

博士論文

グラウンドアンカー維持管理における

アンカー緊張力の利用に関する研究

Studies on the Use of Anchor Tensile Load
in Ground Anchor Maintenance

令和 3 年 3 月

三重大学大学院生物資源学研究科

山崎 充

目 次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	アンカーの維持管理	8
1.3	東海地方の高速道路における現状	13
1.4	研究の目的と検討方法	17
1.5	まとめ	22
1.6	本論において用いる用語の定義	23
第2章	アンカー緊張力低下と地質条件の関係	27
2.1	はじめに	27
2.2	検討方法	29
2.3	初期的なアンカー緊張力低下	36
2.4	長期的なアンカー緊張力低下	49
2.5	アンカー施工条件の影響	71
2.6	地下水の影響	74
2.7	まとめ	77
第3章	アンカー荷重計と変位観測機器の関係	79
3.1	はじめに	79
3.2	各法面の状況と観測機器	81
3.3	荷重計と変位観測機器の関係	101
3.4	アンカー伸び量と変位観測変化量の比較	113
3.5	変位方法と決定係数および変化量比率の関係	120
3.6	まとめ	124

第4章	維持管理におけるアンカー緊張力の利用	125
4.1	はじめに	125
4.2	緊張力低下アンカーへの対応方法について	125
4.3	法面における効率的な緊張力計測配置について	131
4.4	維持管理における緊張力評価の流れ	159
4.5	まとめ	170
第5章	総括	173
5.1	本研究で得られた成果	173
5.2	本研究における今後の課題	179
	謝辞	181
	引用文献	183

第 1 章 序論

1.1 はじめに

グラウンドアンカー（以下、アンカー）は、1957年に日本で初めて導入されて以来¹⁾、道路事業のほか、ダム、河川、砂防などの分野で広く採用されている。このような分野での施工実績は、1990年代に入り急激に増加し、1993年には年間900件近くに上り、1996年～2005年の近年における仮設用途以外のアンカーの施工件数は、約2万4,000件（年間平均約2,400件）、施工延長は約1万5,000km（年間平均約1,500km）であり²⁾、アンカーは様々な分野の社会インフラ整備などにおける地すべりや斜面崩壊等に対する抑止工法として、なくてはならないものとなっている。アンカーが導入された当初は、その防食機能が十分でなく³⁾、鋼材の腐食が進行しやすい構造物であった⁴⁾。アンカーが様々な社会インフラにおける抑止工法として導入されるなか、1980年の中頃から、アンカーに腐食することによる破断が生じ、アンカー頭部の浮き上がりや飛び出しなどの変状が見られるようになってきた³⁾。このため、1988年の旧土質工学会（現在の地盤工学会）の基準改定に伴い、「グラウンドアンカー設計・施工基準（1990）」⁵⁾が制定され、防食機能の向上が図られ、数多くのアンカー工法が開発されるとともに、アンカーの維持管理の必要性が示されるようになった。

アンカーはもともと欧州で開発された工法で、1934年にアフリカのアルジェリアにおいて、ダムの補強のために用いられたのが初めての実績である^{6),7)}。その後アンカーは、先進国である欧米で発展し、1950年～1970年代に施工のための技術基準が制定された⁸⁾。アンカーの維持管理にあっては、イギリス⁹⁾、FIP（*Fédération Internationale de la Précontrainte*）¹⁰⁾、PTI（*Post-Tensioning Institute*）¹¹⁾およびオーストラリア¹²⁾などにおいて、アンカーの点検調査の頻度や本数の目安が示さ

れているものの、維持管理に関する報告事例は少ない。

日本の高速道路において、アンカーは1967年に初めて導入され、主に急峻な山岳地を切土する際の法面安定対策工や、地すべりや崩壊の抑止対策工として採用され、現在までに少なくとも120,000本以上の施工実績がある¹⁾。

アンカーは、**図-1.1**に示すように、引張り材の一端を地盤内で定着させ、引張り材にプレストレスカ（緊張力）を加えて他端を地表で固定し、締め付け効果および引き止め効果を発揮させることで、地すべりや斜面崩壊等に対し抑止効果を発揮させる構造物であり¹³⁾、その大部分が地盤内に存在する。また、アンカーは**図-1.2**に示すように、一つの法面において複数から数百本を施工することで抑止効果を面的に発揮する構造物である。アンカーは、**図-1.3**に示すように、アンカー頭部、引張り部、アンカー体により構成され、2012年に改定された「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説（以下、地盤工学会基準）」¹⁴⁾、2008年に発行された「グラウンドアンカー維持管理マニュアル（以下、維持管理マニュアル）」²⁾にその構造が定義されている。



図-1.1 アンカーの模式断面図

切土法面の安定対策



自然斜面の地すべり対策



トンネル坑口の地すべり対策



図-1.2 アンカーの施工例

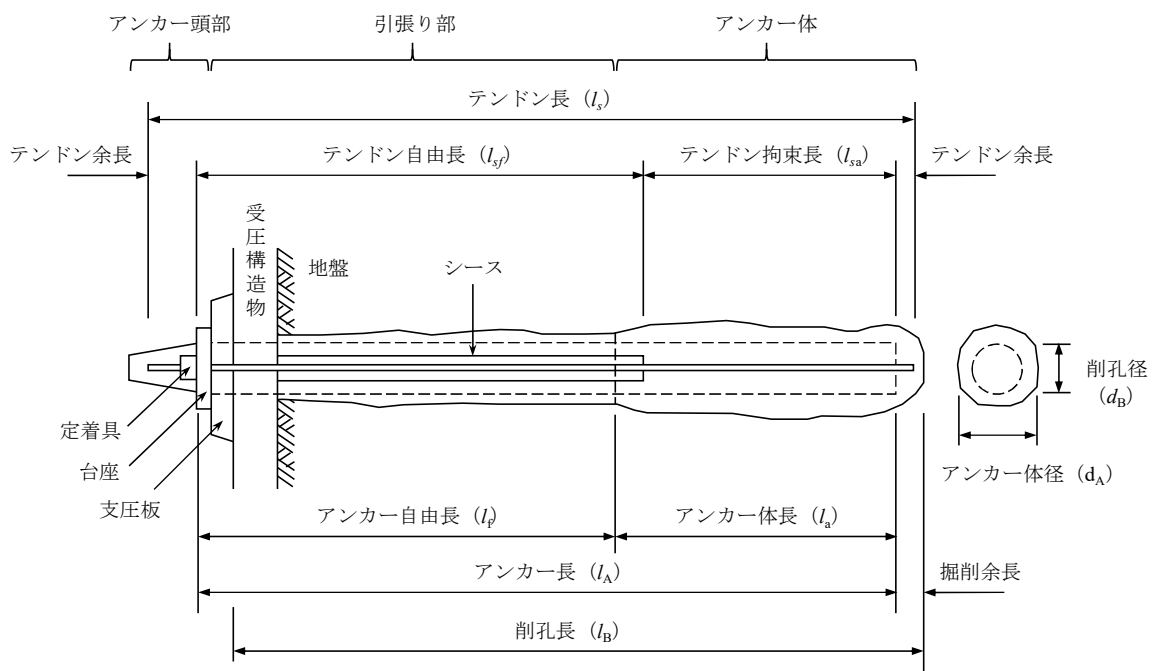


図-1.3 アンカーの構造 ¹⁴⁾

アンカーの引張り材には PC 鋼棒，PC 鋼線，PC 鋼より線，多重 PC 鋼より線，アラミド繊維などの種類があり，緊張力を地盤に伝達する機構には，**図-1.4**に示すように，摩擦方式，支圧方式，摩擦と支圧を組み合わせた摩擦＋支圧方式がある²⁾．摩擦方式のアンカーは，アンカー体とそれを定着させる地盤の間に働く周面摩擦抵抗によって緊張力を地盤に伝えるものであり，支圧方式のアンカーは，アンカー前面に働く地盤の受動土圧の抵抗によって緊張力を地盤に伝えるものであり，摩擦＋支圧方式のアンカーは，アンカー体と地盤の間に働く周面摩擦抵抗とアンカー体前面に働く受動土圧の抵抗の両方によって緊張力を地盤に伝えるものである．現在，市場に流通しているアンカーは，摩擦方式がほとんどであるが，支圧方式のアンカーも数種類開発され，使用されている．摩擦方式には，アンカー体に引張り応力が作用する引張り型アンカー，アンカー体に圧縮応力が作用する圧縮型アンカー，アンカー体に作用する応力を分散させた荷重分散型アンカーがある．また，アンカー頭部の定着具の方式には，**図-1.5**に示すように，ナット方式，くさび方式，くさびナット方式があり²⁾，緊張力の伝達方式などとの組み合わせにより，様々なアンカー工法が開発されてきた．地盤工学会基準¹⁴⁾に示された，通常環境において供用期間2年以上に適用される「防食機能Ⅱ」に相当するアンカー工法は，2019年の現在において16もの工法が存在する¹⁵⁾．

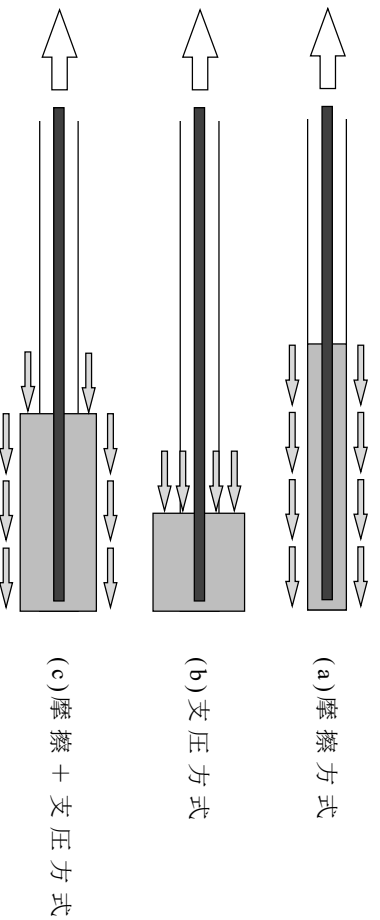


図-1.4 アンカーの緊張力の伝達方式の模式図²⁾



図-1.5 アンカーの主な定着方式²⁾

このように、アンカーには多様な工法が存在するものの、アンカー一体が地盤内に造成され、アンカー頭部の定着具との間の自由長の部分に緊張力を導入し、長期に渡ってその緊張力を保持することで抑止効果を発揮し、法面の安定性を維持するという点においては、どの工法も変わりはない。しかし、アンカーの緊張力は、様々な外的条件において変化し、材料の劣化や腐食により抑止工としての機能が低下することが懸念される。このため、アンカー緊張力および法面の継続的な維持管理を効率的に実施し、適切な時期に必要な対策を講じていくことは、インフラ長寿命化¹⁶⁾ならびに国土強靱化¹⁷⁾の実現に強く求められる事項となる。国土交通省による「道路土工構造物点検要領」¹⁸⁾においては、切土高がおおむね15m以上の長大切土および盛土高がおおむね10m以上の高盛土に加えて、法面保護施設としてのアンカーの点検を5年に1回の頻度で行うことが示されており、今後さらにアンカーの効率的な点検や維持管理の手法が求められると考えられる。

一般にアンカーの緊張力は、図-1.6に示すように、初期緊張力を導入して定着したあと、地盤のクリープや引張り材のリラクゼーションにより時間の経過とともに徐々に低下し、一定の値に収束するとされる¹⁴⁾。しかし、背面地盤が圧縮しやすい性質の場合には、緊張力が低下し続け¹⁹⁾、また、切土による地盤の応力開放や膨張、法面変動、地すべり滑動が生じ、想定以上の外力がアンカーに働いた場合には、緊張力が増加し、その機能が十分に発揮できなくなることが考えられる。

このため、アンカーの建設段階、供用段階においては、その緊張力を計測しながら、アンカーおよびアンカーが施工された法面の維持管理が行われる。

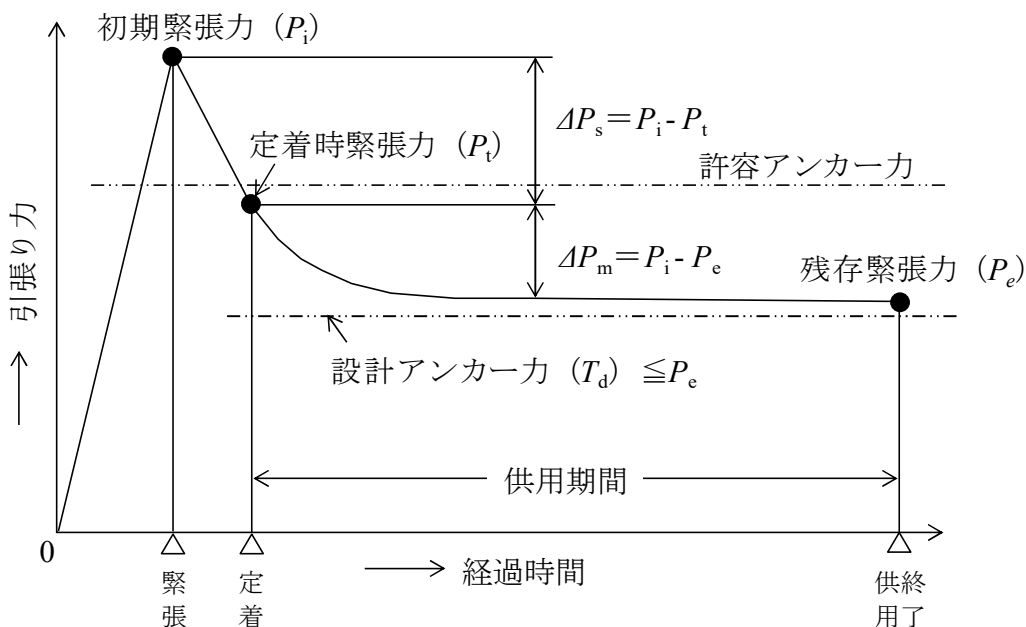


図-1.6 アンカー緊張力の経時変化¹⁴⁾

アンカーが施工される背面地盤は、火成岩、堆積岩および変成岩などの岩種、風化の進行や、亀裂や節理の発達の度合いなど、図-1.7に示すような軟らかい地盤から固い地盤に至るまで様々な地質条件が想定される。アンカーの緊張力低下は、アンカーが施工された背面地盤の地質条件に影響を受け、緊張力の低下量に違いが生じると考えられるものの、地質条件と緊張力低下の関係について現在まで適切な評価が行われてきていない。また、アンカーの緊張力増加については、アンカー体が地すべりや崩壊のすべり面を通過した地盤の深部に定着される構造物にあることから、地山に変動が見られる場合、アンカーは地山の変動に従って、緊張力が増加するセンサーとしての役割を果たすと考えられるものの、現在まで地山の変動とアンカーの緊張力増加の関係について十分な評価は行われてきていない。

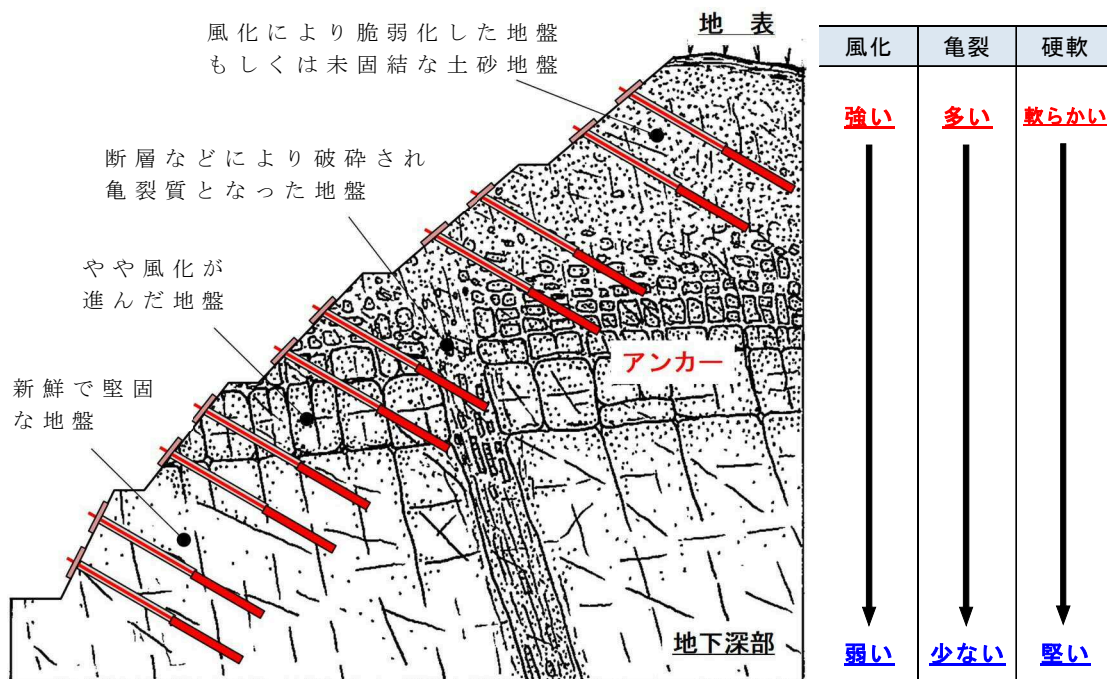


図-1.7 アンカーと地盤との関係

アンカー緊張力の維持管理については、1990年の「グラウンドアンカー設計・施工基準」⁵⁾、さらに2000年に改定された地盤工学会の「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説」²⁰⁾において、アンカーに作用する緊張力を確認するため、施工時に設置された既設の荷重計やリフトオフ試験による緊張力の確認や、再緊張あるいは緊張力緩和の必要性に関して示されたものの、緊張力がどのような状態になった場合に、どのような評価と対応を行うかについての記載はされていなかった。2002年に制定された「グラウンドアンカー工の点検および健全度調査マニュアル（案）（以下、点検調査マニュアル）」²¹⁾では、高速道路におけるアンカー緊張力の評価に関する記載がなされ、さらに2008年の維持管理マニュアル²⁾および2012年の地盤工学会基準¹⁴⁾に残存緊張力とアンカー健全度の目安が記載されるようになった。しかし、これらに示された基準は、アンカーの背面地盤の地質条件や、地山の変動と緊張力変化を考慮した評価方法にはなっていない。

1.2 アンカーの維持管理

アンカーの維持管理の流れ²⁾を図-1.8に示す。アンカーの維持管理は、基本的に供用期間中にアンカーの供用上必要なレベルの性能を維持するため、また、可能な限りアンカーの供用期間をさらに延ばすため、点検、健全性調査、対策などの一連の維持管理を行うものである。アンカーの維持管理は、初期点検、日常点検、定期点検および豪雨や地震といった非常事態が発生した場合の異常時点検における車上からの遠望目視や徒歩での近接目視などにより、主にアンカー頭部の点検を行い、アンカーや法面などに異常が発見された場合において、健全性調査が行われる。健全性調査の項目には、アンカー頭部の保護キャップを外して行う頭部詳細調査、リフトオフ試験による残存緊張力の計測などがあり、アンカーの健全性を評価するための詳細な調査を行い、健全性の低下がアンカーに起因する場合には、対策工が実施される。

高速道路における点検調査マニュアル²¹⁾においては、各種点検の項目が定められ、緊張力調査の必要性和リフトオフ試験などの詳細点検の頻度（最大5年間隔）とリフトオフ試験の数量（アンカー施工全数の5%以上または5本以上）ならびにリフトオフ試験による残存緊張力評価の目安が初めて示された。同マニュアルにおける評価は、残存緊張力が設計アンカー力（ T_d ）に対して120%以上に増加、または定着時緊張力（ P_t ）に対して90%未満に低下し、このようなアンカーで緊張力の緩和や再緊張を行おうとする際に、引張り材余長に作業しろが見込めない、または再緊張作業中にテンドンの降伏引張り力（ T_{ys} ）を超えることが想定される場合には、現状で全く機能しない、もしくは著しい機能低下が認められ、対策・補修を行ってもその機能の復元が望めない「評価区分I」とする、厳しいものであった。

その後、アンカーの点検結果における知見が反映され、2017年の「土工施工管理要領」¹¹⁾において、アンカー施工時には、全数の5%もしくは

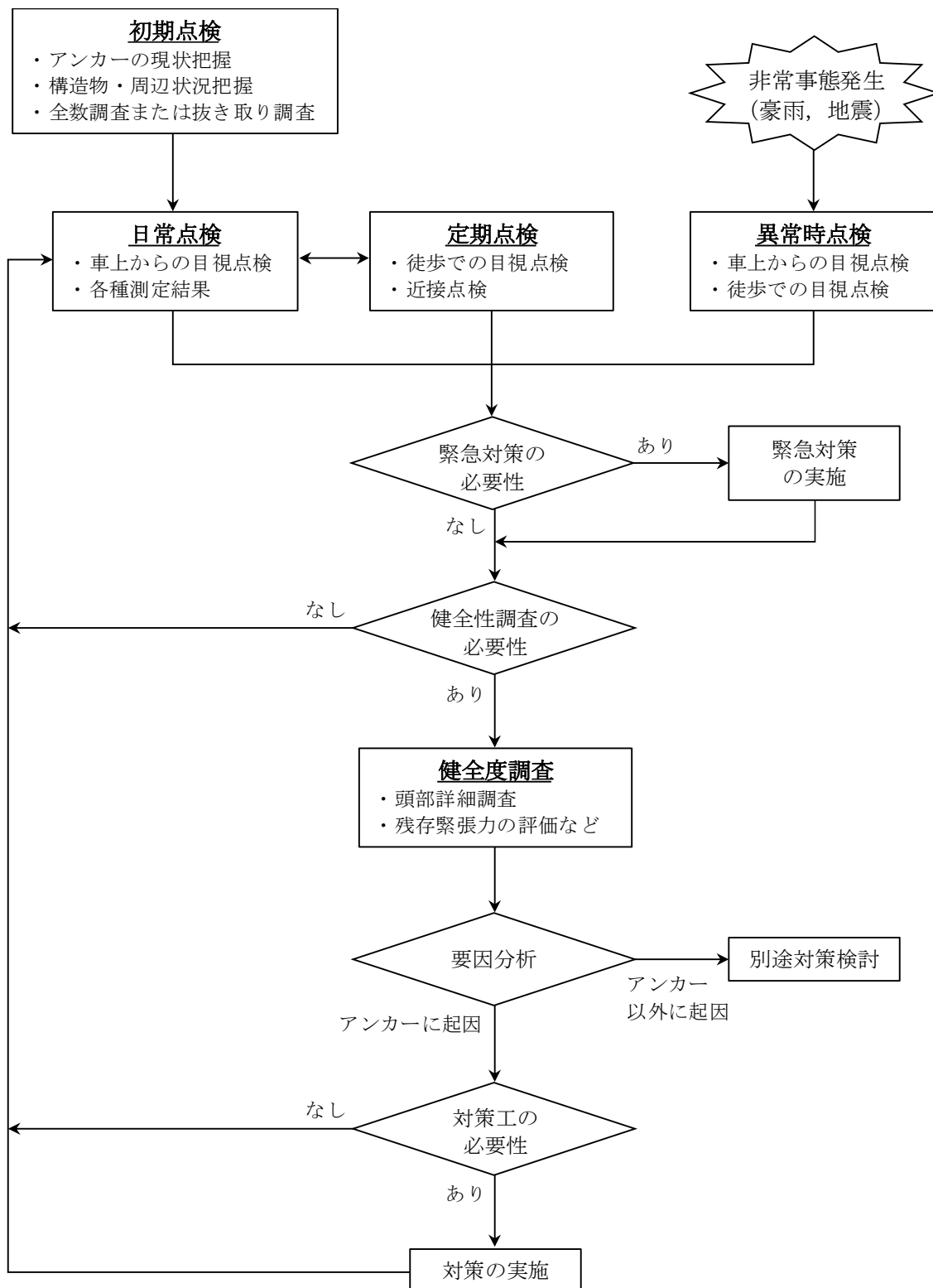


図-1.8 アンカーの維持管理の流れ²⁾

は 5 本以上（全数が 20 本未満で、これによりがたい場合は 2 本とする）に緊張力計測用の計測機器（以下、荷重計）を設置し、緊張力の管理を行うことを定めているほか、供用段階のアンカー緊張力の評価については、2017 年に改訂された「調査要領 第一編 地盤・土工構造物・舗装（以下、調査要領）」²²⁾において、点検調査マニュアル²¹⁾に比べて、より実態に即した基準値が採用されている。

現在の高速道路におけるアンカーの緊張力管理の流れ²³⁾は、図-1.9 に示すように、建設段階においてアンカーの一部に対して荷重計を設置し、緊張力変化のモニタリングを行い、供用段階では、必要に応じて荷重計の計測を継続し評価を行っている。また、荷重計の機能が失われた場合には、定期的な詳細調査としてリフトオフ試験を実施し、アンカーの残存緊張力を確認することで、アンカー機能の健全性の評価を行っている。一般に、アンカーに設置された荷重計は、過酷な自然環境下にさらされるため、その耐用年数は 5 年～10 年程度²⁴⁾とさ

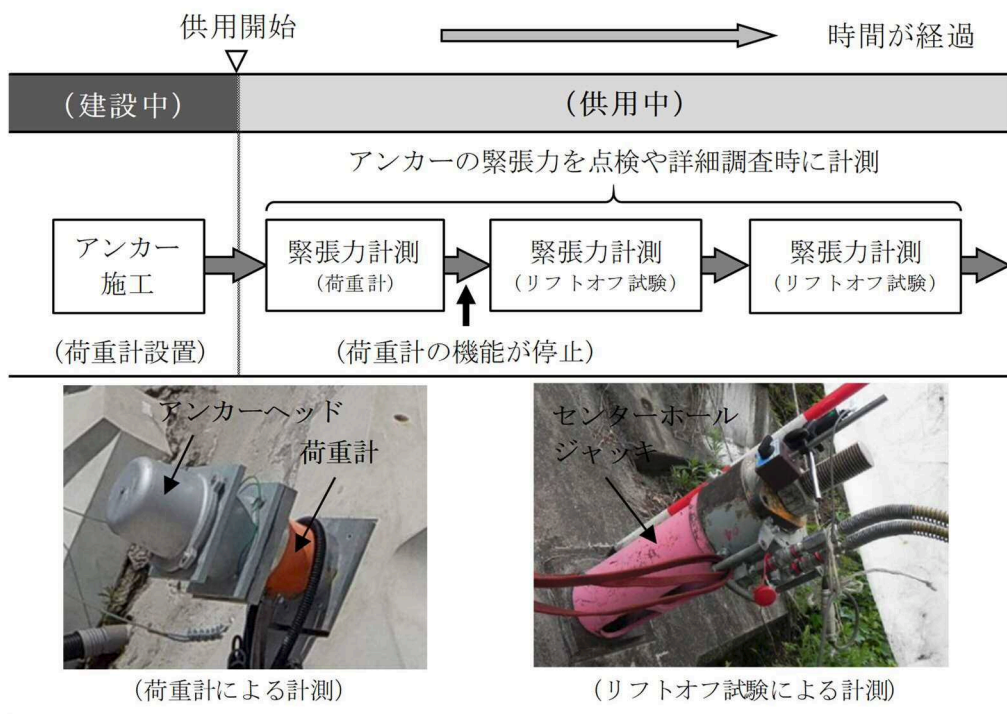


図-1.9 高速道路におけるアンカーの緊張力管理の流れ²³⁾

ている。従来、既設アンカーに対する荷重計の付け替え、あるいは新設においては、作用している緊張力を除荷し、定着具を取り外して荷重計を設置たうえで再緊張を行う大掛かりな作業が必要であった。しかし近年、アンカーの維持管理の重要性から、緊張力の除荷、定着具の取り外し、再緊張を必要としない荷重計の脱着技術が開発され²⁴⁾、²⁵⁾、荷重計による緊張力のモニタリングが比較的容易で安価に行うことができ、アンカーの維持管理に積極的に取り入れられるようになってきている。

表-1.1 に維持管理マニュアル²⁾に示された、健全性調査における残存緊張力とアンカー健全度の目安を示す。アンカーの残存緊張力の管理においては、アンカーを建設した際の定着時緊張力 (P_t) から、緊張力がどの程度低下したか、また、増加した場合には、設計アンカー力 (T_d)、許容アンカー力 (T_a) ならびにテンドンの降伏引張り力 (T_{ys}) に対してどのような状態にあるかを評価し、その状態に応じた対処方法を実施することになっている。残存緊張力とアンカー健全度の目安に示された、アンカー緊張力が低下した場合の状態を見ると、残存率が P_t に対して 50% もしくは 10% 以下になると、アンカーの状態は「機能が大きく低下している」もしくは「機能していない」と評価され、対策の実施が求められることになる。一方、緊張力増加においては、増加するにしたがって危険な状態となり、 T_a もしくは T_a の 110% を超えた場合には、「許容値を超えている」もしくは「危険な状態になる恐れあり」と評価され、対策の実施が求められることとなる。さらに、 T_{ys} の 90% を超えた場合には、アンカーが「破断の恐れあり」と評価され、緊急対策の実施が求められることになる。これらの評価では、アンカーの緊張力が低下し、 P_t に対して 50% 以下になった場合には、アンカーの機能損失が疑われ、緊張力が大きく増加した場合には、法面が不安定化している可能性が考えられることとなる。しかし、これまでアンカー緊張力変化の原因が明確にされておらず、経験的な（定性

的な) 評価を基に緊張力が低下もしくは増加している場合は一律に、アンカーや法面に問題があると判定されることになっており、また緊張力が変化した場合の対処方法についてもその具体例は示されていない。このためアンカーの施工が、様々な地質条件において行われているなかにおいて、アンカー緊張力の変化と地質条件あるいは法面変動との関係について明確に評価し、それらの関係を利用した維持管理の手法が強く求められており、アンカーおよび法面の適切かつ効率的な維持管理にとって、これらの手法を確立することは極めて重要と考えられる。

表-1.1 残存緊張力とアンカー健全度の目安²⁾

残存緊張力の範囲	健全度	状態	対処例
$0.9 T_{ys}$	E	破断の恐れあり	緊急対応を実施
	D	危険な状態になる恐れあり	対策を実施
$1.1 T_a$	C	許容値を超えている	
T_a	B	—	経過観察により対策の必要性を検討
T_d	A	健全	—
P_t	A	健全	—
$0.8 P_t$	B	—	経過観察により対策の必要性を検討
$0.5 P_t$	C	機能が大きく低下している	対策を実施
$0.1 P_t$	D	機能していない	

T_{ys} : テンドンの降伏引張り力, T_a : 許容アンカー力,

T_d : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力

1.3 東海地方の高速道路における現状

中日本高速道路(株)名古屋支社（以下、NEXCO名古屋支社）が管理する路線とアンカーの一覧を表-1.2に示す。NEXCO名古屋支社が管理する10路線においては、116箇所の法面に約13,500本のアンカーが存在する。これらのアンカーは、切土法面や自然斜面における地すべりや崩壊の対策を目的として施工されたものであり、最も古いアンカーは1967年に施工されたものである。NEXCO名古屋支社では、これらのアンカーに対して、点検調査マニュアル²¹⁾、維持管理マニュアル²⁾および調査要領²²⁾などに準じてアンカーの点検を行っている。健全性調査については、アンカーおよびアンカーが施工された法面の異常の有無にかかわらず、5年に1回の頻度で、施工全数の5%または5本以上を対象に、頭部詳細調査やリフトオフ試験による緊張力測定を実施し、アンカーの健全性の評価を行っている。

NEXCO名古屋支社において実施した、2,109本のアンカーのリフトオフ試験試験結果を、表-1.1の残存緊張力とアンカー健全度の目安によって区分したものを図-1.10に示す。図に示した定着時緊張力(P_t)よりも低い $A^- \sim D^-$ の区分は、施工時に比べてアンカーの緊張力が低下し、高い $A^+ \sim E^+$ の区分は、緊張力が増加したことを示している。2,109本のアンカーの施工からの経過時間は異なるが、緊張力が低下したアンカーが88.1%、増加したアンカーが11.9%と、緊張力の低下が見られるアンカーが大部分を占めている。また、 A^- および A^+ の健全、 B^- および B^+ の経過観察と評価されるアンカーは84.2%であり、多くはおおむね健全な状態にあるといえることができる。これらのうち、緊張力が P_t に対して50%以下に低下したアンカーが存在する法面は、いずれも地表面の変状や動態観測による変位は見られず、安定していると評価される法面である。また、緊張力低下アンカーの一部には、引張り材の引き込まれなどが生じ、機能損失が疑われるものがあるものの、多くは外観の目視点検においても健全と評価される機能損失が

見られないアンカーである。

表-1.2 NEXCO 名古屋支社の路線とアンカーの一覧

路線名	法面数 (箇所)	アンカー数 (本)
東名高速道路	1	54
名神高速道路	1	28
中央自動車道	1	136
東名阪自動車道	3	212
紀勢自動車道	5	272
伊勢自動車道	7	501
東海北陸自動車道	69	8,832
東海環状自動車道	12	695
新東名高速道路	14	2,584
新名神高速道路	3	213
合計	116	13,527

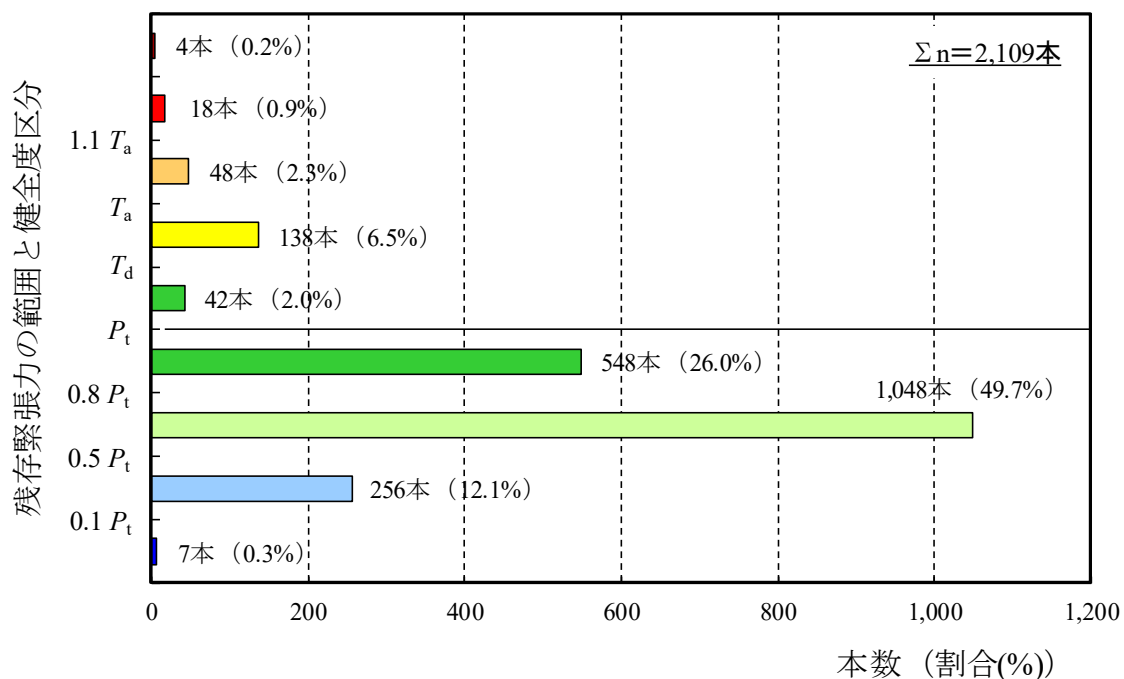


図-1.10 NEXCO 名古屋支社の残存緊張力の評価結果の割合

アンカーアセットマネジメント研究会の「SAAMを用いた既設アンカーのり面の面的評価マニュアル（案）」²⁶⁾では、2,092本のアンカーのリフトオフ試験結果について、維持管理マニュアル²⁾に基づいた健全度の評価が行われている。表-1.3にNEXCO名古屋支社の2,109本と、アンカーアセットマネジメント研究会（SAAM研究会）の2,092本の評価結果を示す。両者のリフトオフ試験結果は、良く似た結果を示し、緊張力低下が見られるアンカーは全体の約80～90%を占め、緊張力増加が見られるアンカーは10～20%と少なくなっている。また、対策の実施を必要としない、おおむね健全と評価されるアンカーは、両者とも約80%である。緊張力低下もしくは増加が見られ、対策を行う必要があると評価されるアンカーは、それぞれ10%程度見られる。このようなリフトオフ試験結果などから、同マニュアル²⁶⁾において、アンカーの緊張力は変状が見られない安定した法面にあっても、アンカー施工時の定着時緊張力（ P_i ）は一定に保持されず、低下する傾向が見られ、特にその低下の程度は、背面地盤の風化の程度が進行するほど大きくなる傾向を示すことを述べている。このため、背面地盤とアンカーの緊張力変化との関係性を評価するうえで、背面の地質条件を考慮する必要がある。

表-1.4にNEXCO名古屋支社管内の路線に分布する岩種および岩石を示す。NEXCO名古屋支社管内の路線には、火成岩、堆積岩および変成岩の様々な岩種が分布している。また、これらに風化の程度、亀裂や節理の発達度合いが加わることで、アンカーの背面地盤の地質条件は、不均質で多様なものになることが想定される。アンカーは施工された背面地盤の地質条件の影響、背面地盤の変動に関わる外的要因によって、残存緊張力の変化に差が生じると考えられることから、緊張力変化と地質条件との関係、法面変動との関係について評価し、それらを利用して維持管理を行っていくことが重要である。

表-1.3 NEXCO名古屋支社とSAAM研究会評価結果

残存緊張力の範囲	健全度	状態	対処例	NEXCO名古屋支社			SAAM研究会 ²⁶⁾			
				評価数に対する割合 (%)			評価数に対する割合 (%)			
緊張力増加 ↑ 緊張力低下 ↓	$0.9 T_{ys}$	E+	破断の恐れ有り	緊急対策を実施	0.2	3.4	11.9	1.3	10.2	19.6
	$1.1 T_a$	D+	危険な状態になる恐れ有り	対策を実施	0.9			3.4		
	T_a	C+	許容値を超えている		2.3			5.5		
	T_d	B+	—	経過観察により対策の必要性を検討	6.5	84.2	88.1	9.4	78.0	80.4
	P_t	A+	健全	—	2.0			38.9		
	$0.8 P_t$	A-	健全	—	26.0	12.4	88.1	29.7	11.8	
	$0.5 P_t$	B-	—	経過観察により対策の必要性を検討	49.7			9.2		
	$0.1 P_t$	C-	機能が大きく低下している	対策を実施	12.1			2.6		
		D-	機能していない		0.3					
	合計 (%)		—	—	—	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
評価数 (本)		—	—	—	2,109			2,092		

T_{ys} : テンドンの降伏引張り力, T_a : 許容アンカー力,
 T_d : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力

表-1.4 NEXCO名古屋支社の路線に分布する岩種・岩石

岩種	岩石名称		出現する路線
火成岩	深成岩	花崗岩, 花崗閃緑岩, 石英閃緑岩, 等	伊勢自動車道, 新東名高速道路
	半深成岩	花崗斑岩, 石英斑岩, 等	東海北陸自動車道, 中央道自動車道
	火山岩	玄武岩, 安山岩, 石英安山岩, 流紋岩, 等	東海北陸自動車道, 中央道自動車道
堆積岩	礫岩, 砂岩, 泥岩, 頁岩, 粘板岩, 等		東海北陸自動車道, 紀勢自動車道, 東名阪自動車道, 新名神高速道路
	石灰岩, チャート, 石炭, 等		—
	凝灰岩, 火砕岩 (火山角礫岩, 火山礫凝灰岩), 等		東海北陸自動車道
変成岩	広域変成岩	千枚岩, 片岩, 片麻岩, 等	伊勢自動車道, 紀勢自動車道, 新東名高速道路
	接触変成岩	ホルンフェルス, 結晶質石灰岩, 珪岩, 等	—
	その他	圧砕岩, 等	—

1.4 研究の目的と検討方法

本論は，高速道路などにおける複数の法面において実施された荷重計やリフトオフ試験による緊張力の計測結果と，建設段階および供用段階で実施された調査ボーリングや法面観察による地質調査結果，ならびに各種動態観測結果を分析し，アンカーの緊張力低下と岩種や風化程度などの地質条件との関係およびアンカー背面の地盤変位がアンカー緊張力に直接反映され，アンカーが法面の変位を捉えるセンサーとして利用できることについて検討を行うことを目的としている．また，それらの検討結果に基づき，アンカーの維持管理において調査された緊張力の維持管理への利用について提案を行っている．本論の検討内容は，以下に示す3項目に分けることができる．

- (1)安定した法面であっても，アンカーの緊張力は時間の経過とともに徐々に低下し，一定の値に収束する傾向があるとされる．その低下量は，アンカーが施工された初期段階で大きく，アンカーが施工された背面地盤の地質条件に影響を受けて異なるとされるものの，緊張力低下と地質条件の関係について現在まで適切な評価は行われてきていない．そこで本論では，複数の安定した法面の緊張力の計測結果と，アンカー自由長部に分布する地盤の岩種および岩級区分について比較検討し，施工から30日後の初期的な緊張力低下，数ヶ月から最大で40年後の長期的な緊張力低下の要因について明らかにする．
- (2)アンカーが施工された法面の地盤が変動した場合，アンカー緊張力は増加する．これは，背面地盤の変位がアンカー緊張力に直接反映され，アンカーが地盤の変位を捉えるセンサーとしての役割を果たすと考えられている．しかし，地盤の変動に伴うアンカーの緊張力変化について，適切な評価は現在まで行われてきていない．そこで本論では，建設段階もしくは供用段階において地盤の変動が生じた複数の法面において，施工時もしくは維持管理段階に設置された荷

重計による緊張力の計測結果と，光波測量，地中伸縮計，挿入型孔内傾斜計，設置型孔内傾斜計およびパイプ歪計の動態観測機器による変位観測結果を比較し，アンカーの緊張力が背面地盤の変位を捉えるセンサーとして機能することを明らかにする．

- (3)アンカーの維持管理においては，これまでアンカー緊張力変化の原因が不明確なため，経験的な評価を基に，緊張力が低下もしくは増加している場合は一律に，アンカーや法面に問題があると判定されていた．これに対し本論で明らかになったアンカーの緊張力低下と地質条件の関係，およびアンカー緊張力が変位を捉えるセンサーとしての役割を果たすことに基づき，緊張力が低下しやすい地質条件における建設段階の適切な上げ越し量や，供用段階の緊張力低下アンカーに対する再緊張の有効性の検討，およびアンカーの緊張力変化を基にした新たな法面の維持管理手法についての提案を行う．

これら本研究のフローを **図-1.11** および **図-1.12** に示す．本論では，第2章でアンカーの緊張力低下と地質条件の関係についての検討結果を示し，第3章においてアンカーの緊張力が背面地盤の変位を捉えるセンサーとして機能することに関する検討結果を示す．これらの検討結果に基づき，第4章において緊張力変化を基にした新たな法面の維持管理手法についての提案を行い，最後に第5章で本研究の総括を行う．以下に，本論における各章の内容を述べる．

第 1 章 序論

【現状の課題】

- ① アンカー緊張力は時間の経過とともに低下傾向があり，低下量は地質条件の影響を受けるとされるものの，緊張力低下と地質条件との関係についての十分は評価が行われていない．
- ② アンカーの背面地盤が不安定化して地盤の変動が生じた場合，アンカーは，従来の変位観測機器と同様に，センサーとしての役割を果たすと考えられるものの，両者の関係について十分な評価が行われていない．
- ③ 残存緊張力はアンカーの健全性評価の重要な指標でありながら，これまで変化の原因が不明確であったため，低下，増加の量に関係なく一律に判定されており，緊張力の変化と地質条件，あるいは地盤変動との関係を利用した維持管理を行う手法は確立されていない．

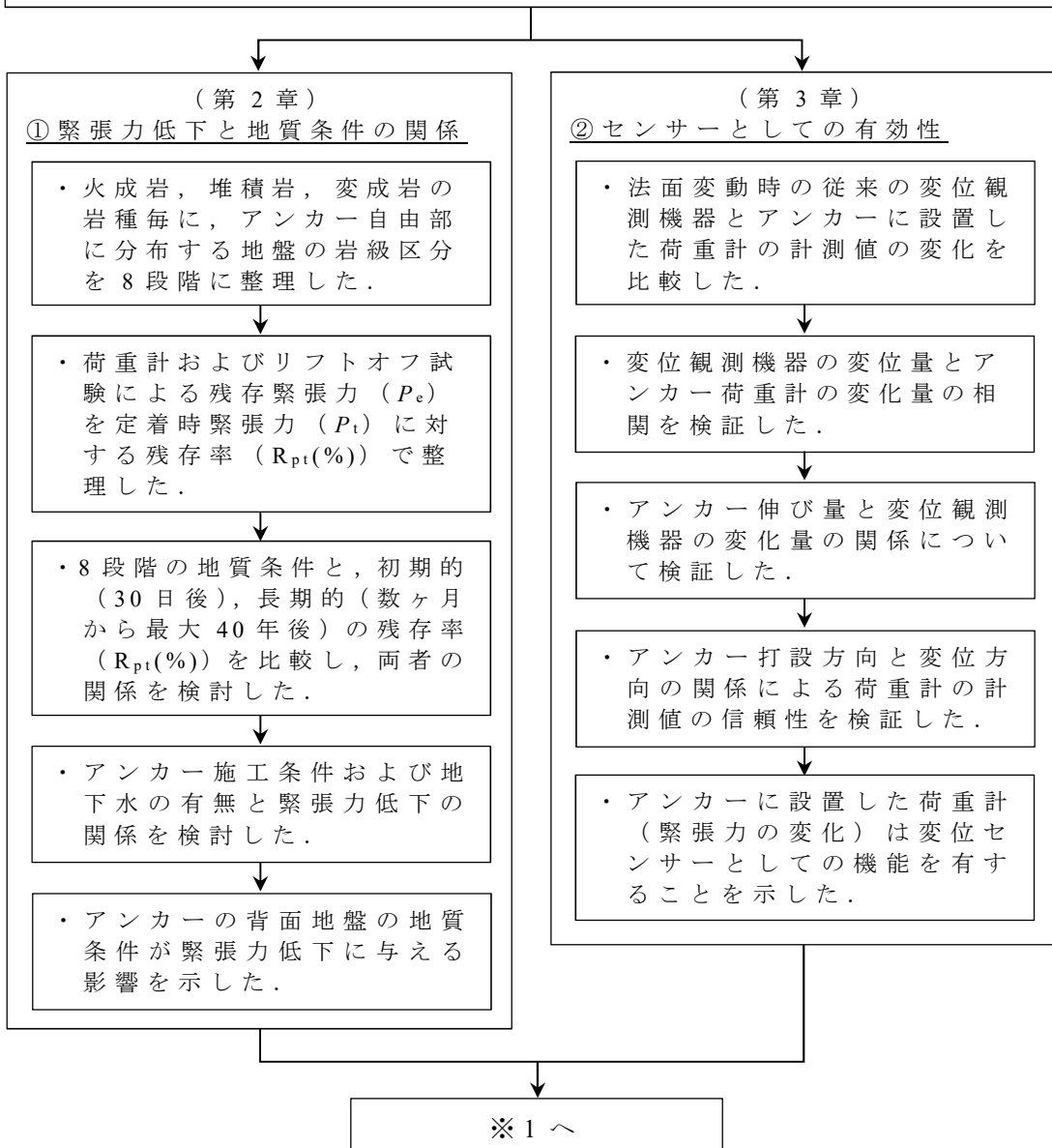


図 -1.11 本研究のフロー (第 1 章～第 3 章)

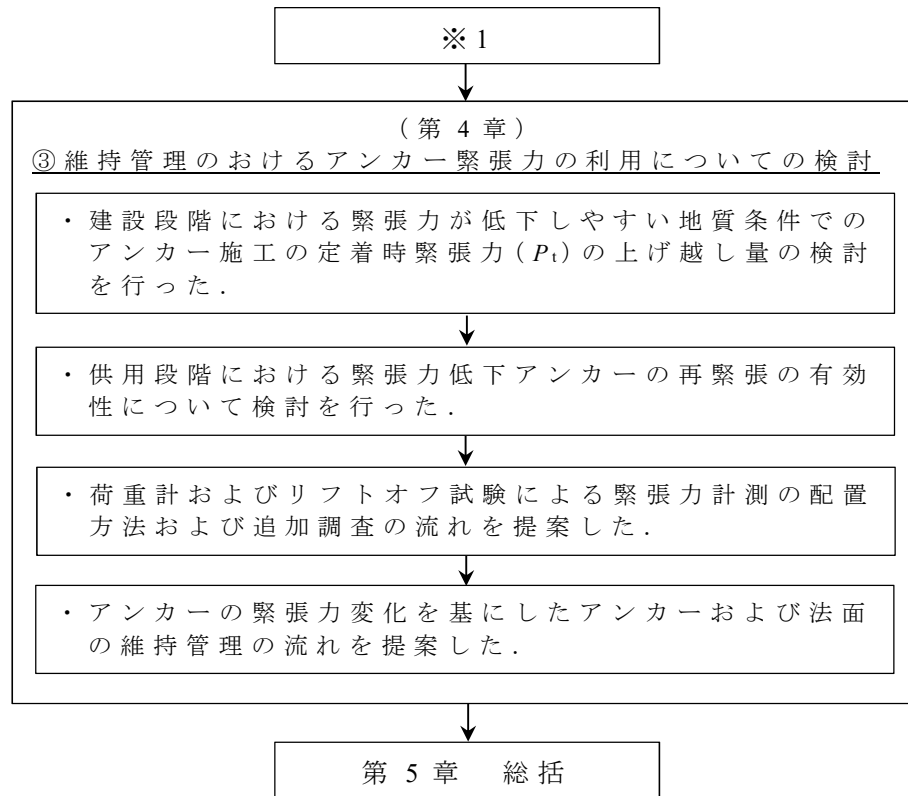


図-1.12 本研究のフロー（第4章～第5章）

1.4.1 第2章におけるアンカー緊張力低下と地質条件の関係

アンカーの緊張力低下は、アンカーの大部分が地盤に造成される構造物であるため、背面地盤の地質条件の影響を受け、短期的にも長期的にも影響を受けると考えられる。しかしながら、地質条件と緊張力の低下の関係について、これまで十分な評価が行われていない。アンカーの維持管理においては、残存緊張力が健全性を評価する一つの指標とされているなかにおいて、両者の関係を把握することは適切かつ効率的なアンカーの維持管理にとって重要である。そこで、第2章では NEXCO 名古屋支社管内の変位や変状が見られない安定した法面を対象に、建設段階および供用段階に行われた、アンカー設計のためのボーリング調査データ、断面図および切土掘削時の法面スケッチの記録を基に、火成岩、堆積岩および変成岩の岩種毎に、アンカー自由長部の主体となる岩級区分²⁷⁾を、 C_H , $C_H \sim C_M$, C_M , $C_M \sim C_L$, C_L , $C_L \sim$

D, D 級および、崩積土，表土のような未固結地盤を含む「土砂」の全 8 段階の地質条件に分け，荷重計およびリフトオフ試験により計測された，施工から 30 日後ならびに数ヶ月から最大で 40 年後の緊張力 (P_e) を対象に，定着時緊張力 (P_t) に対する残存率 ($R_{pt} = P_e/P_t(\%)$) により比較，分析することで，緊張力がどのような地質条件において，どの程度低下するかの検討を行った．また，地質条件以外にも，アンカー自由長，アンカータイプ（引張り型，圧縮型，荷重分散型），受圧構造物（独立受圧板，法枠工）の施工条件および地下水の影響についての検討を行った．

1.4.2 第 3 章におけるアンカー荷重計と変位観測機器の関係

アンカーの背面地盤が不安定化し地盤の変動を生じた場合，アンカーに設置した荷重計（緊張力の計測値）は，従来から用いられる各種変位観測機器と同様に，地盤の変動をダイレクトに捉えるセンサーの役割を果たすと考えられる．第 3 章では，荷重計によるアンカー緊張力の計測と従来の変位観測機器による動態観測が同時に行われ，地盤の変動が確認された複数の法面を対象に，各種変位観測機器（光波測量，地中伸縮計，挿入型孔内傾斜計，設置型孔内傾斜計，パイプ歪計）と荷重計による緊張力の計測結果を比較し，アンカーに設置した荷重計がセンサーとしての機能を有することについて検討を行った．

また，アンカーに設置した荷重計による緊張力の変化から求められるアンカーの伸び量と各種変位観測機器による変動量を比較し，両者の関係についての検証も行った．

1.4.3 第 4 章における維持管理におけるアンカー緊張力の利用

第 4 章では，第 2 章および第 3 章の検討結果に基づき，アンカーの維持管理において，これまでアンカー緊張力変化の原因が不明確なため，定性的な評価により緊張力が低下もしくは上昇している場合は一律に，アンカーや法面に問題があると判定されていたことに対し，法面が健全な場合であっても，アンカーの緊張力は，背面地盤の風化程

度の影響を受けて大きく低下することを明らかにするとともに、緊張力が低下しやすい地質条件における建設段階の適切な上げ越し量や、維持管理段階の緊張力低下アンカーに対する再緊張の有効性の検討を行った。また、地盤の変位が見られる法面に施工されたアンカーの緊張力は、従来から使用されてきた各種変位観測機器と同様に、地盤の変位を捉えるセンサーとしての機能を有することを明確にし、アンカーの緊張力変化を基にした新たな法面の維持管理手法について提案を行った。

1.5 まとめ

アンカーは、1957年に日本で導入されて以来¹⁾、道路事業のほか、ダム、河川、砂防などの分野で広く採用され、高速道路においては、主に急峻な山岳地を切土する際の法面安定対策工や、地すべりや崩壊に対する抑止対策工として採用され、現在までに少なくとも120,000本以上の施工実績があり¹⁾、様々な分野の社会インフラ整備などにおいて、なくてはならないものとなっている。アンカーは、緊張力を地盤に作用させ、その緊張力を保持することで法面などの安定を図る構造物であることから、引張り材の劣化や腐食などを考慮して、緊張力を適切に評価し、効率的な維持管理を行うことが大きな課題となっている。

現在、アンカーの維持管理においては、緊張力の残存率がアンカーの健全性を評価する一つの目安となっているものの、これまでアンカー緊張力変化の原因が明らかになっていないため、維持管理マニュアル²⁾などの残存緊張力の健全度の目安においては、経験に基づく定性的な評価により緊張力が低下もしくは上昇している場合、一律に法面に問題があると判定されている。アンカーは大部分が地盤内の造成される構造物にあって、緊張力は背面地盤の地質条件の影響を受けて変

化し、背面地盤の変動をダイレクトに捉えるセンサーとしての役割を果たすと考えられるものの、現状において、緊張力変化と地質条件および地盤変動との関係を利用しながら維持管理を行う手法は確立されていない。

こうした課題に対し、緊張力低下と地質条件の関係、地盤変動時のアンカー緊張力のセンサーとしての有効性を評価できれば、より効率的で適切なアンカーの維持管理が可能となると考える。そこで本論では、まずアンカーの緊張力低下と地質や風化程度との関係について、荷重計およびリフトオフ試験によって得られた残存緊張力とアンカー自由長部に分布する地盤の岩種および岩級区分との関係を検討し、緊張力低下に地質条件がどのように影響するかを検証する。次に、アンカーの緊張力が背面地盤の変位を捉えるセンサーとしての機能を有することについて、アンカーに設置した荷重計による緊張力の変化と従来から用いられる各種変位観測機器との関係について評価する。最後に、これらの検討結果に基づき、緊張力が低下しやすい地質条件における建設段階の適切な上げ越し量や、維持管理段階の緊張力低下アンカーに対する再緊張の有効性の検討、アンカーの緊張力変化を基にした新たな法面の維持管理手法についての提案を行う。

これらにより、高速道路法面だけでも120,000本以上、国内にはさらに膨大な数が存在するアンカーの適切な維持管理を可能とし、その成果はインフラの長寿命化ならびに国土の強靱化に繋がるものとなると考える。

1.6 本論において用いる用語の定義

本論において用いる用語は、地盤工学会基準¹⁴⁾、維持管理マニュアル²⁾、グラウンドアンカー設計・施工要領¹³⁾などを参考に、次のように定義した。

(1)アンカー一体

グラウトの注入により造成され、引張り部からの緊張力を地盤との摩擦抵抗もしくは支圧抵抗によって地盤に伝達するための抵抗部分をいう。

(2)引張り部

アンカー頭部からの緊張力をアンカー一体に伝達するための部分をいう。

(3)アンカー頭部

引張り部からの緊張力を、支圧板を通じて受圧構造物に伝達させるための部分をいう。

(4)テンドン

緊張力を伝達する部分をいう。

(5)アンカー長 (l_A)

アンカー全体の長さをいい、アンカー一体長とアンカー自由長から構成される。

(6)アンカー一体長 (l_a)

地盤に対して緊張力の伝達が行われているアンカー一体の長さをいう。

(7)アンカー自由長 (l_f)

アンカー頭部のテンドン定着位置からアンカー一体までの長さをいう。

(8)テンドン自由長 (l_{sf})

アンカー頭部に作用する緊張力をアンカー一体まで伝達させる部分のテンドンの長さをいう。

(9)テンドンの極限引張り力 (T_{us})

テンドンに用いる鋼材の JIS に定める引張り力をいう。

(10)テンドンの極限拘束力 (T_{ub})

テンドンあるいはテンドンに取り付けた拘束具とアンカー一体のグラウトとの間に生じている付着、摩擦もしくは支圧に終局限界状態の破壊が生じる力をいう。

(11) アンカーの極限引抜き力 (T_{ug})

地盤とアンカー体の間に生じている付着，摩擦もしくは支圧に終局限界状態の破壊が生じる力をいう．

(12) テンドンの降伏引張り力 (T_{ys})

テンドンに用いる鋼材の JIS に定められる降伏点から求められる引張り力，または降伏点規格値を定めたときの引張り力に相当するものをいう．

(13) 許容アンカー力 (T_a)

テンドンの許容引張り力 (T_{as})，テンドンの許容拘束力 (T_{ab}) およびアンカーの許容引抜き力 (T_{ag}) のうち最も小さい値をいう．

(14) テンドンの許容引張り力 (T_{as})

テンドンの極限引張り力 (T_{us}) またはテンドンの降伏引張り力 (T_{ys}) を，それぞれの安全率で除したもののうち小さい値をいう．

(15) テンドンの許容拘束力 (T_{ab})

テンドンの極限拘束力 (T_{ub}) を安全率で除したものをいう．

(16) アンカーの許容引抜き力 (T_{ag})

アンカーの極限引抜き力 (T_{ug}) を安全率で除したものをいう．

(17) 設計アンカー力 (T_d)

許容アンカー力 (T_a) を超えない，設計に用いるアンカー1本あたりの緊張力をいう．

(18) 緊張力および残存緊張力 (P_e)

引張り材に作用している引張り力をいう．

(19) 初期緊張力 (P_i)

アンカー頭部の緊張，定着作業を行うときに与えるテンドンの緊張力の最大値をいう．

(20) 定着時緊張力 (P_t)

アンカー頭部の緊張・定着作業が終了したときにテンドンに作用している緊張力をいう．

(21)残存率 (R_{pt} , R_{td})

アンカーに残存している緊張力の割合をいい、定着時緊張力 (P_t) に対する残存率を R_{pt} 、設計アンカー力 (T_d) に対する残存率を R_{td} と表記する。

(22)リラクセーション

引張り材のひずみを一定に保持したとき、応力または緊張力が時間とともに減少する現象をいう。

(23)クリープ

静的かつ一定の緊張力がテンドンに作用した場合、時間とともにアンカー体のグラウトとテンドンまたは地盤との接触面に生じる変位のことをいう。

(24)荷重計

アンカー頭部に設置し、緊張力を計測する機器をいう。

(25)リフトオフ試験

アンカー頭部のテンドン余長などを油圧ジャッキで直接引張り上げる方法により、調査時点においてアンカーに残存する緊張力を計測する試験をいう。

(26)モニタリング

アンカー頭部に設置した荷重計などにより、アンカーに作用する緊張力を計測し、計測値の経過変化を継続的に確認することをいう。

(27)アンカー法面

アンカーが施工された法面をいう。

第 2 章 アンカー緊張力低下と地質条件の関係

2.1 はじめに

アンカーが施工される斜面や法面の地質条件は、火成岩、堆積岩および変成岩などの岩種、風化の程度、亀裂、節理および片理の発達の度合いなど様々である。アンカーの設計では、施工する地盤の地質調査としてボーリング調査を行い、地質状態の確認や動態観測により抑止すべきすべり面の深さを評価するとともに、目標安全率を設定して算出された必要抑止力から、アンカーの規格や本数が決定される。しかし、アンカーが施工された法面の地質条件は、初期的にも長期的にも、アンカーの緊張力の変化に影響を及ぼすと考えらるが、現在これらを考慮した設計や維持管理は行われていない。

アンカーの初期的な緊張力の低下の原因としては、地盤のクリープや引張り材のリラクセーションが挙げられ、一般的に大きな変化は 1 ヶ月以内であり、その後の変化は小さいとされている²⁸⁾。引張り材のリラクセーションに関して見てみると、引張り材として用いられる PC 鋼線と PC 鋼より線、PC 鋼棒のリラクセーション率 (γ) は、それぞれ 5%、3%程度で¹⁴⁾、これらのリラクセーションによる緊張力の低下量 (ΔP_{mr} (kN)) を、 $\Delta P_{mr} = \gamma \times P_t$ で算出すると²⁹⁾、緊張力の低下量に与える影響は数%程度と考えられる。

一方、アンカーの長期的な緊張力低下の原因としては、地盤のクリープの継続に加えて、背面地盤の風化、材料の劣化や腐食によるアンカー体の引き抜け、引張り材の引き込まれや破断、受圧構造物の破損とその支持地盤の抜け落ちなど、アンカーそのものや受圧構造物の機能損失が挙げられている。

背面地盤の影響によるアンカー施工直後の初期的な緊張力低下について、常川ら³⁰⁾は、御荷銚帯の緑色岩類が分布する切土法面に施工し

た 45 本のアンカーのうち 11 本において、施工後 2 週間～2 ヶ月間の緊張力を計測した。その結果、D_L級の軟岩では定着時緊張力に対する残存率は 92%、D_Hおよび D_L級では 95%以上となり、岩盤が硬質な場合には、緊張力低下が小さくなる傾向があるとしている。田久ら³¹⁾は、大規模な地すべりの対策工として施工した 1,130 本のアンカーのうち、57 本のアンカーを対象に荷重計を設置し、緊張力低下の傾向を確認した。その結果、施工後 30 日において、表層に緩んだ地盤や強風化状態の地盤が広がる法面端部と、切土深さの浅い法面上部で緊張力低下が大きく、これらは定着時緊張力に対して 90%以下となり、緊張力低下は背面地盤の地質条件が影響していることを指摘した。

また、アンカーの長期的な緊張力低下について、新関ら³²⁾は、軟岩および砂礫地盤に施工したアンカーの緊張力が、施工から 11 ヶ月後に 70%～80%まで低下したと報告している。さらに、朝日ら³³⁾は、施工から 5 年～10 年が経過したアンカーの健全性を調査したところ、定着時緊張力に対して残存率が 80%以下になっているアンカーが 61.8%であったと報告している。野口ら³⁴⁾は、古第三紀の神戸層群および中生代の花崗岩に施工したアンカーの 1 年後の残存緊張力を計測した。その結果、神戸層群の手で掘ることができる表層の砂岩や、降雨で泥状となる泥岩では、定着時緊張力に対する残存率が 40%にまで低下しているのに対し、表層でマサ化が一部みられるものの、深部が硬質な花崗岩の施工箇所では、残存率が 97%であったと報告している。また、藤原・酒井³⁵⁾は、法面中央部に硬質な弱風化岩が分布し、法面端部に向かって風化が進行した強風化岩となり、端部に表土が分布する切土法面に施工したアンカー 18 本を対象に、施工から 10 年後に全数においてリフトオフ試験を行い、緊張力の残存率を求めた。その結果、弱風化岩での残存率が約 77%、強風化岩が約 55%、表土が約 50%と、アンカー背面地盤の風化の程度や地質条件が緊張力低下に影響を与えていることを指摘した。

このように、アンカーの緊張力は、想定外の外力を受けず、アンカーそのものの機能も損失していない場合でも、アンカーが施工された法面の背面地盤の地質条件によって長期的に大きな影響を受けて低下すると考えられる。現在、アンカーが発揮している緊張力の残存率が、その健全度を評価する一つの指標となっているなかで、どのような地質条件において、緊張力低下がどの程度あるかを明らかにすることは、アンカーの施工や維持管理にとって重要である。そこで本章では、建設段階から供用段階において行った、荷重計やリフトオフ試験による残存緊張力の計測結果と、ボーリング調査や法面スケッチによる地質の評価結果とを比較し、アンカー緊張力の施工直後の初期的な低下、および数ヶ月から数十年後の長期的な低下が、アンカーが施工された法面の地質条件とどのような関係にあるかについて検討を行った。

2.2 検討方法

アンカーが施工された法面では、建設段階および供用段階において、アンカー設計、施工を行うために詳細な地質調査がなされる。法面の地盤評価においては、田中の方法³⁶⁾を発展させた岩級区分^{37)、38)}が広く用いられている。表-2.1に一般的な岩級区分²⁷⁾を示す。この岩級区分は、風化の程度、岩塊の硬さ、節理あるいは亀裂の状態の三要素からなる定性的な評価である。本研究の対象とした法面においては、ボーリング調査とあわせ掘削時の切土法面に対し、この方法によって評価した記録が残されている。研究の対象とした各法面の地質などの条件は、建設段階ならびに供用段階に実施された、アンカー設計施工のためのボーリング調査データ、断面図および切土掘削時の法面スケッチの記録を基に、岩種を火成岩、堆岩、変成岩に大別するとともに、アンカー自由長部に分布する地盤の主体となる岩級を、 C_H 、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M 、 $C_M \sim C_L$ 、 C_L 、 $C_L \sim D$ 、 D 級および、崩積土、表土のような未固結

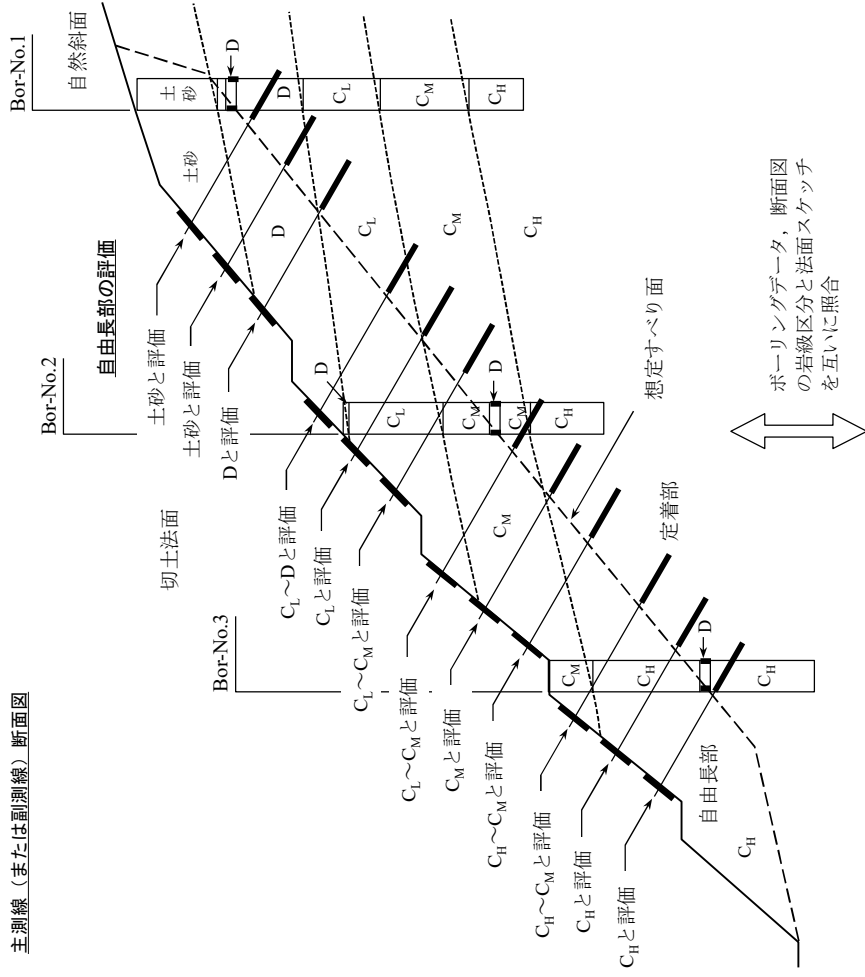
地盤を含む「土砂」の全8段階の地質条件の区分とした。

図-2.1に本検討における地質条件の区分を行う場合の模式図を示す。地質条件の区分は、主測線および副測線で行われたボーリング調査と、その結果から描かれた断面図に基づいて行った。区分にあたっては、アンカー自由長部に相当する地盤が、1つの岩級の場合には、岩級区分毎に、C_H、C_M、C_L、D級に区分した。また、C_HとC_M級、C_MとC_L級、C_LとD級のように2つの岩級にまたがる場合、もしくはそれらが交互に出現する場合には、C_H~C_M、C_M~C_L、C_L~D級に区分した。さらに、自由長部に崩積土、表土のような未固結地盤が分布する場合、もしくはD、C_L級などと同時に未固結地盤が分布する場合には、土砂に区分した。なお、主測線もしくは副測線上にないアンカーについては、それらのボーリングデータおよび断面図と、切土掘削時に行われた地質のスケッチを照合して区分の判定を行った。

表-2.1 一般的な岩級区分²⁷⁾

分類記号	坑壁・露頭	コア	岩片の硬さ	風化の程度	節理面状態	節理間隔
D			指でつぶれる	土壌化 所々に岩片	密着粘土化 われ目不明瞭	5cm以下 ~破碎 コア砂~礫状
C _L			ハンマー打撃 で濁音、容易 に崩れる	内部まで風化 造岩鉱物 粘土化	われ目明瞭だが粘 土化密着	5~15cm 多礫~岩片状
C _M			濁音 われやすい	全体褐色化 造岩鉱物の 変質目立つ	開口われ目多く、 粘土を挟む	5~30cm 多岩片~ 短柱状
C _H			やや濁音 われにくい	全体やや褐色 造岩鉱物 やや変質	密着~ やや開口 粘土を薄く挟む	15~30cm 多短柱状
B			金属音 われにくい	われ目沿い 褐色化 鉱物変質なし	密着~ やや開口 粘土挟まず	30~50cm 多柱状~棒状
A			金属音 われにくい	新 鮮	密着、粘土挟まず	50cm以上 コア棒状

主測線 (または副測線) 断面図



法面スケッチ、アンカー展開図

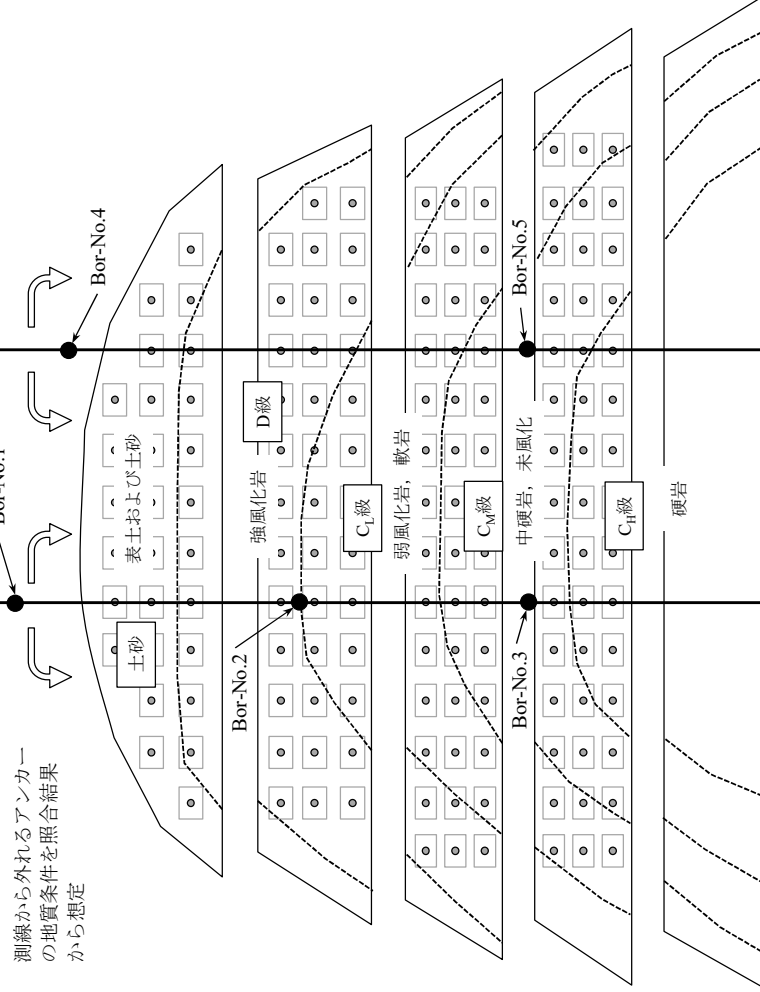


図-2.1 地質条件区分の模式図

表-2.2 に，本検討に用いた法面と計測データの数，地質条件の大別を示す．これらの法面は，いずれも地表面の変状や動態観測に変位が見られない，安定していると評価される法面である．また，アンカーはいずれも頭部や受圧構造物の損傷，受圧構造物背面の地盤の抜け落ちがなく，機能損失は見られない，外観上で健全と評価されるものである．検討の対象とした法面数は，火成岩が 22 箇所（I-1～I-22），堆積岩が 19 箇所（S-1～S-19），変成岩が 10 箇所（M-1～M-10）の 51 箇所である．これら 51 箇所のうち，堆積岩の I-15，I-16，I-22 の 3 法面は，1988 年（昭和 63 年）の旧土質工学会（現在の地盤工学会）の基準改定により制定された防食機能⁵⁾に準拠していない旧タイプアンカーである．残りの 48 箇所は全て，改定後の基準に準拠した新タイプアンカーである．

検討に用いた 51 箇所の法面におけるアンカーの定着時緊張力 (P_t) は，建設段階の記録において定着時緊張力 (P_t) が確認できたもので，設計アンカー力 (T_d) に対して 105%，95%，80%，70%を採用している法面が一部あるが，ほとんどが T_d に対して 100%の値を採用しており，引き止め効果を期待して P_t を T_d に対して 20～30%とする待ち受けタイプのアンカーはない．

アンカーの残存緊張力は，建設段階から供用段階の荷重計計測データ，および供用段階のリフトオフ試験データを用い，それらから求められる定着時緊張力 (P_t) に対する残存緊張力 (P_e) の残存率 ($P_e/P_t = R_{pt}(\%)$) をパラメーターとした．アンカーに設置した荷重計の耐用年数は，一般に 5 年～10 年程度²⁴⁾とされる．荷重計計測データについては，研究対象とした法面は 35 箇所である．これらの荷重計は全て建設段階に設置されたものであり，荷重計計測は，アンカーの緊張・定着に用いた油圧ジャッキの定着時の圧力(緊張力)に合わせるため，緊張力の差分の補正が行われている．検討に用いた荷重計のアンカー定着後の計測頻度は，1 時間，1 日～数日，1 週間～10 日，1 か月と

表-2.2 本研究に用いた法面の地質とデータ数

岩種	地層・岩石	地質時代	法面数 (箇所)	法面 番号	施工年月 (年/月)	アンカー タイプ	引張り材	受圧 構造物	施工条件	地下 水	T _d (kN)	P _i (kN)	施工数 (本)	初期		長期		計測 総数				
														荷重計 (計測数)	荷重計 (計測数)	リフト オフ 試験 (計測数)						
火成岩	領家花崗岩	白亜紀	14	I-1	2013/2	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	181.4	181.4	14	2	2	—	145					
				I-2	2017/10	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	316.5	316.5	61	5	—	—						
				I-3	2013/11~2013/12	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	850.0	850.0	103	6	6	—						
				I-4	2014/10~2015/3	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	335.1	335.1	136	7	7	—						
				I-5	2014/12	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	331.1	331.1	49	5	5	—						
				I-6	2014/11	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	174.1	174.1	39	5	5	—						
				I-7	2014/12	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	190.0	190.0	58	5	5	—						
				I-8	2014/8	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	650.1	650.1	40	5	5	—						
				I-9	2015/3~2015/5	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	514.8	514.8	67	5	5	—						
				I-10	2014/1~2014/6 2015/12~2016/1	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	766.8	766.8	369	17	14	—						
				I-11	2004/9~2004/12	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	408.1	426.0	79	4	—	4						
				I-14	2016/7	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	328.9	328.9	31	—	5	—						
				I-15	1989/1~1990/2	引張型	PC鋼より線	法枠工	切土	—	300.1	300.1	14	—	—	1						
				I-16	1988/12	引張型	PC鋼棒	法枠工	切土	—	276.5	276.5	114	—	—	5						
				火成岩	濃飛流紋岩	白亜紀	8	I-12	2000/6~2000/8	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	367.8	367.8		70	3	—	9	88
								I-13	2018/12	圧縮型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	374.4	374.4		46	4	—	—	
I-17	2000/6~2000/8	荷重分散型	PC鋼より線					独立受圧板	切土	有	627.8	627.8	81	—	—	10						
I-18	1998/9~1998/12	荷重分散型	PC鋼より線					独立受圧板	切土	有	653.3	653.3	232	—	—	24						
I-19	1995/12	荷重分散型	PC鋼より線					独立受圧板	切土	—	469.7	469.7	38	—	—	10						
I-20	2001/9	荷重分散型	PC鋼より線					法枠工	切土	—	268.7	268.7	95	—	—	10						
I-21	2001/9	荷重分散型	PC鋼より線					法枠工	切土	有	302.0	302.0	107	—	—	8						
I-22	1979/4	引張型	PC鋼より線					法枠工	切土	—	264.8	264.8	69	—	—	3						
堆積岩	美濃帯 砂岩・頁岩	ジュラ紀	16	S-1	1995/10~1996/9 2018/7	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	341.9	341.9	423	1	—	—	539					
				S-2	1996/3~1996/11	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	195.1	195.1	14	—	—	2						
				S-3	1994/9~1995/11 1996/10~1996/11	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土 自然斜面	有	440.0 ~ 880.6	440.0 ~ 880.6	436	8	5	178						
				S-4	1996/10~1996/12	引張型	PC鋼より線	法枠工 独立受圧板	切土	有	323.6	323.6	34	—	—	9						
				S-5	1995/7	荷重分散型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	804.1	804.1	258	6	—	47						
				S-6	1994/3	荷重分散型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	639.9	639.9	160	1	1	—						
				S-7	1994/5	荷重分散型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	362.5	347.1	68	1	1	—						
				S-8	1997/9	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	159.2	152.2	658	1	1	—						
				S-12	1994/1	圧縮型	PC鋼より線	独立受圧板	自然斜面	—	329.3	319.2	51	3	—	—						
				S-13	1995/7~1995/12	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	198.0	198.0	1	—	—	1						
				S-14	1996/2~1996/5	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	228.0	228.0	12	—	—	8						
				S-15	1996/8~1997/3	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	412.0	412.0	3	—	—	2						
				S-16	1995/7~1995/12	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	266.7	266.7	89	—	—	13						
				S-17	1996/2~1996/5	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	316.0	316.0	87	—	—	8						
				S-18	1996/8~1997/3	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	449.1	449.1	87	—	—	22						
				S-19	1996/9~1997/12	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	505.0	505.0	144	—	—	13						
				S-19	1996/4~1996/10	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	414.8	414.8	195	—	—	32						
				S-19	1995/10	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	256.9	256.9	114	—	—	19						
				S-19	1994/8~1995/2	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	337.7	337.7	49	—	—	9						
S-19	1994/8~1995/2	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	205.9	205.9	37	—	—	12										
S-19	1994/8~1995/2	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	331.5	331.5	191	—	—	50										
S-19	1994/8~1995/2	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	732.6	732.6	49	—	—	15										
堆積岩	四万十累層 砂岩・頁岩	前期白亜紀 ~古第三紀	2	S-9	2012/7	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	528.9	528.9	65	1	—	5	12					
	S-10	2010/12	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	617.1	615.2	53	1	—	5									
	野洲川層群 砂岩・頁岩	ジュラ紀	1	S-11	2004/9~2004/10 2007/4	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	724.0	744.5	25	5	—	—	17					
S-11	2007/4	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	940.0	897.5	25	6	6	—										
変成岩	三波川変成帯 結晶片岩	後期白亜紀 ~古第三紀	7	M-1	2013/8~2014/10	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	639.7	447.8	158	9	9	—	87					
				M-2	2005/9	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	242.7	194.0	48	1	—	17						
				M-3	2014/11	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	自然斜面	有	686.4	483.9	94	2	2	—						
				M-7	2002/3	引張型	PC鋼より線	法枠工	切土	有	286.0	286.0	27	—	—	32						
				M-8	2004/9	荷重分散型	PC鋼より線	法枠工	切土	—	362.3	362.3	30	—	—	5						
				M-9	1994/4	荷重分散型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	219.6	219.6	70	—	—	5						
				M-10	1993/4	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	291.6	291.6	30	—	—	5						
				M-4	2012/6~2013/10	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	201.0	210.0	159	9	9	—						
				M-5	2014/6~2014/9	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	872.8	920.4	320	24	24	—						
				M-6	2012/11~2013/2	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土 自然斜面	有	795.4	830.1	195	10	10	—						
変成岩	領家帯 片麻岩	白亜紀	3	M-4	2012/6~2013/10	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	—	201.0	210.0	159	9	9	—	86					
				M-5	2014/6~2014/9	引張型	PC鋼より線	独立受圧板	切土	有	872.8	920.4	320	24	24	—						
合計			51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	170	138	666	974						

地下水 — : 地下水位は定着部, 自由長部に無し
有 : 定着部または自由長部に地下水位有り

様々であるが，継続的に計測を行ったものであり，計測期間は最長で5.3年である．これらの荷重計は，**図-2.2**に示す荷重計計測結果のように，急激な計測値の増減がなく，荷重計が正常に作動していることを確認している．

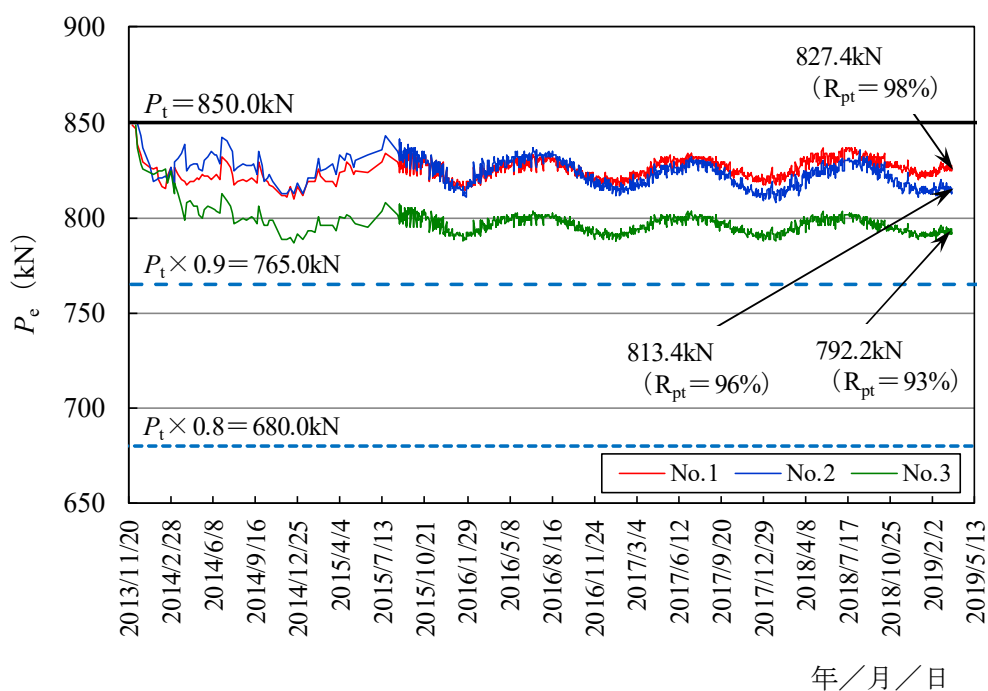


図-2.2 荷重計計測結果

リフトオフ試験による残存緊張力の算定には現在，2010年に示されたNEXCO試験法による方法³⁹⁾が広く用いられている．この方法は，**図-2.3**に示す荷重（緊張力）－変位曲線図において，載荷時のリフトオフ前の傾きとリフトオフ後の傾きの交点の荷重を残存緊張力とするものである．NEXCO試験法が示される以前の残存緊張力の算定には，地盤工学会による定着具が支圧板から離れはじめた（0.1～1mm）ときの荷重とする方法⁴⁰⁾もしくは，アンカー余長分の理論的な伸びの傾きとリフトオフ後の傾きの交点の荷重とする方法²¹⁾が用いられていた．本研究のリフトオフ試験データの一部には2010年以前のものが含まれるが，これらについては，既存の荷重－変位曲線図からリフトオフ

前後の勾配の交点の荷重を残存緊張力とする NEXCO の方法によって再度算定を行った。また、残存率が小さいリフトオフ試験データであっても、アンカー頭部が支圧板から離れ始めるリフトオフが確認できるとともに、アンカー頭部が支圧板から完全に離れたリフトオフ後は、荷重（緊張力）－変位曲線が直線勾配を示し、試験終了時の残留変位が 1mm 以下^{39), 41)}で、定着部の引き抜け、引張り材の破断など、アンカー機能に異常が生じていないと判断できるものを用いた。このような荷重計測データ、および供用段階のリフトオフ試験データから求められる残存率 ($P_e/P_t = R_{pt}(\%)$) と 8 段階に区分した地質条件との比較を行った。

残存率 ($R_{pt}(\%)$) と地質条件の比較は、施工から 30 日後の「初期的な低下」と、その後の数ヶ月から最大で約 40 年後の「長期的な低下」について行い、 R_{pt} と各岩種における 8 段階の地質条件との関係を検

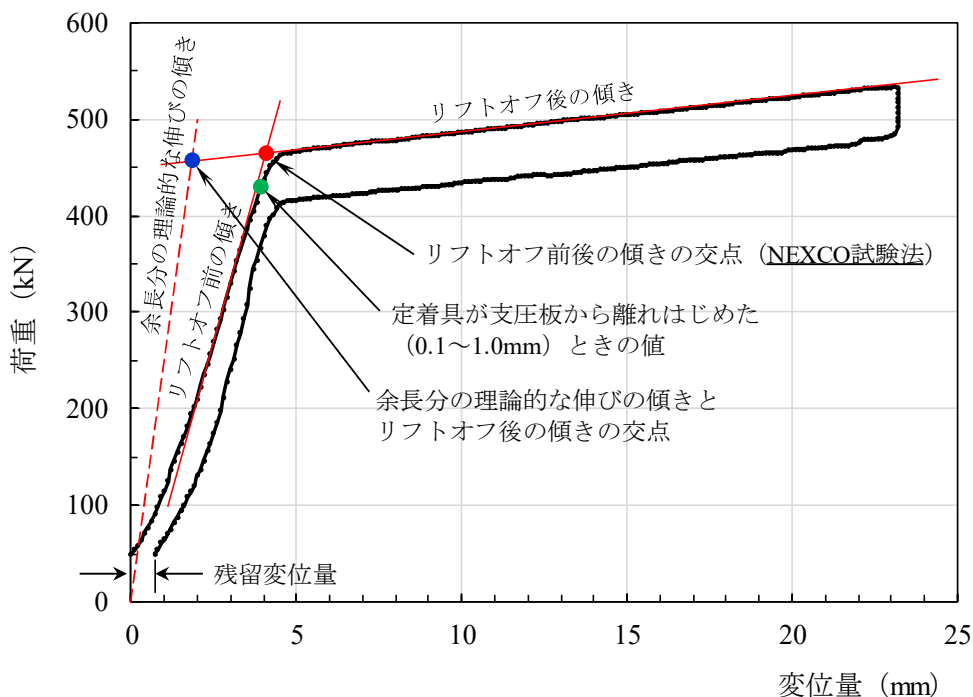


図-2.3 荷重（緊張力）－変位曲線図の例

討した。また、地質条件を a (C_H), b ($C_H \sim C_M, C_M$), c ($C_M \sim C_L, C_L$), d ($C_L \sim D, D$) および e (土砂) の 5 段階に区分した地質条件と、30 日後、数ヶ月～5 年後まで、5 年～15 年後、15 年～25 年後における R_{pt} について、岩種による違いを検討した。さらに、地下水の有無、アンカータイプや受圧構造物の違いによる緊張力低下への影響、緊張力が低下しやすい地質条件でのアンカー施工と維持管理についての提案を行った。

2.3 初期的なアンカー緊張力低下

初期的なアンカーの緊張力低下として、施工から 30 日後の R_{pt} と岩級区分の関係について、火成岩、堆積岩、変成岩に分けて述べる。

本論において、各法面の岩級区分の R_{pt} のプロットは、同一の法面で計測データが複数ある場合には、中心に平均値、その上下に最大値と最小値を短い横バーで示し、それらを縦線で結んだ。データが 1 つの場合は、その計測値の R_{pt} をプロットしている。なお、同一の岩級区分上に複数の法面のデータがある場合には、互いの重複をなくするため、プロットをずらして描いている。また、 R_{pt} が 100% を超えているものがあるが、これらの法面では、変動を伺わせる変状などは確認されていない。一般に、アンカーの建設段階においては、定着具のセットロスや鋼材のリラクセーションを考慮し、高めの緊張力で定着が行われる。これらの法面においては、施工後に緊張力の大きな低下がなかったため 100% を超えていることが考えられる。

2.3.1 火成岩

図-2.4 に火成岩の 30 日後の緊張力の R_{pt} と岩級区分の関係を、表-2.3 に各法面の岩級区分における施工から 30 日後の R_{pt} と R_{pt} の変動係数 ($CV_{R_{pt}}$) を示す。

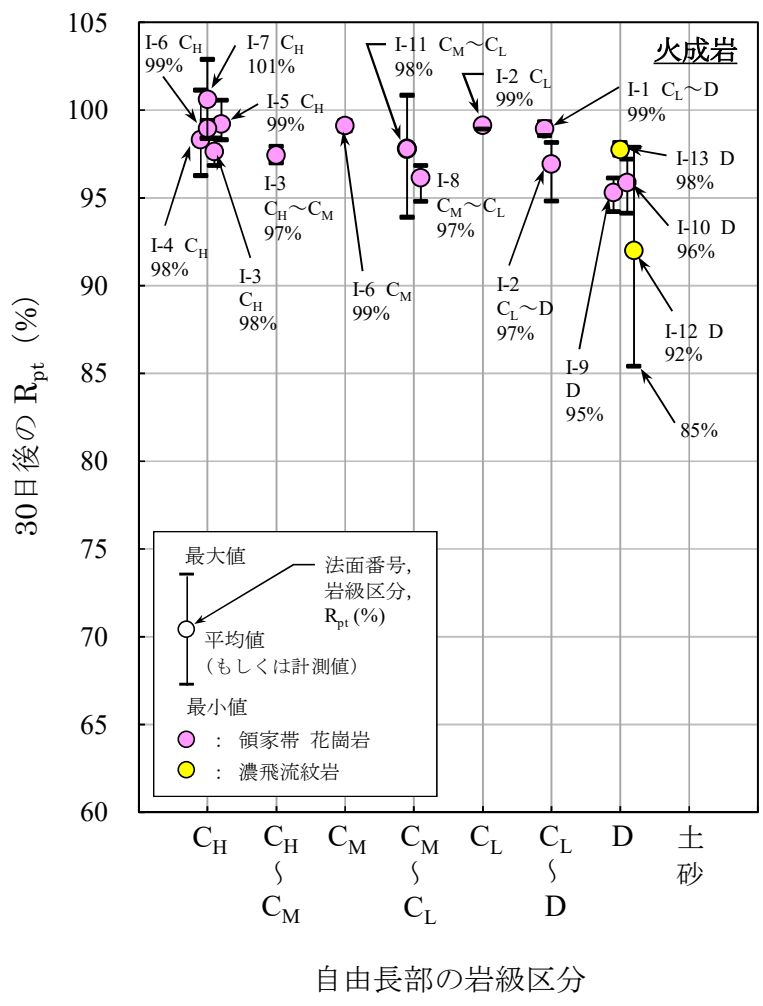


図-2.4 火成岩の30日後の緊張力の R_{pt} と岩級区分の関係

施工から30日後の R_{pt} を平均値で見ると、C_H 級は 100% に近く、緊張力の低下がほとんど見られない。C_H ~ C_M から C_L ~ D 級までは、96% ~ 99% を示し、95% 以上が保たれている。D 級では、R_{pt} が 92% ~ 98% となり、特に、I-12 法面では、R_{pt} の最小値は 85% を示し、最大値と最小値の差と CV_{R_{pt}} が大きくなる。このように、岩級区分が C_H 級から D 級へと地質条件が悪くなるにしたがって、R_{pt} が小さくなる傾向が見られる。

表-2.3 火成岩の各法面の30日後の R_{pt}

法面 番号	地質	T_d (kN)	P_t (kN)	自由長部 岩級区分	荷重計 (箇所)	30日後の R_{pt} (%)				
						最大	平均	最小	最大 最小 差	変動 係数 $CV_{R_{pt}}$
I-1	R-gr	181.4	181.4	$C_L \sim D$	2	99	99	99	0	—
I-2	R-gr	316.5	316.5	C_L	2	99	99	99	0	—
				$C_L \sim D$	3	98	97	95	3	0.015
I-3	R-gr	850.0	850.0	C_H	3	98	98	97	1	0.007
				$C_H \sim C_M$	3	98	97	97	1	0.004
I-4	R-gr	335.1	335.1	C_H	7	101	98	96	5	0.016
I-5	R-gr	331.1	331.1	C_H	5	101	99	98	3	0.008
I-6	R-gr	174.1	174.1	C_H	3	99	99	98	1	0.004
				C_M	2	99	99	99	0	—
I-7	R-gr	190.0	190.0	C_H	5	103	101	98	5	0.015
I-8	R-gr	650.1	650.1	$C_M \sim C_L$	5	97	96	95	2	0.008
I-9	R-gr	514.8	514.8	D	5	96	95	94	2	0.008
I-10	R-gr	766.8	766.8	D	17	97	96	94	3	0.010
I-11	R-gr	408.1	426.0	$C_M \sim C_L$	4	101	98	94	7	0.025
I-12	N-ry	367.8	367.8	D	3	98	92	85	13	0.056
I-13	N-ry	374.4	374.4	D	4	98	98	97	1	0.003

R-Gr : 領家帯 花崗岩, N-ry : 濃飛流紋岩

T_d : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力

2.3.2 堆積岩

図-2.5 に堆積岩の 30 日後の緊張力の R_{pt} と岩級区分の関係を、表-2.4 に各法面の岩級区分における施工から 30 日後の R_{pt} と R_{pt} の変動係数 ($CV_{R_{pt}}$) を示す。

施工から 30 日後の R_{pt} を平均値で見ると、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M 級では、98% および 97% と、95% 以上が保たれる。 $C_M \sim C_L$ 級では、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M 級に比べて小さくなる傾向が見られ、S-1 法面では、95% を下回る。また、 C_L 、 $C_L \sim D$ 級は 91% ~ 95% 程度であり、 $C_L \sim D$ 級の最小値は 90%

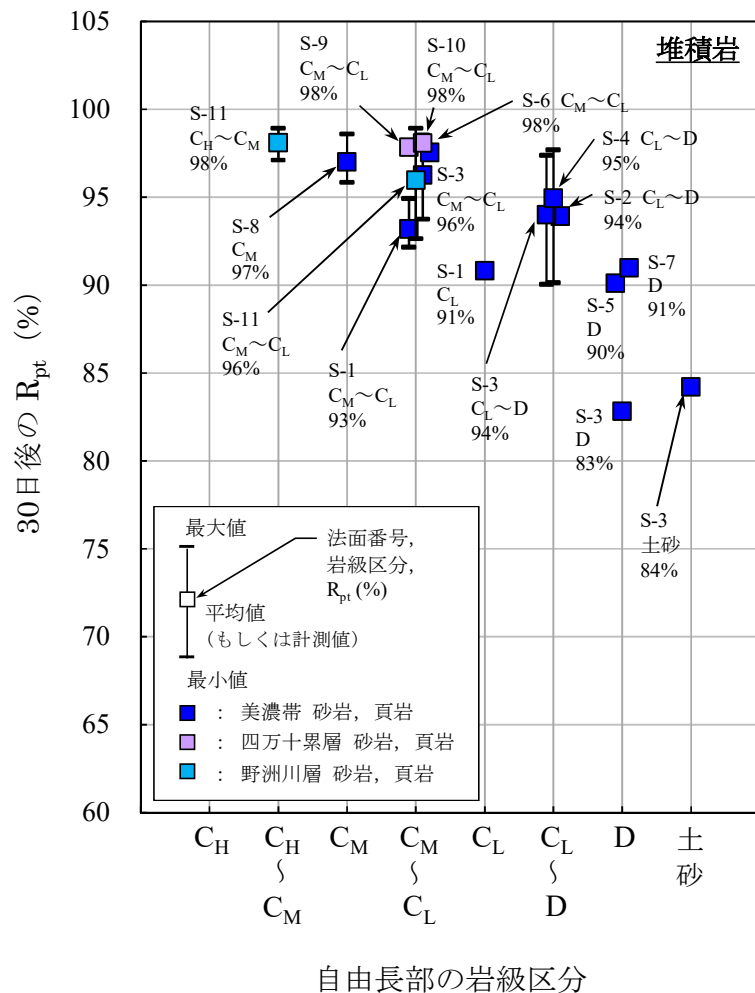


図-2.5 堆積岩の 30 日後の緊張力の R_{pt} と岩級区分の関係

を示すものが見られ、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M 、 $C_M \sim C_L$ 級に比べて R_{pt} の最大値と最小値の差が大きくなる。D 級および土砂は、90%程度もしくはそれ以下となる。S-3 法面の D 級では 83%、S-3 法面の土砂では 84%と、90%を下回り、岩級区分が C_H 級から D 級および土砂へと地質条件が悪くなるにしたがって、 R_{pt} が小さくなる傾向が見られる。

表-2.4 堆積岩の各法面の 30 日後の R_{pt}

法面 番号	地質	T_d (kN)	P_t (kN)	自由長部 岩級区分	荷重計 (箇所)	30日後の R_{pt} (%)				
						最大	平均	最小	最大 最小 差	変動 係数 $CV_{R_{pt}}$
S-1	Mi	475.4	497.5	$C_M \sim C_L$	6	95	93	92	3	0.010
	Mi	341.9	341.9	C_L	1	—	91	—	—	—
S-2	Mi	275.1	275.1	$C_L \sim D$	1	—	94	—	—	—
S-3	Mi	466.9	466.9	D	1	—	83	—	—	—
		440.0	440.0	$C_M \sim C_L$	3	99	96	94	5	0.020
		~	~	$C_L \sim D$	4	97	94	90	7	0.030
		880.6	880.6	土砂	1	—	84	—	—	—
S-4	Mi	804.1	804.1	$C_L \sim D$	6	98	95	90	8	0.036
S-5	Mi	639.9	639.9	D	1	—	90	—	—	—
S-6	Mi	362.5	347.1	$C_M \sim C_L$	1	—	98	—	—	—
S-7	Mi	159.2	152.2	D	1	—	91	—	—	—
S-8	Mi	329.3	319.2	C_M	3	99	97	96	3	0.012
S-9	Sh	528.9	528.9	$C_M \sim C_L$	1	—	98	—	—	—
S-10	Sh	617.1	615.2	$C_M \sim C_L$	1	—	98	—	—	—
S-11	Ya	940.0	897.5	$C_H \sim C_M$	6	99	98	97	2	0.006
		724.0	744.5	$C_M \sim C_L$	5	99	96	93	6	0.025

Mi : 美濃帯 砂岩・頁岩, Sh : 四万十累層 砂岩・頁岩, Ya : 野洲川層群 砂岩

T_d : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力

2.3.3 変成岩

図-2.6 に変成岩の 30 日後の緊張力の R_{pt} と岩級区分の関係を、表-2.5 に各法面の岩級区分における施工から 30 日後の R_{pt} と R_{pt} の変動係数 ($CV_{R_{pt}}$) を示す。

施工から 30 日後の R_{pt} を平均値で見ると、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M 級は 99% 前後で、緊張力の低下はほとんど見られない。 $C_M \sim C_L$ 級では、M-5 法面で 94% と、95% を下回るとともに、 R_{pt} の最大値と最小値の差が大きく、

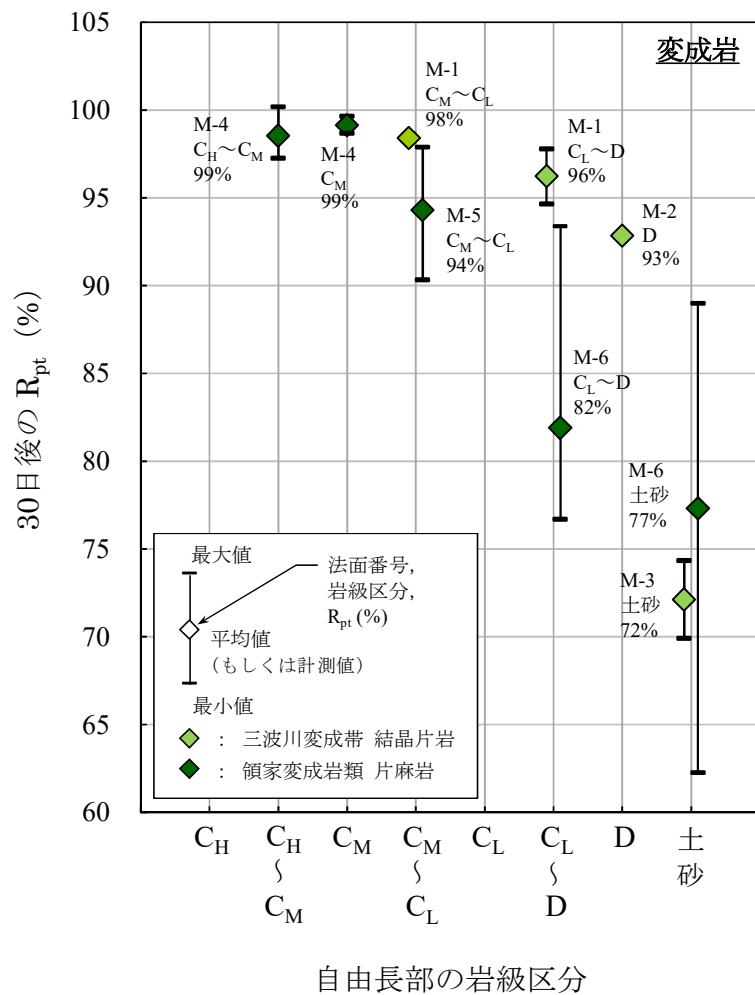


図-2.6 変成岩の 30 日後の緊張力の R_{pt} と岩級区分の関係

最小値は 90%を示す。C_L～D, D 級は, C_M～C_Lまでに比べて小さくなり, M-6 法面では, 平均 R_{pt} が 82%を示すとともに, 最大値と最小値の差, CV_{Rpt} も大きい。M-6, M-3 法面の土砂では 77%, 72%と, 80%を下回る値を示し, 特に M-6 法面においては, R_{pt} の最小値は 62%と小さい値を示し, 最大値の 89%との差が大きく, CV_{Rpt} が最も大きい値を示す。このように, 岩級区分が C_H 級から D 級, 土砂になるにしたがって, R_{pt} が小さくなるとともに, 最大値と最小値の差やばらつきが大きくなる傾向が見られる。

表-2.5 変成岩の各法面の 30 日後の R_{pt}

法面 番号	地質	T _d (kN)	P _t (kN)	自由長部 岩級区分	荷重計 (箇所)	30日後の R _{pt} (%)				
						最大	平均	最小	最大 最小 差	変動 係数 CV _{Rpt}
M-1	Sa	639.7	447.8	C _M ～C _L	3	99	98	98	1	0.003
				C _L ～D	6	98	96	95	3	0.010
M-2	Sa	242.7	194.0	D	1	—	93	—	—	—
M-3	Sa	686.4	483.9	土砂	2	74	72	70	4	—
M-4	Ry	201.0	210.0	C _H ～C _M	5	100	99	97	3	0.013
				C _M	4	100	99	99	1	0.004
M-5	Ry	872.8	920.4	C _M ～C _L	24	98	94	90	8	0.022
M-6	Ry	795.4	830.1	C _L ～D	4	93	82	77	16	0.082
				土砂	6	89	77	62	27	0.119

Sa : 三波川変成帯 結晶片岩, Ry : 領家変成岩 片麻岩

T_d : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力

2.3.4 岩種による 30 日後の R_{pt} の比較

施工から 30 日後の R_{pt} について、火成岩、堆積岩および変成岩の岩種による比較を行ってみる。岩種による R_{pt} の比較においては、8 段階の地質条件を、 C_H 級の区分 a、 C_M 級が含まれる $C_H \sim C_M$ および C_M 級の区分 b、 C_L 級が含まれる $C_M \sim C_L$ および C_L 級の区分 c、D 級が含まれる $C_L \sim D$ および D 級の区分 d、土砂の区分 e の 5 つに分けて比較を行った。

表-2.6 に火成岩、堆積岩、変成岩の各岩種の区分 a から e におけるデータ数と、平均 R_{pt} 、最大値と最小値の差および R_{pt} の変動係数 ($CV_{R_{pt}}$) を、図-2.7 に各岩種の岩級区分と 30 日後の平均 R_{pt} の関係、図-2.8 に各区分の 30 日後の最大値と最小値の差と変動係数の関係を示す。また、火成岩、堆積岩、変成岩の区分 a から e の平均 R_{pt} について、図-2.9 に示す流れにより分散分析 (F 検定) ならびに平均値の差の検定 (t 検定) を行った。F 検定および t 検定の有意水準は、両側 5% とした。表-2.7 に 30 日後の平均 R_{pt} の各組み合わせによる t 検定の結果を示す。

まず、図-2.7 に示す各岩種の岩級区分と 30 日後の平均 R_{pt} の関係を

表-2.6 30 日後の岩種別の平均 R_{pt} ・最大最小差・変動係数

経過時間	区分	火成岩				堆積岩				変成岩			
		N	平均 R_{pt} (%)	最大最小差	変動係数 $CV_{R_{pt}}$	N	平均 R_{pt} (%)	最大最小差	変動係数 $CV_{R_{pt}}$	N	平均 R_{pt} (%)	最大最小差	変動係数 $CV_{R_{pt}}$
30日	a	23	99	3	0.016	0	—	—	—	0	—	—	—
	b	5	98	2	0.009	9	98	3	0.010	9	99	3	0.010
	c	11	97	7	0.020	18	95	8	0.027	27	95	8	0.024
	d	34	96	14	0.024	14	94	8	0.032	11	91	21	0.087
	e	0	—	—	—	1	84	—	—	8	76	27	0.110
計		73	—	—	—	42	—	—	—	55	—	—	—

a : C_H , b : $C_H \sim C_M, C_M$, c : $C_M \sim C_L, C_L$, d : $C_L \sim D, D$, e : 土砂

N : データ数

見ると、いずれの岩種とも区分 a から e へと、岩級区分が悪くなるにしたがって、 R_{pt} が小さくなることがわかる。区分 a は、火成岩のみのデータであるが、 R_{pt} は 99% と高い値を示す。区分 b では、各岩種とも 98% 程度で大きな差はない。区分 c では、火成岩で 97%、堆積岩および変成岩で 95% 程度となり、火成岩に比べて堆積岩および変成岩でやや小さな R_{pt} を示す。区分 d では、火成岩、堆積岩、変成岩の順に R_{pt} が小さくなり、それぞれ 96%、94%、91% を示す。区分 e は、堆積岩と変成岩のデータであるが、それぞれ 84%、76% となり、 R_{pt} が小さい値を示す傾向が見られる。

次に、図-2.8 に示す各岩種の岩級区分における R_{pt} の最大値と最小値の差と変動係数の関係を見ると、両者に正の関係があることがわかる。どの岩種においても区分 a および b では、最大値と最小値の差が 3% 程度、 $CV_{R_{pt}}$ が 0.010~0.016 と小さいが、区分 c では、最大値と最小値の差が 7%~8%、 $CV_{R_{pt}}$ が 0.020~0.027 を、区分 d では、最大値と最小値の差が 8%~21%、 $CV_{R_{pt}}$ が 0.024~0.087 を、区分 e は、変成岩のみのデータであるが、最大値と最小値の差が 27%、 $CV_{R_{pt}}$ が 0.110 と最も大きい値を示す。このようにアンカーの緊張力は、どの岩種においても地質条件が悪くなるにしたがって、ばらつきを広げながら低下すると考えられる。

岩種による違いを見ると、区分 c までは、有意な差は見られないものの、区分 d では、変成岩において最大値と最小値の差が 21%、 $CV_{R_{pt}}$ が 0.087 と、火成岩や堆積岩に比べて大きい値を示す。変成岩で緊張力の低下、最大値と最小値の差、 $CV_{R_{pt}}$ が大きくなるのは、片理構造を有する、岩種の特性が起因していることが考えられる。

以上の結果、アンカーの緊張力は、施工された背面地盤の地質条件の影響を受け、施工から 30 日後であっても R_{pt} に差が生じ、地質条件が悪くなるにしたがって低下量とばらつきが大きくなることが明らかになった。

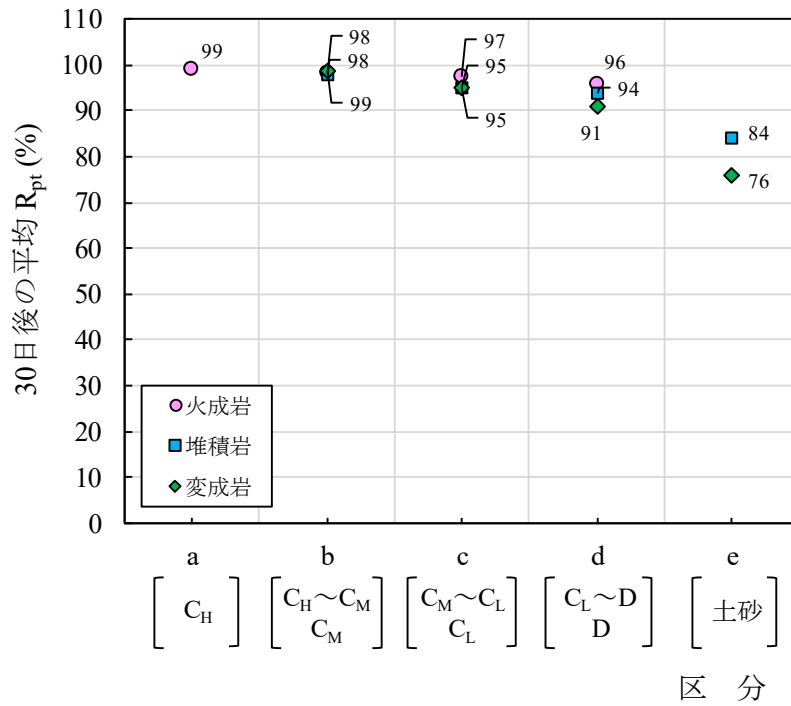


図-2.7 各岩種の岩級区分と30日後の平均 R_{pt} の関係

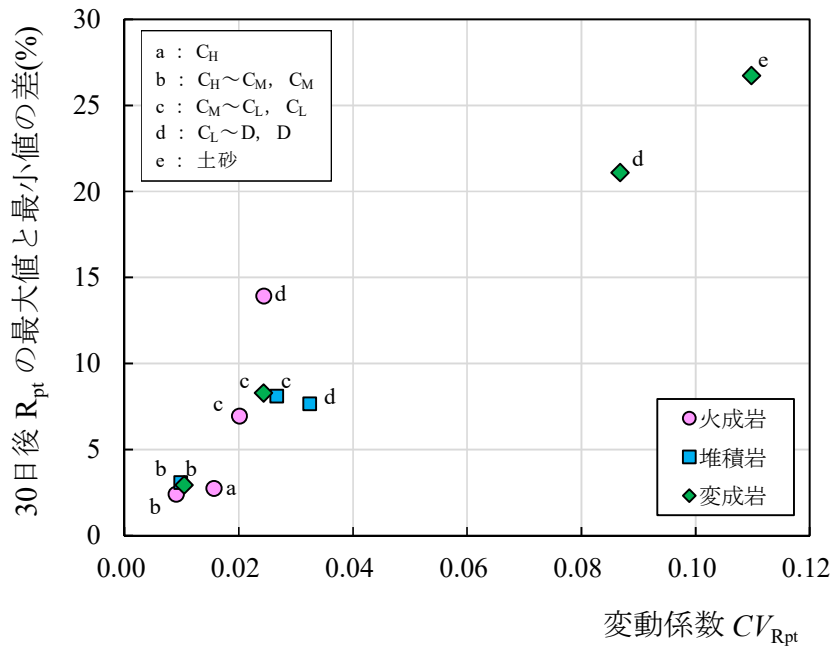


図-2.8 30日後の R_{pt} の最大最小値差と変動係数の関係

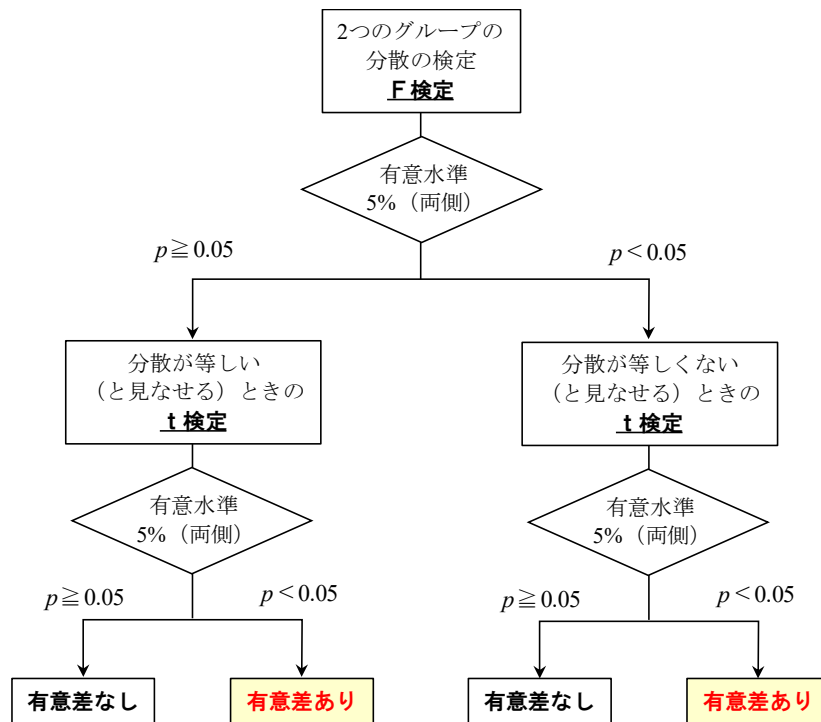


図-2.9 平均 R_{pt} の F 検定から t 検定の流れ

表-2.7 に示す R_{pt} の平均値の各組み合わせにおける t 検定の結果について見てみる。全体に、地質条件の良い a もしくは b と、地質条件の悪い d, e との間で有意な差がある傾向が見られる。特に、変成岩の e では、いずれの岩種、区分との間に有意な差があるという結果が得られた。これは、変成岩の e の緊張力の低下量とばらつきが、他の岩種、区分に比べて大きいため、 R_{pt} の平均値に有意な差があると評価されたと考えられる。

次に、地質条件の良い方から見ると、火成岩の区分 a と各岩種の b および c では、 R_{pt} の平均値に有意な差がない結果が多く見られた。地質条件の良い各岩種の a, b もしくは火成岩の c の平均 R_{pt} は 99% ~ 97% であり、最大値と最小値の差は 2% ~ 7%、 $CV_{R_{pt}}$ は 0.009 ~ 0.020 と、いずれも値の範囲が小さいため、有意な差がない結果が得られたと考えられる。各岩種の区分 b と堆積岩および変成岩の c、各岩種の d ならびに変成岩の c では、おおむね有意な差がある結果が得られ

た．堆積岩および変成岩の c と各岩種の d の平均 R_{pt} には，有意な差がない結果となっている．これは，堆積岩および変成岩の c および d の平均 R_{pt} は 91%～95%であり，最大値と最小値の差は 8%～21%， $CV_{R_{pt}}$ は 0.024～0.087 と，類似した範囲を示し，特に変成岩の d の平均 R_{pt} は小さいながらも最大値と最小値の差が 21%と大きく，堆積岩の c および d ，変成岩の c の範囲に重なるためと考えられる．

表-2.7 30日後の平均 R_{pt} の有意差検定 (t 検定) 結果

区分	岩種	a			b			c			d			e		
		火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩
a	N	23	0	0	5	6	3	11	18	27	34	14	11	0	1	8
	火成岩	23	-	-	等分散 t(26)=1.20 p=0.241 有意差なし	等分散 t(30)=2.23 p=0.034 有意差あり	等分散 t(30)=0.35 p=0.725 有意差なし	等分散 t(32)=2.68 p=0.011 有意差あり	不等分散 t(27)=5.60 p=6.1E-6 有意差あり	等分散 t(48)=7.34 p=2.3E-9 有意差あり	等分散 t(55)=5.41 p=1.4E-6 有意差あり	不等分散 t(17)=5.23 p=2.5E-5 有意差あり	不等分散 t(10)=3.30 p=0.008 有意差あり	-	-	不等分散 t(7)=7.25 p=1.7E-4 有意差あり
	堆積岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b	火成岩	5	等分散 t(26)=1.20 p=0.241 有意差なし	-	-	等分散 t(12)=1.20 p=0.513 有意差なし	等分散 t(12)=-1.16 p=0.267 有意差なし	等分散 t(14)=0.84 p=0.415 有意差なし	等分散 t(21)=2.50 p=0.021 有意差あり	等分散 t(30)=3.10 p=0.004 有意差あり	等分散 t(17)=1.20 p=0.054 有意差なし	不等分散 t(17)=4.50 p=3.2E-4 有意差あり	不等分散 t(10)=2.92 p=0.014 有意差あり	-	-	不等分散 t(7)=6.94 p=2.2E-4 有意差あり
	堆積岩	6	等分散 t(30)=2.23 p=0.034 有意差あり	-	-	等分散 t(12)=1.20 p=0.513 有意差なし	等分散 t(16)=-2.14 p=0.048 有意差あり	等分散 t(18)=0.59 p=0.566 有意差なし	不等分散 t(24)=3.74 p=0.001 有意差あり	不等分散 t(31)=5.23 p=1.1E-5 有意差あり	不等分散 t(31)=3.35 p=0.002 有意差あり	不等分散 t(17)=4.30 p=4.9E-4 有意差あり	不等分散 t(10)=2.79 p=0.019 有意差あり	-	-	不等分散 t(7)=-6.85 p=2.4E-4 有意差あり
	変成岩	3	等分散 t(30)=0.35 p=0.725 有意差なし	-	-	等分散 t(12)=-1.16 p=0.267 有意差なし	等分散 t(16)=-2.14 p=0.048 有意差あり	等分散 t(18)=1.98 p=0.063 有意差なし	不等分散 t(25)=5.18 p=2.3E-5 有意差あり	不等分散 t(30)=6.94 p=1.0E-7 有意差あり	不等分散 t(29)=5.22 p=1.4E-5 有意差あり	不等分散 t(17)=5.42 p=4.6E-5 有意差あり	不等分散 t(10)=3.21 p=0.009 有意差あり	-	-	不等分散 t(7)=-7.18 p=1.8E-4 有意差あり
c	火成岩	11	等分散 t(32)=2.68 p=0.011 有意差あり	-	-	等分散 t(14)=0.84 p=0.415 有意差なし	等分散 t(18)=0.59 p=0.566 有意差なし	等分散 t(18)=1.98 p=0.063 有意差なし	等分散 t(27)=2.37 p=0.025 有意差あり	等分散 t(36)=3.14 p=0.004 有意差あり	等分散 t(43)=1.68 p=0.101 有意差なし	等分散 t(23)=3.15 p=0.004 有意差あり	不等分散 t(11)=2.56 p=0.026 有意差あり	-	-	不等分散 t(8)=6.62 p=1.7E-4 有意差あり
	堆積岩	18	不等分散 t(27)=5.60 p=6.1E-6 有意差あり	-	-	等分散 t(21)=2.50 p=0.021 有意差あり	不等分散 t(24)=3.74 p=0.001 有意差あり	不等分散 t(25)=5.18 p=2.3E-5 有意差あり	等分散 t(27)=2.37 p=0.025 有意差あり	等分散 t(43)=0.45 p=0.654 有意差なし	等分散 t(50)=-1.18 p=0.243 有意差なし	等分散 t(30)=1.26 p=0.217 有意差なし	不等分散 t(11)=1.71 p=0.115 有意差なし	-	-	不等分散 t(8)=-5.94 p=3.46E-4 有意差あり
	変成岩	27	等分散 t(48)=7.34 p=2.3E-9 有意差あり	-	-	等分散 t(30)=3.10 p=0.004 有意差あり	不等分散 t(31)=5.23 p=1.1E-5 有意差あり	不等分散 t(30)=6.94 p=1.0E-7 有意差あり	等分散 t(36)=3.14 p=0.004 有意差あり	等分散 t(43)=0.45 p=0.654 有意差なし	等分散 t(59)=-1.94 p=0.056 有意差なし	不等分散 t(11)=1.60 p=0.138 有意差なし	不等分散 t(11)=1.60 p=0.138 有意差なし	-	-	不等分散 t(7)=-5.89 p=0.001 有意差あり
d	火成岩	34	等分散 t(55)=5.41 p=1.4E-6 有意差あり	-	-	等分散 t(37)=1.20 p=0.054 有意差なし	不等分散 t(31)=3.35 p=0.002 有意差あり	不等分散 t(29)=5.22 p=1.4E-5 有意差あり	等分散 t(43)=1.68 p=0.101 有意差なし	等分散 t(50)=-1.18 p=0.243 有意差なし	等分散 t(59)=-1.94 p=0.056 有意差なし	等分散 t(46)=2.56 p=0.014 有意差あり	不等分散 t(11)=2.07 p=0.062 有意差あり	-	-	不等分散 t(7)=-6.27 p=4.2E-4 有意差あり
	堆積岩	14	不等分散 t(17)=5.23 p=2.5E-5 有意差あり	-	-	不等分散 t(17)=4.50 p=3.2E-4 有意差あり	不等分散 t(17)=5.42 p=4.9E-4 有意差あり	不等分散 t(10)=4.6E-5 p=0.009 有意差あり	等分散 t(23)=3.15 p=0.004 有意差あり	等分散 t(30)=1.26 p=0.217 有意差なし	不等分散 t(11)=1.60 p=0.138 有意差なし	等分散 t(46)=2.56 p=0.014 有意差あり	不等分散 t(12)=1.18 p=0.262 有意差なし	-	-	不等分散 t(7)=-5.45 p=0.001 有意差あり
	変成岩	11	不等分散 t(10)=3.30 p=0.008 有意差あり	-	-	不等分散 t(11)=2.92 p=0.014 有意差あり	不等分散 t(10)=2.79 p=0.019 有意差あり	不等分散 t(10)=3.21 p=0.009 有意差あり	不等分散 t(11)=2.56 p=0.026 有意差あり	不等分散 t(11)=1.71 p=0.115 有意差なし	不等分散 t(11)=1.60 p=0.138 有意差なし	不等分散 t(11)=2.07 p=0.062 有意差あり	不等分散 t(12)=1.18 p=0.262 有意差なし	-	-	不等分散 t(7)=-3.71 p=0.002 有意差あり
e	火成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	堆積岩	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	変成岩	8	不等分散 t(7)=7.25 p=1.7E-4 有意差あり	-	-	不等分散 t(7)=6.94 p=2.2E-4 有意差あり	不等分散 t(7)=-6.85 p=2.4E-4 有意差あり	不等分散 t(7)=-7.18 p=1.8E-4 有意差あり	不等分散 t(8)=6.62 p=1.7E-4 有意差あり	不等分散 t(8)=5.94 p=3.46E-4 有意差あり	不等分散 t(7)=5.89 p=0.001 有意差あり	不等分散 t(7)=-6.27 p=4.2E-4 有意差あり	不等分散 t(8)=-5.45 p=0.001 有意差あり	-	-	不等分散 t(17)=-3.71 p=0.002 有意差あり

a: C_{II}, b: C_{II}~C_MC_M, c: C_M~C_LC_L, d: C_L~D,D, e: 土砂, N: データ数
 等分散: 2つのグループの分散の検定 (F検定) においてp≧0.05となり, 分散が等しいと見なしたものと
 不等分散: 2つのグループの分散の検定 (F検定) においてp<0.05となり, 分散が等しくないとして見なしたものと
 t(df): t値, df: 自由度, p: p値 (外側確立)

2.4 長期的なアンカー緊張力低下

長期的なアンカーの緊張力低下として、施工から数ヶ月から数年、数十年後の緊張力の R_{pt} と岩級区分の関係について、火成岩、堆積岩、変成岩に分けて述べる。

2.4.1 火成岩

図-2.10 および図-2.11 に火成岩の各法面の岩級区分における R_{pt} と経過時間の関係を示す。このうち、図-2.10 には 8 段階の地質条件のうち、 C_H 、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M および $C_M \sim C_L$ 級を、図-2.11 には C_L 、 $C_L \sim D$ 、 D 級および土砂の関係図を示す。また、表-2.8 に火成岩の結果についてまとめたものを示す。

図-2.10 に示す C_H 、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M および $C_M \sim C_L$ 級をみると、5 年後までの平均 R_{pt} は 90%~100% が保たれ、岩級区分での明瞭な差は見られない。20 年後以降も平均 R_{pt} は、90% もしくは 85% 以上を示す。 R_{pt} の最大値と最小値の差を見ると、5 年後までは小さいが、25 年後もしくは 35 年後においては、10 年後までに比べて大きくなることがわかる。これに対して、図-2.11 に示す C_L 、 $C_L \sim D$ 、 D 級および土砂では、経過時間とともに R_{pt} が小さくなる傾向が見られる。5 年後までは、 D 級の平均 R_{pt} は、90%~95% で、最大値と最小値の差は小さいものの、10 年後以降になると、平均 R_{pt} は全ての法面で 90% を下回り、 C_L 、 $C_L \sim D$ 、 D 級の順に小さくなるとともに、最大値と最小値の差が大きくなる。15 年~20 年後においては、 C_L 級の I-20 法面で平均 R_{pt} が 84%、 $C_L \sim D$ 級の I-18 法面で 73%、 D 級の I-12、I-17、I-19 法面でそれぞれ 70%、56%、75%、57% を示し、岩級区分の順に R_{pt} が小さくなる傾向が見られる。また、15 年~20 年後における D 級の I-12、I-17、I-19 法面では、 R_{pt} の最小値が 40% もしくは 30% を下回るものが見られ、最大値と最小値の差も大きい。特に、I-21 法面の土砂においては、約 10 年後の平均 R_{pt} が 45%、37% と、最も小さい値を示す。火成岩では、 D 級および土砂において、施工から 10 年後には、 R_{pt} が 50% を下回り、

表-1.1 に示す残存緊張力とアンカー健全度の目安において、「対策を実施」と評価されるアンカーが出現する。

本研究の対象とした旧タイプアンカーは、火成岩の3法面（I-15, I-16, I-22）のみである。これらの法面のアンカーは、いずれも $C_M \sim C_L$ 級に区分され、それぞれ施工から 25.8 年、26.9 年、37.2 年後の R_{pt} である。これらは図-2.10 において右上にプロットされ、平均で 85%～99% と高い値を示し、同じ $C_M \sim C_L$ 級に区分される新タイプアンカーの I-11 法面の 13.0 年後の平均 R_{pt} （94%）とほとんど差が見られない。I-15, I-16, I-22 法面では、湧水や地下水が認められておらず、防食性能の劣る旧タイプアンカーにあっても、 $C_M \sim C_L$ 級の比較的良好な地質条件にあるため、緊張力の大きな低下が生じず、健全性が保たれていると考えられる。

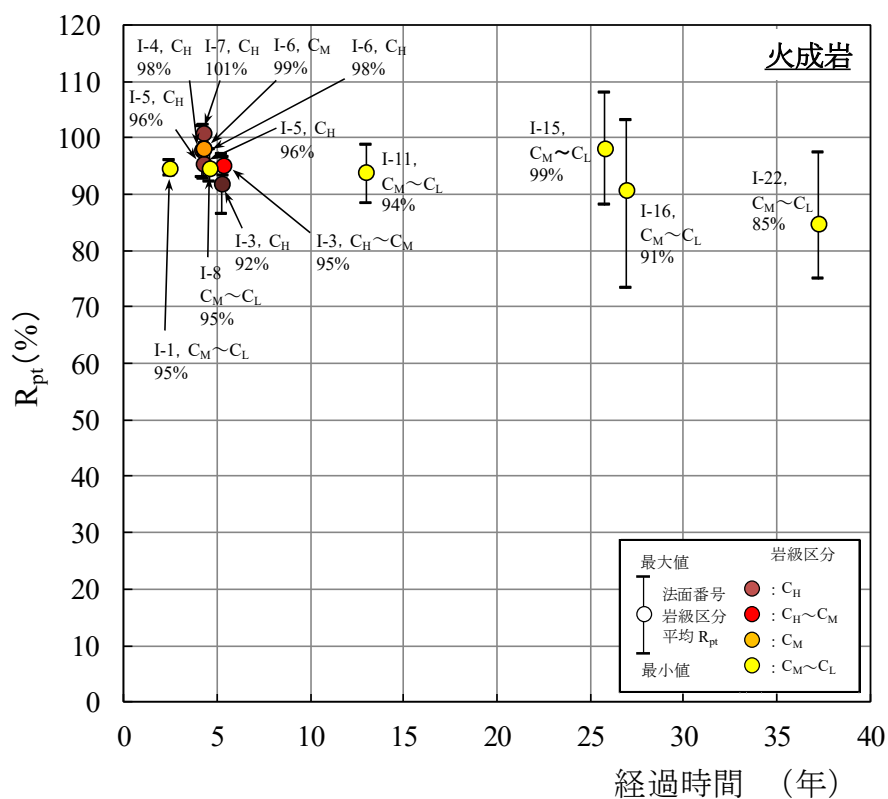


図-2.10 火成岩の経過時間と R_{pt} の関係 (その 1)

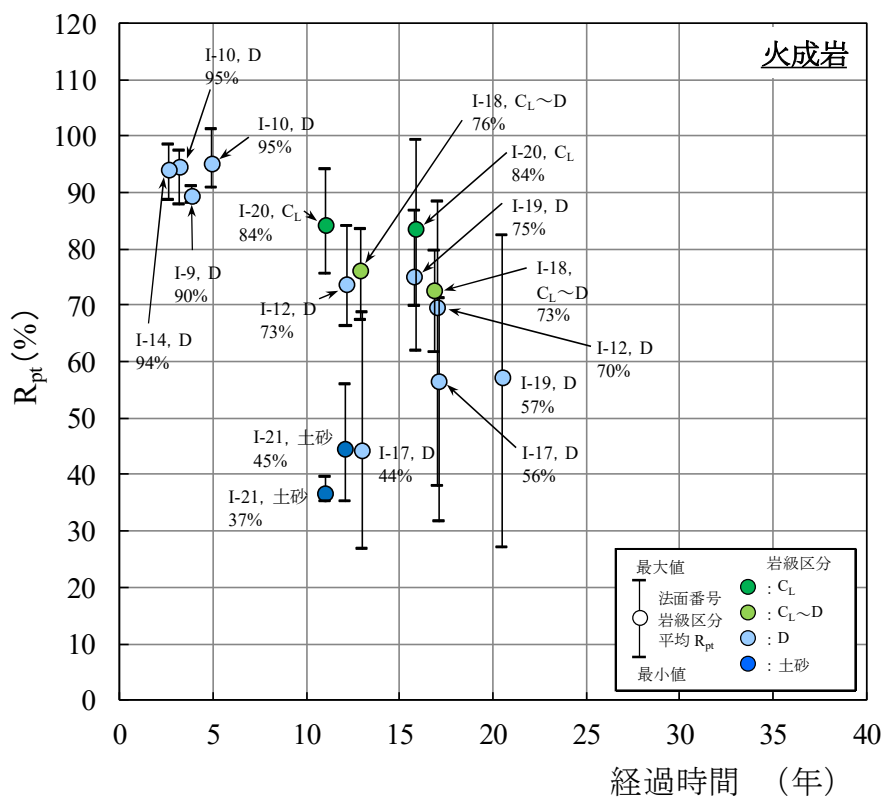


図-2.11 火成岩の経過時間と R_{pt} の関係 (その 2)

表-2.8 火成岩の数ヶ月から数十年後の R_{pt}

法面 番号	地質	T_d (kN)	P_t (kN)	自由長部 岩級区分	経過 時間 (年)	計 測 種 別	計 測 数	残存率 $R_{pt}(\%)$				
								最大	平均	最小	最大 最小 差	変動 係数 $CV_{R_{pt}}$
I-1	R-gr	181.4	181.4	$C_M \sim C_L$	2.5	LC	2	96	95	93	3	—
I-3	R-gr	850.0	850.0	C_H	5.3	LC	3	97	92	87	10	0.048
				$C_H \sim C_M$	5.3	LC	3	97	95	93	4	0.015
I-4	R-gr	335.1	335.1	C_H	4.2	LC	7	102	98	93	9	0.029
I-5	R-gr	331.1	331.1	C_H	4.3	LC	5	98	96	93	5	0.018
I-6	R-gr	174.1	174.1	C_H	4.3	LC	3	99	98	98	1	0.006
				C_M	4.3	LC	2	99	99	98	1	—
I-7	R-gr	190.0	190.0	C_H	4.3	LC	5	102	101	97	5	0.020
I-8	R-gr	650.1	650.1	$C_M \sim C_L$	4.6	LC	5	98	95	92	6	0.021
I-9	R-gr	514.8	514.8	D	3.9	LC	5	91	90	88	3	0.013
I-10	R-gr	766.8	766.8	D	4.9	LC	14	101	95	91	10	0.029
				D	3.2	LC	5	97	95	88	9	0.038
I-11	R-gr	408.1	426.0	$C_M \sim C_L$	13.0	LOT	4	99	94	88	11	0.040
I-12	N-ry	367.8	367.8	D	12.2	LOT	5	84	74	66	18	0.079
		324.7	324.7		17.0	LOT	8	88	70	38	50	0.214
I-14	R-gr	328.9	328.9	D	2.6	LC	5	99	94	89	10	0.037
I-15	R-gr	300.1	300.1	$C_M \sim C_L$	25.8	LOT	6	108	98	88	20	0.070
I-16	R-gr	94.1	94.1	$C_M \sim C_L$	26.9	LOT	5	103	91	73	30	0.120
I-17	N-ry	627.8	627.8	D	13.0	LOT	5	69	44	27	42	0.312
					17.1	LOT	5	71	56	32	39	0.241
I-18	N-ry	653.3	653.3	$C_L \sim D$	12.9	LOT	11	84	76	68	16	0.067
					16.9	LOT	13	80	73	62	18	0.061
I-19	N-ry	469.7	469.7	D	15.8	LOT	5	87	75	70	17	0.083
					20.5	LOT	5	82	57	27	55	0.342
I-20	N-ry	268.7	268.7	C_L	11.0	LOT	5	94	84	76	18	0.097
					15.9	LOT	5	99	84	62	37	0.155
I-21	N-ry	302.0	302.0	土砂	11.0	LOT	3	40	37	35	5	0.060
					12.1	LOT	5	56	45	35	21	0.155
I-22	N-ry	264.8	264.8	$C_M \sim C_L$	37.2	LOT	6	97	85	75	22	0.086

R-Gr : 領家帯 花崗岩, N-ry : 濃飛流紋岩

T_d : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力

LC : 荷重計による計測データ, LOT : リフトオフ試験による計測データ

2.4.2 堆積岩

図-2.12, 図-2.13 および図-2.14 に堆積岩の緊張力の R_{pt} と経過時間の関係を示す. このうち, 図-2.12 には 8 段階の地質条件のうち, C_H , $C_H \sim C_M$ および C_M 級を, 図-2.13 には $C_M \sim C_L$ および C_L 級を, 図-2.14 は $C_L \sim D$, D 級および土砂の関係図を示す. また, 表-2.9 に堆積岩の結果についてまとめたものを示す.

図-2.12 に示す C_H , $C_H \sim C_M$ および C_M 級をみると, 20 年後の C_H 級の S-12 法面においては, 平均 R_{pt} が 106%と, 100%を上回っているものの, 変動を伺わせる変状などは確認されていない. 本法面のアンカーは建設段階において, 定着具のセットロスや鋼材のリラクセーションを考慮し, 目標とした定着時緊張力よりも高めに定着し, その後に大きな緊張力の低下が無かったため 100%を上回っていると考えられる. $C_H \sim C_M$ 級の 10 年~20 年後の平均 R_{pt} は, おおむね 90%以上が保たれている. C_M 級は, $C_H \sim C_M$ 級に比べてやや小さいもの, 10 年~20 年後の平均 R_{pt} は 80%~90%で, 最小値でもおおむね 70%以上を示す. C_H , $C_H \sim C_M$, C_M 級では, 10 年後以降において, 緊張力低下が継続する傾向が見られない.

図-2.13 に示す $C_M \sim C_L$ および C_L 級をみると, 5 年後までは R_{pt} が 90%程度を示すものの, 5 年後以降の R_{pt} は, C_H , $C_H \sim C_M$ および C_M 級に比べて小さく, 最大値と最小値の差が大きくなる. 5 年~20 年後までの間では, いずれも平均で 57%~74%の範囲を示し, 残存緊張力とアンカー健全度の目安において, R_{pt} が 50%を下回り, 「対策を実施」と評価されるアンカーは, 一部の $C_M \sim C_L$ 級の法面に見られるのみである.

図-2.14 に示す $C_L \sim D$, D 級および土砂を見ると, 経過時間とともに R_{pt} が小さくなる傾向が見られる. 5 年後までは, 81%~92%の範囲を示し, 10 年~20 年後では, いずれも R_{pt} がさらに小さくなる傾向が見られ, 最大値と最小値の差も大きくなる. $C_L \sim D$, D 級および土砂では

15年後において、その半数が残存緊張力とアンカー健全度の目安において、 R_{pt} が50%を下回り、「対策を実施」と評価されるアンカーになる。このように、 $C_L \sim D$, D級のような風化が進行した法面では、10年後以降も緊張力低下が継続し、最大値と最小値の差が大きくなる傾向が見られる。

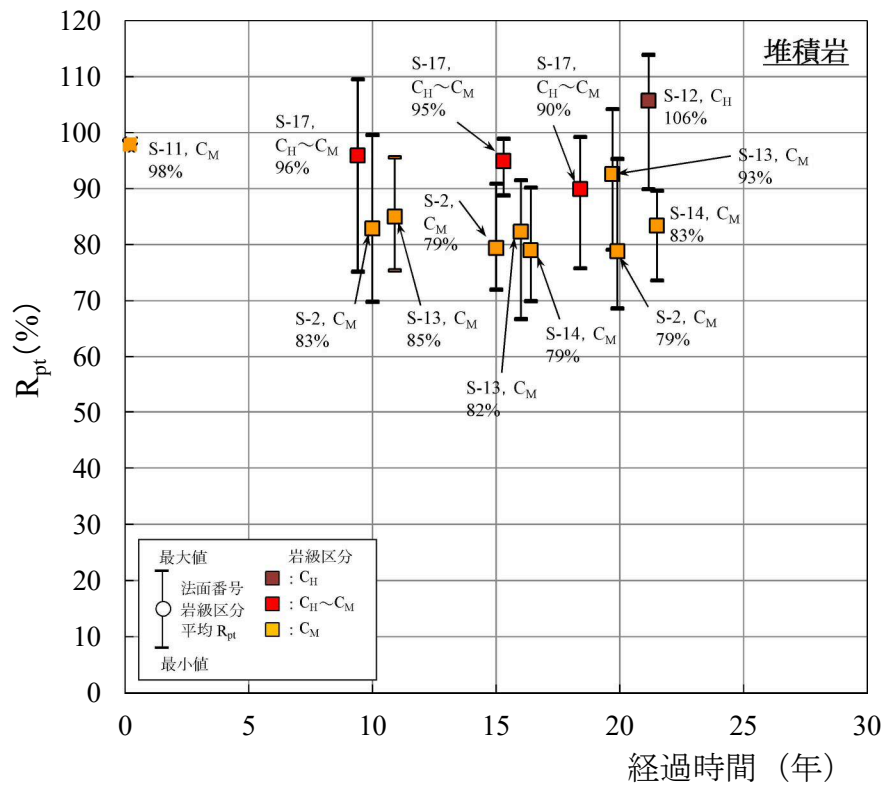


図-2.12 堆積岩の経過時間と R_{pt} の関係 (その1)

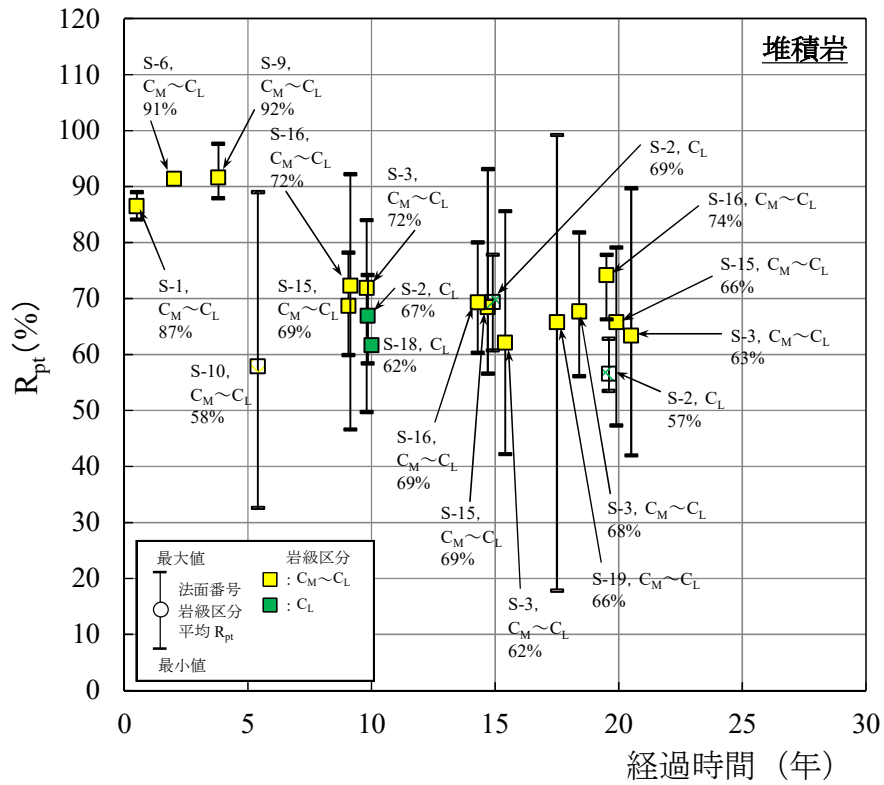


図-2.13 堆積岩の経過時間と R_{pt} の関係 (その 2)

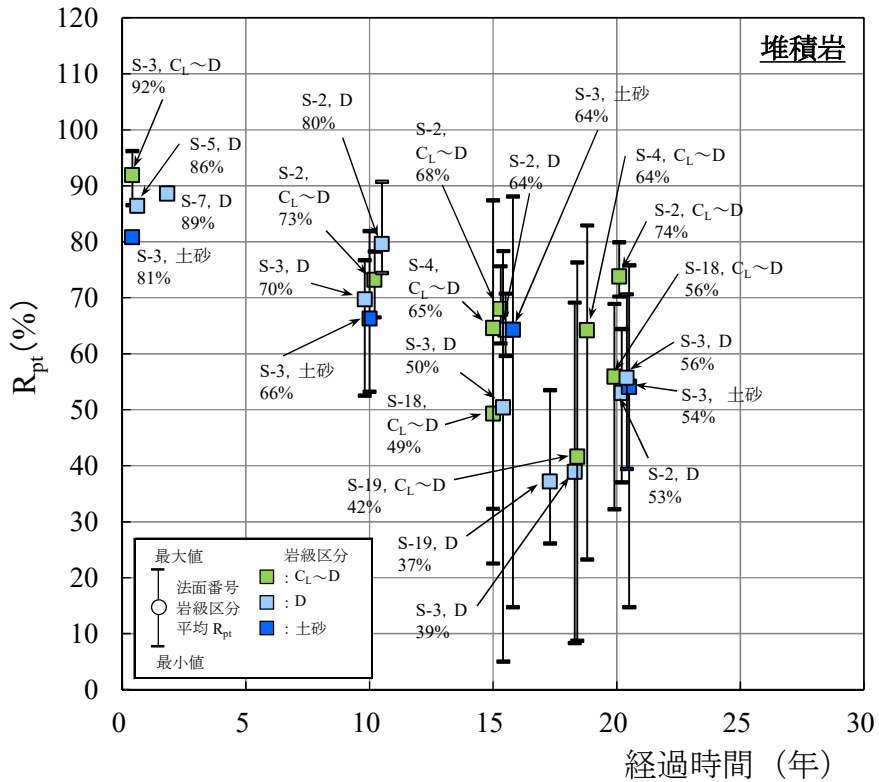


図-2.14 堆積岩の経過時間と R_{pt} の関係 (その 3)

表-2.9 堆積岩の数ヶ月から数十年後の R_{pt}

法面 番号	地質	T_a (kN)	P_t (kN)	自由長部 岩級区分	経過 時間 (年)	計 測 種 別	計 測 数	残存率 $R_{pt}(\%)$					
								最大	平均	最小	最大 最小差	変動 係数 $CV_{R_{pt}}$	
S-1	Mi	475.4	497.5	$C_M \sim C_L$	0.5	LC	6	89	87	84	5	0.019	
S-2	Mi	195.1 275.1 833.5	195.1 275.1 833.5	C_M	10.0	LOT	7	100	83	70	30	0.127	
					15.0	LOT	6	91	79	72	19	0.107	
					19.9	LOT	6	95	79	69	26	0.120	
				C_L	9.8	LOT	3	74	67	58	16	0.097	
					14.9	LOT	5	78	69	61	17	0.097	
					19.6	LOT	3	63	57	54	9	0.077	
				$C_L \sim D$	10.2	LOT	5	78	73	67	11	0.066	
					15.3	LOT	5	76	68	62	14	0.078	
					20.1	LOT	3	80	74	70	10	0.059	
				D	10.5	LOT	5	91	80	74	17	0.066	
					15.5	LOT	3	71	64	60	11	0.073	
					20.2	LOT	7	64	53	37	27	0.167	
S-3	Mi	440.0 ~ 880.6	440.0 ~ 880.6	$C_M \sim C_L$	9.8	LOT	17	84	72	50	34	0.134	
					15.4	LOT	54	86	62	42	44	0.188	
					18.4	LOT	4	82	68	56	26	0.164	
					20.5	LOT	9	90	63	42	48	0.215	
				$C_L \sim D$	0.4	LC	4	96	92	87	9	0.040	
					D	9.8	LOT	7	77	70	53	24	0.104
				15.4		LOT	32	78	50	5	73	0.376	
				18.3		LOT	7	69	39	8	61	0.423	
				20.4		LOT	4	71	56	39	32	0.258	
				土砂	0.4	LC	1	—	81	—	—	—	
					10.0	LOT	13	82	66	53	29	0.137	
					15.8	LOT	25	88	64	15	73	0.247	
					20.5	LOT	6	76	54	15	61	0.364	
S-4	Mi	323.6 804.1	323.6 804.1	$C_L \sim D$	15.0	LOT	28	87	65	23	64	0.257	
					18.8	LOT	28	83	64	23	60	0.205	
S-5	Mi	639.9	639.9	D	0.6	LC	1	—	86	—	—		
S-6	Mi	362.5	347.1	$C_M \sim C_L$	2.0	LC	1	—	91	—	—		
S-7	Mi	159.2	152.2	D	1.8	LC	1	—	89	—	—		
S-9	Sh	528.9	528.9	$C_M \sim C_L$	3.8	LOT	5	98	92	88	10	0.037	
S-10	Sh	617.1	615.2	$C_M \sim C_L$	5.4	LOT	5	89	58	33	56	0.412	
S-11	Ya	940.0	897.5	C_M	0.2	LC	6	99	98	97	2	0.007	
S-12	Mi	198.0	198.0	C_H	21.2	LOT	11	114	106	90	24	0.062	
S-13	Mi	266.7	266.7	C_M	10.9	LOT	5	96	85	75	21	0.080	
					16.0	LOT	4	92	82	67	25	0.116	
					19.7	LOT	4	104	93	79	25	0.100	
S-14	Mi	316.0	316.0	C_M	16.4	LOT	4	90	79	70	20	0.094	
					21.5	LOT	4	90	83	74	16	0.073	
S-15	Mi	449.1 505.0	449.1 505.0	$C_M \sim C_L$	9.1	LOT	11	78	69	60	18	0.091	
					14.7	LOT	12	93	69	57	36	0.127	
					19.9	LOT	12	79	66	47	32	0.128	
S-16	Mi	414.8	414.8	$C_M \sim C_L$	9.1	LOT	12	92	72	47	45	0.155	
					14.3	LOT	10	80	69	60	20	0.082	
					19.5	LOT	10	78	74	66	12	0.042	
S-17	Mi	256.9	256.9	$C_H \sim C_M$	9.4	LOT	9	110	96	75	35	0.123	
					15.3	LOT	5	99	95	89	10	0.038	
					18.4	LOT	5	99	90	76	23	0.089	
S-18	Mi	337.7	337.7	C_L	10.0	LOT	2	62	62	61	1	—	
					$C_L \sim D$	15.0	LOT	3	64	49	32	32	0.262
						19.9	LOT	4	69	56	32	37	0.252
S-19	Mi	205.9 331.5 732.6	205.9 331.5 732.6	$C_M \sim C_L$	17.5	LOT	54	99	66	18	81	0.314	
					$C_L \sim D$	18.4	LOT	8	76	42	9	67	0.763
					D	17.3	LOT	15	54	37	26	28	0.166

Mi: 美濃帯 砂岩・頁岩, Sh: 四万十層層 砂岩・頁岩, Ya: 野洲川層群 砂岩・頁岩

T_a : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力

LC: 荷重計による計測データ, LOT: リフトオフ試験による計測データ

2.4.3 変成岩

図-2.15 および図-2.16 に変成岩の緊張力の R_{pt} と経過時間の関係を示す。このうち、図-2.15 には 8 段階の地質条件のうち、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M および $C_M \sim C_L$ 級を、図-2.16 には $C_L \sim D$ 、 D 級および土砂の関係図を示す。また、表-2.10 に変成岩の結果についてまとめたものを示す。

図-2.15 に示す $C_H \sim C_M$ 、 C_M 、 $C_M \sim C_L$ 級を見ると、5 年後までは、平均 R_{pt} はおおむね 90%以上が保たれる。5 年～15 年後では、 $C_H \sim C_M$ 級の M-7 法面、 $C_M \sim C_L$ 級の M-5 法面で 90%を下回るものの、最大値と最小値の差は小さい。

図-2.16 に示す $C_L \sim D$ 、 D 級および土砂を見ると、 $C_H \sim C_M$ 、 C_M および $C_M \sim C_L$ 級と比べて、時間の経過とともに R_{pt} が小さく、最大値と最小値の差が大きくなる傾向が見られる。5 年後までの土砂を見ると、M-3 法面の 0.1 年後（約 40 日後）の平均 R_{pt} は 68%に、M-6 法面の 3.2 年後の平均 R_{pt} は、65%にまで小さくなり、最大値と最小値の差は大きい。M-7 法面の $C_L \sim D$ 、 D 級においても 5 年後において 60%～50%程度にまで小さくなり、最大値と最小値の差も大きくなっている。5 年～20 年後を見ると、 $C_L \sim D$ 級よりも D 級で R_{pt} が小さい傾向が見られる。特に、 D 級の M-7 および M-10 法面では、15 年後において R_{pt} の最小値が 30%を下回っている。変成岩の D 級は、火成岩、堆積岩と同様に、施工から 10 年もしくは 15 年が経過すると、 R_{pt} が 50%を下回り、残存緊張力とアンカー健全度の目安において、「対策を実施」と評価されるアンカーが出現する。

M-7 法面においては、5.7 年および 14.2 年後にリフトオフ試験による残存引張り力の測定を行った。その結果、 $C_H \sim C_M$ 級では、5.7 年および 14.2 年後のいずれにおいても平均 R_{pt} は 87%を示すのに対し、 $C_L \sim D$ 級では、平均 R_{pt} が 5.7 年後で 61%、 D 級では 54%、14.2 年後においては、それぞれ 56%、38%を示しており、 $C_L \sim D$ 、 D 級では、5.7 年後と 14.2 年後の 8.5 年の間に緊張力がさらに低下した結果が得られ

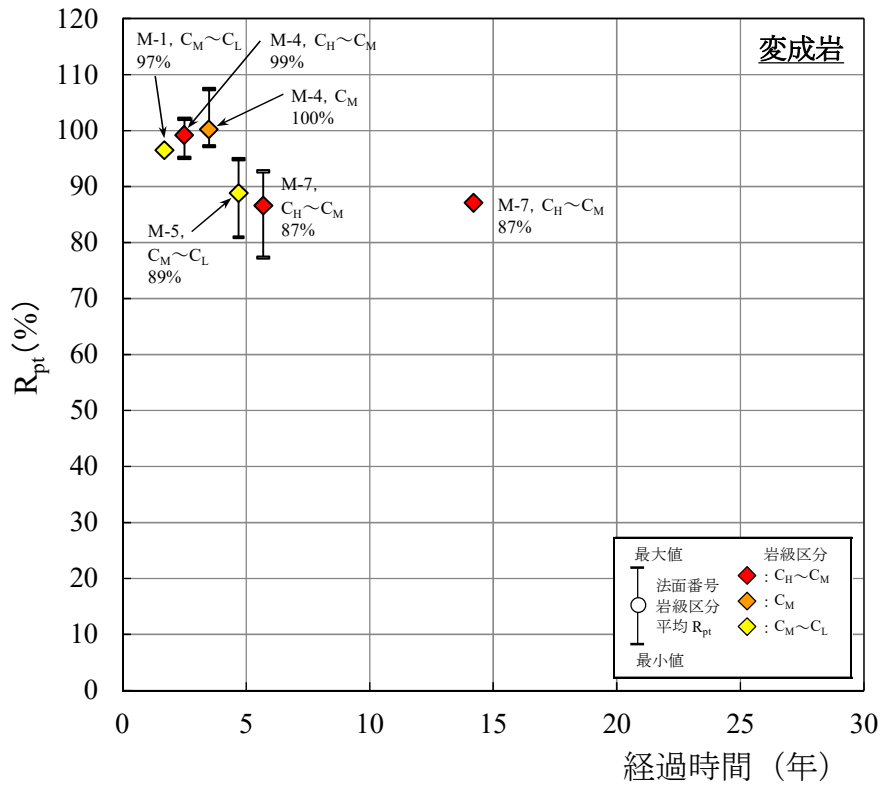


図-2.15 変成岩の経過時間と R_{pt} の関係 (その 1)

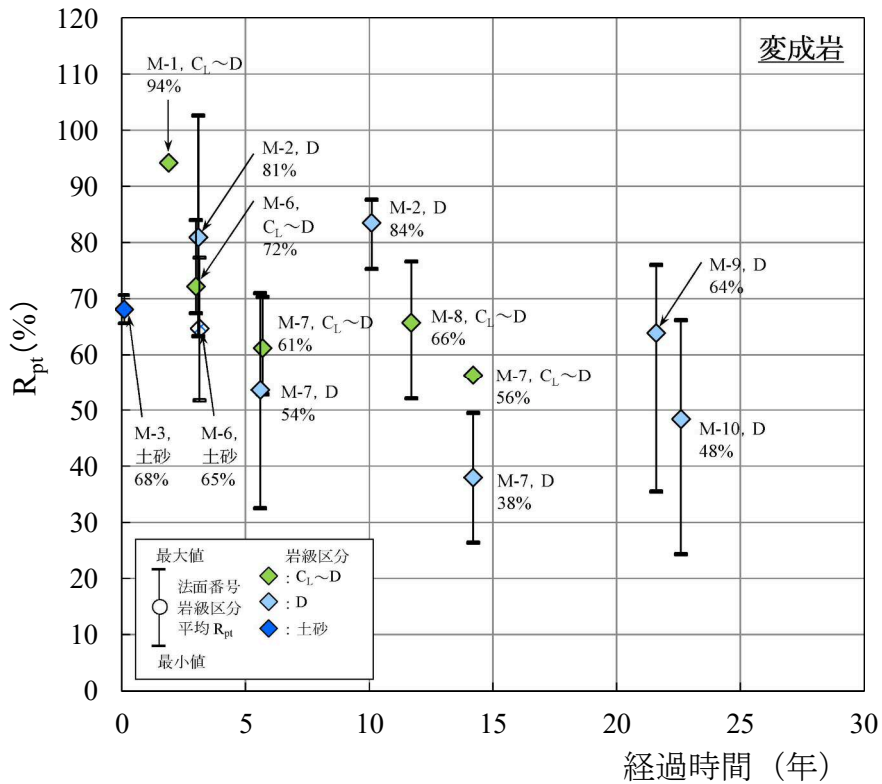


図-2.16 変成岩の経過時間と R_{pt} の関係 (その 2)

た．この結果から，アンカーの緊張力低下は， $C_L \sim D$ ， D 級のような背面の地盤の風化が進行している場合，施工から10年～15年後の長期にわたって継続することが考えられる．

表-2.10 変成岩の数ヶ月から数十年後の R_{pt}

法面 番号	地質	T_d (kN)	P_t (kN)	自由長部 岩級区分	経過 時間 (年)	計 測 種 別	計 測 数	残存率 $R_{pt}(\%)$				
								最大	平均	最小	最大 最小差	変動 係数 $CV_{R_{pt}}$
M-1	Sa	639.7	447.8	$C_M \sim C_L$	1.7	LC	3	97	97	96	1	0.005
				$C_L \sim D$	1.9	LC	6	95	94	94	1	0.005
M-2	Sa	242.7	194.0	D	3.1	LOT	14	103	81	63	40	0.133
				D	10.1	LOT	3	88	84	75	13	0.070
M-3	Sa	686.4	483.9	土砂	0.1	LC	2	71	68	66	5	—
M-4	Ryo	201.0	210.0	$C_H \sim C_M$	2.5	LC	5	102	99	95	7	0.033
				C_M	3.5	LC	4	107	100	97	10	0.042
M-5	Ryo	872.8	920.4	$C_M \sim C_L$	4.7	LC	24	95	89	81	14	0.039
M-6	Ryo	795.4	830.1	$C_L \sim D$	3.0	LC	4	84	72	67	17	0.095
				土砂	3.2	LC	6	77	65	52	25	0.123
M-7	Sa	286.0	286.0	$C_H \sim C_M$	5.7	LOT	5	93	87	77	16	0.060
					14.2	LOT	1	—	87	—	—	—
				$C_L \sim D$	5.7	LOT	11	70	61	53	17	0.108
					14.2	LOT	2	57	56	56	1	—
				D	5.6	LOT	11	71	54	33	38	0.237
					14.2	LOT	2	50	38	26	24	—
M-8	Sa	362.3	362.3	$C_L \sim D$	11.7	LOT	5	77	66	52	25	0.122
M-9	Sa	219.6	219.6	D	21.6	LOT	5	76	64	36	40	0.252
M-10	Sa	291.6	291.6	D	22.6	LOT	5	66	48	24	42	0.323

Sa：三波川変成帯結晶片岩， Ry：領家変成岩片麻岩

T_d ：設計アンカー力， P_t ：定着時緊張力

LC：荷重計による計測データ， LOT：リフトオフ試験による計測データ

2.4.4 岩種による長期的な低下量の比較

長期的な R_{pt} について、火成岩、堆積岩および変成岩の岩種による比較を行ってみる。 R_{pt} の比較においては、30日後の各岩種の比較と同様に、地質条件を a から e の5段階に区分し、経過時間は、30日以降の数ヶ月～5年後まで、5年～15年後、15年～25年後の3期間で比較を行った。表-2.11に火成岩、堆積岩、変成岩の各岩種の区分 a から e におけるデータ数と、平均 R_{pt} 、最大値と最小値の差および変動係数 ($CV_{R_{pt}}$) を、図-2.17から図-2.19に各岩種の岩級区分と3期間の平均 R_{pt} の関係、図-2.20から図-2.22に各岩種の岩級区分と3期間の最大値と最小値の差と変動係数の関係を示す。

表-2.11 経過時間と岩種別の平均 R_{pt} ・最大最小差・変動係数

経過時間	区分	火成岩				堆積岩				変成岩			
		N	平均 $R_{pt}(\%)$	最大最小差	変動係数 $CV_{R_{pt}}$	N	平均 $R_{pt}(\%)$	最大最小差	変動係数 $CV_{R_{pt}}$	N	平均 $R_{pt}(\%)$	最大最小差	変動係数 $CV_{R_{pt}}$
5年 まで	a	22	98	10	0.028	0	—	—	—	0	—	—	—
	b	0	—	—	—	6	98	2	0.007	9	100	12	0.038
	c	7	95	6	0.019	12	89	14	0.040	27	90	16	0.045
	d	29	94	14	0.038	6	90	10	0.041	24	83	39	0.137
	e	0	—	—	—	1	81	—	—	8	66	26	0.109
計		58	—	—	—	25	—	—	—	68	—	—	—
5年 ～ 15年	a	3	92	11	0.048	0	—	—	—	0	—	—	—
	b	3	95	3	0.014	21	89	40	0.135	6	87	15	0.054
	c	7	89	32	0.092	69	69	61	0.156	0	—	—	—
	d	21	68	57	0.230	17	74	38	0.102	34	60	61	0.227
	e	8	42	21	0.164	13	66	29	0.137	0	—	—	—
計		42	—	—	—	120	—	—	—	40	—	—	—
15年 ～ 25年	a	0	—	—	—	11	106	24	0.062	0	—	—	—
	b	0	—	—	—	38	85	38	0.119	0	—	—	—
	c	22	90	46	0.126	146	65	81	0.240	0	—	—	—
	d	31	68	61	0.204	147	55	82	0.347	10	56	52	0.314
	e	0	—	—	—	31	62	73	0.276	0	—	—	—
計		53	—	—	—	373	—	—	—	10	—	—	—

a : Ch, b : Ch～Cm,Cm, c : Cm～Cl,Cl, d : Cl～D,D, e : 土砂

N : データ数

また、各岩種の数ヶ月～5年後まで、5年～15年後、15年～25年後の3期間における、区分aからeの平均 R_{pt} について、**図-2.9**に示す流れにより分散分析（F検定）ならびに平均値の差の検定（t検定）を行った。F検定およびt検定の有意水準は、両側5%とした。

まず、**図-2.17**に示す各岩種の岩級区分と5年後までの R_{pt} の関係を見てみる。いずれの岩種とも5年後までの R_{pt} は、区分aからeへと、岩級区分の順に小さくなる。区分aおよびbでは、いずれの岩種においても R_{pt} は100%に近い値を示す。区分cでは、火成岩は95%を示すものの、堆積岩および変成岩では90%を下回る。区分dでは、火成岩で94%、堆積岩で90%、変成岩で83%を示す。区分eでは、堆積岩で81%、変成岩で66%となる。このように岩種毎にみると、火成岩では、区分aからdにおいて R_{pt} が90%以上を示し、緊張力は大きく低下しないが、堆積岩では区分dで90%、変成岩では83%と、低下量が大きくなる傾向が見られる。

図-2.18に示す5年～15年後の R_{pt} の関係においても、区分aからeへと岩級区分の順に小さくなる傾向が見られる。火成岩の区分aは92%と、5年後までに比べて6%小さい値となる。区分bでは火成岩、堆積岩、変成岩で、それぞれ95%、89%、87%を示し、堆積岩および変成岩においては、5年後までに比べて、10%程度低下する傾向を示す。区分cの火成岩は89%を示すが、堆積岩は69%と小さな値を示す。区分dでは、火成岩、堆積岩、変成岩で、それぞれ68%、74%、60%と、80%を下回り、さらにeでは、火成岩で42%、堆積岩で66%と低い値を示す。

図-2.19に示す15年～25年後では、区分aの堆積岩のS-12法面において106%を示している。S-12法面では、変動を伺わせる法面変状などは確認されておらず、建設段階において、定着具のセットロスや鋼材のリラクセーションを考慮し、目標とした定着時緊張力よりも高めに定着し、その後に大きな緊張力の低下が無かったため100%を上

回っていると考えられる。区分 b の堆積岩では 85%を示し、5 年～15 年後の 89%に比べて、4%低下している。区分 c では、火成岩で 90%、堆積岩で 65%を示す。区分 d では、火成岩で 68%と、5 年～15 年後と変化がないが、堆積岩で 55%、変成岩で 56%と、5 年～15 年後に比べて、それぞれ 19%、4%低下している。区分 e の堆積岩においては 62%を示し、5 年～15 年後に比べて、4%低下している。

次に、経過時間による R_{pt} の最大値と最小値の差と変動係数($CV_{R_{pt}}$) の関係を見てみる。図-2.20 から図-2.22 に示す 5 年後まで、5 年～15 年後まで、15 年～25 年後の R_{pt} の最大値と最小値の差と変動係数の関係では、両者に正の関係が見られる。5 年後まで、5 年～15 年後、15 年～25 年後の 3 期間を比較すると、最大値と最小値の差および $CV_{R_{pt}}$ のどちらも、時間の経過とともに大きくなることがわかる。特に、区分 c, d, e においてその傾向が顕著である。5 年～15 年後の火成岩および堆積岩における区分 d と e を比較すると、e での最大値と最小値の差および $CV_{R_{pt}}$ が小さくなっている。これは、区分 e は背面の地盤が一様に風化して土砂化し、緊張力低下が大きく、最大値と最小値の差が小さくなるためと考えられる。15 年後～25 年後においては、特に区分 c, d, e が最大値と最小値の差、 $CV_{R_{pt}}$ ともに高い領域にプロットされ、これは、風化が進んだ法面では、時間の経過とともに緊張力が低下し、同一の法面においても個々のアンカーの低下量が不均一になることで、最大値と最小値の差が大きくなるためと考えられる。

このように、岩種および岩級区分と R_{pt} の比較、 R_{pt} の最大値と最小値の差と変動係数 ($CV_{R_{pt}}$) の関係についての検討を行った結果、アンカーの緊張力低下は、5 年後以降も継続し、 $C_L \sim D$, C_L , D 級および土砂で大きくなる。また、緊張力低下は、15 年～25 年後においては、落ち着きを見せながらも、 $CV_{R_{pt}}$ が大きくなる傾向が見られる。岩種毎の長期的な緊張力低下は、総じて見ると、火成岩に比べて堆積岩と変成岩で大きい傾向があり、5 年～10 年後においては、火成岩の場合、 D

級および土砂，堆積岩の場合， $C_L \sim D$ ， D 級および土砂に施工されたアンカーで，残存緊張力とアンカー健全度の目安において，「対策を実施」と評価されるアンカーが出現し，15 年～25 年後においては，さらに R_{pt} が 50%を下回るものが増加する．変成岩の長期的な緊張力低下については，15 年～25 年後のデータが少ないものの， D 級の平均 R_{pt} は 50%を下回り，堆積岩と類似した傾向が見られることから，変成岩は堆積岩と同様の長期的な低下傾向を示すと考えられる．

次に，3 期間の R_{pt} の平均値の各組み合わせにおける t 検定の結果について見てみる．表-2.11 から表-2.13 に，5 年後まで，5 年～15 年後，15 年～25 年後の平均 R_{pt} の各組み合わせによる t 検定の結果を示す．3 期間とも全体に，地質条件の良い a もしくは b と，地質条件の悪い d ， e との間で有意な差がある傾向が見られる．

表-2.11 に示す数ヶ月～5 年後までは，各岩種の区分の組み合わせの多くで有意な差がある結果が得られた．地質条件の良い方から見ると，火成岩の区分 a と堆積岩および変成岩の b では，平均 R_{pt} に有意な差がない結果が見られた．5 年後までのデータでは，火成岩の a の平均 R_{pt} は 98%，最大値と最小値の差は 10%であり，堆積岩の 98%および 2%，変成岩の 100%および 12%と，いずれも緊張力低下が小さく R_{pt} の示す範囲が類似しているためと考えられる．各岩種の区分 a および b と，区分 c ， d および e の間では，有意な差がある結果が多く見られた．これに対し火成岩の c と d に有意な差が見られない結果となったのは，平均 R_{pt} はそれぞれ 95%，94%，最大値と最小値の差は 6%と 14%であり，火成岩の区分 d の R_{pt} の範囲が広く火成岩の c の範囲に重なるためと考えられる．堆積岩の c と変成岩の c は，平均 R_{pt} はそれぞれ 89%，90%，最大値と最小値の差は 14%，16%であり，両者の R_{pt} の範囲が重なるためと考えられる．堆積岩および変成岩の区分 c と堆積岩 d に有意な差が見られないのは，堆積岩の c と d ，変成岩の c の平均 R_{pt} はそれぞれ 89%，90%，90%，最大値と最小値の差は 14%，10%，

16%と、それらが示す範囲が重なっているためと考えられる。

表-2.12 に示す 5 年～15 年後では、各岩種の区分の組み合わせの多くで有意な差がある結果が得られた。地質条件の良い方から見ると、火成岩の区分 a と各岩種の b, 火成岩の c では有意な差がない結果となった。火成岩の a の平均 R_{pt} は 92%とやや小さく、最大値と最小値の差が 11%と大きいこと、堆積岩および変成岩の b の平均 R_{pt} は 89%, 87%を示し、最大値と最小値の差は 40%, 15%と幅広い範囲を示すためと考えられる。火成岩の a と、堆積岩の c ならびに各岩種の c および d の平均 R_{pt} には有意な差がある結果となった。各岩種の区分 b と火成岩の c に有意な差がないのは、火成岩の c の平均 R_{pt} は 89%であり、各岩種の b の 87%～95%と類似し、最大値と最小値の差は 32%と幅広い範囲を示すためと考えられる。堆積岩の c と、火成岩および堆積岩の d に有意な差がないのは、堆積岩の c の平均 R_{pt} は 69%, 最大値と最小値の差は 61%を示し、火成岩および堆積岩の d の平均 R_{pt} はそれぞれ 68%, 74%, 最大値と最小値の差は 57%, 38%を示す。堆積岩の c の R_{pt} の示す範囲が広いため、有意な差がない結果となったと考えられる。これは、火成岩の d と堆積岩の d および e, 変成岩の d と堆積岩の e の間でも有意な差がないのは、平均 R_{pt} が似た値を示すことに加えて、どちらか一方もしくは、どちらとも最大値と最小値の差が大きいためと考えられる。

表-2.13 に示す 15 年～25 年後では特に、堆積岩と変成岩の地質条件が悪い区分 c, d, e の組み合わせにおいて、平均 R_{pt} に有意な差がない結果が見られた。これは、堆積岩と変成岩が類似した緊張力低下と R_{pt} のばらつきを示し、施工から 15 年～25 年後も緊張力低下は継続しており、最大値と最小値の差が広がっていくことで R_{pt} の示す範囲が幅広くなり、有意な差がない結果を示すと考えられる。また、火成岩の c と堆積岩の b, 火成岩の d と堆積岩の c の異なる区分において有意な差がない結果が得られた。火成岩では、堆積岩、変成岩に比べて

地質条件が悪くても緊張力低下が小さく，堆積岩および変成岩の地質条件と比べ1段階良い区分と類似した R_{pt} を示すためと考えられる。

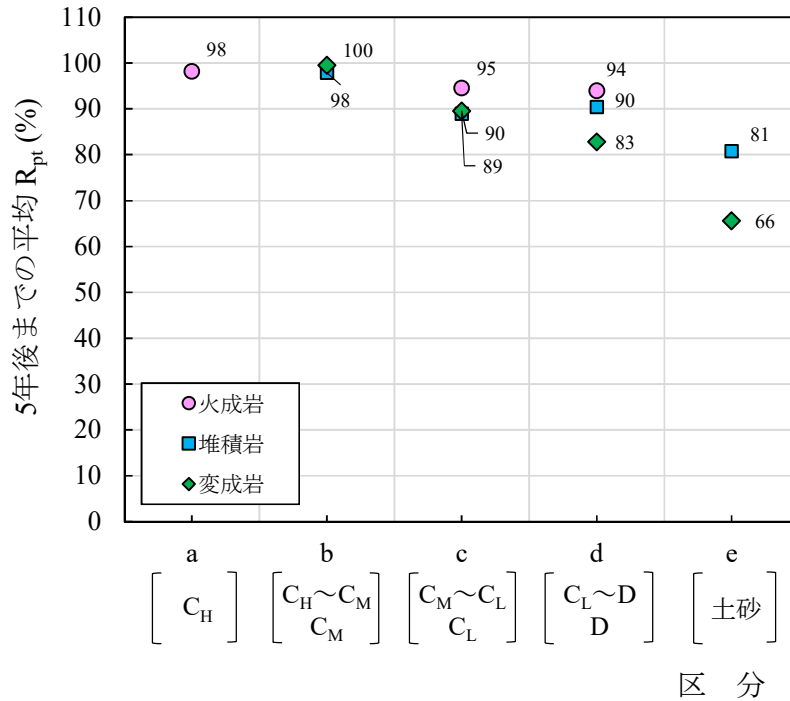


図-2.17 各岩種の岩級区分と5年後までの R_{pt} の関係

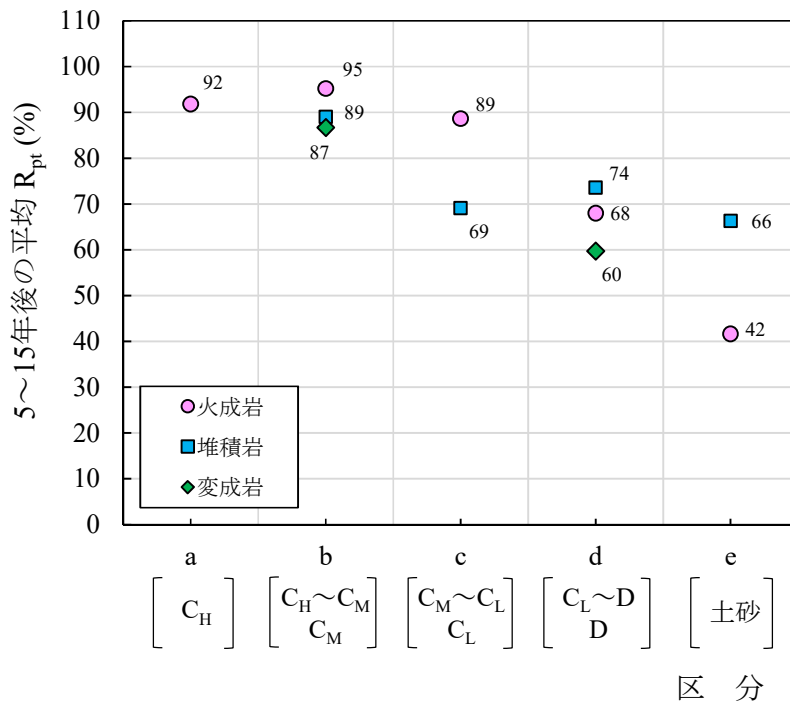


図-2.18 各岩種の岩級区分と5から15年後の R_{pt} の関係

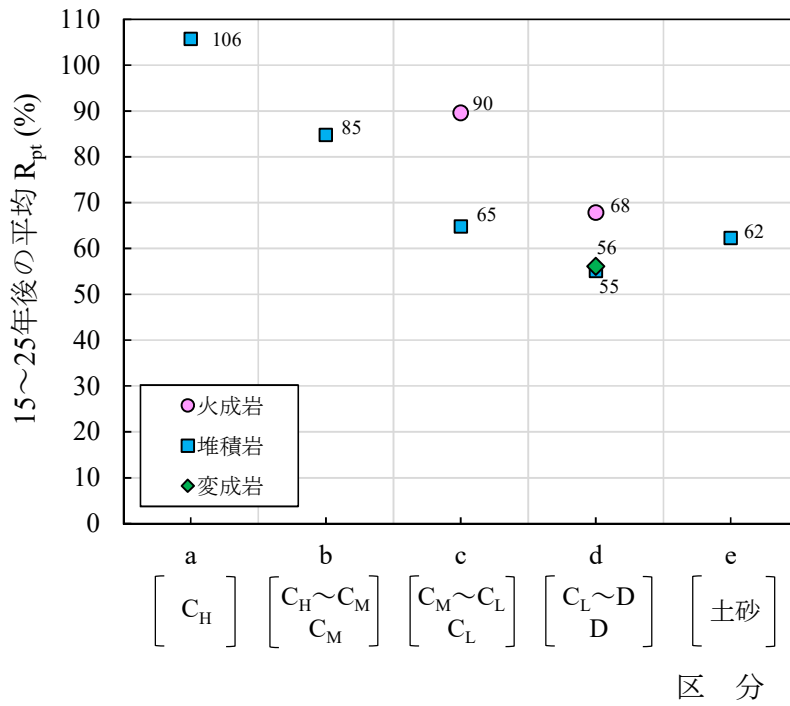


図-2.19 各岩種の岩級区分と15から25年後のR_{pt}の関係

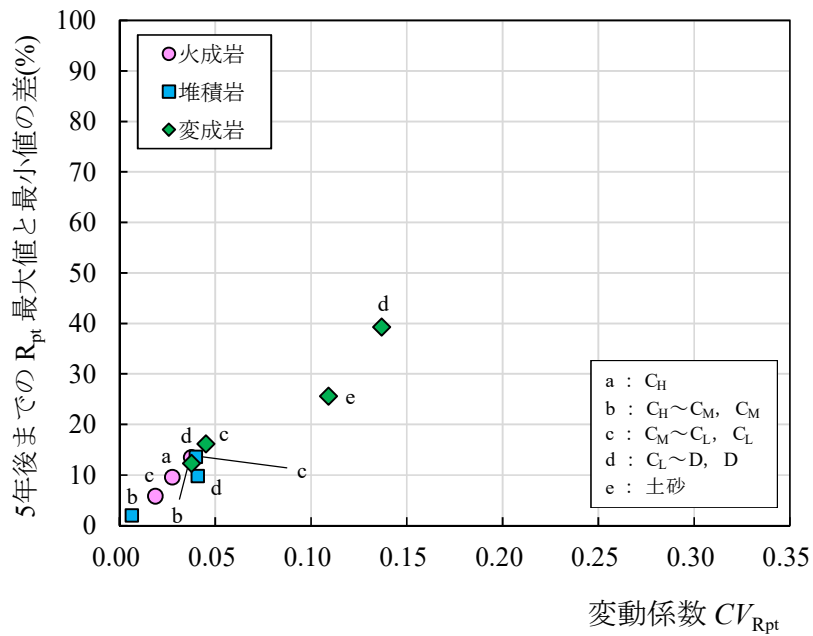


図-2.20 5年後までのR_{pt}の最大最小差と変動係数の関係

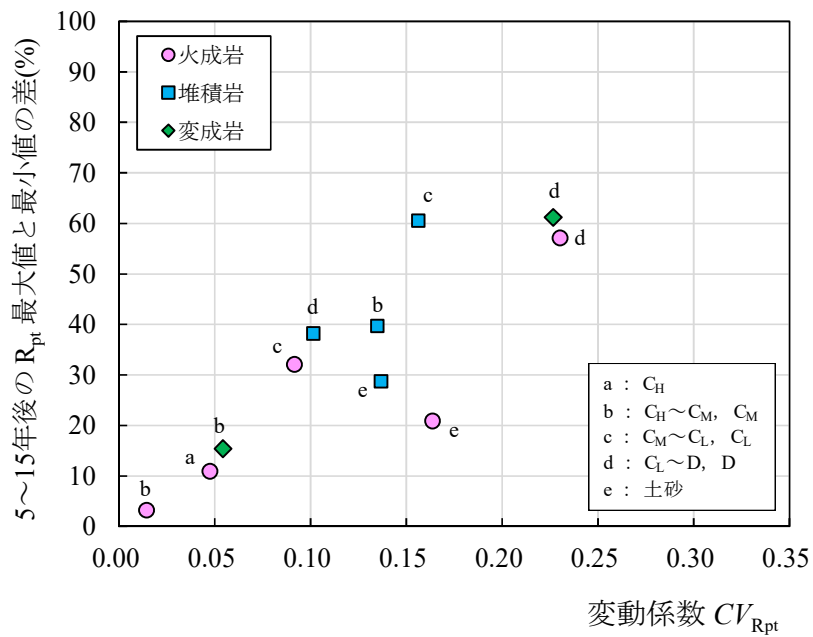


図 -2.21 5 から 15 年後の R_{pt} の最大最小差と変動係数の関係

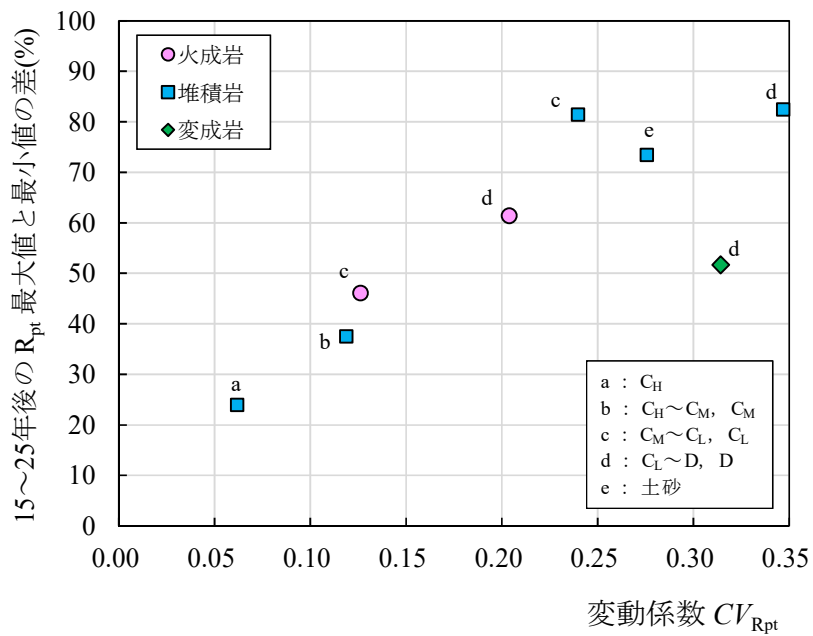


図 -2.22 15 から 25 年後の R_{pt} の最大最小差と変動係数の関係

表-2.11 5年後までの平均 R_{pt} の有意差検定 (t 検定) の結果

区分	岩種	a			b			c			d			e			
		火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	
	N	22	0	0	0	6	9	7	12	27	29	6	24	0	1	8	
a	火成岩	22	-	-	-	不等分散 t(26)=0.48 p=0.639 有意差なし	等分散 t(29)=-1.13 p=0.267 有意差なし	等分散 t(27)=3.19 p=0.004 有意差あり	等分散 t(32)=8.16 p=2.5E-9 有意差あり	等分散 t(47)=8.31 p=8.7E-11 有意差あり	等分散 t(49)=4.50 p=3.4E-5 有意差あり	等分散 t(26)=5.52 p=8.6E-6 有意差あり	不等分散 t(26)=6.32 p=1.1E-6 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(8)=11.32 p=2.5E-6 有意差あり
	堆積岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b	火成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	堆積岩	6	不等分散 t(26)=0.48 p=0.639 有意差なし	-	-	-	不等分散 t(9)=-1.23 p=0.235 有意差なし	不等分散 t(8)=4.22 p=0.003 有意差あり	不等分散 t(13)=7.98 p=2.3E-6 有意差あり	不等分散 t(31)=9.76 p=5.7E-11 有意差あり	不等分散 t(33)=5.37 p=6.2E-6 有意差あり	不等分散 t(5)=4.45 p=0.007 有意差あり	不等分散 t(24)=6.33 p=1.5E-6 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(7)=11.88 p=5.9E-9 有意差あり
	変成岩	9	等分散 t(29)=-1.13 p=0.267 有意差なし	-	-	-	不等分散 t(9)=-1.23 p=0.235 有意差なし	等分散 t(14)=3.06 p=0.008 有意差あり	等分散 t(19)=6.28 p=3.0E-7 有意差あり	等分散 t(34)=6.34 p=3.0E-7 有意差あり	等分散 t(36)=4.00 p=2.9E-4 有意差あり	等分散 t(13)=4.36 p=7.7E-4 有意差あり	不等分散 t(31)=6.20 p=6.9E-9 有意差あり	-	-	-	等分散 t(15)=11.72 p=5.9E-9 有意差あり
c	火成岩	7	等分散 t(27)=3.19 p=0.004 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(8)=4.22 p=0.003 有意差あり	等分散 t(14)=3.06 p=0.008 有意差あり	等分散 t(17)=3.66 p=0.002 有意差あり	等分散 t(32)=3.07 p=0.004 有意差あり	等分散 t(34)=0.43 p=0.672 有意差なし	等分散 t(11)=2.44 p=0.033 有意差あり	不等分散 t(27)=4.76 p=5.7E-5 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(8)=10.36 p=6.5E-6 有意差あり
	堆積岩	12	等分散 t(32)=8.16 p=2.5E-9 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(13)=7.98 p=2.3E-6 有意差あり	等分散 t(19)=6.28 p=5.1E-6 有意差あり	等分散 t(17)=3.66 p=0.002 有意差あり	等分散 t(37)=-0.43 p=0.669 有意差なし	等分散 t(39)=-3.98 p=2.9E-4 有意差あり	等分散 t(16)=-0.73 p=0.479 有意差なし	不等分散 t(31)=2.40 p=0.023 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(9)=8.06 p=2.1E-5 有意差あり
	変成岩	27	等分散 t(47)=8.31 p=8.7E-11 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(31)=9.76 p=5.7E-11 有意差あり	等分散 t(34)=6.34 p=3.0E-7 有意差あり	等分散 t(32)=3.07 p=0.004 有意差あり	等分散 t(37)=-0.43 p=0.669 有意差なし	等分散 t(54)=-4.22 p=9.4E-5 有意差あり	等分散 t(31)=-0.42 p=0.675 有意差なし	不等分散 t(28)=2.73 p=0.011 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(8)=8.53 p=2.7E-5 有意差あり
d	火成岩	29	等分散 t(49)=4.50 p=3.4E-5 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(33)=5.37 p=6.2E-6 有意差あり	等分散 t(36)=4.00 p=2.9E-4 有意差あり	等分散 t(34)=0.43 p=0.672 有意差なし	等分散 t(39)=-3.98 p=2.9E-4 有意差あり	等分散 t(54)=-4.22 p=9.4E-5 有意差あり	等分散 t(33)=2.17 p=0.037 有意差あり	不等分散 t(27)=4.55 p=1.0E-4 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(8)=10.20 p=7.3E-6 有意差あり
	堆積岩	6	等分散 t(47)=8.31 p=8.6E-6 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(5)=4.45 p=0.007 有意差あり	等分散 t(13)=4.36 p=7.7E-4 有意差あり	等分散 t(11)=2.44 p=0.033 有意差あり	等分散 t(16)=-0.73 p=0.479 有意差なし	等分散 t(31)=-0.42 p=0.675 有意差なし	等分散 t(33)=2.17 p=0.037 有意差あり	不等分散 t(24)=2.34 p=0.014 有意差あり	-	-	-	等分散 t(12)=7.19 p=1.1E-5 有意差あり
	変成岩	24	不等分散 t(26)=6.32 p=1.1E-6 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(24)=6.33 p=1.5E-6 有意差あり	不等分散 t(31)=6.20 p=6.9E-9 有意差あり	不等分散 t(27)=4.76 p=5.7E-5 有意差あり	不等分散 t(31)=2.40 p=0.023 有意差あり	不等分散 t(28)=2.73 p=0.011 有意差あり	不等分散 t(24)=3.34 p=1.0E-4 有意差あり	不等分散 t(24)=2.34 p=0.014 有意差あり	-	-	-	等分散 t(30)=3.91 p=4.9E-4 有意差あり
e	火成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	堆積岩	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	変成岩	8	不等分散 t(8)=11.32 p=2.5E-6 有意差あり	-	-	-	不等分散 t(7)=11.88 p=6.8E-6 有意差あり	等分散 t(15)=11.72 p=5.9E-9 有意差あり	不等分散 t(8)=10.36 p=6.5E-6 有意差あり	不等分散 t(9)=8.06 p=2.1E-5 有意差あり	不等分散 t(8)=8.53 p=2.7E-5 有意差あり	不等分散 t(8)=10.20 p=7.3E-6 有意差あり	等分散 t(12)=7.19 p=1.1E-5 有意差あり	等分散 t(30)=3.91 p=4.9E-4 有意差あり	-	-	-

a: C_{II}, b: C_{II}~C_MC_M, c: C_M~C_LC_L, d: C_L~D.D, e: 土砂, N: データ数
 等分散: 2つのグループの分散の検定 (F検定) においてp ≥ 0.05となり, 分散が等しいと見なしたものの
 不等分散: 2つのグループの分散の検定 (F検定) においてp < 0.05となり, 分散が等しくないと見なしたものの
 t(df): t値, df: 自由度, p: p値 (外側確立)

表-2.12 5年～15年後の平均 R_{pt} の有意差検定 (t検定) 結果

区分	岩種	a			b			c			d			e		
		火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩
a	火成岩	3	0	0	3	21	6	7	69	0	21	17	34	8	13	0
	堆積岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b	火成岩	3	-	-	-	不等分散 t(22)=2.18 p=0.040 有意差あり	等分散 t(7)=1.39 p=0.208 有意差なし	等分散 t(10)=1.29 p=0.227 有意差なし	不等分散 t(13)=16.57 p=4.0E-10 有意差あり	-	不等分散 t(22)=7.48 p=1.8E-7 有意差あり	等分散 t(18)=4.73 p=1.7E-4 有意差あり	不等分散 t(35)=3.98 p=3.4E-4 有意差あり	等分散 t(9)=10.75 p=2.0E-6 有意差あり	等分散 t(14)=4.44 p=0.001 有意差あり	-
	堆積岩	21	-	-	-	-	等分散 t(25)=0.44 p=0.662 有意差なし	等分散 t(28)=0.09 p=0.931 有意差なし	不等分散 t(96)=7.22 p=1.2E-10 有意差あり	-	等分散 t(40)=4.75 p=2.6E-5 有意差あり	等分散 t(36)=4.47 p=7.5E-5 有意差あり	等分散 t(53)=7.98 p=6.9E-15 有意差あり	等分散 t(27)=10.16 p=1.0E-10 有意差あり	等分散 t(32)=5.68 p=2.7E-4 有意差あり	-
	変成岩	6	-	-	-	等分散 t(7)=1.39 p=0.208 有意差なし	等分散 t(25)=0.44 p=0.662 有意差なし	等分散 t(13)=-0.48 p=0.636 有意差なし	等分散 t(81)=3.91 p=1.9E-4 有意差あり	-	不等分散 t(24)=4.56 p=1.3E-4 有意差あり	等分散 t(21)=3.82 p=0.001 有意差あり	不等分散 t(20)=8.53 p=4.3E-8 有意差あり	等分散 t(12)=12.88 p=2.2E-8 有意差あり	等分散 t(17)=4.91 p=1.3E-4 有意差あり	-
c	火成岩	7	-	-	-	等分散 t(10)=1.29 p=0.227 有意差なし	等分散 t(13)=0.09 p=0.931 有意差なし	等分散 t(13)=-0.48 p=0.636 有意差なし	等分散 t(84)=5.18 p=1.5E-6 有意差あり	-	等分散 t(28)=3.60 p=0.001 有意差あり	等分散 t(24)=4.52 p=1.4E-4 有意差あり	等分散 t(41)=5.97 p=4.7E-7 有意差あり	等分散 t(15)=12.06 p=4.1E-9 有意差あり	等分散 t(20)=5.64 p=1.6E-5 有意差あり	-
	堆積岩	69	-	-	-	不等分散 t(13)=16.57 p=4.0E-10 有意差あり	不等分散 t(96)=7.22 p=1.2E-10 有意差あり	等分散 t(81)=3.91 p=1.9E-4 有意差あり	等分散 t(84)=5.18 p=1.5E-6 有意差あり	-	不等分散 t(25)=0.30 p=0.769 有意差なし	等分散 t(92)=-1.63 p=0.107 有意差なし	等分散 t(109)=3.87 p=1.8E-4 有意差あり	等分散 t(83)=6.98 p=6.7E-10 有意差あり	等分散 t(88)=0.89 p=0.378 有意差なし	-
	変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d	火成岩	21	-	-	-	不等分散 t(22)=7.48 p=1.8E-7 有意差あり	等分散 t(40)=4.75 p=2.6E-5 有意差あり	不等分散 t(24)=4.56 p=1.3E-4 有意差あり	等分散 t(28)=3.60 p=0.001 有意差あり	不等分散 t(30)=-0.30 p=0.769 有意差なし	-	不等分散 t(30)=-1.14 p=0.167 有意差なし	等分散 t(53)=2.04 p=0.046 有意差あり	不等分散 t(26)=6.07 p=2.0E-6 有意差あり	等分散 t(32)=0.35 p=0.727 有意差なし	-
	堆積岩	17	-	-	-	等分散 t(18)=4.73 p=1.7E-4 有意差あり	等分散 t(36)=4.47 p=7.5E-5 有意差あり	等分散 t(21)=3.82 p=0.001 有意差あり	等分散 t(24)=4.52 p=1.4E-4 有意差あり	等分散 t(92)=-1.63 p=0.107 有意差なし	-	不等分散 t(30)=-1.14 p=0.167 有意差なし	不等分散 t(48)=4.64 p=2.8E-5 有意差あり	等分散 t(23)=9.86 p=1.0E-9 有意差あり	等分散 t(28)=2.35 p=0.026 有意差あり	-
	変成岩	34	-	-	-	不等分散 t(31)=13.93 p=6.9E-15 有意差あり	等分散 t(53)=7.98 p=1.2E-10 有意差あり	不等分散 t(20)=8.53 p=4.3E-8 有意差あり	等分散 t(41)=3.97 p=4.7E-7 有意差あり	等分散 t(109)=3.87 p=1.8E-4 有意差あり	-	等分散 t(53)=2.04 p=0.046 有意差あり	不等分散 t(48)=4.64 p=2.8E-5 有意差あり	等分散 t(40)=3.59 p=0.001 有意差あり	等分散 t(45)=-1.58 p=0.120 有意差なし	-
e	火成岩	8	-	-	-	等分散 t(9)=10.75 p=2.0E-6 有意差あり	等分散 t(27)=10.16 p=1.0E-10 有意差あり	等分散 t(12)=12.88 p=2.2E-8 有意差あり	等分散 t(15)=12.06 p=4.1E-9 有意差あり	等分散 t(83)=6.98 p=6.7E-10 有意差あり	-	不等分散 t(26)=6.07 p=2.0E-6 有意差あり	等分散 t(23)=9.86 p=1.0E-9 有意差あり	等分散 t(40)=3.59 p=0.001 有意差あり	等分散 t(19)=-6.31 p=4.7E-6 有意差あり	-
	堆積岩	13	-	-	-	等分散 t(14)=5.17 p=1.5E-4 有意差あり	等分散 t(32)=5.68 p=2.7E-6 有意差あり	等分散 t(17)=4.91 p=1.3E-4 有意差あり	等分散 t(20)=5.64 p=1.6E-5 有意差あり	等分散 t(88)=0.89 p=0.378 有意差なし	-	等分散 t(32)=0.35 p=0.727 有意差なし	等分散 t(28)=2.35 p=0.026 有意差あり	等分散 t(45)=-1.58 p=0.120 有意差なし	等分散 t(19)=-6.31 p=4.7E-6 有意差あり	-
	変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

a: C_H, b: C_H~C_MC_M, c: C_M~C_LC_L, d: C_L~D,D, e: 土砂, N: データ数
 等分散: 2つのグループの分散の検定 (F検定) において p ≥ 0.05 となり, 分散が等しいと見なしたものの
 不等分散: 2つのグループの分散の検定 (F検定) において p < 0.05 となり, 分散が等しくないと思われたものの
 t(df): t値, df: 自由度, p: p値 (外側確立)

表-2.13 15年～25年後の平均 R_{pt} の有意差検定 (t検定) の結果

区分	岩種	a			b			c			d			e			
		火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	火成岩	堆積岩	変成岩	
a	N	0	11	0	0	38	0	22	146	0	31	147	10	0	31	0	
	火成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	堆積岩	11	-	-	-	等分散 $t(47)=6.34$ $p=8.2E-8$ 有意差あり	-	等分散 $t(31)=4.22$ $p=2.0E-4$ 有意差あり	不等分散 $t(155)=8.62$ $p=7.3E-15$ 有意差あり	-	不等分散 $t(36)=12.08$ $p=3.2E-14$ 有意差あり	不等分散 $t(25)=19.43$ $p=1.3E-16$ 有意差あり	不等分散 $t(11)=7.94$ $p=7.0E-6$ 有意差あり	-	不等分散 $t(39)=11.55$ $p=3.7E-14$ 有意差あり	-	
変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
b	火成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	堆積岩	38	-	等分散 $t(47)=6.34$ $p=8.2E-8$ 有意差あり	-	-	等分散 $t(58)=-1.67$ $p=0.101$ 有意差なし	不等分散 $t(87)=9.55$ $p=3.3E-15$ 有意差あり	-	等分散 $t(72)=5.94$ $p=9.6E-9$ 有意差あり	不等分散 $t(112)=12.56$ $p=5.1E-24$ 有意差あり	不等分散 $t(10)=4.69$ $p=8.6E-4$ 有意差あり	-	不等分散 $t(46)=6.35$ $p=8.6E-8$ 有意差あり	-		
	変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
c	火成岩	22	-	等分散 $t(31)=4.22$ $p=2.0E-4$ 有意差あり	-	等分散 $t(58)=-1.67$ $p=0.101$ 有意差なし	-	等分散 $t(166)=7.18$ $p=2.3E-11$ 有意差あり	-	等分散 $t(56)=6.07$ $p=1.6E-7$ 有意差あり	不等分散 $t(41)=11.76$ $p=1.0E-13$ 有意差あり	等分散 $t(30)=6.24$ $p=7.2E-7$ 有意差あり	-	等分散 $t(51)=6.40$ $p=4.9E-8$ 有意差あり	-		
	堆積岩	146	-	不等分散 $t(155)=8.62$ $p=7.3E-15$ 有意差あり	-	不等分散 $t(87)=9.55$ $p=3.3E-15$ 有意差あり	等分散 $t(166)=7.18$ $p=2.3E-11$ 有意差あり	-	等分散 $t(180)=-1.12$ $p=0.265$ 有意差なし	不等分散 $t(280)=4.72$ $p=3.7E-6$ 有意差あり	等分散 $t(154)=1.67$ $p=0.097$ 有意差なし	-	等分散 $t(175)=0.78$ $p=0.435$ 有意差なし	-			
	変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
d	火成岩	31	-	不等分散 $t(36)=12.08$ $p=3.2E-14$ 有意差あり	-	等分散 $t(72)=5.94$ $p=9.6E-9$ 有意差あり	等分散 $t(56)=6.07$ $p=1.6E-7$ 有意差あり	等分散 $t(180)=-1.12$ $p=0.265$ 有意差なし	-	不等分散 $t(71)=4.53$ $p=2.3E-5$ 有意差あり	等分散 $t(44)=2.18$ $p=0.034$ 有意差あり	-	-	-			
	堆積岩	147	-	不等分散 $t(25)=19.43$ $p=1.3E-16$ 有意差あり	-	不等分散 $t(41)=11.76$ $p=5.1E-24$ 有意差あり	不等分散 $t(41)=11.76$ $p=5.1E-24$ 有意差あり	不等分散 $t(280)=4.72$ $p=3.7E-6$ 有意差あり	-	不等分散 $t(71)=4.53$ $p=2.3E-5$ 有意差あり	等分散 $t(155)=-0.17$ $p=0.870$ 有意差なし	-	等分散 $t(176)=-1.92$ $p=0.057$ 有意差なし	-			
	変成岩	10	-	不等分散 $t(11)=7.94$ $p=7.0E-6$ 有意差あり	-	不等分散 $t(10)=4.69$ $p=8.6E-4$ 有意差あり	等分散 $t(30)=6.24$ $p=7.2E-7$ 有意差あり	等分散 $t(154)=1.67$ $p=0.097$ 有意差なし	等分散 $t(44)=2.18$ $p=0.034$ 有意差あり	等分散 $t(155)=-0.17$ $p=0.870$ 有意差なし	-	-	等分散 $t(39)=-0.95$ $p=0.347$ 有意差なし	-			
e	火成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	堆積岩	31	-	不等分散 $t(39)=11.55$ $p=3.7E-14$ 有意差あり	-	不等分散 $t(46)=6.35$ $p=8.6E-8$ 有意差あり	等分散 $t(51)=6.40$ $p=4.9E-8$ 有意差あり	等分散 $t(175)=0.78$ $p=0.435$ 有意差なし	等分散 $t(65)=1.47$ $p=0.147$ 有意差なし	等分散 $t(176)=-1.92$ $p=0.057$ 有意差なし	等分散 $t(39)=-0.95$ $p=0.347$ 有意差なし	-	-	-			
	変成岩	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

a: C_{II}, b: C_{II}~C_MC_M, c: C_M~C_LC_L, d: C_L~D.D, e: 土砂, N: データ数
 等分散: 2つのグループの分散の検定 (F検定) において $p \geq 0.05$ となり, 分散が等しいと見なしたもの
 不等分散: 2つのグループの分散の検定 (F検定) において $p < 0.05$ となり, 分散が等しくないとして見なしたもの
 $t(df)$: t値, df: 自由度, p: p値 (外側確立)

2.5 アンカー施工条件の影響

本検討に用いたアンカーは、全て摩擦型アンカー^{28), 29)}である。摩擦型アンカーのうち、引張り材とグラウトとの付着抵抗により耐荷体に引張り応力が生じる引張型、耐荷体に圧縮応力が生じる圧縮型、複数の耐荷体により圧縮応力を分散させる荷重分散型¹⁵⁾のようなアンカータイプ、独立受圧板や法枠工の受圧構造物の違い、あるいは同一法面においてもアンカー自由長の違いなどにより、緊張力の低下量が異なる可能性がある。そこで、アンカー自由長(l_f)の長短に差があり、アンカータイプおよび受圧構造物に違いがある2法面(I-18, S-4)を対象に、アンカー自由長と R_{pt} の関係について同一の岩級区分で比較するとともに、引張型と荷重分散型のアンカータイプおよび受圧構造物の違いによる緊張力低下への影響を検討してみる。

表-2.14 に比較した2法面のアンカーの施工条件および平均 R_{pt} と R_{pt} の変動係数を示す。また、図-2.23 に2法面のアンカー自由長の R_{pt} の関係を、アンカータイプ、受圧構造物に分けて示す。このうちI-18法面は、火成岩の $C_L \sim D$ 級に区分され、アンカータイプは荷重分散型、受圧構造物は独立受圧板である。本法面のアンカー自由長は、短いもので4.5m、長いもので13.0m、アンカー体長(l_a)は全て7.0mであり、施工から約17年後の R_{pt} をプロットしたものである。S-4法面は、堆積岩の $C_L \sim D$ 級に区分され、アンカータイプは引張型、受圧構造物は法枠工および独立受圧板である。本法面のアンカー自由長は、短いもので6.0m、長いもので28.0m、アンカー体長(l_a)は全て6.0mであり、施工から約19年後の R_{pt} をプロットしたものである。図中には各法面の平均 R_{pt} を点線で示すとともに、S-4法面については、法枠工と独立受圧板の異なる受圧構造物に分けて平均 R_{pt} の点線を示している。

まず、アンカー自由長と R_{pt} の関係を見ると、各法面の R_{pt} は、それぞれの平均 R_{pt} の上下でばらつきながらプロットされ、I-18, S-4法面ともに l_f と R_{pt} の間に正もしくは負の関係は見られない。次に、アン

カータイプについて見ると，I-18法面の荷重分散型の R_{pt} は 62%～80%，S-4法面の引張型の R_{pt} は 45%～83%と重なってプロットされ，両者に明瞭な差は見られない．なお，火成岩の I-18法面の平均 R_{pt} が，堆積岩の S-4法面に比べて高いのは，火成岩は堆積岩に比べて緊張力低下が小さいためと考えられる．最後に，受圧構造物について見ると，同一法面に法枠工と独立受圧板がある S-4法面では，法枠工の R_{pt} は 45%～83%，独立受圧板の R_{pt} は 48%～77%のおおむね同じ範囲内ではらついてプロットされ，両者に明瞭な差は見られない．表-2.15に2法面の施工条件の組み合わせによる平均 R_{pt} の有意差検定（t検定）の結果を示す．t検定の有意水準は，これまでと同様に両側 5%とした．S-4法面の引張型，法枠工と I-18法面の荷重分散型，独立受圧板において有意な差がある結果となった．これは，火成岩は堆積岩に比べて，同じ岩級区分においては，緊張力低下が小さい傾向があり，I-18法面の平均 R_{pt} は3条件の中で最も高く，最大値と最小値の差は小さい値を示すためと考えられる．

検討対象とした2法面においては，アンカー自由長（ l_f ）と R_{pt} に明瞭な関係は見られず，アンカー自由長の差が長期的な緊張力低下に影響を与えない可能性が考えられた．また，アンカータイプ，受圧構造物の違いについても， R_{pt} とそれらの間に明瞭な関係は見られなかった．前述したように，特に C_L～D，D級のような風化が進行した法面では，緊張力低下は10年後以降も継続し，最大値と最小値の差やばらつきが大きくなる傾向が見られる．このため，緊張力低下はアンカータイプや受圧構造物などの施工条件よりも地質条件に依存していると考えられる．検討に用いた法面は，圧縮型のアンカーが2箇所と少なく，引張型で独立受圧板を受圧構造物とするアンカーが多かった．このため今後は，種々のアンカータイプ，受圧構造物のデータをより多く収集，蓄積したうえで，さらなる検討を加える必要があると考えられる．

表-2.14 2法面の施工条件と平均 R_{pt}

岩種	法面番号	岩級区分	施工条件			データ数 (N)	平均 R_{pt} (%)	最大最小差	変動係数 $CV_{R_{pt}}$
			自由長 (m)	アンカータイプ	受圧構造物				
堆積岩	S-4	C _L ~D	4.5~13.0	引張型	法枠工	5	60	29	0.169
		C _L ~D	6.0~23.0	引張型	独立受圧板	18	67	38	0.154
火成岩	I-18	C _L ~D	20.0~28.0	荷重分散型	独立受圧板	13	73	18	0.061

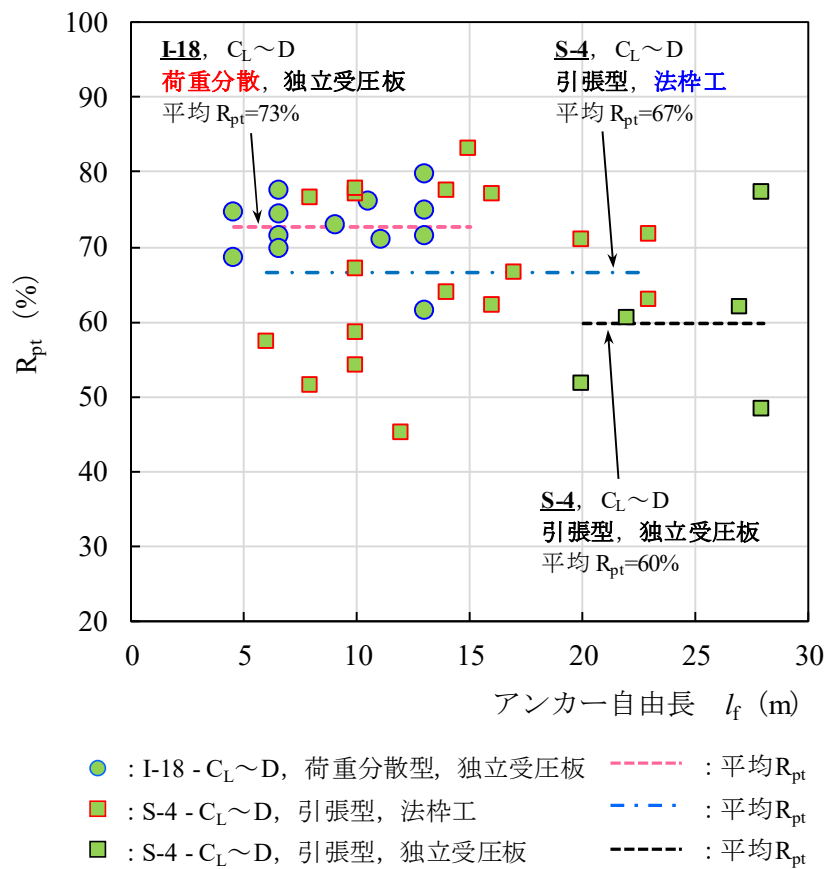


図-2.23 2法面のアンカー自由長と R_{pt} の関係

表-2.15 施工条件による平均 R_{pt} の有意差検定 (t 検定) の結果

法 面	S-4		I-18		
	岩級区分	$C_L \sim D$		$C_L \sim D$	
		施工条件	引張型 独立受圧板	引張型 法枠工	荷重分散 独立受圧板
S-4	$C_L \sim D$	引張型 独立受圧板		等分散 $t(21)=-1.25, p=0.73$ 有意差なし	不等分散 $t(5)=-2.46, p=0.06$ 有意差なし
		引張型 法枠工	等分散 $t(21)=-1.25, p=0.73$ 有意差なし		不等分散 $t(25)=-2.17, p=0.04$ 有意差あり
I-18		荷重分散 独立受圧板	不等分散 $t(5)=-2.46, p=0.06$ 有意差なし	不等分散 $t(25)=-2.17, p=0.04$ 有意差あり	

2.6 地下水の影響

アンカーの緊張力低下や R_{pt} のばらつきが生じる条件として、地盤内の地下水の影響が考えられる。ここでは、施工後 15 年～25 年までの長期的な R_{pt} の変化と地下水の関係について検討を行ってみる。

表-2.16 に火成岩、堆積岩、変成岩の各岩種の法面における地下水の有無と、区分 a から e の平均 R_{pt} および R_{pt} の変動係数を示す。また、図-2.24 に地下水の有無による各岩種の岩級区分の平均 R_{pt} と変動係数 ($CV_{R_{pt}}$) の関係を示す。いずれの条件においても、区分 a から d で平均 R_{pt} は小さくなり、 $CV_{R_{pt}}$ は大きくなる負の関係が見られる。このうち、平均 R_{pt} が 80%以上の領域では、地下水有り と 地下水無し とともに、 $CV_{R_{pt}}$ は小さく、両者が重なってプロットされるのに対して、平均 R_{pt} が 70%以下の領域では、地下水有りの区分 c, d, e は、 $CV_{R_{pt}}$ が 0.25 程度以上の領域にプロットされ、地下水無しの区分 c, d は $CV_{R_{pt}}$ が 0.25 程度以下の領域にプロットされ、両者に差が見られることがわかる。地質条件が良い区分 a (C_H 級), b ($C_H \sim C_M, C_M$ 級) では、地下水の有無が、 R_{pt} のばらつきに与える影響は小さいのに対して、地質条件が悪

い区分 c ($C_M \sim C_L$, C_L 級), d ($C_L \sim D$, D 級) および e (土砂) では, 地下水が有りの場合, 無しに比べて R_{pt} のばらつきが大きくなる傾向が見られた. 地質条件が悪い地盤では, 地下水の存在とその変化 (降雨時の上昇と無降雨時の下降) による影響を受けるため, R_{pt} のばらつきが大きくなる可能性が考えられる.

表-2.16 地下水の有無と各岩種の平均 R_{pt} と変動係数

地下水の有無	岩種	法面番号	自由長部の岩級区分	区分	データ数	平均 $R_{pt}(\%)$	変動係数 $CV_{R_{pt}}$
有り	火成岩	I-17	D	d	5	56	0.241
	堆積岩	S-17	$C_H \sim C_M$	b	10	92	0.072
		S-3, 19	$C_M \sim C_L, C_L$	c	121	64	0.258
		S-3, 4, 19	$C_L \sim D, D$	d	122	54	0.371
		S-3	土砂	e	31	62	0.276
	変成岩	M-9, 10	$C_L \sim D, D$	d	10	56	0.314
無し	火成岩	I-15, 16, 20, 22	$C_M \sim C_L, C_L$	c	22	90	0.126
		I-12, 19	D	d	18	68	0.241
	堆積岩	S-12	C_H	a	11	106	0.062
		S-2, 13, 14	C_M	b	28	82	0.118
		S-2, 15, 16	$C_M \sim C_L, C_L$	c	25	68	0.126
		S-2, 18	$C_L \sim D, D$	d	25	60	0.206

a : C_H , b : $C_H \sim C_M, C_M$, c : $C_M \sim C_L, C_L$, d : $C_L \sim D, D$, e : 土砂

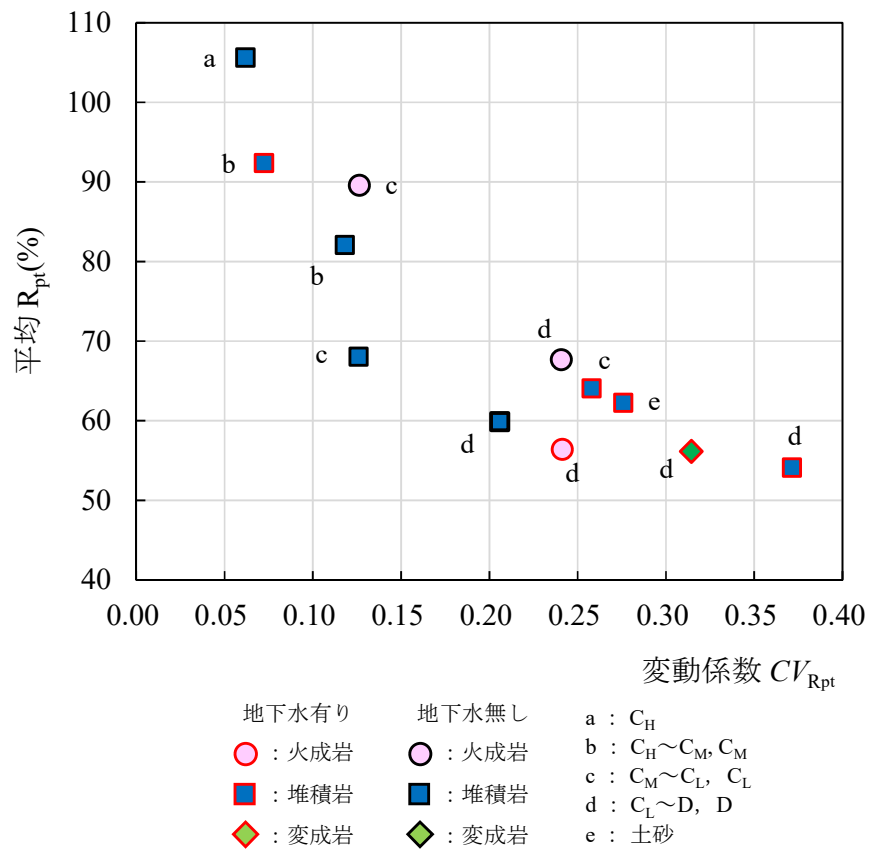


図-2.24 地下水の有無による平均 R_{pt} と変動係数の関係

2.7 まとめ

本章においては、地表面の変状や動態観測に変位が見られない、安定していると評価される 51 箇所の法面を対象に、時間経過に伴うアンカー緊張力低下について、アンカー自由長部に分布する地盤の地質条件を C_H , $C_H \sim C_M$, C_M , $C_M \sim C_L$, C_L , $C_L \sim D$, D 級ならびに崩積土、表土のような未固結地盤を含む「土砂」の 8 段階に区分し、火成岩、堆積岩、変成岩の岩種において、施工から 30 日後の初期的、数ヶ月から最大で 40 年後の長期的な緊張力の残存率 (R_{pt}) と地質条件、施工条件および地下水の有無の関連性について検討を行った。その結果、以下の事項を明らかにすることができた。

- (1) アンカーの緊張力低下は、初期的にも長期的にも、アンカーが施工された法面の地質条件（岩級区分）に関係し、 C_H , $C_H \sim C_M$, C_M , $C_M \sim C_L$, C_L , $C_L \sim D$, D 級、土砂へと地質条件が悪くなるにしたがって大きくなる。また、緊張力低下は、施工から 30 日後の初期的なものよりも、それ以降の長期的な期間において大きい。
- (2) 施工から 30 日後の初期的な緊張力低下は、火成岩の D 級、堆積岩の D 級および土砂、変成岩の $C_L \sim D$ 級および土砂で大きく、 R_{pt} が 90%を下回るアンカーが出現するとともにばらつきが大きくなる。このような傾向は、変成岩で顕著である。
- (3) 長期的な緊張力低下については、施工から 20 年後においても、火成岩、堆積岩、変成岩ともに、 C_H , $C_H \sim C_M$, C_M 級では、平均 R_{pt} でおおむね 90%以上の健全な状態が保持される。
- (4) 火成岩の D 級および土砂、堆積岩および $C_L \sim D$, D 級および土砂は、施工から 10 年～20 年後には R_{pt} が 50%を下回り、残存緊張力とアンカー健全度の目安において「対策を実施」と評価されるアンカーが出現する。このような傾向は、火成岩に比べて堆積岩、変成岩で顕著である。

- (5) 地質条件が $C_L \sim D$, D 級および土砂のような風化が進んだ法面では, 緊張力低下は施工から 5 年後以降の 10 年後, 20 年後も継続し, R_{pt} のばらつきは大きくなっていく傾向が見られる.
- (6) 同一の法面における同一の岩級区分において, 長期的な緊張力低下とアンカー自由長 (l_f) との関係を検討した結果, 両者に明瞭な関係は見られず, 緊張力低下にアンカー自由長の影響は見られない可能性が考えられる.
- (7) 地下水の有無と緊張力低下の関係について検討した結果, 地質条件が $C_M \sim C_L$, C_L , $C_L \sim D$, D 級および土砂の法面において地下水が存在する場合には, 地下水が存在しない場合に比べて, R_{pt} のばらつきが大きくなる傾向が見られる.

第3章 アンカー荷重計と変位観測機器の関係

3.1 はじめに

現在，地すべりや斜面崩壊などによる地表の変位観測においては，地表伸縮計，地盤傾斜計，光波測量，GPS観測などが，地中の変位観測においては，パイプ歪計，挿入型あるいは設置型の孔内傾斜計，地中伸縮計などが利用されている．また，水文および気象観測を行う場合には，ボーリング孔を用いた地下水位計による観測，および雨量計などを利用した観測が実施されている⁴²⁾．

ところで，アンカー緊張力の変化は，地盤内のテンドン自由長の伸び縮みに依存するため，アンカーのテンドン自由長の伸び量 u と緊張力（荷重）の変化量 ΔT との関係は，式(1)で表される．

$$u = \frac{\Delta T \times l_{sf}}{A_s \times E_s} \quad \dots (1)$$

ここに， u ：テンドン自由長部の伸び量（mm）

ΔT ：緊張力の変化量（kN）

l_{sf} ：テンドン自由長（mm）

A_s ：テンドン断面積（mm²）

E_s ：テンドンの弾性係数（kN/mm²）

このため，地山に変動が見られる場合，アンカーに設置した荷重計による緊張力の計測値は，地山の変動に従って変化し，従来の各種変位観測機器と同様，法面の変動をダイレクトに捉えるセンサーとしての機能を有していると考えられる⁴³⁾．酒井ら⁴⁴⁾は，地すべり滑動によって変位が生じたパイプ歪計と，アンカーの緊張力が増加する時期が一致することを示すとともに，1時間毎に計測した緊張力と温度との相関を基に，地すべりの滑動時に両者の相関が大きく低下し，アンカーに設置された荷重計がセンサーとしての機能を有し，これを利用した

法面の安定性評価が可能であることを示した。しかしながら、現在まで各種変位観測機器で確認された変化量と、アンカーに設置された荷重計による緊張力の計測値との関係について十分な評価は行われていない。

そこで本研究では、施工中および供用中の4法面において、従来の変位観測手法である光波測量、地中伸縮計、挿入型孔内傾斜計、設置型孔内傾斜計、パイプ歪計の観測結果と、これらと同時に実施した荷重計によるアンカー緊張力の計測結果を基に、変位観測と緊張力の変化の関係を比較するとともに、荷重計による緊張力の増加量から式(1)によって算出されるテンドン自由長部の伸び量と変位観測の変化量とを比較し、アンカーに設置した荷重計が従来の変位観測機器と同等に地盤変動を捉えるセンサーとしての機能の有無について検討を行った。

ここで、アンカー自由長とテンドン自由長の違いについて述べておく。図-3.1に引張型と圧縮型アンカーにおけるテンドン自由長の違いを示す。アンカー自由長(l_f)とは、アンカー頭部のテンドン定着位置からアンカー体までの長さをいい、テンドン自由長(l_{sf})とは、アンカー頭部に作用する緊張力をアンカー体まで伝達させるために必要な部分のテンドン長さをいう。図-3.1のうち(a)引張型アンカーは、アンカー体の浅部側に緊張力を作用させ、アンカー体に引張り応力を働かせるため、アンカー体長内のテンドンはグラウトと付着し、伸び縮みしない状態となっている。一方、(b)圧縮型アンカーはアンカー体長の深部側に緊張力を作用させ、アンカー体に圧縮応力が働く構造になっており、アンカー体長内においてもテンドンの大部分が自由に伸び縮みする状態になっており、引張型と異なる。このため、第2章においては、すべり面よりも浅い部分を対象に緊張力低下と地質条件の関係を検討した。第3章で述べるアンカーの伸び縮みは、テンドンが自由な状態になっている部分を対象とするため、テンドン自由長を対象とし、第2章と区別した。

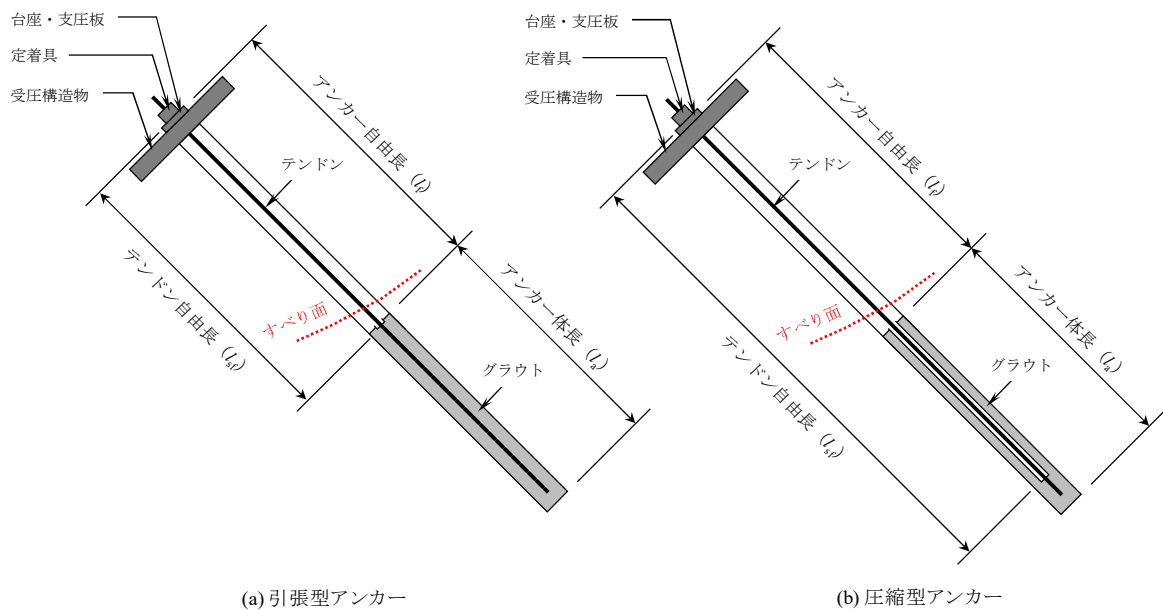


図-3.1 アンカータイプによるテンドン自由長の違い

3.2 各法面の状況と観測機器

検討を行った各法面のアンカー規格，施工本数，荷重計の番号と種類，定格容量，観測を行った変位観測機器，および地盤変動が生じた事象を表-3.1に示す。

法面1および法面2は，建設段階において切土掘削を行いながらアンカーを施工した際，法面が不安定化し，緊張力の増加と変位観測機器に変化が見られた現場である。このうち，法面1では，荷重計が4箇所設置され，トータルステーションによる4点の光波測量（移動杭観測），2箇所の地中伸縮計による観測が行われている。法面2では，荷重計が3箇所設置され，2箇所の挿入型孔内傾斜計による観測が行われている。法面3では完成後，大きな降雨によって緊張力の増加と孔内傾斜計の変位が確認されたため，荷重計が2箇所設置され，2箇所の設置型孔内傾斜計による観測が行われている。法面4では，ま

まった降雨のたびに地すべりブロックの滑動が見られる現場で、荷重計が3箇所設置され、1箇所のパイプ歪計による観測が行われている。

表-3.1 比較検証した法面

法面 番号	アンカー 規格	テンドン 断面積 A_s (mm^2)	テンドン 弾性係数 E_s (kN/mm^2)	設計 アンカー力 T_d (kN)	施工 本数 (本)	荷重計			テンドン 自由長 l_{sf} (m)	アンカー 体長 l_a (m)	変位観測機器		地盤変動の事象
						番号	種類	定格 容量			機器・手法	箇所数	
1	SMCS-5	493.6	194	474.0	6	HT4-2	歪ゲージ式	1MN	9.7	3.0	光波測量	4点	切土に伴う法面の不安定化
						HT4-4	歪ゲージ式	1MN	9.7	3.0			
	SMCS-6	592.3	194	657.0	25	HT3-2	歪ゲージ式	2MN	6.2	3.5	地中伸縮計	2箇所	
						HT3-15	歪ゲージ式	2MN	6.2	3.5			
2	VSL E5-7	691.0	191	766.8	390	5-2-29	歪ゲージ式	1.5MN	16.7	9.0	挿入型 孔内傾斜計	2箇所	切土に伴う法面の不安定化
						4-2-30	歪ゲージ式	1.5MN	12.7	9.0			
						4-2-36	歪ゲージ式	1.5MN	12.7	9.0			
3	EHD5-3	296.1	191	316.5	61	B-18	歪ゲージ式	500kN	7.6	9.5	設置型 孔内傾斜計	2箇所	集中豪雨による切土法面の変動
						D-18	歪ゲージ式	500kN	5.1	9.5			
4	SFL-3	416.1	195	414.5	85	A1-23	歪ゲージ式	1MN	20.0	4.5	パイプ歪計	1箇所	降雨による地すべり変動
						A2-12	歪ゲージ式	1MN	14.5	4.5			
						A3-14	歪ゲージ式	1MN	15.5	4.5			

3.2.1 法面 1

1) 荷重計・変位観測機器の設置状況

法面 1 は、全 8 段の切土法面で、2 段目から 4 段目にかけて 88 本のアンカーが施工されている。図-3.2 に平面図を、図-3.3 に断面図を示す。本地点の基盤地質は中生代ジュラ紀～三畳紀の野洲川層群に属する頁岩で、地盤は法面に対して受け盤、流れ盤となる高角度の亀裂が発達し、岩級区分^{36), 45), 46)}は $C_L \sim C_M$ 級で、アンカー定着部は $C_M \sim C_H$ 級となっている。施工されたアンカーは、4 段目および 3 段目法面が SMC 工法⁴⁷⁾、2 段目法面が SFL 工法⁴⁸⁾である。

アンカー傾角（アンカー打設方向と水平面のなす角）は、4 段目、3

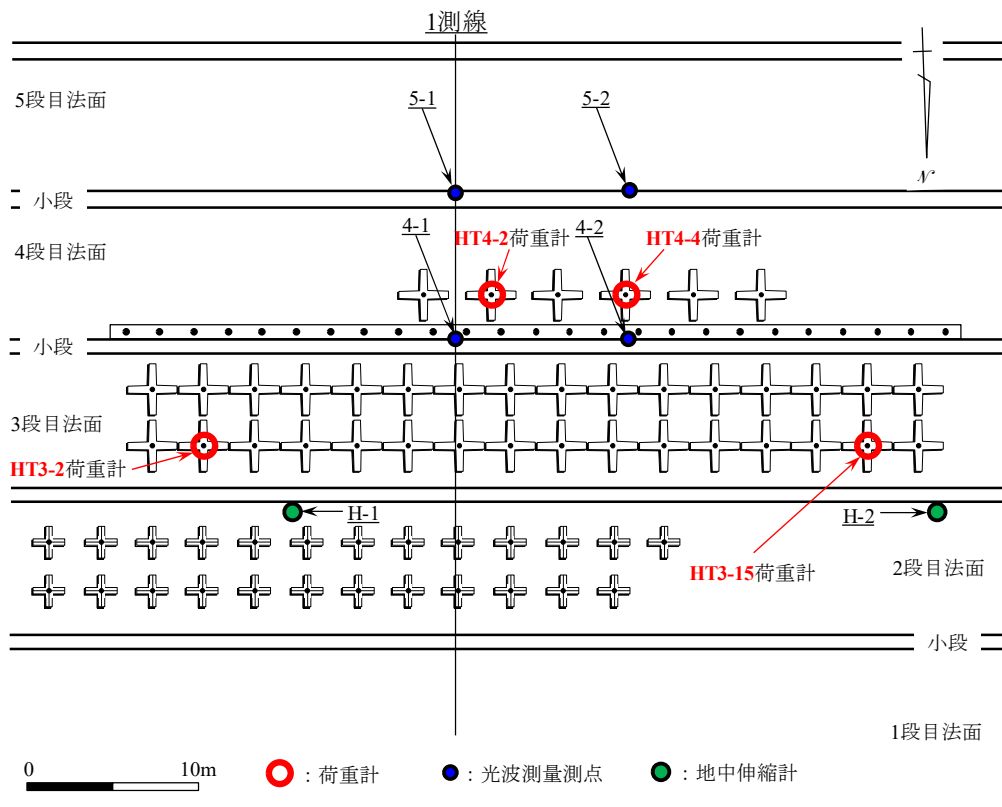


図-3.2 法面1平面図

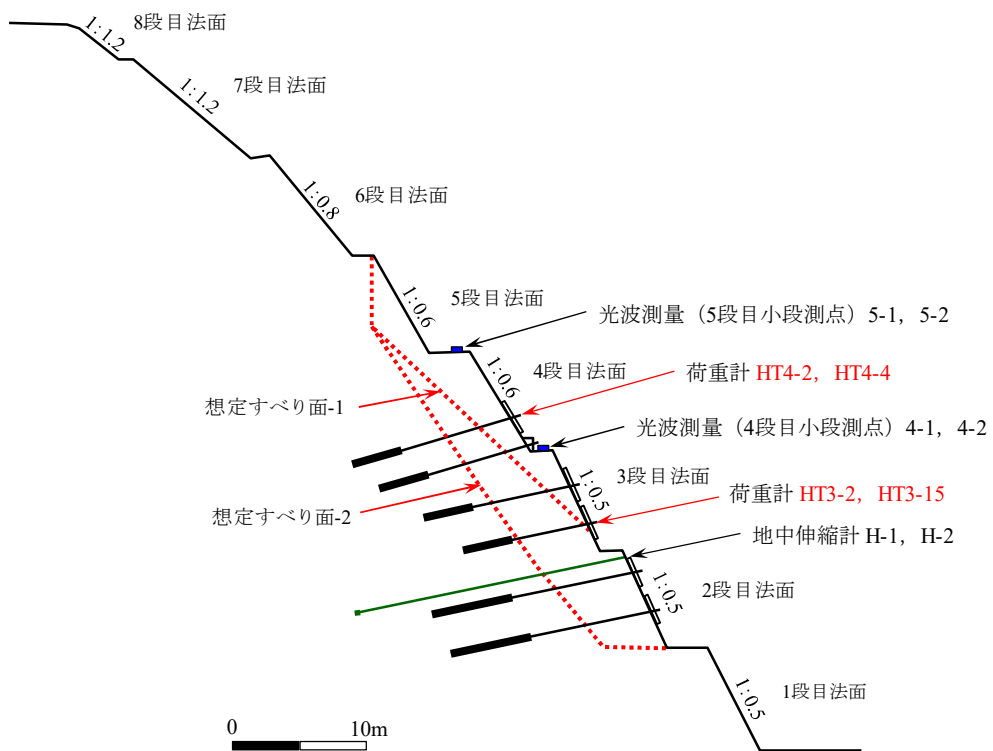


図-3.3 1測線断面図

段目，2段目がそれぞれ16，11，11度で，切土法面に直交する1測線の方向に施工された．荷重計は，施工と同時に設置され，4箇所とも歪ゲージ式であり，4段目の2箇所の荷重計の定格容量は1MN，3段目の2箇所の荷重計の定格容量は2MNである．

本法面では，3段目法面の掘削中に変状が生じたため，4段目小段と5段目小段に光波測量を実施するための移動杭を設置するとともに，**図-3.3**に示す想定すべり面-1に対する対策工として，4段目にアンカーの施工が行われた．このアンカー施工後，3段目法面の掘削を進めたところ，荷重計HT4-2およびHT4-4に増加が見られるとともに，法面对岸上り線側の不動点からのトータルステーションによる4点の光波測量においても変位が見られた．さらに切土が進み，3段目から2段目の法面掘削を行った際には，**図-3.3**に示す想定すべり面-2とした深いすべりに発展した可能性が考えられたため，アンカーの追加施工を行うとともに，荷重計HT3-2およびHT3-15，2段目の法面に設置した地中伸縮計H-1およびH-2による観測が行われた．地中伸縮計H-1，H-2は，いずれも3段目法面に施工されたアンカーと平行になるように，斜め下方11度の方向に深度20m，22mでボーリング掘削が行われ，伸縮計ケーブル先端を固定することで観測が行われている．

2) 荷重計と光波測量の関係

3段目法面の掘削中の変動における，4段目，5段目法尻小段に設置された光波測量の水平成分の変化量 δ_e と，これに近接した荷重計HT4-2，HT4-4の緊張力 P_e との関係について検討を行ってみる．**図-3.4**および**図-3.5**は，4段目および5段目の光波測量と荷重計による緊張力の計測結果を示したものである．計測頻度はいずれも1回/日である．光波測量による変位観測では，4段目および5段目とも，**図中A**期間の2004年6月28日から2004年8月2日にかけて法面変動と考えられる δ_e に変化が見られ，これと同時期に荷重計HT4-2，HT4-4の P_e は増加し，緊張力の変化と光波測量の変化は良く一致していることが確

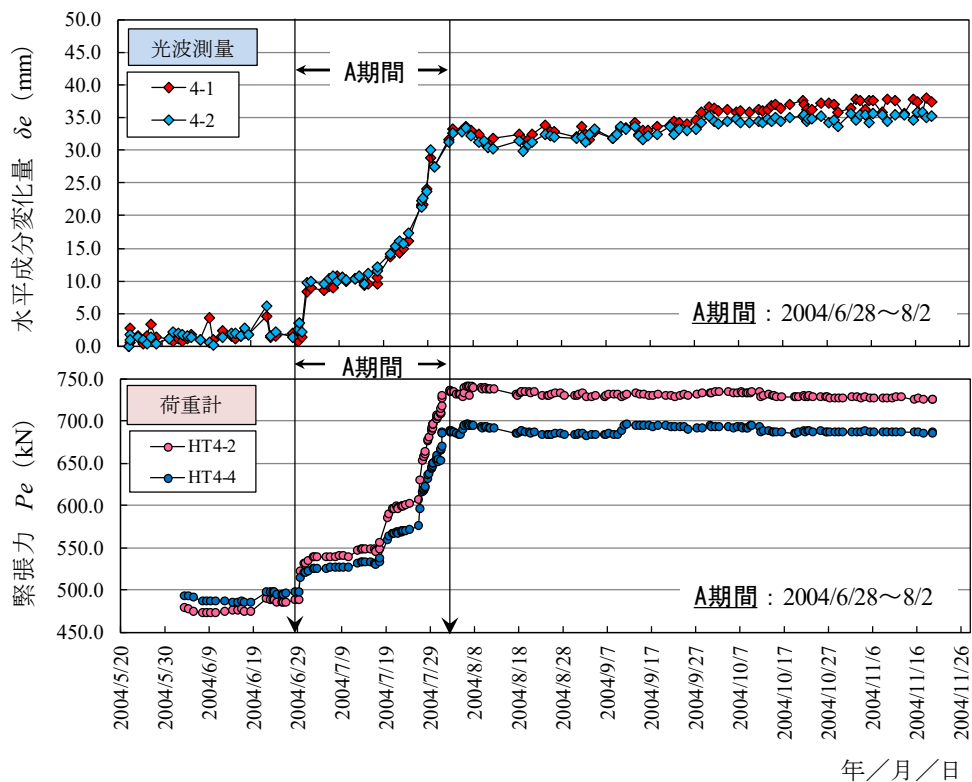


図-3.4 4段目光波測量と荷重計の計測結果

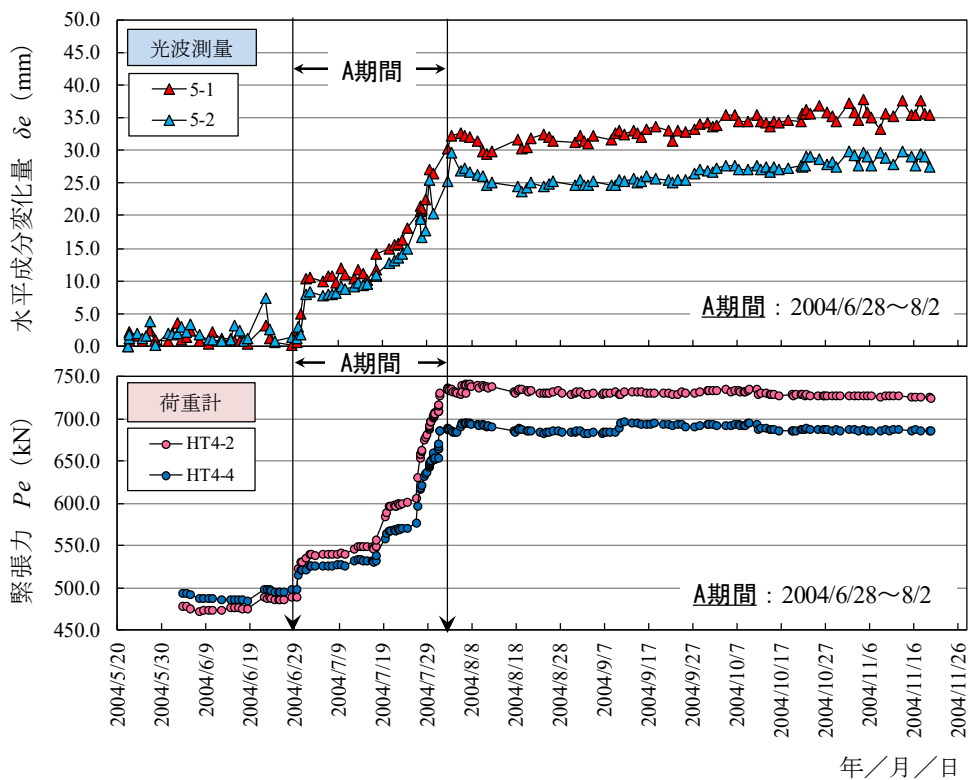


図-3.5 5段目光波測量と荷重計の計測結果

認できる． A 期間における光波測量測点の変化量 δ_e は， 4 段目の 2 測点では 29.7mm， 29.8mm， 5 段目の 2 測点では 23.9mm， 30.1mm であった． また， 荷重計による緊張力の変化量 ΔT は， HT4-2 では 246.3kN， HT4-4 では 189.5kN の増加であった．

3) 荷重計と地中伸縮計の関係

3 段目から 2 段目の法面掘削を行った際に考えられた深いすべりにおける， 2 段目法面に設置した地中伸縮計の変化量 δ_e と， これに近接した荷重計 HT3-2， HT3-15 の P_e の関係について検討を行ってみる．

図-3.6 は， 2 段目地中伸縮計と， 荷重計の計測結果を示したものである． 計測頻度はいずれも 1 回／日である． 図中の B 期間とした 2007 年 4 月 9 日に H-2 の地中伸縮計に変化が見られ， C 期間とした 2007 年 6

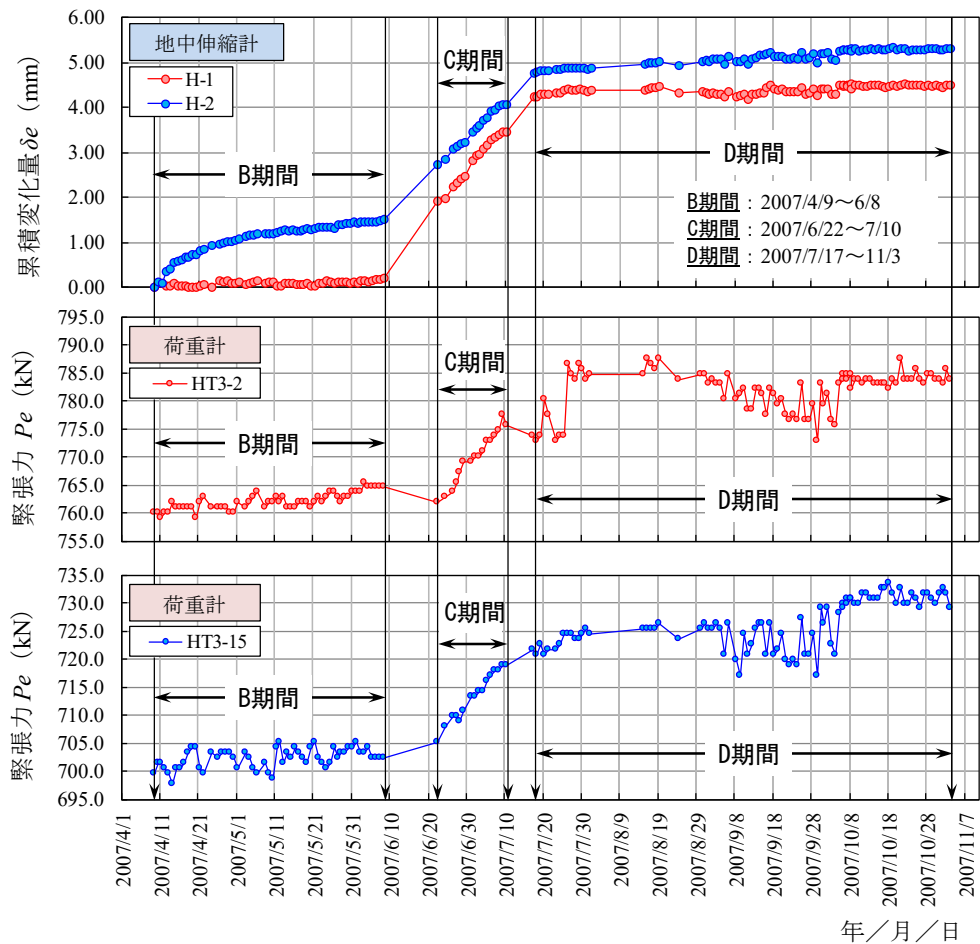


図-3.6 地中伸縮計と荷重計の計測結果

月 22 日から 7 月 10 日の間に、H-1 および H-2 の両者ともに変化が見られ、D 期間の 2007 年 7 月 17 日以降には収束した。

荷重計は、B 期間においてわずかな増加が見られ、C 期間では地中伸縮計と同時期に緊張力が増加し、D 期間の 2007 年 7 月 17 日以降からおおむね安定した値を示している。荷重計の変化と地中伸縮計の変化は、良く一致していることが確認できる。

C 期間における地中伸縮計の変化量 δ_e は、H-1 では 1.5mm、H-2 では 1.3mm、荷重計による緊張力の変化量 ΔT は、HT3-2、HT3-15 とともに 13.8kN の増加であった。

3.2.2 法面 2

1) 荷重計・挿入型孔内傾斜計の設置状況

法面 2 は、全 13 段の切土法面で、4 段目から 8 段目にかけて 390 本のアンカーが施工されている。

本法面では、5 段目から 4 段目の切土掘削に伴い、法面に設置された挿入型傾斜計の変化と荷重計の増加が見られた。図-3.7 に 3 段目から 7 段目の平面図を、図-3.8 に想定すべり面が位置する 3 段目から 9 段目の断面図を示す。本法面の基盤地質は中生代白亜紀に属する花崗岩で、岩級区分^{36), 45), 46)}は、マサ化が進んだ $D_L \sim D_M$ 級で、アンカー定着部は $C_L \sim C_H$ 級となっている。施工されたアンカーは、VSL 工法⁴⁹⁾である。アンカー傾角は 35° で、切土法面に直交する 2 測線の方に施工された。

本法面では、図-3.8 に示す想定すべり面の対策工としてアンカーが施工された。アンカーの施工および定着は、5 段目法面の 5-2-29 アンカーが 2014 年 5 月 13 日に、4 段目法面の 4-2-30、4-2-36 アンカーが 2014 年 6 月 30 日に行われ、5 段目から 4 段目を掘削中、No.4、No.8 の 2 箇所の挿入型孔内傾斜計に変化が見られるとともに、荷重計 5-2-29、4-2-30 および 4-2-36 にも増加が見られた。No.4、No.8 の挿入型孔内傾斜計は、それぞれ深度が 22.0m、25.0m で、測線方向の A 軸と

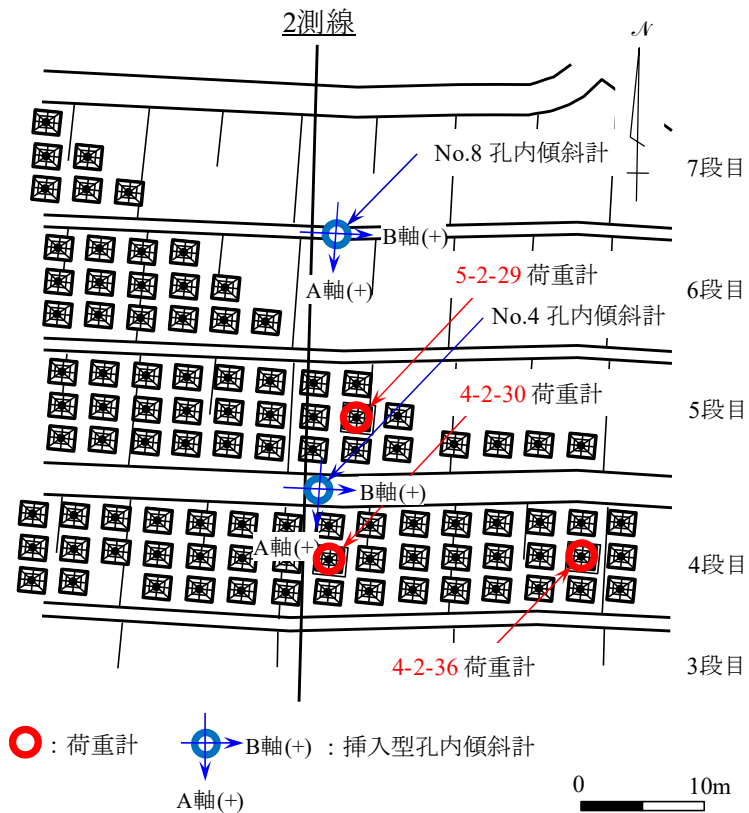


図-3.7 法面2平面図

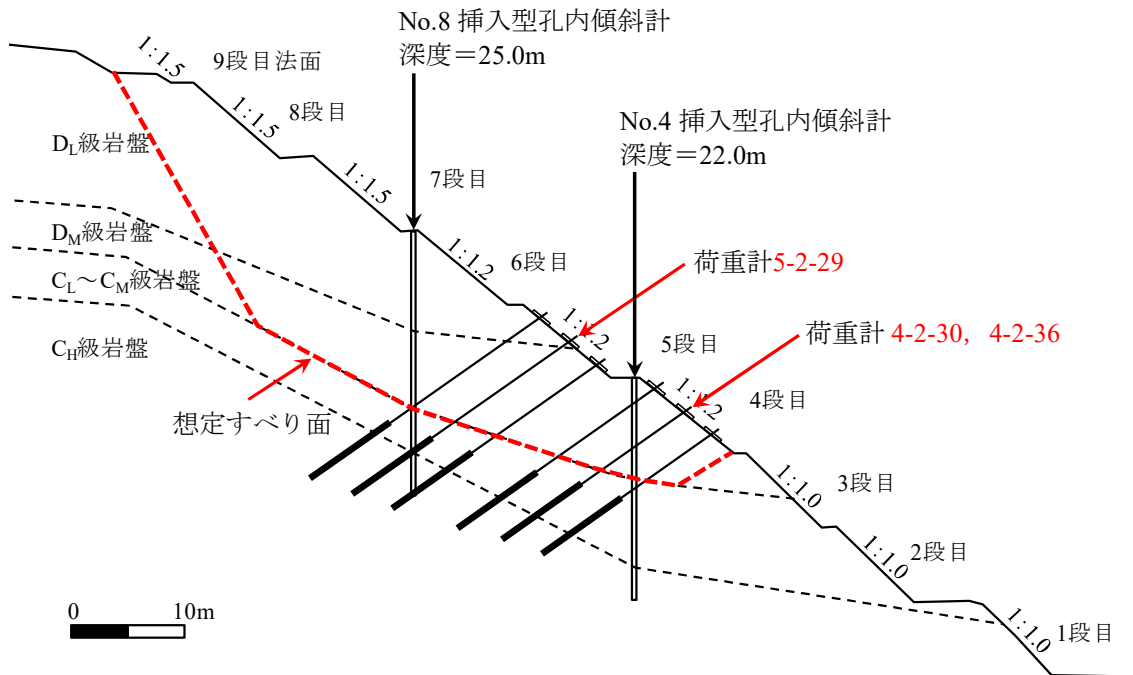


図-3.8 2測線断面図

それに直交する B 軸の 2 方向について、孔底から 0.5m ピッチに GL-0.5m まで、3 日から 12 日に 1 回の頻度で測定が実施されている。荷重計は、施工と同時に設置され、3 箇所とも歪ゲージ式で、定格容量は 1.5MN である。

2) 荷重計と挿入型孔内傾斜計の関係

図-3.9 および図-3.10 に、No.4, No.8 の挿入型孔内傾斜計の観測結果を示す。観測期間は、No.4 は 2014 年 5 月 30 日から 2014 年 12 月 24 日まで、No.8 は 2013 年 9 月 2 日から 2014 年 12 月 24 日までである。観測結果から、No.4 では深度 8.0~9.0m に、No.8 では深度 13.5~14.5m にせん断性の変位が確認できる。

ところで、アンカーの施工範囲内の No.4 は、2014 年 5 月 13 日に 5 段目法面の 5-2-29 アンカーの定着とほぼ同時に観測を開始したところ、8.0m 以下の累積変位量が山側に向かって戻るように結果を示しており、これは、施工時のアンカー緊張力による地盤の締め付け、あるいは引き止め効果による影響の可能性が考えられる。

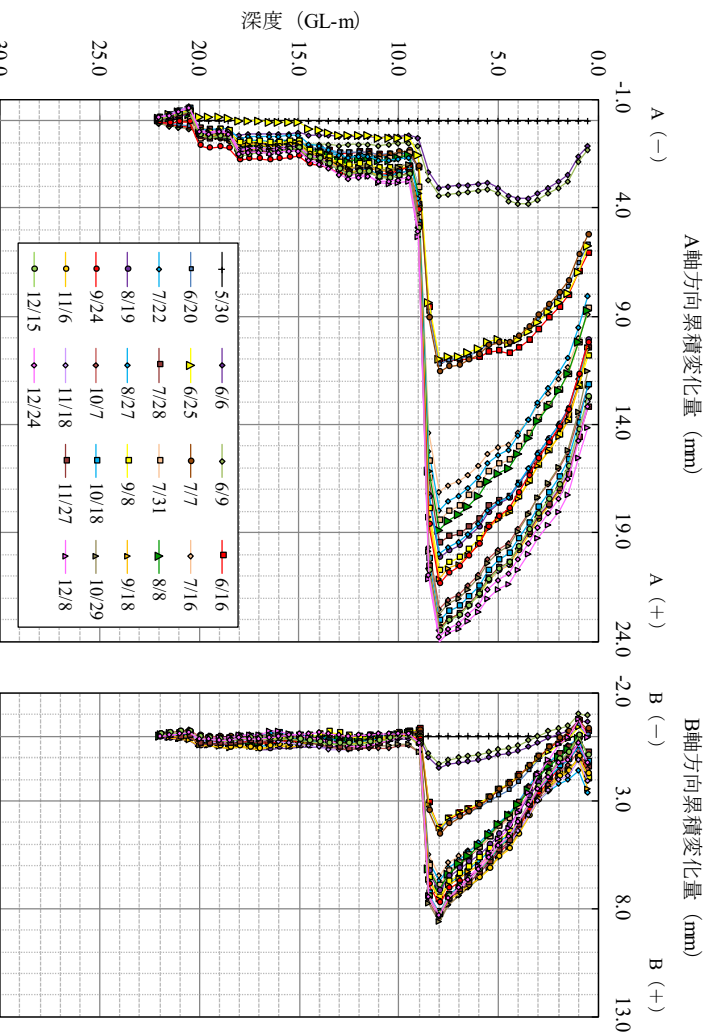


図-3.9 No.4 孔内傾斜計変動図

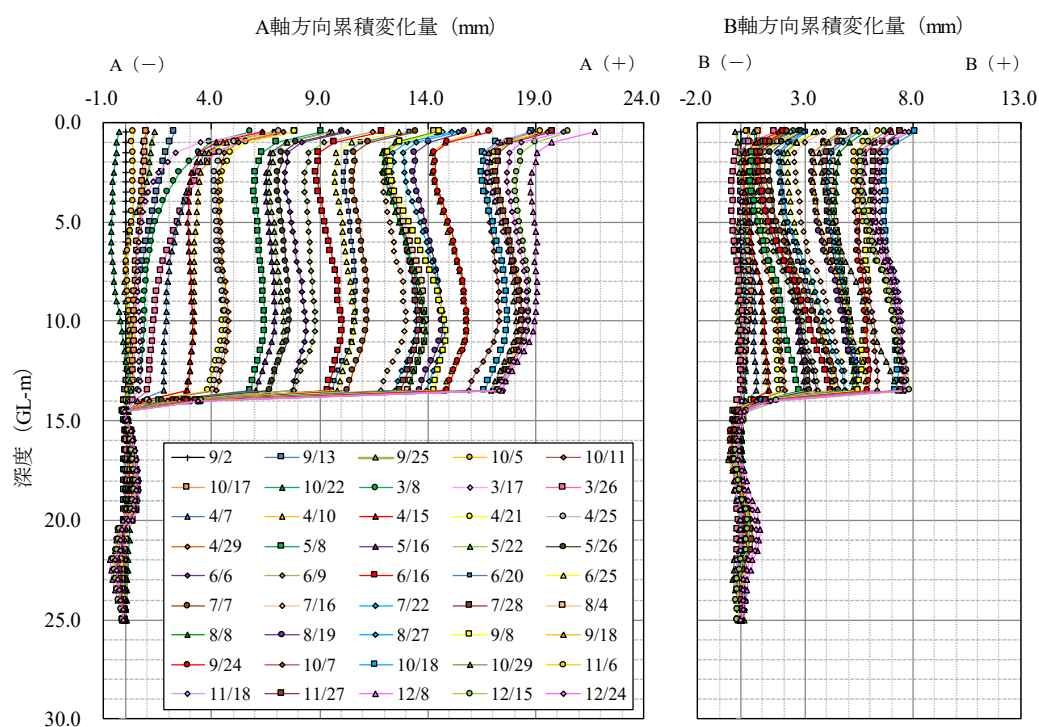


図-3.10 No.8 孔内傾斜計変動図

図-3.11 に A 軸と B 軸を合成した No.4 および No.8 のすべり面深度と考えられる 8.0~9.0m, 13.5~14.5m における累積変化量と, 3 箇所の荷重計による緊張力の計測結果を示す. いずれの荷重計も No.4 および No.8 孔内傾斜計のすべり面深度付近の変化に伴い, アンカー設置以降の E 期間 (2014 年 5 月 16 日~11 月 6 日) および F 期間 (2014 年 7 月 4 日~11 月 6 日) において増加が見られ, 緊張力は挿入型傾斜計の変化に追従して変化していることが確認できる.

挿入型孔内傾斜計 No.4 の深度 8.0~9.0m および No.8 の深度 13.5~14.5m における累積変化量 δ_e は, E 期間の No.8 では 12.3mm, F 期間の No.4 では 9.5mm, No.8 では 7.7mm であった. また, 荷重計による緊張力の変化量 ΔT は, E 期間の 5-2-29 では 43.3kN の増加, F 期間の 5-2-29, 4-2-30, 4-2-36 はそれぞれ 25.5kN, 36.3kN, 30.3kN の増加であった.

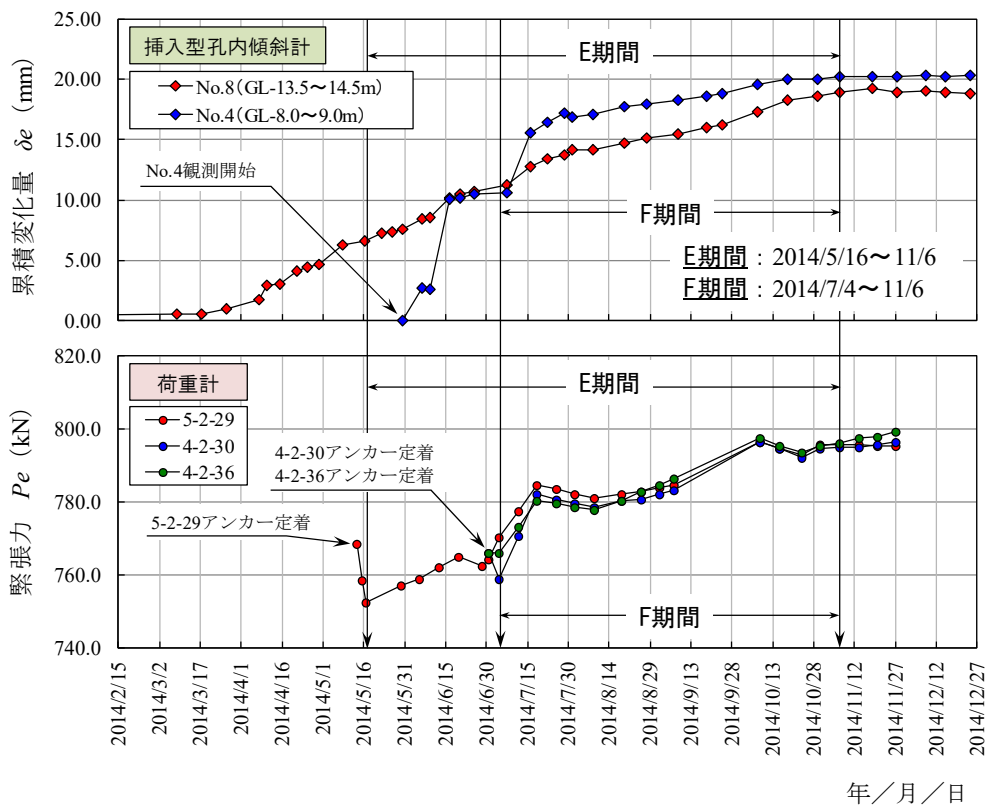


図-3.11 挿入型孔内傾斜計と荷重計の計測結果

3.2.3 法面 3

1) 荷重計・設置型孔内傾斜計の設置状況

法面 3 は、全 7 段の切土法面で、5 段目から 6 段目にかけて 61 本のアンカーが施工されている。図-3.12 に平面図，図-3.13 に断面図を示す。本法面の基盤地質は中生代白亜紀に属する花崗岩で、岩級区分³⁶⁾、⁴⁵⁾、⁴⁶⁾は、風化が進んだ D_H~C_L 級で、アンカー定着部は C_L~C_M 級となっている。施工されたアンカーは、EHD 工法⁵⁰⁾である。アンカー傾角は 28 度で、切土法面に直交する 3 測線の方に施工された。

本法面では、施工段階の切土掘削時に法面変動は見られなかったが、断層破碎帯が存在し不安定化する可能性が考えられたため、図-3.13 に示したすべり面を想定して、アンカーが施工されている。法面完成後は、設置型孔内傾斜計 No.1 および No.2，荷重計 B-18 および D-18 による観測が行われている。

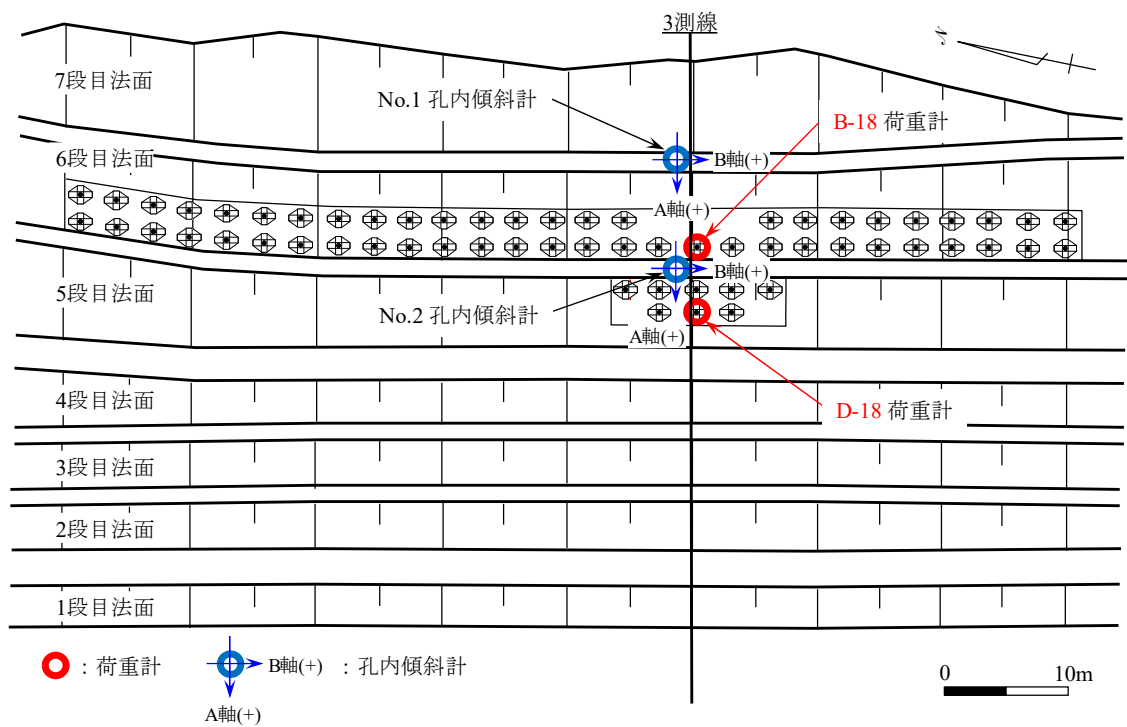


図-3.12 法面3平面図

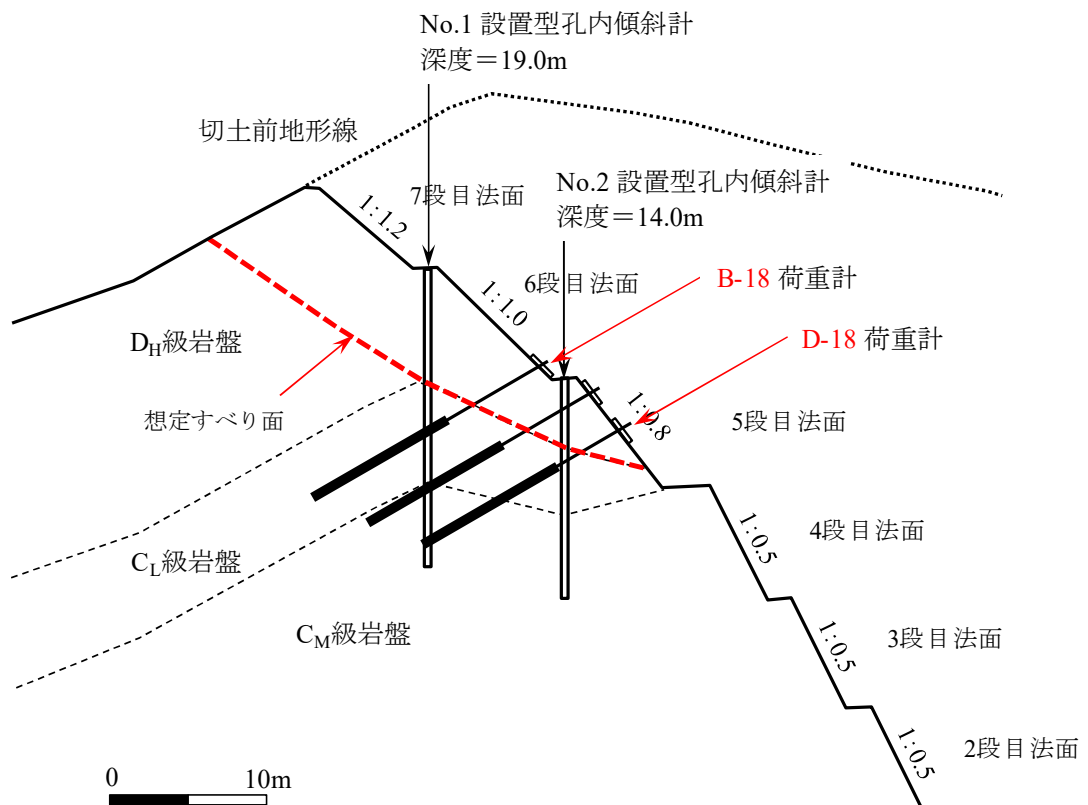


図-3.13 3測線断面図

設置型孔内傾斜計は、ボーリング掘削後に埋設したアルミガイド管に、No.1では深度0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 7.5, 9.5mに、No.2では深度0.5, 2.5, 4.5, 6.5, 7.5, 8.5, 11.5, 14.5mに傾斜計センサーを設置して観測が行われた。荷重計は、アンカー施工と同時に設置され、2箇所ともに歪ゲージ式で、定格容量は500kNである。

本法面では、2017年10月16日3:00から11月8日13:00の約23日間に、累積で433mmの降雨があり、No.1の深度2.5m、No.2の深度7.5mで傾斜計センサーに法面方向への変化が見られるとともに、B-18, D-18の2箇所で荷重計による緊張力の増加が見られた。本法面では、設置型孔内傾斜計および荷重計ともに1回/1時間の頻度で観測が行われ、毎正時にデータが記録されている。

2) 荷重計と設置型孔内傾斜計の関係

図-3.14に設置型孔内傾斜計No.1の深度2.5mおよびNo.2の深度7.5mの変化量と、荷重計B-18, D-18による緊張力の計測結果を示す。

No.1傾斜計においては、2017年10月19日からのG期間で変位ははじめ、2017年10月22日から大きな変位が見られ、10月31日以降は収束した。No.2傾斜計は、No.1に遅れて2018年10月22日に変位がはじまり、10月31日までおおむね一定速度の変位が見られ、No.1より小さい変化量で収束した。

一方、荷重計B-18, D-18は、温度変化に伴うと考えられる増減を繰り返しながらも、G期間の2017年10月19日から10月31日までの間で増加が見られ、孔内傾斜計の変化と良く一致していることが確認できる。法面に設置した温度計の計測値は、図-3.14に示した2017年10月5日から2017年11月9日において、最高が32.1℃、最低が5.5℃、平均が15.6℃であった。各日の午前0:00から23:00までの24時間の荷重計による緊張力と温度の関係は、孔内傾斜計に変化が見られない期間において高い相関を示すものの、孔内傾斜計に変化が見られたG期間では両者の相関が大きく低下するため、ここでは緊張力の温度補

正は行わず計測値をそのまま用いた。

G 期間の設置型孔内傾斜計の変化量 δ_e は、No.1 の深度 2.5m では 1.0mm、No.2 の深度 7.5m では 0.3mm、荷重計による緊張力の変化量 ΔT は、B-18 では 3.8kN、D-18 では 5.4kN の増加であり、荷重計 B-18、D-18 は、設置型孔内傾斜計の変化量が 1.0mm 以下の小さな変位に対して、温度の影響に追随しながらも良く反応し、変化に伴って増加している。

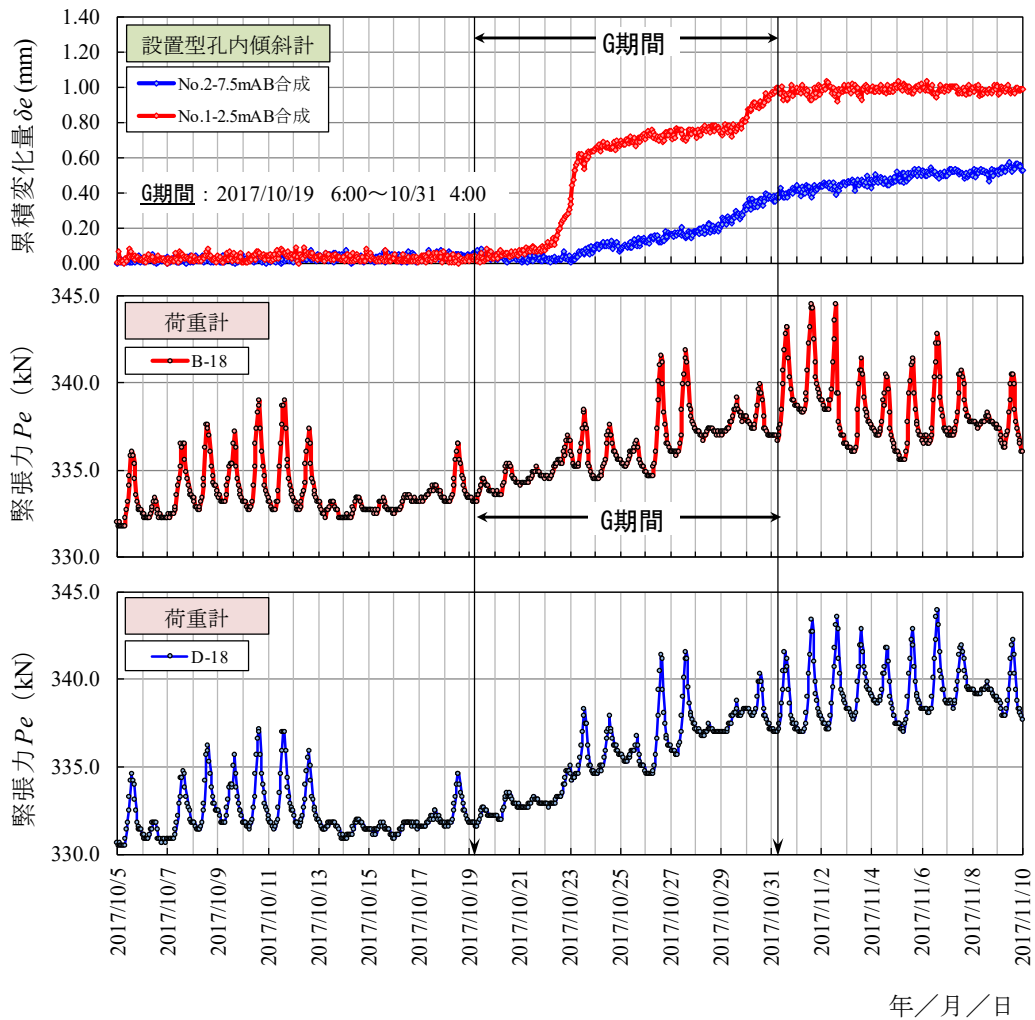


図-3.14 設置型孔内傾斜計と荷重計の計測結果

3.2.4 法面 4

1) 荷重計・パイプ歪計の設置状況

法面 4 は，地すべりブロックの抑止工として，上段，中段，下段の 3 段に分け 86 本のアンカーが施工されている．**図-3.15** に平面図，**図-3.16** に断面図を示す．本法面の基盤地質は，新生代第三紀の堆積岩である熊野層群の砂岩・泥岩互層と，それらを起源とする崩積土からなっている．施工されたアンカーは，SFL 工法⁴⁸⁾である．アンカー傾角は 25 度で，地すべり方向に直交すると考えられる 4 測線の方向に施工された．

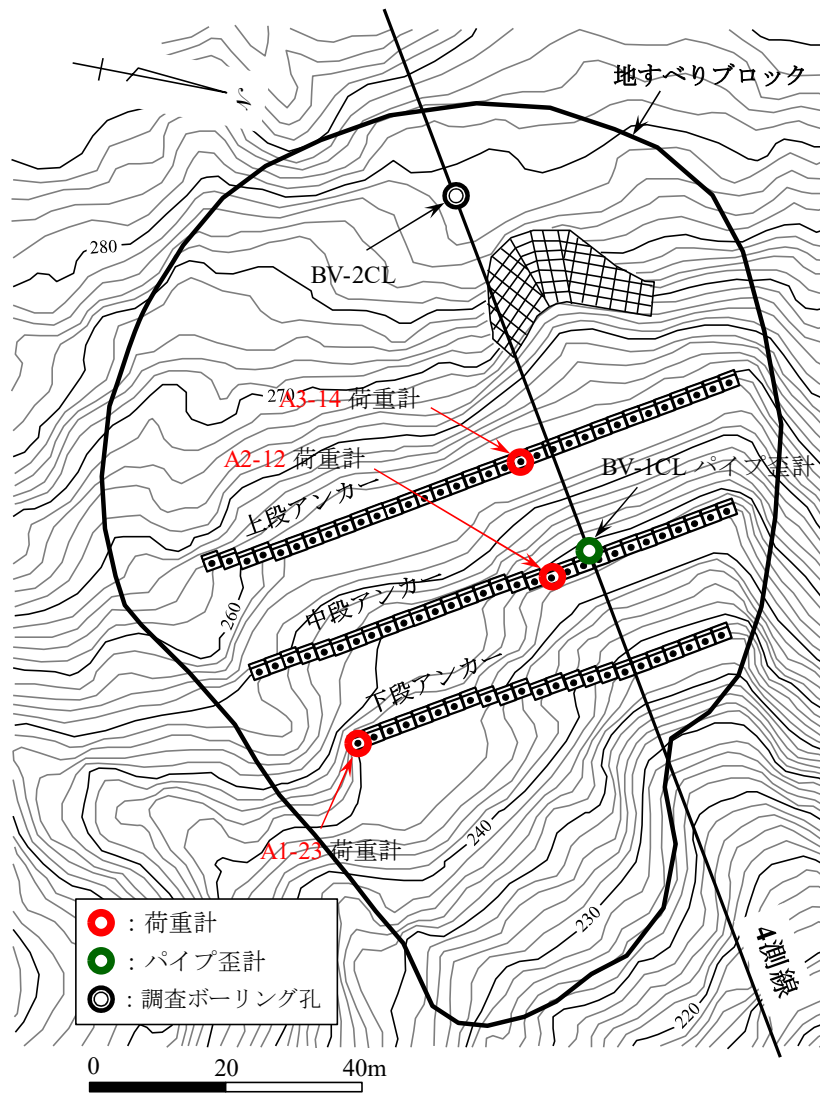


図-3.15 法面 4 平面図

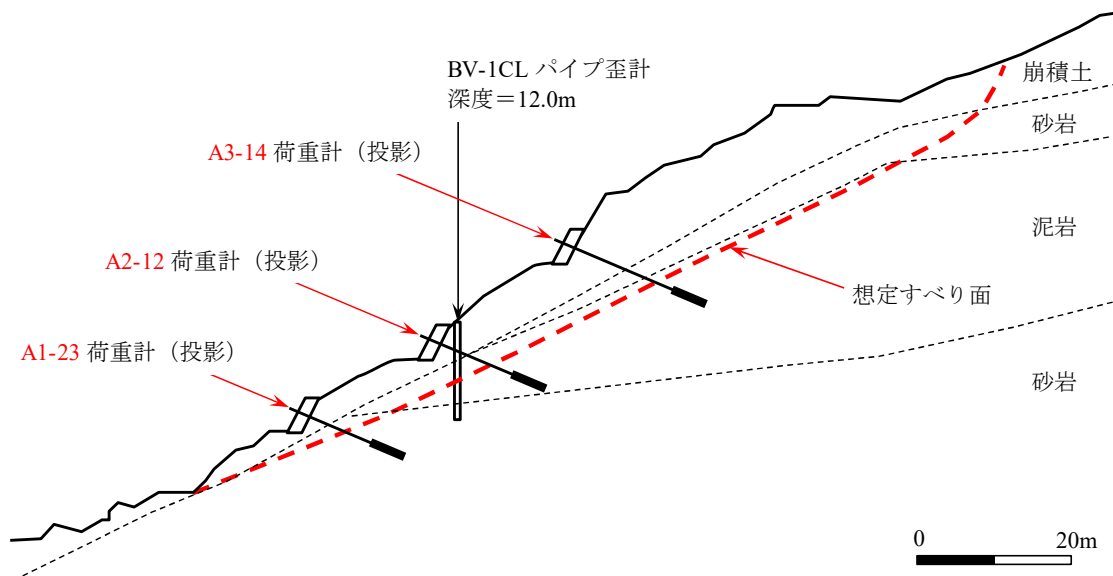


図-3.16 4 測線断面図

本法面では、パイプ歪計 BV-1CL と 3 箇所のアンカー荷重計により、地すべりブロックの観測が行われている。BV-1CL は、深度 12.0m の調査ボーリング孔に深度 11.5m から 0.5m まで、1.0m 間隔で歪ゲージを貼りつけたパイプ歪計（塩ビ管）が埋設され、12 深度での観測が行われている。観測は 2013 年 8 月 10 日から開始し、おおよそ 6 月から 12 月の間に 1 回 / 1 日の頻度で毎正午にデータが記録され、2017 年 11 月 17 日まで観測が行われた。

荷重計は、A3-14 が 2013 年 8 月 10 日から、A1-23、A2-12 が 2014 年 9 月 30 日から計測を開始し、1 回 / 1 時間の計測が行われている。これらの荷重計は、既設アンカーに対して緊張力の除荷、定着具の取り外し、再緊張を必要としない荷重計の脱着技術²⁵⁾により後付けされ、3 箇所とも歪ゲージ式で、定格容量は 1MN である。

2) 荷重計とパイプ歪計の関係

本法面では、まとまった降雨のたびにパイプ歪計の変位とアンカー緊張力の増加が見られる。図-3.17 に各荷重計による緊張力の変化を示す。緊張力の増加は、図中、H、I、J、K の 4 つの期間に分けられ、H

期間は 2013 年 9 月 15 日から 9 月 17 日, I 期間は 2014 年 8 月 9 日から 8 月 12 日, J 期間は 2015 年 7 月 16 日から 7 月 18 日, K 期間は 2017 年 10 月 21 日から 10 月 24 日である.

図-3.18 に, 例として 2013 年 8 月 10 日から 12 月 7 日までの BV-1CL パイプ歪計変動図を示す. この結果より, 2013 年 9 月 15 日から 9 月 17 日の間に深度 8.5m で $166\mu\epsilon$ の変化が確認でき, 本地点では深度 8.5m 付近にすべり面が位置すると考えられる.

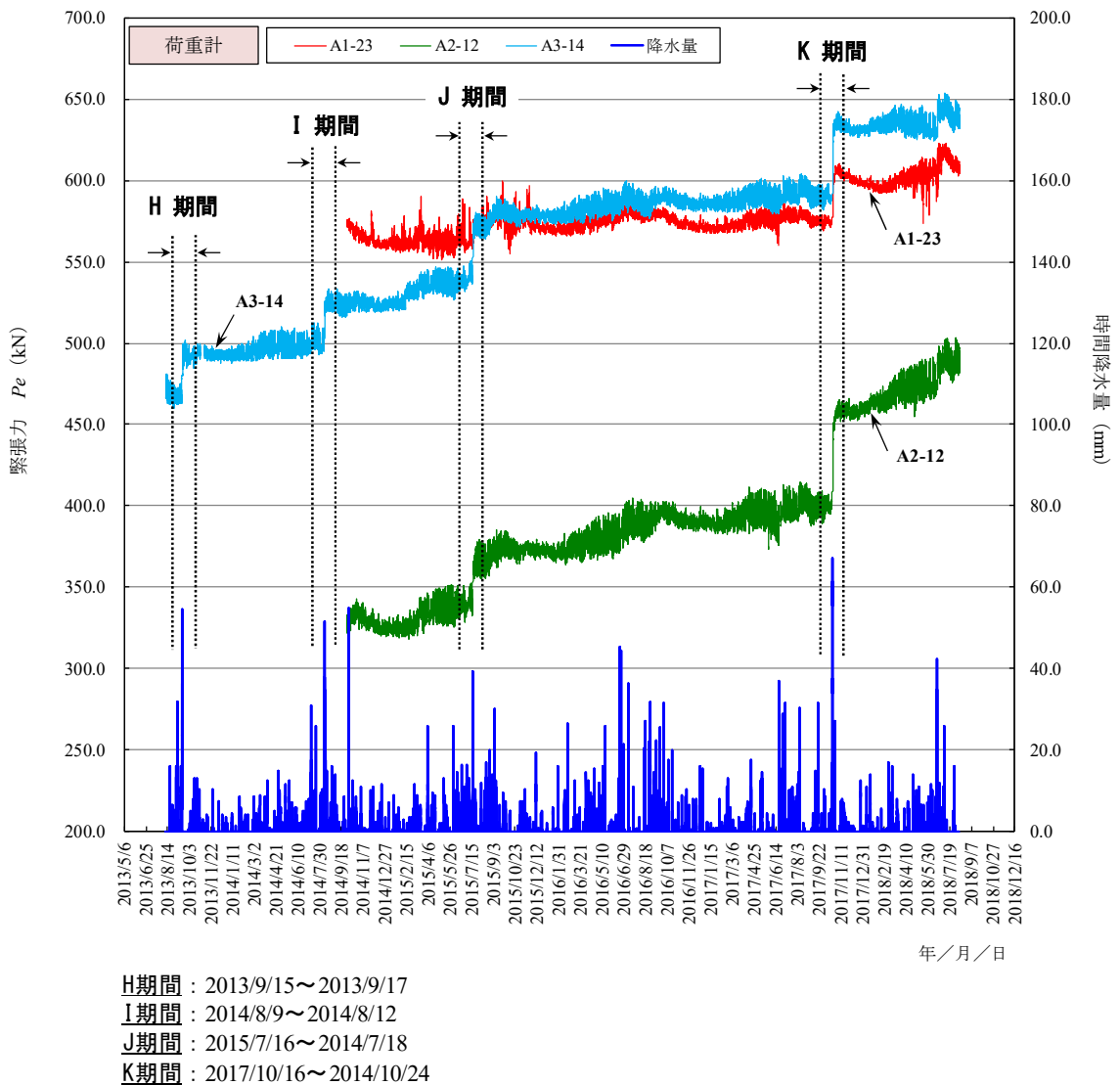


図-3.17 法面 4 の荷重計変動図

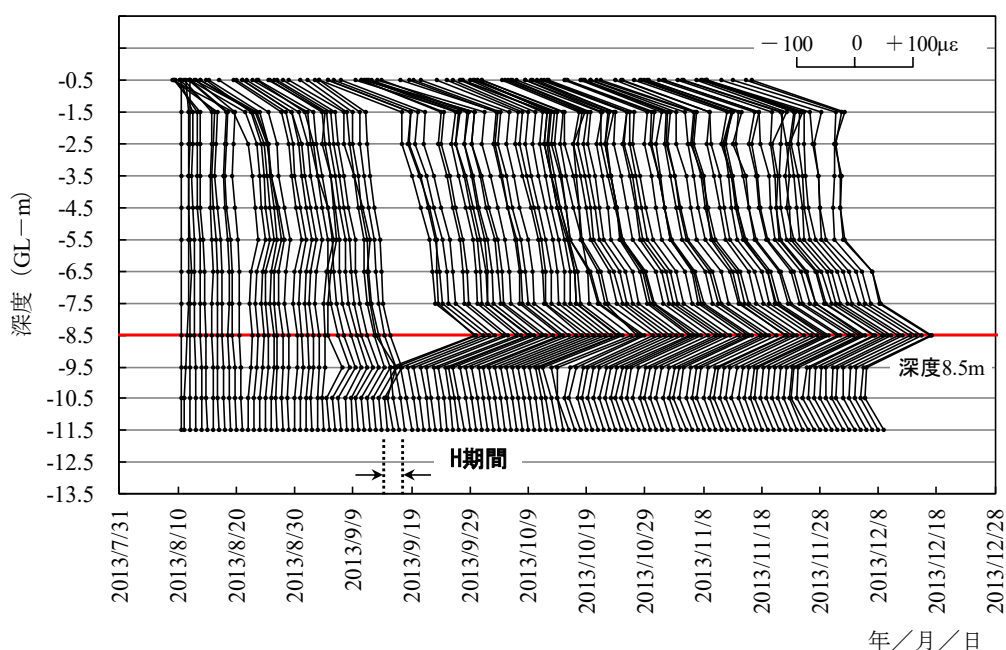


図-3.18 2013年のBL-1CLパイプ歪計変動図

図-3.19 から図-3.22 に H, I, J, K 期間におけるパイプ歪計と荷重計の変化を示す。図-3.19 に示す H 期間では、パイプ歪計において $166\mu\epsilon$ の変化が見られたのに対し、荷重計 A3-14 では 21.0kN の増加が見られた。図-3.20 に示す I 期間では、パイプ歪計において $102\mu\epsilon$ の変化が見られたのに対し、荷重計 A3-14 では 24.0kN の増加が見られた。図-3.21 に示す J 期間では、パイプ歪計において $25\mu\epsilon$ の変化が見られたのに対し、荷重計 A1-23, A2-12, A3-14 ではそれぞれ、 2.6kN , 22.3kN , 22.9kN の増加が見られた。また、図-3.22 に示す K 期間では、パイプ歪計において $67\mu\epsilon$ の変化が見られたのに対し、荷重計 A1-23, A2-12, A3-14 ではそれぞれ、 23.4kN , 40.6kN , 34.7kN の増加が見られた。

以上のように H, I, J, K 期間のいずれもパイプ歪計の変化とアンカ一の荷重計による緊張力の増加は良く一致している。

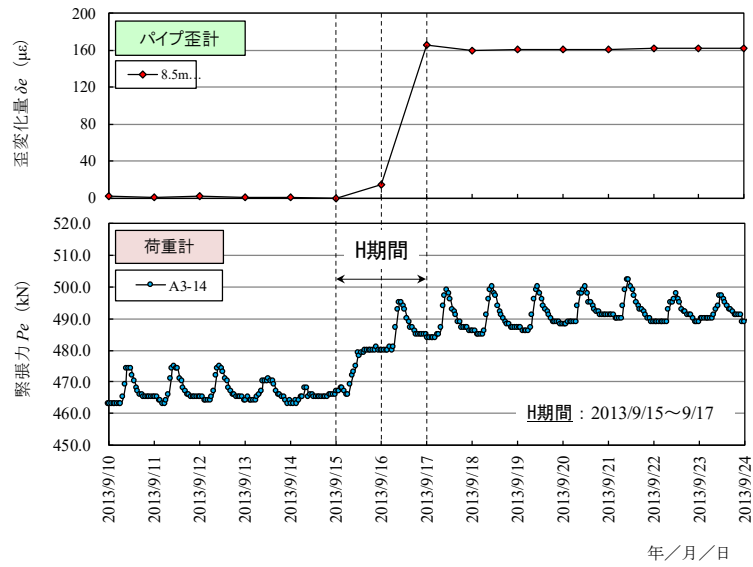


図-3.19 H期間のパイプ歪計と荷重計の観測結果

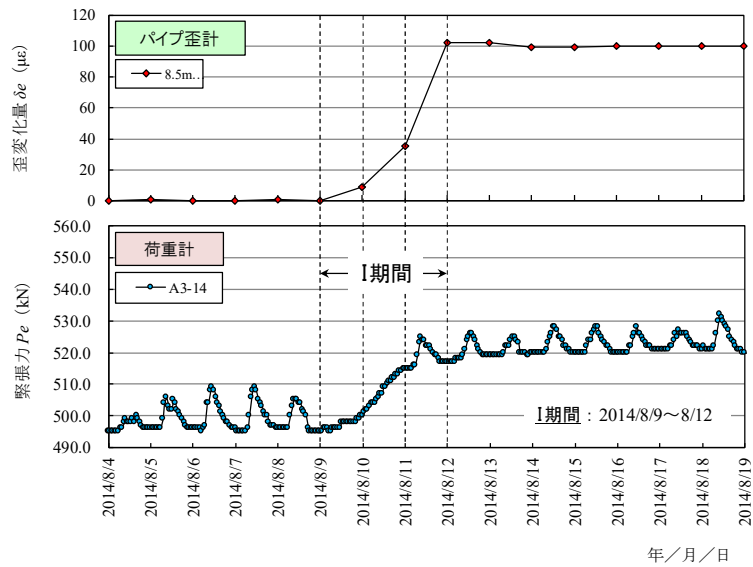


図-3.20 I期間のパイプ歪計と荷重計の観測結果

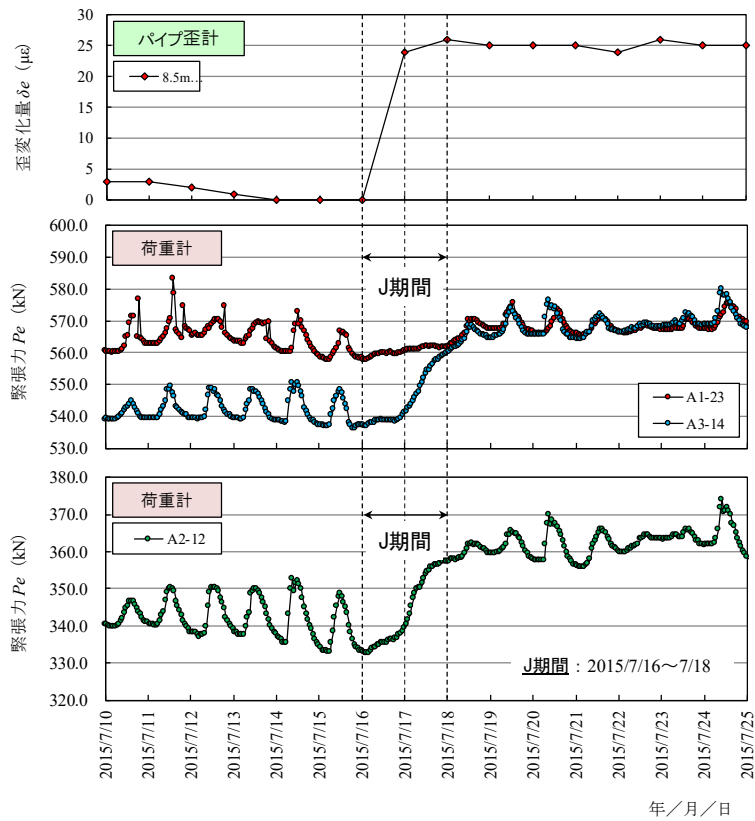


図-3.21 J 期間のパイプ歪計と荷重計の観測結果

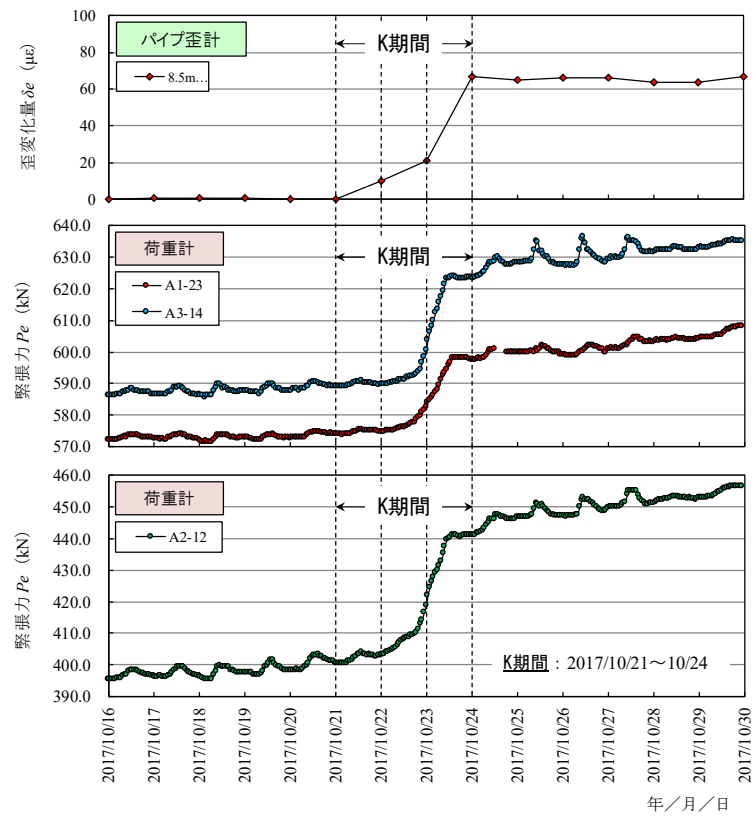


図-3.22 K 期間のパイプ歪計と荷重計の観測結果

3.3 荷重計と変位観測機器の関係

4 法面における光波測量，地中伸縮計，挿入型孔内傾斜計，設置型孔内傾斜計，パイプ歪計の変位観測機器の観測結果とアンカー荷重とに関係について検討を行ってみる。

3.3.1 法面 1 の荷重計と各種変位観測機器の関係

図-3.23 から図-3.26 に，法面 1 の 2004 年 6 月 28 日から 8 月 2 日の A 期間における 4 段目の 2 測点，5 段目の 2 測点の光波測量と，荷重計 HT4-2，HT4-4 による緊張力との関係を示す。いずれの結果も荷重計による緊張力と光波測量の変化量とに線形的な関係が見られ，HT4-2 と光波測量結果における決定係数 R^2 は，4 段目で 0.96，0.95，5 段目で 0.93，0.92，HT4-4 と光波測量結果においても，4 段目で 0.95，0.94，5 段目で 0.91，0.90 と高い値を示す。

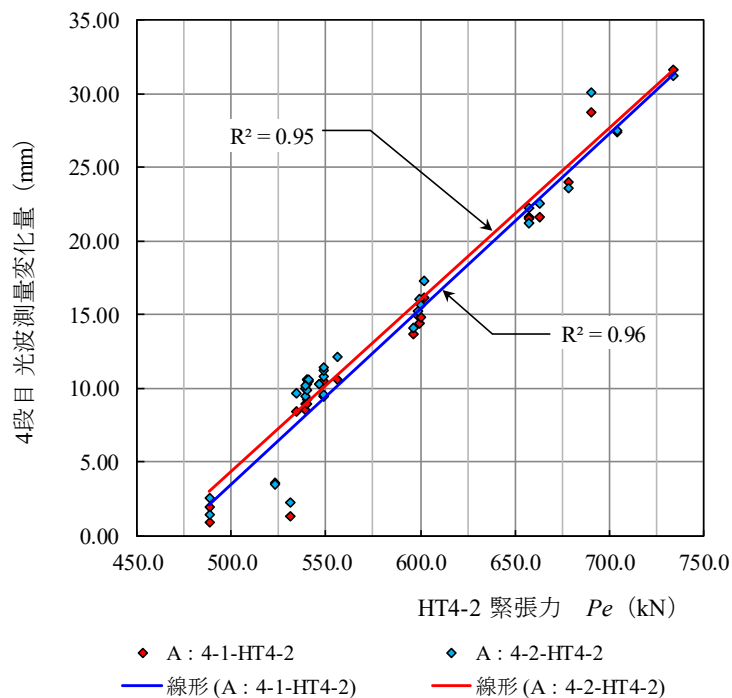


図-3.23 HT4-2 の緊張力変化と 4 段目光波測量の関係

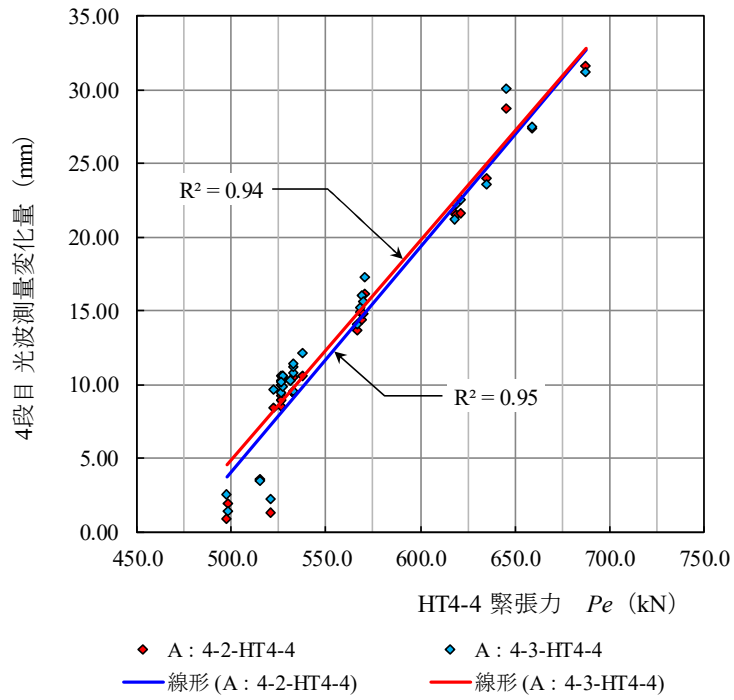


図-3.24 HT4-4 の緊張力変化と 4 段目光波測量の関係

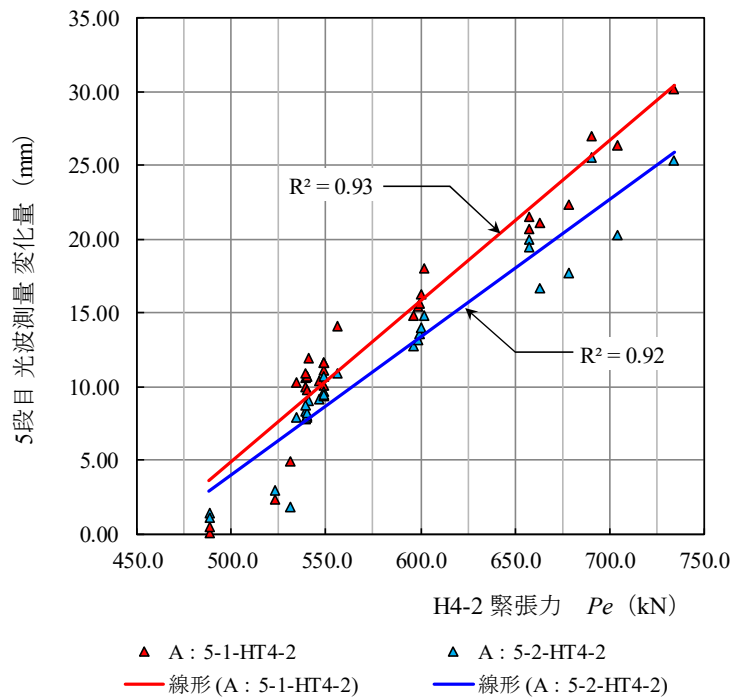


図-3.25 HT4-2 の緊張力変化と 5 段目光波測量の関係

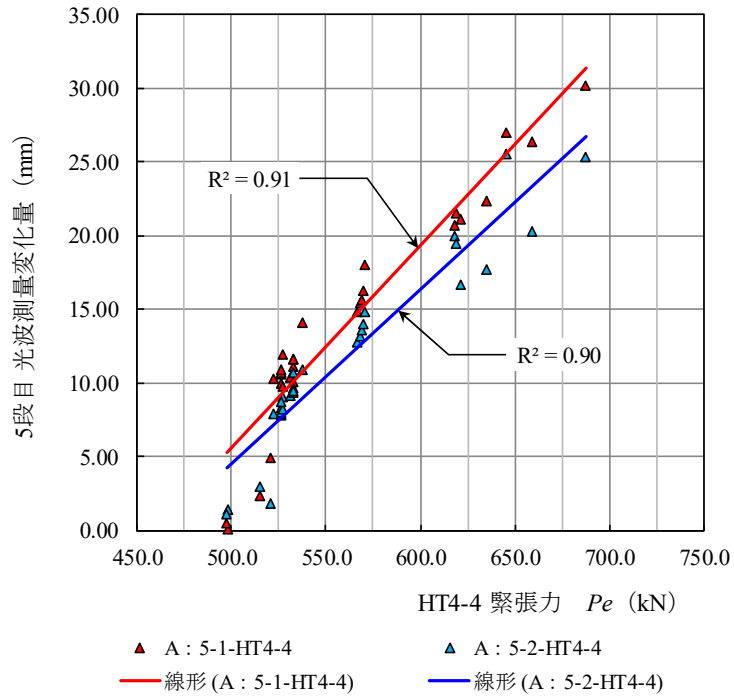


図-3.26 HT4-4 の緊張力変化と 5 段目光波測量の関係

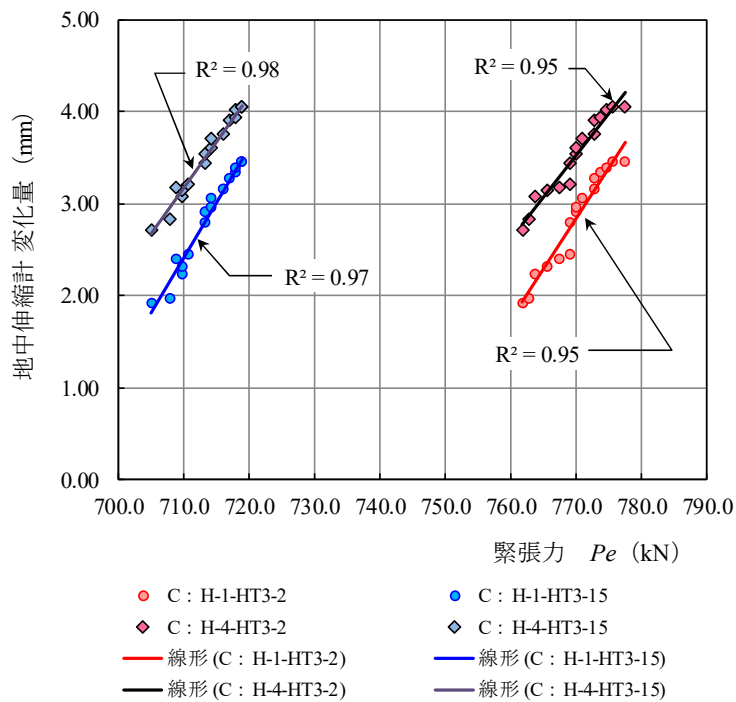


図-3.27 法面 1 の緊張力変化と地中伸縮計の関係

また、2007年4月9日から6月8日のC期間においては、2箇所
 の地中伸縮計（H-1，H-2）に変位が見られるとともに、荷重計HT3-2，
 HT3-15の緊張力の増加が確認される。図-3.27はC期間の地中伸縮計
 と荷重計による緊張力の関係を示したものである。地中伸縮計H-1，
 H-2の変化量と、荷重計HT3-2，HT3-15による緊張力との決定係数 R^2
 は、0.95～0.98と高い相関が見られる。

3.3.2 法面2の荷重計と挿入型孔内傾斜計の関係

図-3.28に法面2の2014年5月16日から11月6日のE期間におけ
 る、挿入型孔内傾斜計No.8と荷重計5-2-29の緊張力の関係を示す。
 挿入型孔内傾斜計No.8と荷重計5-2-29の緊張力に線形関係が見られ、
 R^2 は0.96と高い値を示す。また、図-3.29および図-3.30に2014年5
 月29日から11月6日のF期間における、挿入型孔内傾斜計No.8，
 No.4と荷重計5-2-29，4-2-30，4-2-36の緊張力の関係を示す。挿入型
 孔内傾斜計No.8，No.4と荷重計5-2-29，4-2-30，4-2-36の緊張力の関
 係にも線形関係が認められ、 R^2 は0.82～0.95と高い値を示す。

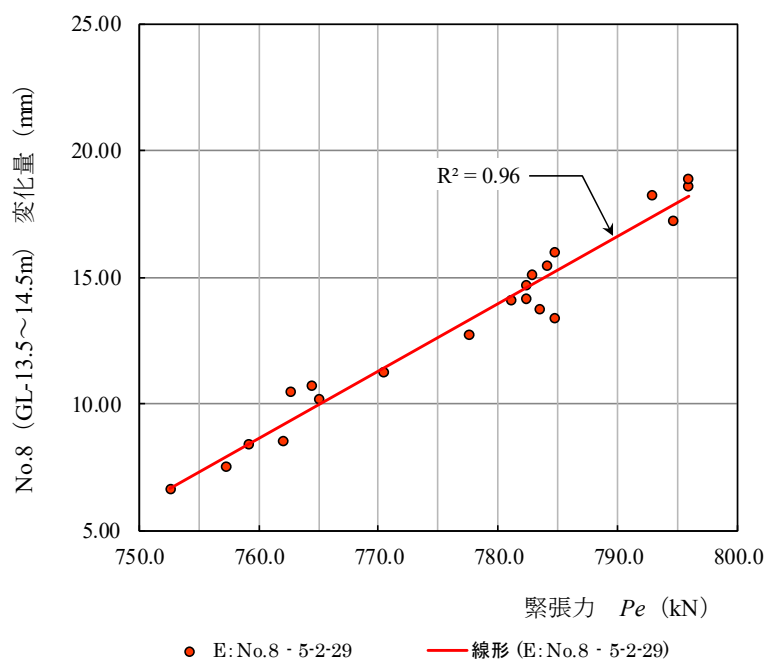


図-3.28 E期間の緊張力変化とNo.8孔内傾斜計の関係

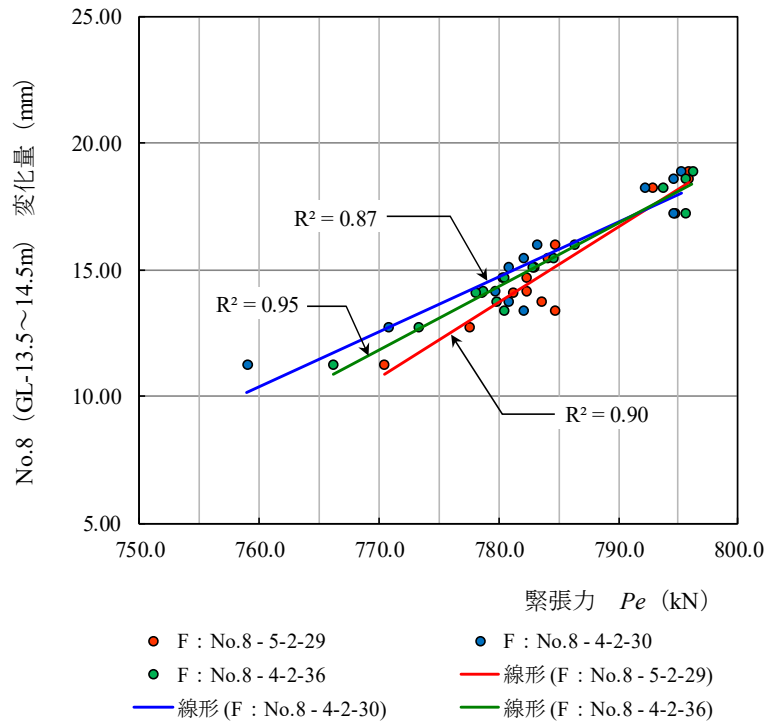


図 -3.29 F 期間の緊張力変化と No.8 孔内傾斜計の関係

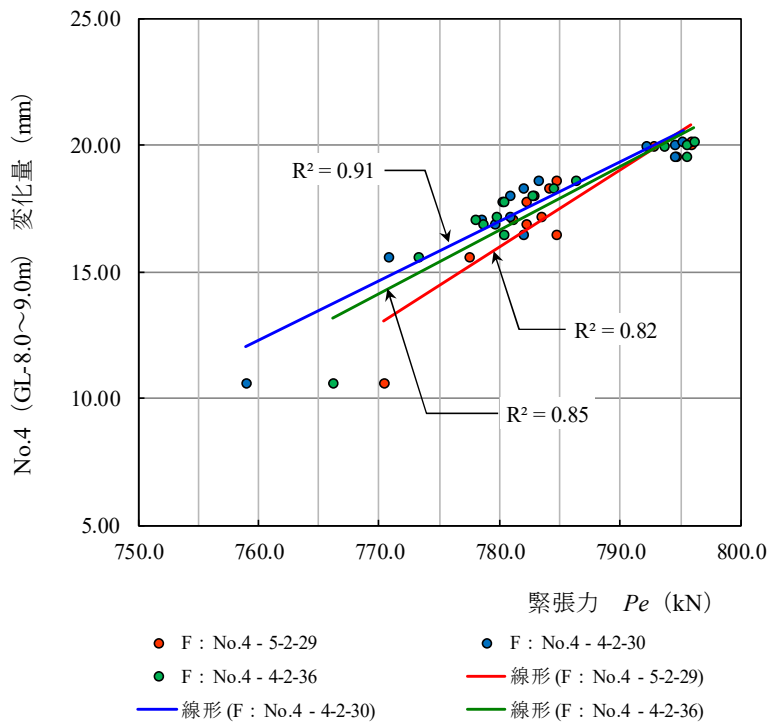


図 -3.30 F 期間の緊張力変化と No.4 孔内傾斜計の関係

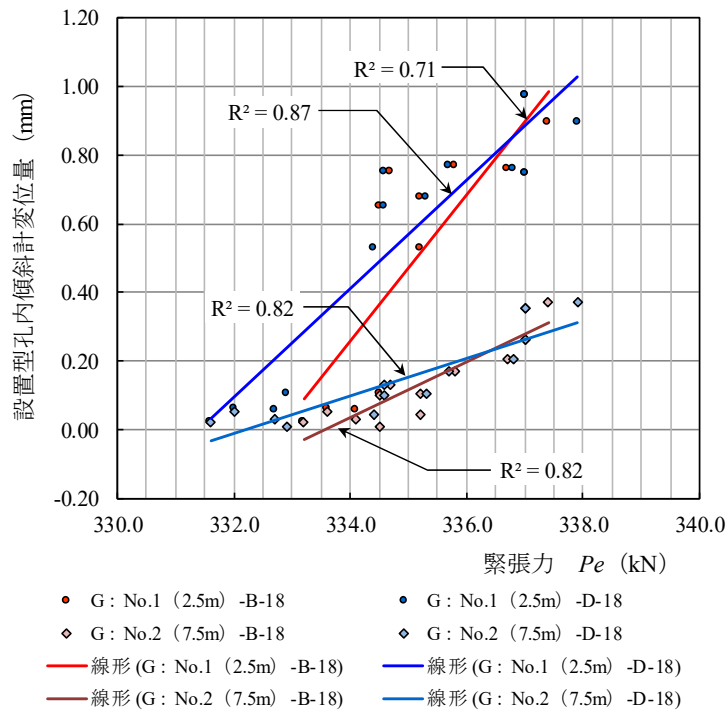


図-3.31 法面 3 の緊張力変化と設置型孔内傾斜計の関係

3.3.3 法面 3 の荷重計と設置型孔内傾斜計の関係

図-3.31 に法面 3 の 2017 年 10 月 19 日から 10 月 31 日の G 期間における，設置型孔内傾斜計 No.1，No.2 と荷重計 B-18，D-18 による緊張力の関係を示す．設置型傾斜計 No.1 の深度 2.5m および No.2 の深度 7.5m における変化量と，荷重計 B-18，D-18 の緊張力の R^2 は，0.71～0.87 である．本地点の設置型孔内傾斜計の変化量は 1.0mm，0.3mm と小さいながらも，荷重計との間に良い相関が確認できる．

3.3.4 法面 4 の荷重計とパイプ歪計の関係

図-3.32 から図-3.34 に，法面 4 の H，I，J，K の 4 期間（H 期間：2013 年 9 月 15 日から 9 月 17 日，I 期間：2014 年 8 月 9 日から 8 月 12 日，J 期間：2015 年 7 月 15 日から 7 月 18 日，K 期間：2017 年 10 月 16 日から 10 月 24 日）における，パイプ歪計の深度 8.5m の変化と荷重計 A3-14，A1-23，A2-12 の荷重値との関係を示す．

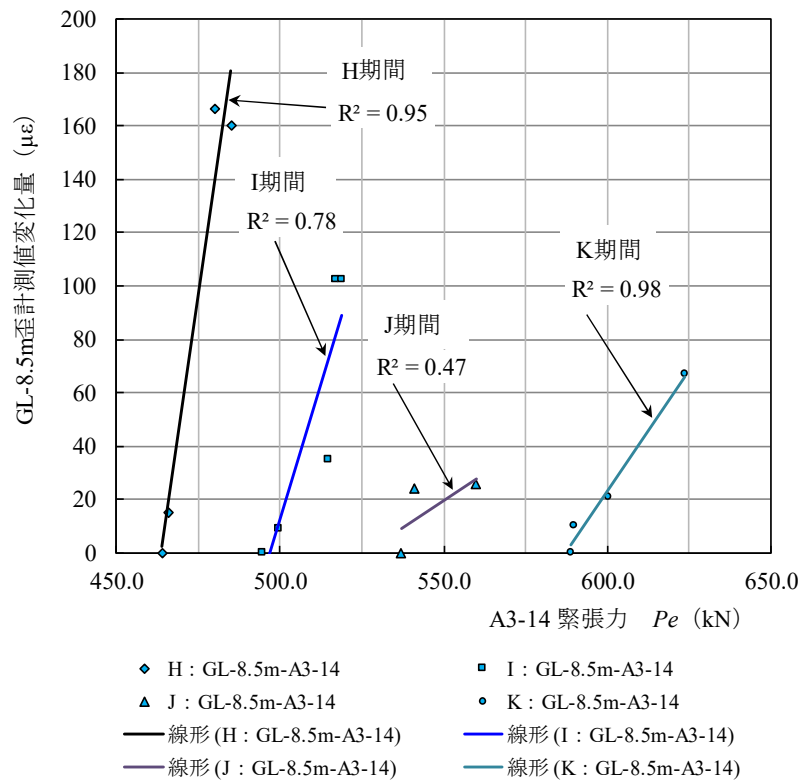


図-3.32 法面4のA3-14緊張力変化とパイプ歪計の関係

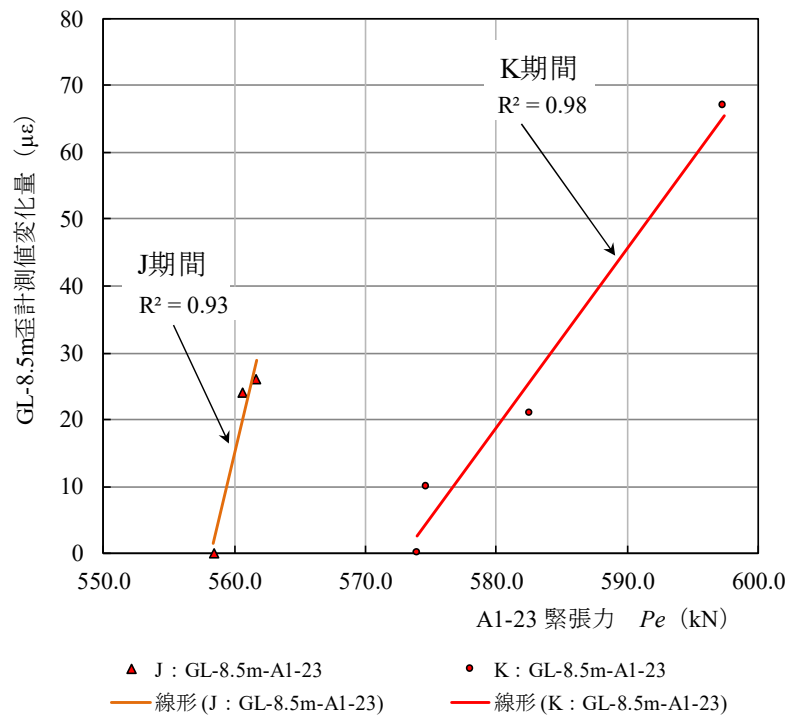


図-3.33 法面4のA1-23緊張力変化とパイプ歪計の関係

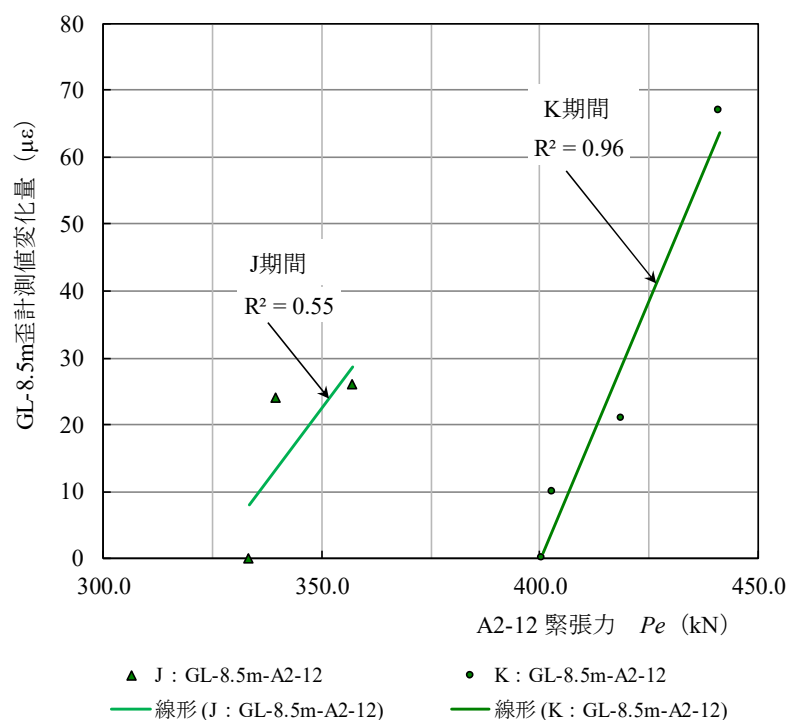


図-3.34 法面 4 の A2-12 緊張力変化とパイプ歪計の関係

図-3.32 に示す 4 期間とも計測が行われた荷重計 A3-14 について見ると、測定数が少ないものの、いずれも歪と緊張力の増加に対応が認められる。また、J 期間、K 期間に計測が行われた荷重計 A1-23 (図-3.33)、A2-12 (図-3.34) についても、同様に歪の増加に伴って緊張力の増加が認められる。パイプ歪計の変化量と荷重計の荷重値との R^2 は、パイプ歪計の変化量が $26\mu\epsilon$ と小さく、データ数が 3 点と少ない J 期間においては低い値 (荷重計 A3-14 の 0.47、A2-12 の 0.55) を示すものの、その他の H, I, K 期間では、0.78~0.98 と 0.7 以上の高い値となっている。

3.3.5 荷重計と変位観測機器の相関の検証

表-3.2 に、各法面における各種変位観測機器とアンカーに設置した荷重計の荷重値との R^2 、各種変位観測機器の変化量 δ_e (mm もしくは $\mu\epsilon$) ならびにアンカー荷重の変化量 ΔT (kN)、およびデータ数を示す。

表-3.2 荷重計と変位観測機器の決定係数

法面 番号	荷重計 番号	緊張力 変化量 ΔT (kN)	変位観測機器		変化量 δ_e (mm)	データ 数 (個)	決定 係数 R^2
			観測手法	番号			
1	HT4-2	246.3	光波測量	5-1	30.1	30	0.93
				5-2	23.9	30	0.92
				4-1	29.7	30	0.96
				4-2	29.8	30	0.95
	HT4-4	189.5	光波測量	5-1	30.1	30	0.91
				5-2	23.9	30	0.90
				4-1	29.7	30	0.95
				4-2	29.8	30	0.94
	HT3-2	13.8	地中伸縮計	H-1	1.5	16	0.95
				H-4	1.3	16	0.95
	HT3-15	13.8	地中伸縮計	H-1	1.5	16	0.97
				H-4	1.3	16	0.98
2	5-2-29	43.3	挿入型 孔内傾斜計	No.8	12.3	21	0.96
		25.5		No.8	7.7	14	0.90
				No.4	9.5	14	0.82
	4-2-30	36.3	挿入型 孔内傾斜計	No.8	7.7	14	0.87
				No.4	9.5	14	0.91
	4-2-36	30.0	挿入型 孔内傾斜計	No.8	7.7	14	0.95
No.4				9.5	14	0.85	
3	B-18	3.8	設置型 孔内傾斜計	No.1	1.0	13	0.71
				No.2	0.3	13	0.82
	D-18	5.4	設置型 孔内傾斜計	No.1	1.0	13	0.87
				No.2	0.3	13	0.82
法面 番号	荷重計 番号	緊張力 変化量 ΔT (kN)	変位観測機器		変化量 δ_e ($\mu\epsilon$)	データ 数 (個)	決定 係数 R^2
4	A1-23	2.6	パイプ歪計	BV-1CL	26	3	0.93
		23.4			67	4	0.98
	A2-12	22.3	パイプ歪計	BV-1CL	26	3	0.55
		40.6			67	4	0.96
	A3-14	21.0	パイプ歪計	BV-1CL	166	4	0.95
		24.0			102	4	0.78
		22.9			26	3	0.47
		34.7			67	4	0.98

法面 1 においては、光波測量により求められた δ_e の 23.9mm～30.1mm に対し、 ΔT は 189.5kN、246.3kN で、 R^2 は 0.90～0.98 と高い相関が認められる。また、地中伸縮計により求められた δ_e の 1.3mm および 1.5mm に対し、 ΔT は 13.8kN となり、 R^2 は 0.95～0.98 と高い相関が認められる。本法面の地中伸縮計は、アンカーと平行に斜め下方 11 度方向に設置されているため、 R^2 がほぼ 1 に近い高い相関が得られていると考えられる。

法面 2 においては、挿入型傾斜計により求められた δ_e の 7.7mm～12.3mm に対し、 ΔT は 2.5.5kN～43.3kN で、 R^2 は 0.82～0.96 と高い値となっている。

法面 3 においては、設置型孔内傾斜計により求められた δ_e の 0.3mm および 1.0mm に対し、 ΔT は 3.8kN および 5.4kN で、 R^2 は 0.71～0.87 を示す。

法面 4 においては、4 期間のパイプ歪計の変化量 δ_e が $26\mu\epsilon$ ～ $166\mu\epsilon$ に対し、 ΔT は 2.6kN～40.6kN となっている。本法面では、他の法面に比べて各期間のデータ数が 3 点から 4 点と少なく、 R^2 の評価に十分でなく低い値を示すものが一部に見られるが、これらを除くとパイプ歪計の変位に対応して緊張力の増加が確認できる。

図-3.35 は、緊張力変化量 ΔT と決定係数 R^2 の関係を示したものである。この結果より、光波測量、地中伸縮計、挿入型孔内傾斜計、設置型孔内傾斜計の観測結果と荷重計による緊張力との R^2 は 0.7 を超え高い相関を示す。このうち光波測量では、200kN 程度以上の大きな緊張力変化量を捉えるのに対し、地中伸縮計、挿入型孔内傾斜計、設置型孔内傾斜計では、50kN 以下の小さな緊張力変化量においても高い相関が認められる。また、パイプ歪計では、データ数が少ないため R^2 が 0.7 を下回るものを除くと、歪計の変化量が $26\mu\epsilon$ に対し、50kN 以下の小さな緊張力変化量も捉えることができている。

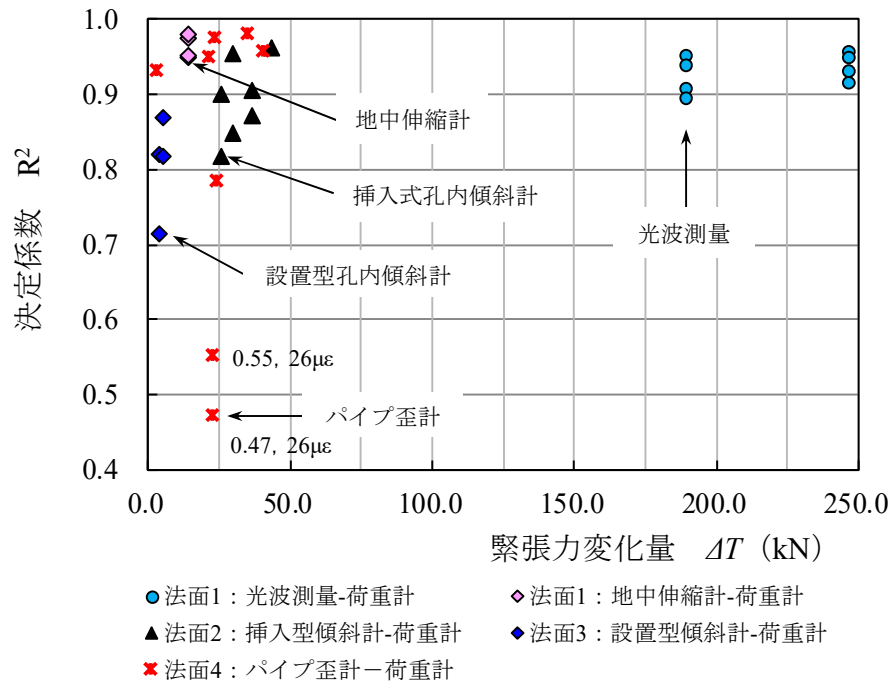


図-3.35 緊張力変化量と決定係数 R^2 の関係

表-3.3 は，高速道路で用いられる変位観測機器の管理基準値の目安⁵¹⁾を示したものである。「点検・要注意または観測強化」となる変位速度は，伸縮計，光波測距儀で $5\text{mm}/10$ 日，孔内傾斜計で $1\text{mm}/10$ 日，パイプ歪計で $100\mu\epsilon$ 以上となっており，これらと比べて小さな変化においても変位観測機器の変化量 δ_e と荷重変化量 ΔT との間に高い相関が見られ，アンカーに設置した荷重計は，各種変位観測機器と同様に地盤変動を捉えて変化している。

図-3.36 は，テンドン自由長 (l_{sf}) と決定係数 R^2 との関係を示したものである。4 法面のうち最もテンドン自由長が長いものは法面 4 の 20.0m で，最も短いものは法面 3 の 5.1m である。決定係数 R^2 とテンドン自由長との間に有意な関係は見られず，各種変位観測と荷重変化量との間にテンドン自由長の影響はないと考えられる。

表-3.3 各種変位観測機器における管理基準値の目安⁵¹⁾

観測機器	表記法	対応区分			
		点検または観測強化	対策工の検討	警戒・応急対策	嚴重警戒・一次退避
伸縮計	変位速度	5mm以上 /10日	5~50mm /10日	10~100mm /10日	100mm以上 /1日
地中伸縮計					
光波測距儀					
孔内傾斜計		1mm以上 /10日	5~50mm /10日	—	—
パイプ歪計	累積値	100 $\mu\epsilon$ 以上	1,000~5,000 $\mu\epsilon$	—	—

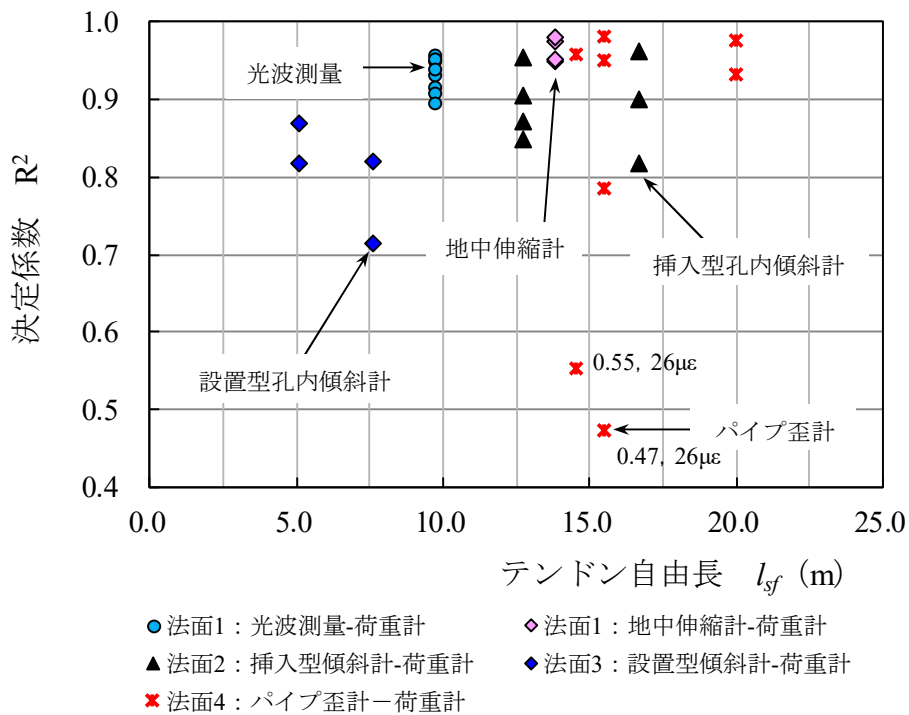


図-3.36 テンドン自由長と決定係数の関係

3.4 アンカー伸び量と変位観測変化量の比較

アンカーに作用している緊張力は、テンドン自由長の伸び量に依存して増加することが考えられる。そこで、各法面におけるアンカー荷重による緊張力変化量 ΔT を基に、前述した式(1)から求められるテンドン自由長の伸び量 u と、それに対応する各種変位観測機器の δ_e (法面 1 では光波測量と地中伸縮計，法面 2 では挿入型孔内傾斜計，法面 3 では設置型孔内傾斜計) との関係について検討を行ってみる。

まず、法面の各種変位観測機器の変化量 δ_e と緊張力変化量 ΔT から求められるテンドン自由長の伸び量 u の比較を行ってみる。表-3.4 に法面の各種変位観測機器の変化量 δ_e , ΔT から求められるテンドン自由長の伸び量 u ，およびテンドン自由長の伸び量と各種変位観測機器の変化量の比率 (u/δ_e) を示す。

図-3.37 に変位観測変化量 δ_e とテンドン自由長の伸び量 u との関係および原点を通る一次回帰式と決定係数を示す。両者には R^2 が 0.94 と高い相関を示す線形関係が認められる。また、変位観測の実測値に対し、テンドン自由長の伸び量 u は概ね 75%程度であり、変位観測変化量 δ_e に比べて若干小さい値を示す。

表-3.4 変位観測変化量とアンカーの伸び量の比率

法面 番号	観測 機器 番号	深度 (m)	期 間	変化量 δ_e (mm)	荷重計 番号	テンドン 自由長 l_{sf} (m)	伸び量 u (mm)	比率	
								u/δ_e	平均
1	5-1	—	A	30.1	HT4-2	9.7	25.0	0.83	0.79
					HT4-4	9.7	19.2	0.64	
	5-2	—	A	23.9	HT4-2	9.7	25.0	1.04	
					HT4-4	9.7	19.2	0.80	
	4-1	—	A	29.7	HT4-2	9.7	25.0	0.84	
					HT4-4	9.7	19.2	0.65	
4-2	—	A	29.8	HT4-2	9.7	25.0	0.84		
				HT4-4	9.7	19.2	0.64		
1	H-1	—	C	1.5	HT3-2	6.2	0.7	0.50	0.53
					HT3-15	6.2	0.7	0.50	
	H-4	—	C	1.3	HT3-2	6.2	0.7	0.57	
					HT3-15	6.2	0.7	0.57	
2	No.8	13.5 ~ 14.5	E	12.3	5-2-29	16.7	5.5	0.45	0.42
			F	7.7	5-2-29	16.7	3.2	0.42	
					4-2-30	12.7	3.5	0.45	
					4-2-36	12.7	2.9	0.38	
	No.4	0.5 ~ 9.0	F	5.0	5-2-29	16.7	3.2	0.65	0.64
					4-2-30	12.7	3.5	0.70	
4-2-36					12.7	2.9	0.58		
3	No.1	2.5	G	1.0	B-18	7.6	0.5	0.51	1.00
					D-18	5.1	0.5	0.49	
	No.2	7.5	G	0.3	B-18	7.6	0.5	1.52	
					D-18	5.1	0.5	1.48	

変位観測機器

法面1：光波測量（5-1, 5-2, 4-1, 4-2）

法面1：地中伸縮計（H-1, H-2）

法面2：挿入型孔内傾斜計（No.8, No.4）

法面3：設置型孔内傾斜計（No.1, No.2）

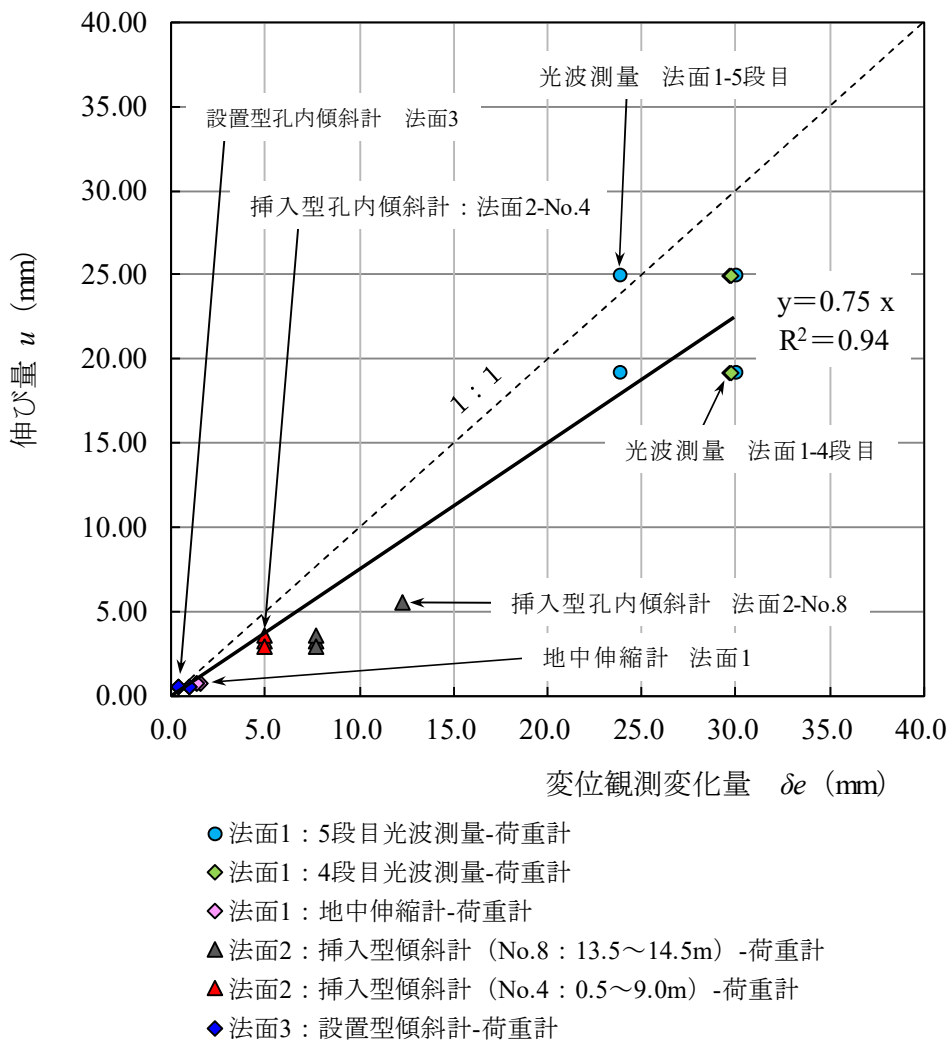


図-3.37 変位観測変化量とアンカー伸び量の関係

しかしながら、光波測量、挿入型孔内傾斜計、設置型孔内傾斜計の変位観測機器の変位方向は、アンカーの打設方向と必ずしも一致しない。そこで、アンカーの伸び量 u を変位方向に換算して、変位観測機器の変化量 δe と比較した。アンカーの伸び量 u の変位方向への換算は、図-3.38 に示す断面におけるアンカー傾角および平面における変位観測機器の変位方向とアンカー方向と関係から、テンドン自由長の伸び量 u (mm) をアンカー傾角 (α) から水平成分に補正して u' (mm) を求め、さらに変位観測機器の変位方向とアンカー方向がなす角 (θ)

から、換算変位量 uH' (mm) を求めた。なお、法面 3 の挿入型孔内傾斜計 No.4 では、すべり面深度 8.0m 以浅の累積変位が地表面に向かって北方向(A軸のマイナス方向)に戻るような変動をしている(図-3.9)。このため、地表面のアンカー頭部とすべり面以深の地盤を結ぶ自由長の伸び量の比較には、深度 9.0~0.5m の変化量を比較対象とした。また、法面 1 の地中伸縮計は、アンカーと平行して設置しているため、変化量 δe と伸び量 u をそのまま比較した。

表-3.5 に法面の各種変位観測機器の変化量 δe , ΔT から求められるアンカーの伸び量 u , 換算変位量 uH' (mm), アンカー伸び量もしくは換算変位量と各種変位観測機器の変化量の比率 ($u/\delta e$, $uH'/\delta e$) を示す。

図-3.39 に変位観測変化量 δe とアンカー自由長の伸び量 u および換算変位量 uH' の関係、原点を通る一次回帰式と決定係数を示す。両者には R^2 が 0.93 と高い相関を示す線形関係が認められる。また、変位観測の実測値に対し、アンカーの伸び量 u および換算変位量 uH' は概ね 80%程度であり、アンカーの伸び量を変位観測の変位方向に換算した uH' についても、変位観測変化量 δe に比べて若干小さい値となった。

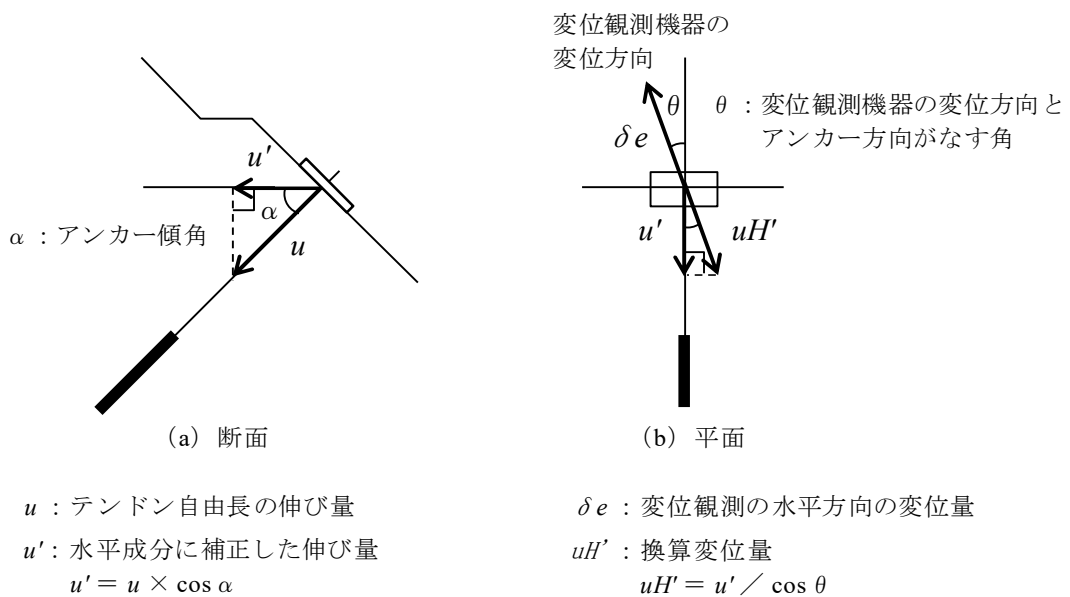


図-3.38 アンカー方向と変位方向による換算変位量 uH' の算出

表-3.5 変位観測変化量とアンカーの伸び量・換算変化量の比率

法面 番号	観測 機器 番号	深度 (m)	期 間	変位量 δe (mm)	荷重計 番号	テンドン 自由長 l_{sf} (m)	伸び量 u (mm)	換算 変化量 uH' (mm)	変位量比	
									$u/\delta e$	平均
1	5-1	—	A	30.1	HT4-2	9.7	25.0	27.6	0.92	0.84
					HT4-4	9.7	19.2	21.3	0.71	
	5-2	—	A	23.9	HT4-2	9.7	25.0	28.4	1.19	
					HT4-4	9.7	19.2	21.9	0.91	
	4-1	—	A	29.7	HT4-2	9.7	25.0	26.4	0.89	
					HT4-4	9.7	19.2	20.3	0.68	
4-2	—	A	29.8	HT4-2	9.7	25.0	21.9	0.73		
				HT4-4	9.7	19.2	20.9	0.70		
1	H-1	—	C	1.5	HT3-2	6.2	0.7	—	0.50	0.53
					HT3-15	6.2	0.7	—	0.50	
	H-4	—	C	1.3	HT3-2	6.2	0.7	—	0.57	
					HT3-15	6.2	0.7	—	0.57	
2	No.8	13.5 ~ 14.5	E	12.3	5-2-29	16.7	5.5	6.1	0.49	0.47
			F	7.7	5-2-29	16.7	3.2	3.6	0.46	
					4-2-30	12.7	3.5	3.9	0.50	
					4-2-36	12.7	2.9	3.2	0.42	
	No.4	0.5 ~ 9.0	F	5.0	5-2-29	16.7	3.2	3.3	0.66	0.66
					4-2-30	12.7	3.5	3.6	0.72	
4-2-36					12.7	2.9	3.0	0.59		
3	No.1	2.5	G	1.0	B-18	7.6	0.5	0.7	0.66	1.13
					D-18	5.1	0.5	0.6	0.63	
	No.2	7.5	G	0.3	B-18	7.6	0.5	0.6	1.67	
					D-18	5.1	0.5	0.5	1.58	

動態観測機器

法面1：光波測量（5-1, 5-2, 4-1, 4-2）

法面1：地中伸縮計（H-1, H-2）

法面2：挿入型孔内傾斜計（No.8, No.4）

法面3：設置型孔内傾斜計（No.1, No.2）

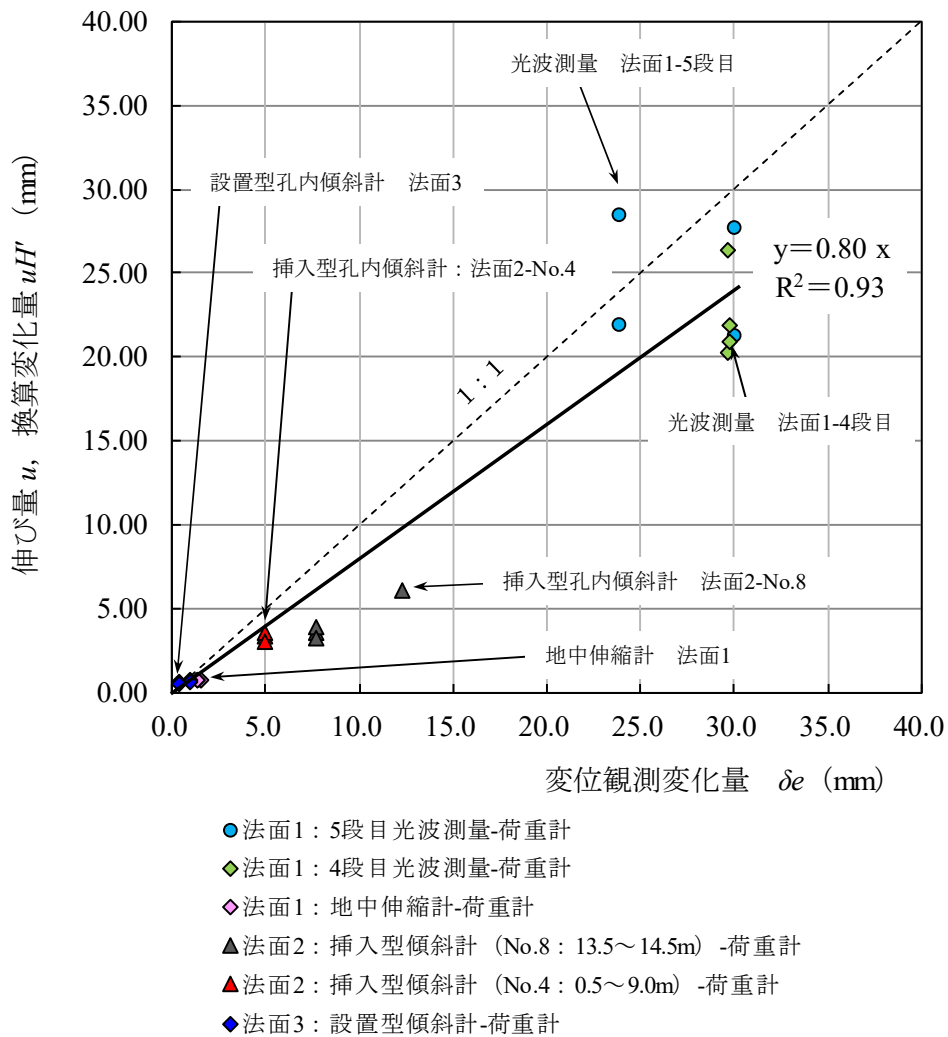


図-3.39 変位観測変化量とアンカー伸び量・換算変化量の関係

次に，アンカーのテンドン自由長 (l_{sf}) の長短が，アンカーの伸び量 u と変化量 δe の比率に及ぼす影響について検討してみる。

図-3.40 に各法面の荷重計設置アンカーのテンドン自由長と $u/\delta e$ の関係を示す。テンドン自由長と変化量比 $u/\delta e$ との間に明瞭な関係は認められない。一般にテンドン自由長が 20m 以内のアンカーでは，シーとテンドンの摩擦損失は無視して良いとされており¹⁴⁾，自由長の長短に関わらず，摩擦損失による影響は無視できると考えられる。本研

究で対象としたアンカーの自由長は 20m 以下であるため、明瞭な関係が見られなかったと考えられる。また、本論で比較したアンカーの引張り材（テンドン）は PC 鋼より線で、このリラクセーションによる減少率は 5%程度とされており¹⁴⁾、今回求めた伸び量と変化量の比率 u/δ_e への影響は小さいと考えられる。

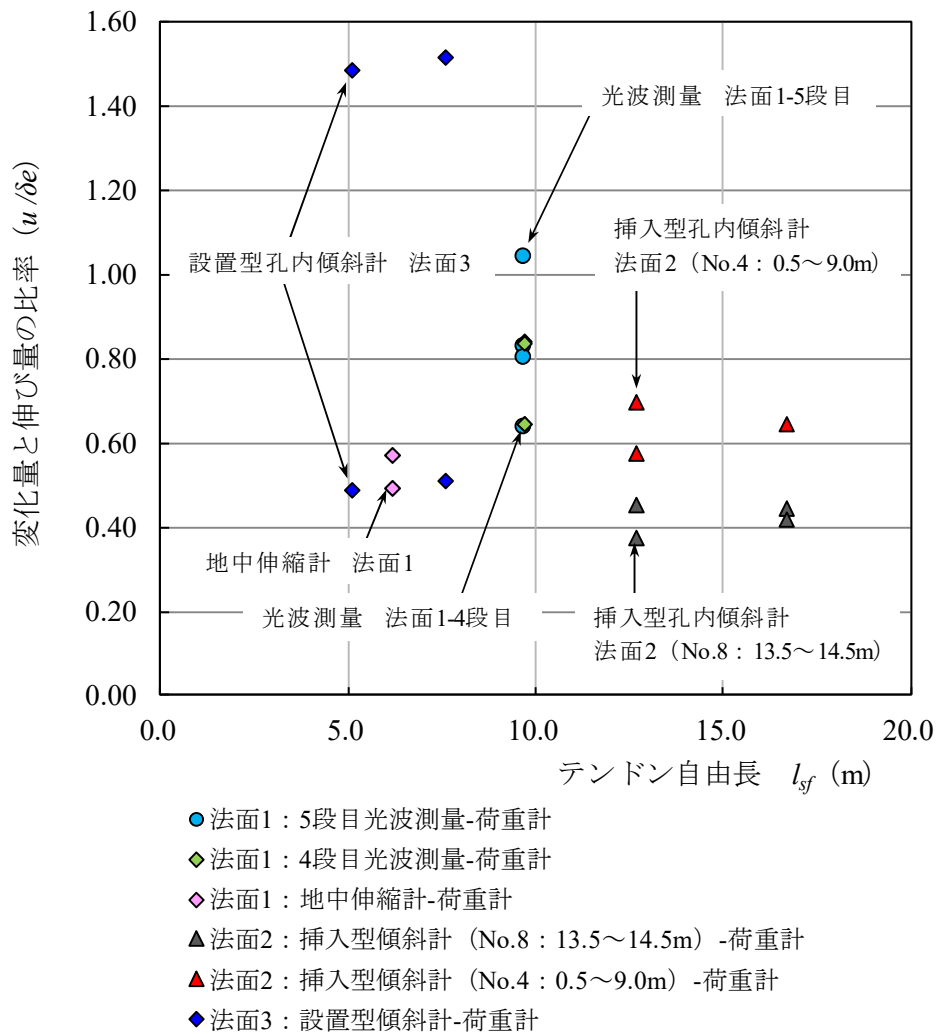


図 -3.40 テンドン自由長と u/δ_e の関係

3.5 変位方法と決定係数および変化量比率の関係

法面 1 の光波測量，法面 2 の挿入型傾斜計，法面 3 の埋設型傾斜計の観測における変位方向と荷重計を設置したアンカーの設置方向の関係から，これまで述べてきた決定係数 R^2 と変化量の比率 (u/δ_e) について検討を行ってみる．

表-3.6 に法面の各種変位観測機器の変化量 δ_e ，アンカーの伸び量 u ，変位観測機器の変位方向とアンカーがなす角，決定係数 R^2 および変化量の比率 (u/δ_e) を示す．各法面の変位方向とアンカーがなす角は，法面 1 において 22.1 度から 30.6 度，法面 2 において 12.5 度から 25.5 度，法面 3 において 22.0 度および 36.0 度であり，アンカー対策が有効に機能するとされる 0 度から 40 度程度までの範囲¹³⁾に入っている．

図-3.41 に変位方向とアンカーがなす角と決定係数 R^2 の関係を示す．両者の間に明瞭な相関は見られず，40 度程度までの範囲内において，変位方向とアンカーがなす角に関係はなく，いずれも決定係数 R^2 は高い値を示すことが分かる．

図-3.42 に変位方向とアンカーがなす角と変化量と伸び量の比率 (u/δ_e) の関係を示す．図中において，法面 3 の設置型傾斜計 No.2 の深度 7.5m における変化量と，B-18 および D-18 の伸び量の比率 u/δ_e がいずれも 1.5 の高い位置にプロットされる．No.2 の深度 7.5m の変化量は 0.3mm と，表-3.3 に示す各種変位観測機器における管理基準値の目安や，他の法面の変位観測機器の変化量に比べて小さな値であるため， u/δ_e が高くなったものと考えられる．法面 3 の設置型傾斜計 No.2 の深度 7.5m の変化量と B-18 および D-18 の伸び量を除くと，アンカーがなす角と u/δ_e の間に明瞭な相関は見られず，アンカー対策が有効に機能するとされる 40 度程度までの範囲内において，変位方向とアンカーがなす角による u/δ_e への影響は小さいと考えられる．

表-3.6 変位観測機器の変位方向と決定係数および変化量比

法面 番号	観測 機器 番号	深度 (m)	期 間	変化量 δ_e (mm)	荷重計 番号	伸び量 u (mm)	変位方向と アンカーが かなす角 (度)	決定 係数 R^2	比率 u/δ_e
1	5-1	—	A	30.1	HT4-2	25.0	27.8	0.93	0.83
					HT4-4	19.2	30.6	0.91	0.64
	5-2	—	A	23.9	HT4-2	25.0	22.1	0.92	1.04
					HT4-4	19.2	25.8	0.90	0.80
	4-1	—	A	29.7	HT4-2	25.0	27.8	0.96	0.84
					HT4-4	19.2	30.6	0.95	0.65
	4-2	—	A	29.8	HT4-2	25.0	22.1	0.95	0.84
					HT4-4	19.2	25.8	0.94	0.64
2	No.8	13.5 ~ 14.5	E	12.3	5-2-29	5.5	25.5	0.96	0.45
			F	7.7	5-2-29	3.2	25.5	0.90	0.42
					4-2-30	3.5	25.5	0.87	0.45
					4-2-36	2.9	25.5	0.95	0.38
	No.4	8.0 ~ 9.0	F	9.5	5-2-29	3.2	23.3	0.91	0.38
					4-2-30	3.5	23.3	0.91	0.41
					4-2-36	2.9	23.3	0.85	0.34
	No.4	0.5 ~ 9.0	F	5.0	5-2-29	3.2	12.5	0.69	0.65
					4-2-30	3.5	12.5	0.75	0.70
					4-2-36	2.9	12.5	0.75	0.58
3	No.1	2.5	G	1.0	B-18	0.5	36.0	0.71	0.51
					D-18	0.5	36.0	0.87	0.49
	No.2	7.5	G	0.3	B-18	0.5	22.0	0.82	1.52
					D-18	0.5	22.0	0.82	1.48

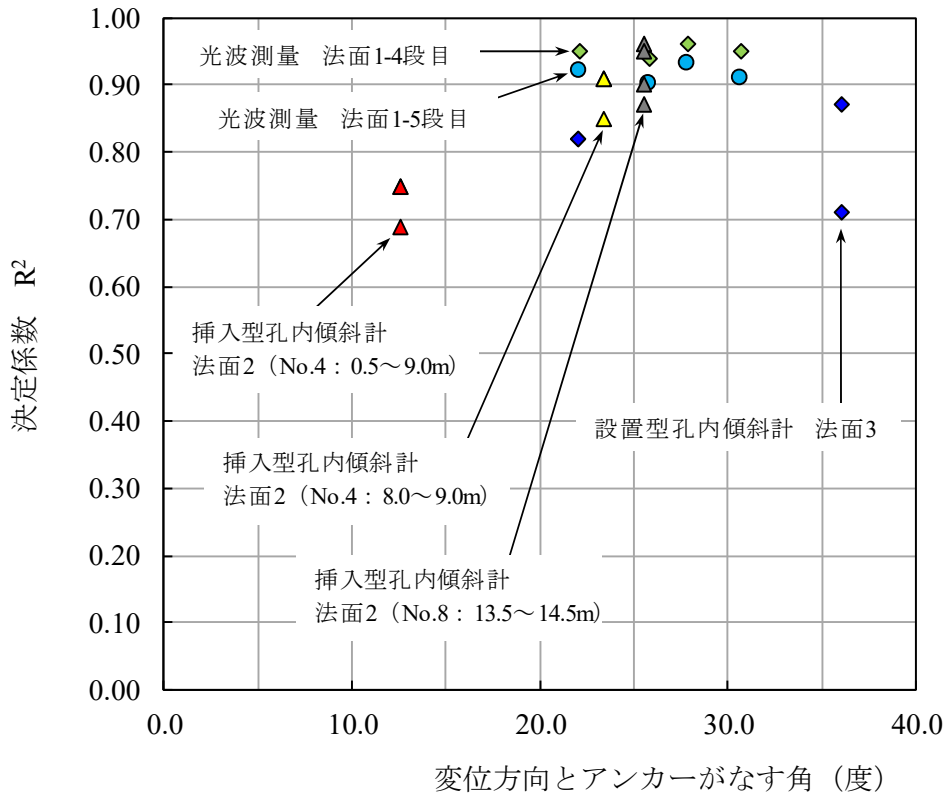
変位観測機器

法面1：光波測量（5-1, 5-2, 4-1, 4-2）

法面1：地中伸縮計（H-1, H-2）

法面2：挿入型孔内傾斜計（No.8, No.4）

法面3：設置型孔内傾斜計（No.1, No.2）



- 法面1 : 5段目光波測量-荷重計
- ◆ 法面1 : 4段目光波測量-荷重計
- ▲ 法面2 : 挿入型傾斜計 (No.8 : 13.5~14.5m) -荷重計
- ▲ 法面2 : 挿入型傾斜計 (No.4 : 8.0~9.0m) -荷重計
- ▲ 法面2 : 挿入型傾斜計 (No.4 : 0.5~9.0m) -荷重計
- ◆ 法面3 : 設置型傾斜計-荷重計

図-3.41 変位方向とアンカーがなす角と R^2 の関係

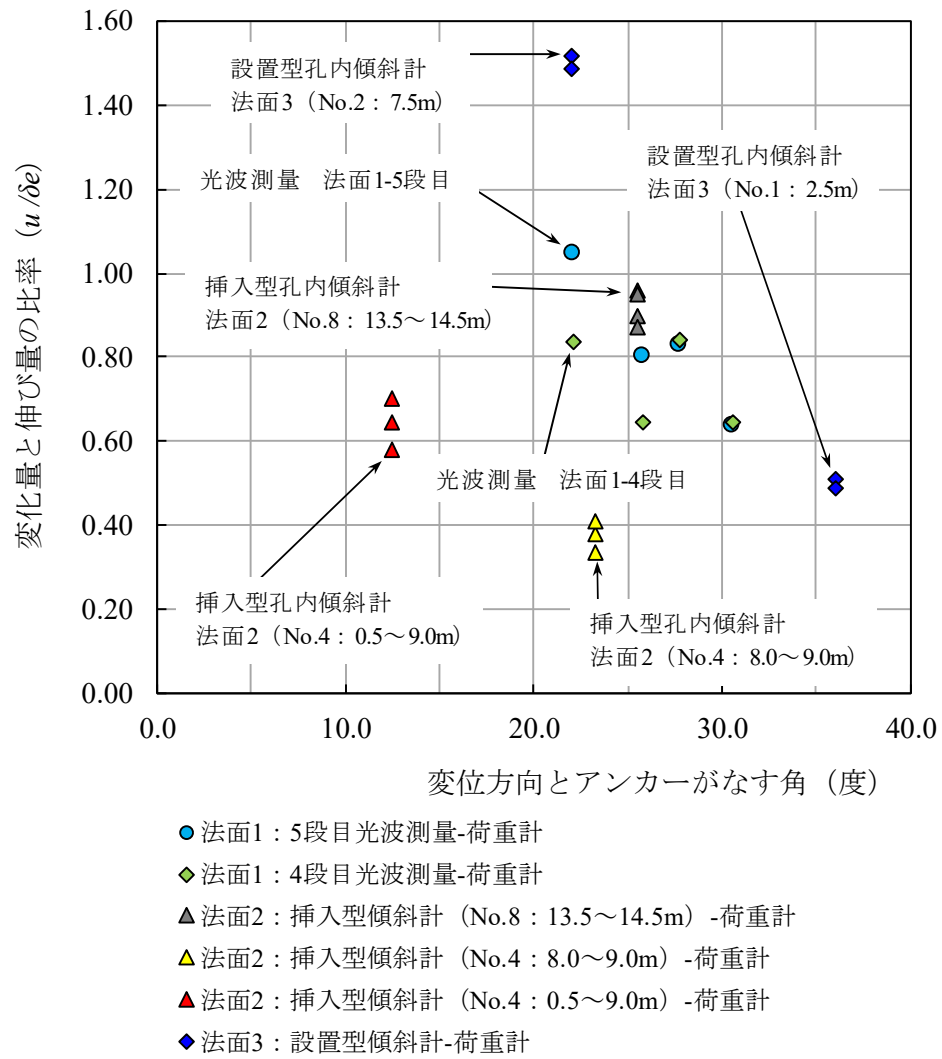


図 -3.42 変位方向とアンカーがなす角と u/δ_e の関係

3.6 まとめ

本章において、法面や地すべり等で用いられる各種変位観測機器とアンカーに設置した荷重計が同時に計測された4法面を対象に、両者の関係について検討を行い、荷重計の変位センサーとしての可能性についての評価を行った。その結果、以下の事項を明らかにすることができた。

- (1) アンカーに設置した荷重計による緊張力の計測値は、法面などの観測に一般的に用いられる各種変位観測機器（光波測量、地中変位計、挿入型傾斜計、設置型孔内傾斜計、パイプ歪計）の変位に良く追従して変化する。
- (2) 各種変位観測機器の変化とアンカーに設置した荷重計による緊張力の変化には高い相関が認められ、両者は一次回帰式で近似できる。また、変位観測機器の変化量が小さい場合でも高い相関が見られ、荷重計による緊張力の計測値は、変位観測機器と同等に地盤変動を捉えていることが確認された。
- (3) 各種変位観測による変化量と、アンカーに設置した荷重計による緊張力の変化量から算出されるテンドン自由長の伸び量の比較を行った結果、緊張力の変化量から求められる伸び量は、変位観測から求められる値の75%～80%程度であった。
- (4) 各種変位観測機器とアンカーに設置した荷重計による緊張力の変化は、変位方向とアンカー方向のなす角が40度程度まで斜交しても高い相関を示すことが確認された。
- (5) アンカーに設置した荷重計は、従来の変位観測機器と同様に、地盤の変位を捉えるセンサーとしての機能を有すると考えられる。

第 4 章 維持管理におけるアンカー緊張力の利用

4.1 はじめに

第 2 章では，アンカーの緊張力は，法面が安定している場合であっても，背面地盤の風化程度などの地質条件の影響を受けて大きく低下し，地質条件が悪くなるにしたがって低下量，ばらつきともに大きくなることを示した．第 3 章では，地盤変位が見られる法面に施工されたアンカーの緊張力は，従来から使用されてきた各種変位観測機器と同様に，地盤の変位を捉えるセンサーとしての機能を有することを示した．アンカー緊張力の評価は，これまでアンカー緊張力の変化が不明確であったため，表-1.1 に示したアンカー維持管理における残存緊張力の健全度の目安²⁾のような定性的な評価により，緊張力が低下もしくは増加している場合一律に，アンカーもしくは法面に問題があると判定されており，これらの関係を考慮した効率的な施工および維持管理が行われていない．

こうした課題に対し，本章ではアンカーの緊張力低下と地質条件の関係，アンカー緊張力が地盤の変位を捉えるセンサーとしての機能を有することについての検討結果に基づき，効率的なアンカーの維持管理に向けて，緊張力が低下しやすい地質条件における建設段階の上げ越し量，供用段階の緊張力低下アンカーに対応する再緊張の提案，アンカー維持管理における緊張力計測の面的配置の提案およびアンカー緊張力変化を基にした新たな法面の管理手法について検討を行った．

4.2 緊張力低下アンカーへの対応方法について

第 2 章では，岩級区分による 8 段階の地質条件においては，地質条件が悪くなるにしたがって，緊張力低下と R_{pt} のばらつきが大きくな

ることを示した。火成岩の D 級および土砂，堆積岩の C_L～D，D 級および土砂，変成岩の D 級（火成岩，堆積岩の結果を踏まえると土砂も含まれると想定される）では，施工から 10 年もしくは 15 年以上を経過すると， R_{pt} が 50%を下回るアンカーが出現する。これらは，表-1.1 に示した残存緊張力とアンカー健全度の目安²⁾に照らすと，機能が大きく低下している，または，機能していない状態であり，「対策を実施」と評価されることとなる。地質条件が悪い法面では，このような評価がなされるアンカーが出現することから，アンカーの維持管理における大きな課題となる。

ここでは，データ数が 32 と多く，緊張力低下と R_{pt} の最大値と最小値の差が大きい，堆積岩の S-3 法面の D 級における，施工から 15.4 年後に実施したリフトオフ試験結果（表-2.9）ならびに，18 年後に実施した緊張力低下アンカーの再緊張と，その後の荷重計による緊張力の計測結果を用いて，建設段階および供用段階における緊張力低下が大きいアンカーへの対応方法を検討してみる。

4.2.1 建設段階における対応方法

建設段階における対応方法として，低下量を見込み，設計アンカー力 (T_d) よりも高い定着時緊張力 (P_t) を導入（上げ越し）し，残存緊張力を T_d に対する残存率 ($R_{td} (= P_t/T_d)$) で評価する方法が考えられる。S-3 法面では，設計アンカー力 (T_d) を定着時緊張力 (P_t) としている。図-4.1 に 15.4 年後のリフトオフ試験の平均値，最大値，最小値と，上げ越し量を T_d に対して，10%，20%，30%，40%，50%とした場合の R_{td} を示す。各上げ越し量における R_{pt} は，上げ越しを行っても R_{td} の最大値と最小値の差とばらつきは変化しないと考え，それぞれの上げ越し量を平均値，最大値，最小値に加算した。S-3 法面では，15.4 年後において残存率が 50%以下となり，残存緊張力とアンカー健全度の目安において，「対策を実施」と評価されるアンカーが 44%存在するのに対し，10%および 20%上げ越し時には 16%，30%および 40%上げ越

し時には 9%、50%上げ越し時には 0%となり、「対策を実施」と評価されるアンカーの割合は減少する。しかし一方では、残存率が高いアンカーも存在するため、30%上げ越し時から、残存率が T_d を超えるアンカーが出現しはじめ、50%上げ越し時には、50%ものアンカーが T_d を超えると想定され、法面に過大な残存緊張力のアンカーが多く存在することになる。また、上げ越しを行う場合、採用するアンカーの許容アンカー力 (T_a) は定着時緊張力より大きくする必要があり¹⁾、切土の進行などによる施工状況の変化によって緊張力が増加する可能性を考慮すると、より大きな余裕のある規格のアンカー、受圧構造物が必要となる。このため、現実的な対応として緊張力低下が大きい地質条件における P_t の上げ越し量は、10%程度までが妥当であり、30%~50%の上げ越しは過大であると考えられる。S-3 法面では、残存緊張力とアンカー健全度の目安において、「対策を実施」と評価されるアンカーが、44%存在するのに対して、10%の上げ越しによって半分以下の 16%にまで減少するとともに、28%のアンカーが、 R_{td} (R_{pt}) で 50%を下回らなくなり、一定の有効性が確認できる。しかし、上げ越しのみでは緊張力低下が大きいアンカーへの対応を十分かつ効率的に行うことはできないため、緊張力低下が大きい地質条件の法面では、次に述べる再緊張を行いやすい構造のアンカーを採用しておくことが必要と考えられる。

4.2.2 供用段階における対応方法

供用段階における緊張力低下が大きいアンカーへの対応方法として、再緊張の実施が考えられる。図-4.2 に S-3 法面において施工から約 18 年後に行った、緊張力低下アンカー (2-2-6, 2-2-7 アンカー) の再緊張と再緊張後の荷重計による緊張力の計測結果を示す。2-2-6 および 2-2-7 アンカーの R_{pt} は、再緊張前にはそれぞれ 8%、11%と、 P_t ($= T_d$) の 10%前後の状態であった。再緊張は、定着部の引き抜けなど、アンカー機能に損失がないことを確認したうえで、 T_d の 80%を目標に 78%、

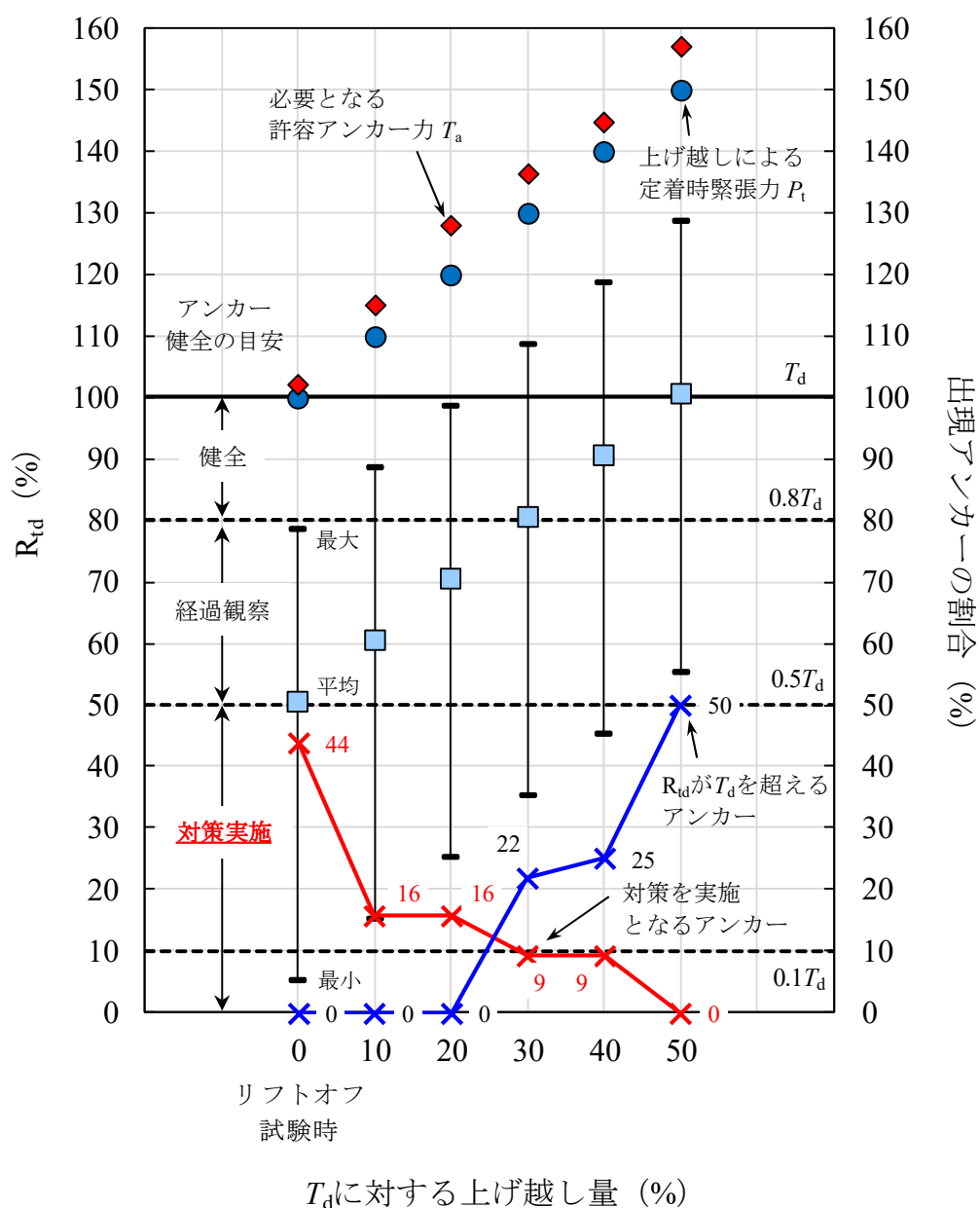


図-4.1 S-3 法面 D 級の 15.4 年後を例とした上げ越し量の検討

77%を導入した。再緊張後の緊張力は、わずかな低下傾向は見られるが、荷重計による計測開始から 4.9 年後においても、2-2-6, 2-2-7 アンカーの R_{pt} は、それぞれ 71%, 65% が保たれており、再緊張は緊張力低下アンカーの対応方法の一つとして有効と考えられる。再緊張の実施時期については、 R_{pt} が 50% を下回り、 R_{pt} のばらつきが大きくなる 15 年～20 年後が効果的ではないかと考えられる。しかし、施工後間もな

い数ヶ月後の時期もしくは、数年後における再緊張の実施も一定の効果があると考えられるため、このような事例を収集し、再緊張の実施時期の検証を行う必要がある。

本検討に用いた法面は、いずれも法面変状のない安定していると評価される法面である。このため、 R_{pt} が50%を下回っても、残存緊張力とアンカー健全度において、直ちに「対策を実施」と評価するのではなく、頭部背面調査や維持性能確認試験などによるアンカー機能の健全性調査⁴⁾を行ったうえで、機能に損失がある場合には機能回復やアンカーの更新、損失がない場合には再緊張やモニタリングを行うなどの対応を講じていくことが妥当と考えられる。

朝日ら³³⁾は、施工から320日間のアンカーの緊張力を計測し、緊張力の残存率は、経過時間の対数で近似できるとしている。また、地盤工学会の「グラウンドアンカー工法の調査・設計から施工まで」²⁹⁾によると、アンカーの緊張力の低下量の推定方法として、経過時間の対数近似による長期的な緊張力低下量の試みについて述べられている。S-3法面の2-2-6、2-2-7アンカーの再緊張後の4.9年間の荷重計による緊張力の計測結果から、それぞれのアンカーの緊張力変化の対数近似式を用いて、再緊張から20年後の緊張力を予測してみた。図-4.3に再緊張から20年後の緊張力の予測を示す。予測は、荷重計による緊張力の計測の2回目以降の1時間に1回の頻度で計測した、4.9年間のデータを用いて、自然対数の近似式を求めた。経過時間(年)による対数の近似式の決定係数(R^2)は、2-2-6アンカーが0.56、2-2-7アンカーが0.83と高い値を示す。対数近似による20年後の2-2-6、2-2-7アンカーの緊張力は、それぞれ576.0kN、512.5kNと予測され、両者の値に大きな差はなく、いずれも再緊張前の63.0kN、69.0kNよりも高い値が得られた。このことから、再緊張は緊張力低下アンカーへの対応方法として有効であると考えられる。

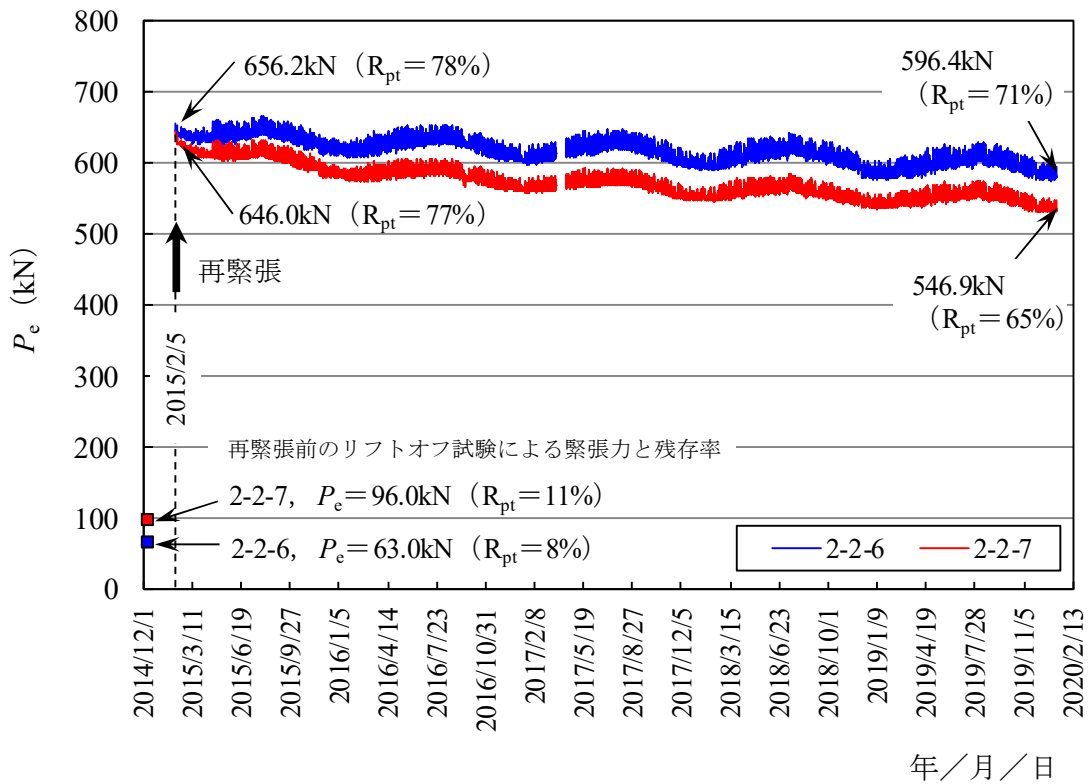


図-4.2 S-3 法面における再緊張後の緊張力計測結果

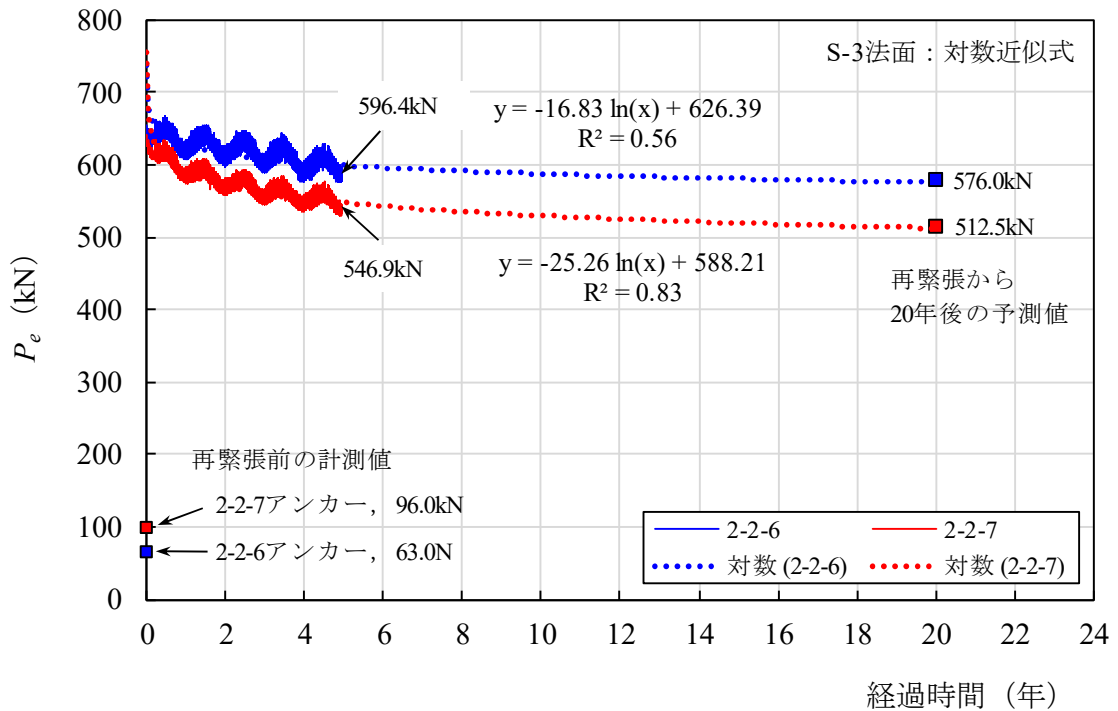


図-4.3 S-3 法面再緊張アンカーの20年後の緊張力の予測

4.3 法面における効率的な緊張力計測配置について

アンカーの緊張力低下は，背面地盤の地質条件に応じて異なり，両者に関係があること，また，アンカーに設置した荷重計は，従来の変位観測機器と同様に，地盤変位を捉えるセンサーとしての機能を有することを示してきた．アンカーの残存緊張力は，アンカーや法面の健全性を評価する指標の一つであり，アンカーの建設段階から供用後の維持管理において，緊張力の計測が行われる．表-4.1に各種要領およびマニュアルによる緊張力の計測数量の目安を示す．土工施工管理要領¹⁹⁾では，アンカーの施工時には荷重計による緊張力管理を行うこととしており，設置数量の目安として，アンカー全本数の5%かつ5本以上（20本未満でこれによりがたい場合は，設置数量を2本とすることができるとしている．維持管理段階においては，維持管理マニュアル²⁾，地盤工学会基準¹⁴⁾，調査要領²²⁾に健全性調査の項目として，荷重計設置，リフトオフ試験の実施に関する記載があり，おおよそ5%～10%かつ3本～5本以上は実施数量の目安とされる．

さらに，健全性調査においてアンカーの健全性に問題があると評価される場合には，より詳細な残存緊張力分布調査（追加調査）や面的調査がなされることとなり，調査要領²²⁾では25%以上が目安とされ，「SAAM ジャッキを用いた既設アンカーのり面の面的面的調査マニュアル（案）（以下，面的調査マニュアル）」⁵²⁾では，全数調査の実施が望ましいが，全数調査が難しい場合には，全アンカー本数の25%～50%程度を目安とした間引き調査を行い，この面的調査結果を基に必要に応じて追加調査を実施するとしている．

このようにアンカーの緊張力管理について，各種要領において建設段階および供用段階の実施数量の目安が記載されている．アンカー施工時の施工管理，維持管理段階の健全性評価における荷重計設置やリフトオフ試験の実施数量の目安は，5%～10%以上かつ3～5本以上とされ，それらの実施位置は，アンカーの健全性評価や同評価結果に基

づいて追加する残存緊張力分布調査や面的調査のような二次調査，さらに必要となる追加調査にとって重要と考えられるものの，効率的な配置や追加調査に関する検討は十分に行われていない．

ここでは，建設段階および維持管理段階において地盤変動が生じ，アンカーの緊張力増加が見られ，残存緊張力分布調査や面的調査のような二次調査，さらにリフトオフ試験を追加した複数の法面を例に効率的な緊張力計測の配置について検討を行う．

表-4.1 各種要領・マニュアルによる緊張力の計測数量の目安

時 期	要領・マニュアル	調査の位置付け	項 目	本数の目安	備 考
建設段階 (施工段階)	NEXCO土工施工管理要領 (2017) ¹⁹⁾	施工管理	荷重計 設置	5%かつ 5本以上	施工数量が20本未満の 場合は2本とすることが できる
供用段階 (維持管理段階)	維持管理マニュアル (2008) ²⁾	健全性調査	荷重計 設置	10%かつ 3本以上	残存緊張力のモニタリ ング
			リフトオフ 試験	10%かつ 3本以上	—
	地盤工学会基準 (2012) ¹⁴⁾	健全性調査	リフトオフ 試験	5%かつ 3本以上	健全性判定で健全性調 査が必要とされたアン カーとその周辺につい ては別途実施
	NEXCO調査要領 (2017) ²²⁾	健全性調査	リフトオフ 試験	5%かつ 5本以上	全数が20本未満の場合 は2本以上
			緊張力 計測	—	既設の荷重計から緊張力 を計測する
残存緊張力 分布調査 (追加調査)	リフトオフ 試験	25%以上	健全度調査の結果から 必要に応じて実施		
面的調査マニュアル(案) (2010) ⁵²⁾	面的調査	リフトオフ 試験	100%が 望ましいが 25%～50%	面的調査結果を基に必 要に応じて追加調査を 実施	

4.3.1 緊張力計測配置の検討に用いた法面

緊張力計測配置の検討に用いた法面のアンカーおよび緊張力計測の数量を表-4.2に示す。3法面はいずれもアンカーが施工された法面に変動や、それに伴う緊張力増加が見られ、残存緊張力分布調査として多くのリフトオフ試験を実施した法面である。法面Aでは、アンカー施工本数の66本に対して、全数の66本（箇所）においてリフトオフ試験による残存緊張力の調査を行っており、リフトオフ試験の試験率（試験数／施工本数）は100.0%である。法面Bでは、アンカー施工本数の88本に対して、53本（箇所）においてリフトオフ試験による残存緊張力の調査を行っており、リフトオフ試験の試験率は60.2%である。法面Cでは、アンカー施工本数の168本に対して、46本（箇所）においてリフトオフ試験による残存緊張力の調査を行っており、リフトオフ試験の試験率は27.4%である。

表-4.2 緊張力計測配置の検討に用いた法面

法面 番号	アンカー 規格	許容 アンカー力 T_a (kN)	降伏 引張り力 T_{ys} (kN)	$0.9 T_{ys}$ (kN)	施工本数 N(本)	設計 アンカー力 T_d (kN)	定着時 緊張力 P_t (kN)	リフトオフ試験		備 考
								試験数 n(本)	試験割合 n/N(%)	
A	EHD5-4	439.2	574.0	516.6	66	369.3	369.3	66	100.0	建設後に法面変動により緊張力が増加
B	SMC5-5	549.0	780.0	702.0	6	474.0	474.0	6	100.0	建設段階および 供用段階に法面 変動により緊張 力が増加
	SMC5-7	768.6	1,092.0	982.8	25	724.0	724.0	13	52.0	
	SMC5-6	658.0	936.0	842.4	32	657.0	657.0	18	56.3	
	SFL-6	940.0	1,322.0	1,189.8	25	940.0	940.0	16	64.0	
	合計	—	—	—	—	88	—	—	53	
C	VSL E5-4	439.0	624.0	561.6	168	341.9	341.9	47	28.0	供用段階に法面 変動により緊張 力が増加

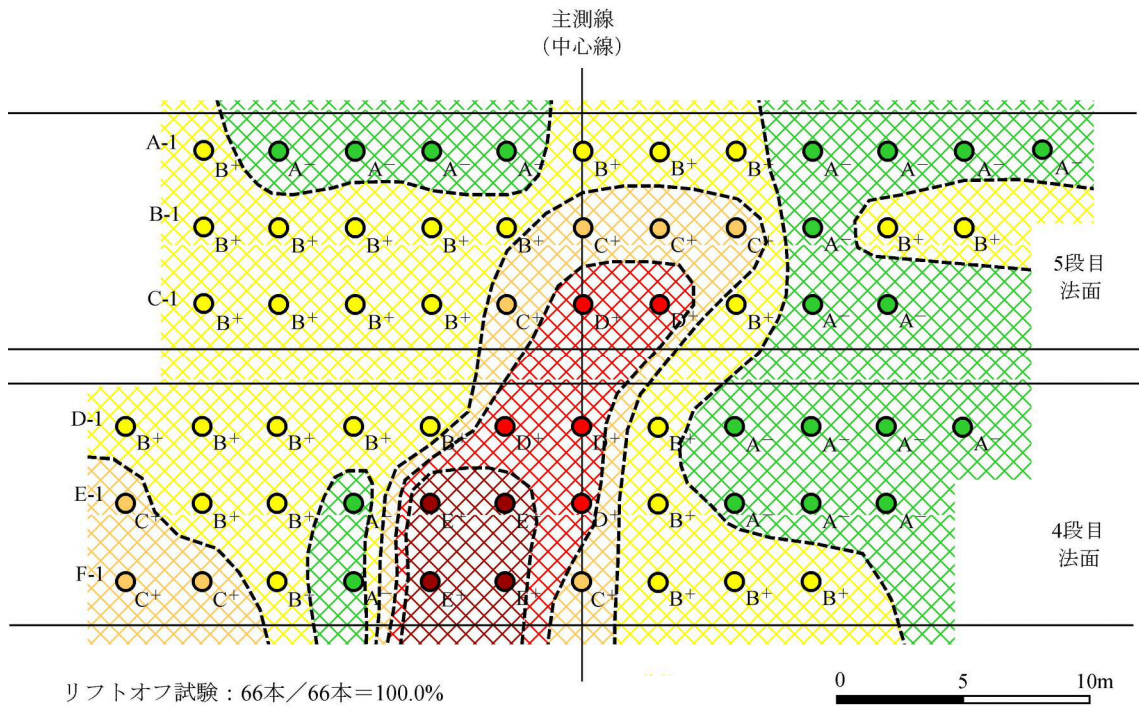
法面 A, 法面 B および法面 C のリフトオフ試験結果に基づく, 残存緊張力の A, B, C, D, E の評価区分の分布図を 図-4.5, 図-4.6 および 図-4.7 にそれぞれ示す. なお, A~E の評価区分の分布図は, 表-4.3 に示すように, 定着時緊張力 (P_t) からの緊張力低下と増加が分かりやすいよう, 緊張力が低下した場合の A から D の右肩に「- (マイナス)」を付けて緑色から青色の寒色系で着色し, 緊張力が増加した場合の A から E の右肩に「+ (プラス)」を付けて緑色から臙脂色の暖色系で着色した.





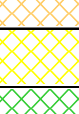





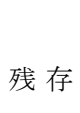





表-4.3 残存緊張力とアンカー健全度の目安²⁾

(A~E の右肩に「+」, 「-」を追記し着色した)

残存緊張力の範囲	健全度	状態	対処例
$0.9 T_{ys}$	E ⁺	破断の恐れあり	緊急対応を実施
	D ⁺	危険な状態になる恐れあり	対策を実施
$1.1 T_a$	C ⁺	許容値を超えている	
T_a	B ⁺	—	経過観察により対策の必要性を検討
T_d	A ⁺	健全	—
P_t	A ⁻	健全	—
$0.8 P_t$	B ⁻	—	経過観察により対策の必要性を検討
$0.5 P_t$	C ⁻	機能が大きく低下している	対策を実施
$0.1 P_t$	D ⁻	機能していない	

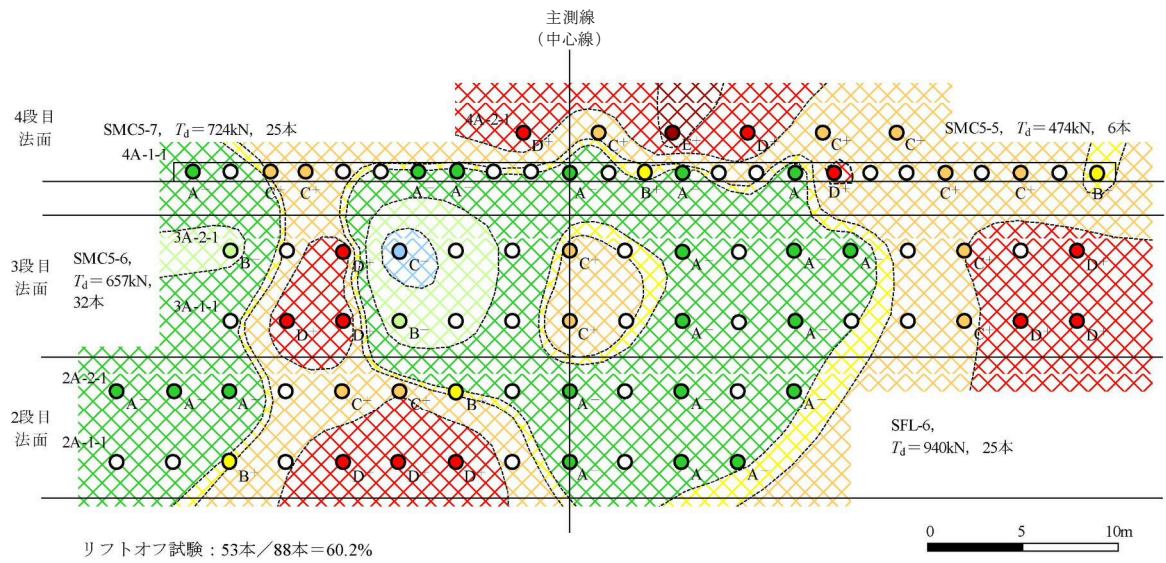
T_{ys} : テンドンの降伏引張り力, T_a : 許容アンカー力,
 T_d : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力



残存緊張力の範囲	健全度	着色・凡例	EHD5-4	評価数 (本)
$0.9 T_{ys}$	E ⁺			4
	D ⁺			5
$1.1 T_a$	C ⁺			8
	B ⁺			29
$P_t = T_d$	A ⁻			20
$0.8 P_t$	B ⁻			0
$0.5 P_t$	C ⁻			0
$0.1 P_t$	D ⁻			0

リフトオフ試験未実施 ○

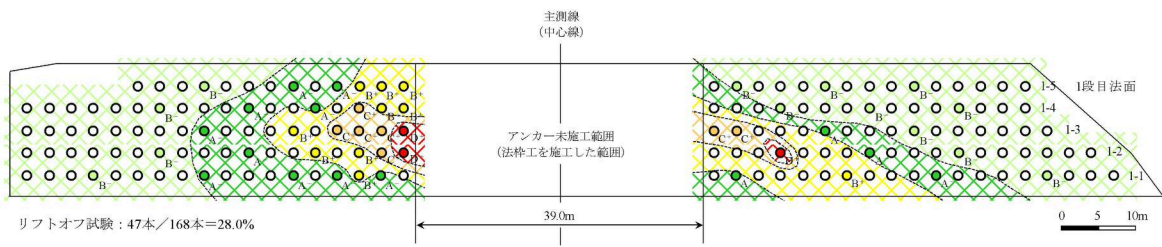
図-4.4 法面 A の残存緊張力評価区分の分布図



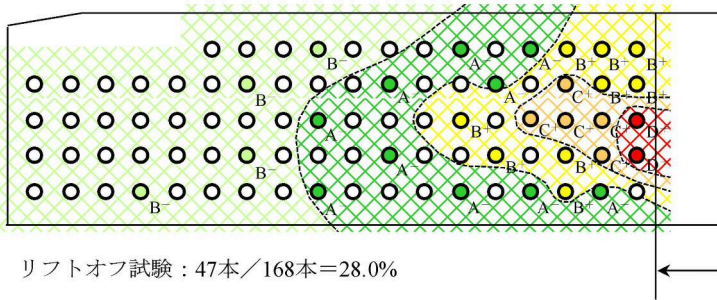
残存緊張力の範囲	健全度	着色・凡例	4A-2 SMC5-5	4A-1 SMC5-7	3A-1, 2 SMC5-6	4A-1, 2 SFL-6	評価数 (本)
$0.9 T_{ys}$	E ⁺						1
	D ⁺		702.0	982.8	842.4	1189.8	12
$1.1 T_a$	C ⁺		603.9	845.5	723.8	1034.0	13
	B ⁺		549.0	768.6	658.0	940.0	4
$P_t = T_d$	A ⁻		474.0	724.0	657.0	940.0	20
	B ⁻		379.2	579.2	525.6	752.0	2
$0.5 P_t$	C ⁻		237.0	362.0	328.5	470.0	1
	D ⁻		47.4	72.4	65.7	94.0	0

リフトオフ試験未実施 ○

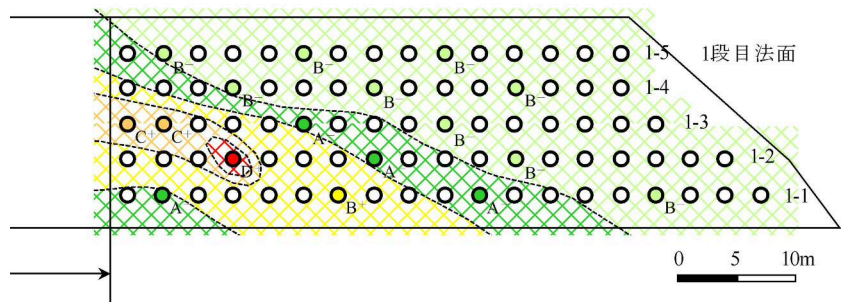
図-4.5 法面 B の残存緊張力評価区分の分布図



左側拡大図



右側拡大図



残存緊張力の範囲	健全度	着色・凡例	VSL E5-4	評価数 (本)
$0.9 T_{ys}$	E ⁺	赤格子	●	0
	D ⁺	赤格子	●	3
$1.1 T_a$	C ⁺	黄格子	●	7
	B ⁺	黄格子	●	10
T_a	A ⁻	緑格子	●	13
$P_t = T_d$	B ⁻	緑格子	●	13
	C ⁻	青格子	●	0
$0.8 P_t$	D ⁻	青格子	●	0
$0.5 P_t$				
$0.1 P_t$				

リフトオフ試験未実施 ○

図-4.6 法面 C の残存緊張力評価区分の分布図

法面 A では、2 段の法面にわたって全 66 本のアンカーが施工されている。基盤地質は中生代白亜紀に属する花崗岩である。アンカーの規格は EHD5-4 であり、定着時緊張力 (P_t) には、設計アンカー力 (T_d) の 369.3kN が採用されている。本法面では、建設直後から法面の変動および亀裂などの変状が見られたため、施工全数の 66 本のアンカーにおいて、リフトオフ試験による残存緊張力分布調査（面的調査）を行った。図-4.4 に示す評価区分の分布図では、主測線の特に一段目法面で緊張力増加が大きく、 C^+ 、 D^+ および E^+ となる領域が存在し、その周辺に緊張力の増加量が小さな B^+ の領域が見られる。1 段目法面の左端部では緊張力が B^+ よりも増加した C^+ の領域が、右端部では緊張力が低下した A^- の領域が見られる。

法面 B では、3 段の法面にわたって全 88 本のアンカーが施工されている。基盤地質は中生代ジュラ紀～三畳紀の野洲川層群に属する頁岩である。アンカーは 4 つの異なる規格が採用されており、4 段目の上から SMC5-5、SMC5-7、SMC5-6、SFL-6 であり、いずれも定着時緊張力 (P_t) には、設計アンカー力 (T_d) が採用され、それぞれ 474.0kN、724.0kN、657.0kN、940.0kN である。本法面では、建設段階に法面変動が確認され、アンカーの施工によって変動は、一旦は収束したが、供用段階の健全性調査において一部に緊張力増加が確認されたため、リフトオフ試験を追加し、施工全数のおよそ 60%にあたる 53 本のアンカーにおいて、残存緊張力分布調査（面的調査）を行った。図-4.5 に示す評価区分の分布図では、主測線の中央部に C^+ となる緊張力増加領域が見られるものの、その周辺は緊張力がやや低下し、 A^- と評価される領域が分布する。また、それより外側では、緊張力が増加し、 C^+ および E^+ となるドーナツ状の領域が見られる。法面の左端部には緊張力が低下した A^- の領域が見られるものの、右端部は緊張力が増加し C^+ および D^+ となる領域となっている。

法面 C では、3 段の法面にわたって全 423 本のアンカーが施工され

ている。基盤地質は中生代ジュラ紀の美濃帯に属する砂岩・頁岩互層である。アンカーの規格は VSL E5-4 であり、定着時緊張力 (P_t) には、設計アンカー力 (T_d) の 341.9kN が採用されている。表-4.2 に示すアンカー施工本数とリフトオフ試験の数量、図-4.6 に示す評価区分の分布図は、アンカーが施工された 3 段の法面のうち、緊張力増加が見られた 1 段目法面における調査結果である。なお 1 段目中央部の 39m 間は、地質の状態が良好であったため、当初アンカーの施工が行われず、法枠工が施工され、この法枠工の両側に全 168 本のアンカーが施工されている。本法面では、供用段階の健全性調査において一部に緊張力増加が確認されたため、リフトオフ試験を追加し、施工全数のおよそ 30%にあたる 47 本のアンカーにおいて、残存緊張力分布調査（面的調査）を行った。図-4.6 に示す評価区分の分布図では、法枠工の施工範囲の両側で緊張力が増加し、 B^+ 、 C^+ および D^+ となる領域が見られる。その周辺では、緊張力が低下する傾向が顕著になり、次第に小さくなり、法面の両端部に向かって A^- 、 B^- の領域が見られる。

4.3.2 緊張力計測配置の基本的な考え方と追加調査の流れ

緊張力増加が見られた 3 法面を例とした効率的な緊張力配置の検討にあたって、様々な段および列数において施工されるアンカーに対する荷重計設置もしくは健全性調査のリフトオフ試験実施位置の基本的な配置について検討する。アンカーの施工は、1 段の法面もしくは複数段の法面において、施工段数および列数が多様であるため、ここでは、アンカーが 2 段の法面にそれぞれ 2 段、3 段、4 段、5 段で施工される場合を想定し、各種要領²⁾、¹⁴⁾、²²⁾に示された健全性調査数量の目安である全数の 5%~10%かつ 3~5 本以上で荷重計設置もしくはリフトオフ試験位置を配置することとする。第 2 章に示したアンカーの緊張力低下は、地質条件悪い場合には残存率の最大値と最小値の差とばらつきが大きくなる傾向がある。また、本章に示した緊張力増加した 3 法面の例では、法面変動に伴う緊張力の増加は、必ずしも主測線（中

心線)において大きくなく、一様な増加も見られるとは限らないため、荷重計設置やリフトオフ試験実施位置は、法面全体の緊張力が把握できるように、まんべんなく配置する必要があるといえる。

ここで、2段の法面を対象に1法面あたり2段、3段、4段および5段ずつ、23列のアンカーが施工された法面の緊張力計測の配置例を図-4.7、図-4.8、図-4.9および図-4.10に示す。緊張力計測の配置方法は、主測線（中心線）において列方向に2段間隔で配置し、左右に設ける副測線は3列飛ばしとし、左-1、右-1とした奇数の副測線では、主測線と千鳥になるよう2段間隔以上空けて主測線より数量を少なくして配置する。さらにその外側の左-2、右-2とした偶数の副測線では、主測線と同様の数量を千鳥になるように配置する。これらよりもさらに両端にアンカーが施工される場合には、左右の奇数および偶数の副測線の配置を千鳥配置となるよう繰り返していく。なお、これらが対応しない場合、例えば1段目の法面にはアンカーが4段、2段目の法面にはアンカーが2段施工される場合には、1法面あたり4段のケースと2段のケースを組み合わせた配置を行う。

図-4.7に示した2段法面の2段・23列のケースの計測数は5箇所（本）であり、施工全数の92本に対する計測率は5.4%である。また、図-4.8に示した2段法面の3段・23列では、計測数は8箇所、計測率は5.8%、図-4.9に示した2段法面の4段・23列では、計測数は10箇所、計測率は5.4%、図-4.10に示した2段法面の5段・23列では、計測数は13箇所、計測率は5.7%である。

これら4ケースにおいては、両端のアンカーが2列ずつ計測できないこととなるため、余り数による計測率を求めてみる。表-4.4にアンカーの施工列数による緊張力の計測率の変化を示す。列の違いによって施工全数に対する割合は変化するが、おおむね5.4%～7.0%の緊張力の計測率となる。これらの計測率は、各種要領および基準²⁾、¹⁴⁾、¹⁹⁾、²²⁾に示される健全性調査の目安である5～10%の範囲に入っている。

なお，最端部の計測が行うことができない配置の場合，必要に応じて最端部の計測を加えることも考えられる．

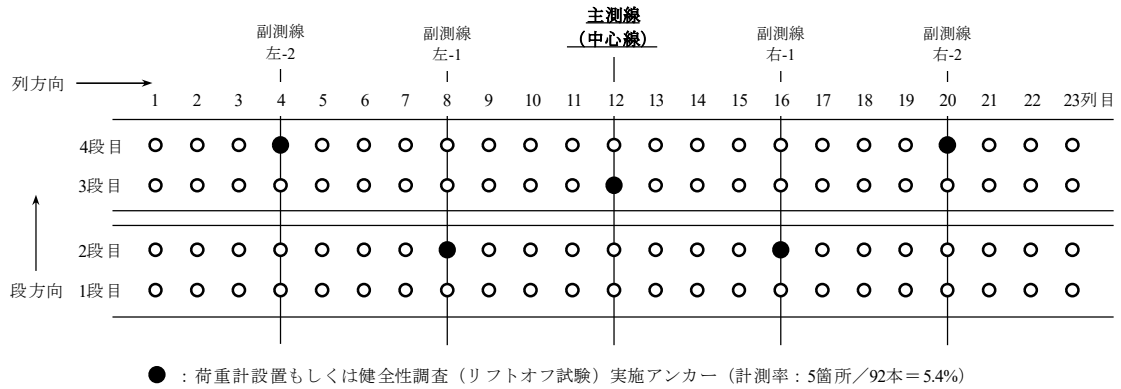


図-4.7 2段法面の2段・23列の緊張力計測の配置例

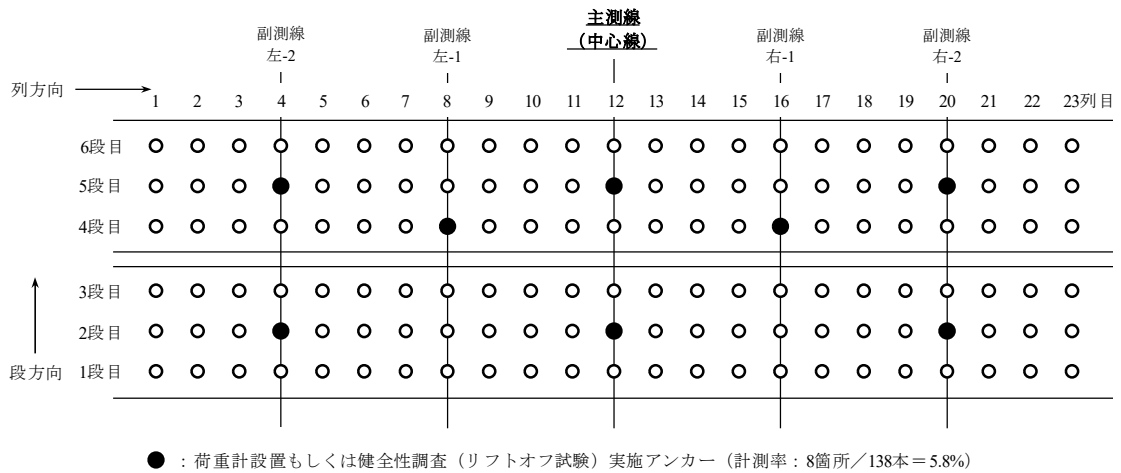


図-4.8 2段法面の3段・23列の緊張力計測の配置例

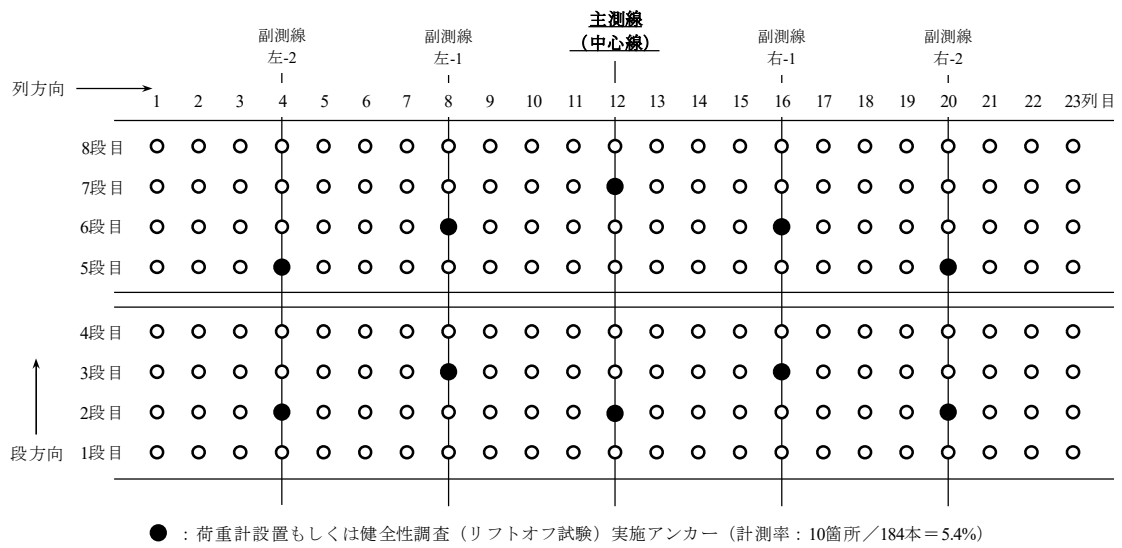


図-4.9 2段法面の4段・23列の緊張力計測の配置例

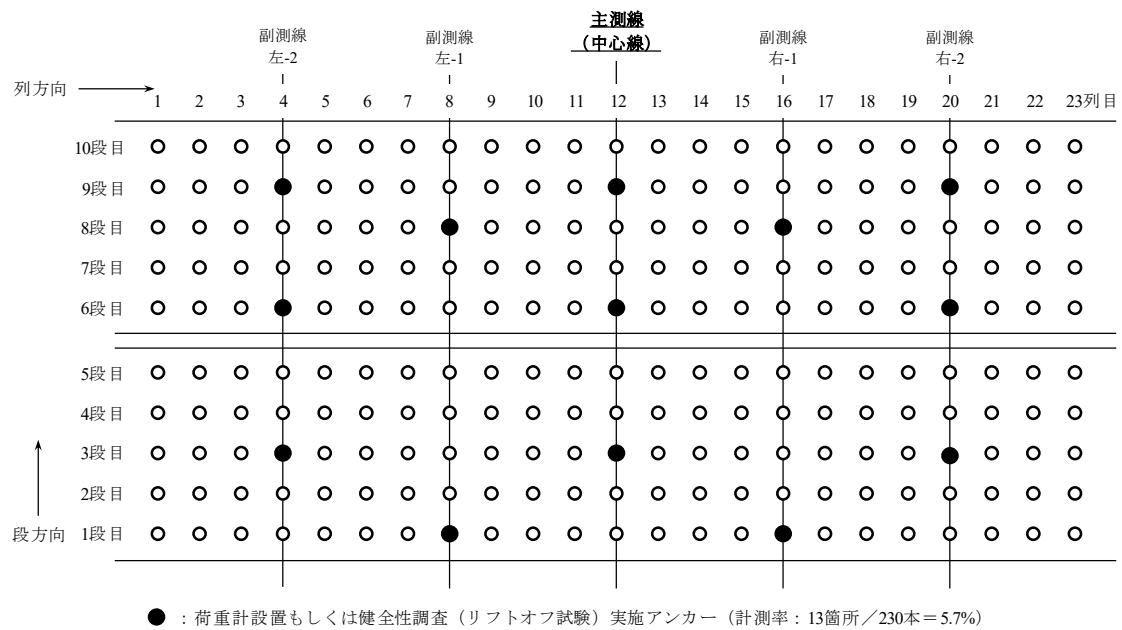



図-4.10 2段法面の5段・23列の緊張力計測の配置例

表-4.4 アンカーの施工列数による緊張力の計測率の変化

法面数	段数	列数	アンカー 施工数 N(本)	緊張力計測数 n(箇所, 本)	計測率 n/N(%)
2	2	19	76	5	6.6
		20	80	5	6.3
		21	84	5	6.0
		22	88	5	5.7
		23	92	5	5.4
2	3	19	114	8	7.0
		20	120	8	6.7
		21	126	8	6.3
		22	132	8	6.1
		23	138	8	5.8
2	4	19	152	10	6.6
		20	160	10	6.3
		21	168	10	6.0
		22	176	10	5.7
		23	184	10	5.4
2	5	19	190	13	6.8
		20	200	13	6.5
		21	210	13	6.2
		22	220	13	5.9
		23	230	13	5.7

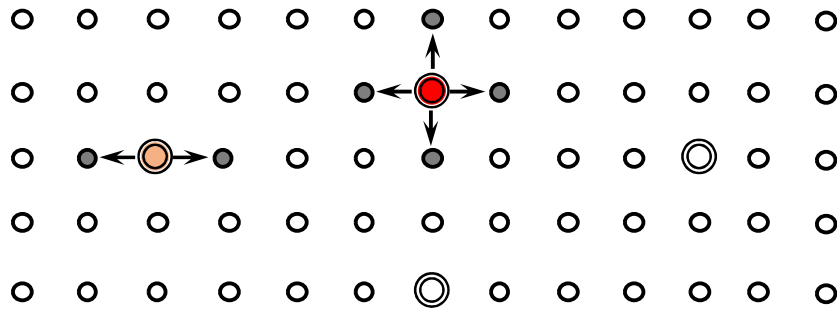
次に、荷重計計測および健全性調査のリフト試験結果において緊張力増加もしくは低下が見られ、残存緊張力や面的調査などの追加調査

を実施する場合について検討する。残存緊張力に増加または低下し、残存緊張力とアンカー健全度の目安²⁾において、C⁺、D⁺、E⁺、C⁻、D⁻となる結果が得られ、緊張力が増加した場合には、法面の不安定化やアンカーの破断の恐れがあり、緊急対応の実施が必要となることが考えられ、このようなアンカーを絞り込んでいくことが重要となる。詳細な残存緊張力分布調査および、緊張力増加または低下アンカーの絞り込みを行うため、-4.11に示すような問題の考えられるアンカーの左右もしくは上下のアンカーで追加調査を実施する流れを検討してみる。追加調査は、次のような考え方で行う。

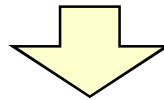
緊張力計測の配置により決定したアンカーの緊張力計測を行ったうえで、この結果を基に、①緊張力がA⁺、A⁻、B⁻となり表-4.3の健全度の目安において「健全」と評価される場合にはリフトオフ試験による追加調査は実施しない。②緊張力がB⁺、C⁻となり「経過観察により対策の必要性を検討」と評価される場合は左右のアンカーにおいてリフトオフ試験による追加調査を実施する。③緊張力がE⁺、D⁺、C⁺、D⁻となり「緊急対策を実施」もしくは「対策を実施」と評価される場合には、左右上下のアンカーにおいて追加調査を実施する。④追加調査の対象となったアンカーにおけるリフトオフ試験（緊張力計測）の結果、さらにE⁺もしくはD⁻となった場合にのみ、左または右のアンカーで追加調査を実施し、左右にアンカーが無い場合には上下において実施する。⑤リフトオフ試験による追加調査は、評価がE⁺、D⁻以外となるまで継続する。

このように、リフトオフ試験を順次、追加することで危険な状態にある、もしくは機能が大きく低下し、機能していないと評価されるアンカーの分布状況を把握する。緊張力の変化の少ない健全な法面では緊張力の計測率が小さく、計測率は5.4%～7.0%であるが、緊張力が極端に増加もしくは低下したアンカーが多い法面では、計測率が増加していくことになる。

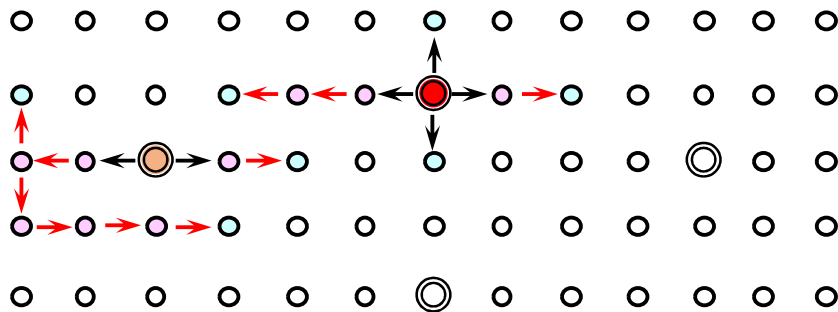
【追加調査の考え方】



- ◎ : 荷重計計測もしくは健全性調査（リフトオフ試験）で、A⁺もしくはA⁻、B⁻と評価されるアンカー（左右のアンカーでの追加調査は実施しない）
- : 荷重計計測もしくは健全性調査（リフトオフ試験）で、B⁺もしくはC⁻と評価されるアンカー（左右のアンカーでの追加調査を実施する）
- : 荷重計計測もしくは健全性調査（リフトオフ試験）で、C⁺、D⁺、E⁺もしくはD⁻と評価されるアンカー（上下左右のアンカーでの追加調査を実施する）
- : 追加調査（リフトオフ試験）を実施するアンカー
- ← : B⁺以上もしくはC⁻以下と評価され、追加調査を実施



【さらなる追加調査の実施】



- : 追加調査の結果、D⁺、C⁺、B⁺、A⁺、A⁻、B⁻、C⁻と評価されるアンカー（さらなる追加調査は実施しない）
- : 追加調査の結果、E⁺もしくはD⁻と評価されるアンカー（左もしくは右のアンカーでさらに追加調査を実施する）
- ← : 荷重計計測もしくは健全性調査（リフトオフ試験）で、B⁺以上もしくはC⁻以下となり、追加調査を実施
- ← : 追加調査（リフトオフ試験）でE⁺もしくはD⁻と評価され、さらなる追加調査を実施（追加調査は、E⁺、D⁻以外の評価になるま継続（左右にアンカーが無い場合には、上下のアンカーにおいて行う）

図 -4.11 荷重計計測および健全性調査から追加調査の流れ

4.3.3 3 法面の緊張力計測配置と追加調査までのシミュレーション

緊張力増加が見られる 3 法面の残存緊張力分布図に基づき，前項に示した緊張力計測の配置ならびに追加調査方法に基づき，荷重計もしくは健全性調査におけるリフトオフ試験を実施した場合の各法面の追加調査までの流れについてシミュレーションを行ってみる．法面 A，法面 B および法面 C のシミュレーション結果を **図-4.12**，**図-4.13** および **図-4.14** にそれぞれ示す．

法面 A は 2 段の法面にわたって，それぞれアンカーが 3 段，10～12 列で施工されている．前項に示した配置方法によって緊張力計測位置を決定すると，**図-4.12(a)**に示すように，施工全数の 66 本に対して 6.1% の 4 箇所となる．この計測位置において荷重計計測もしくはリフトオフ試験結果から得られる緊張力の健全度評価は，**図-4.12(b)**に示すように D⁺は 1 箇所，C⁺は 1 箇所，B⁺は 1 箇所，A⁻は 1 箇所となり，C⁺，D⁺のアンカーについては隣接する上下左右において，B⁺のアンカーについては隣接する左右において追加調査を実施する（図中の黒矢印）．追加調査を実施したアンカーにおいて E⁺が見られるため，左のアンカーでさらなる追加調査を実施する（図中の赤矢印）．法面 A におけるシミュレーション結果は，**図-4.12(c)**に示すように，最終的に緊張力計測は 16 箇所となり，施工全数 66 本に対する緊張力計測率は 24.2% であり，調査要領²²⁾および面的調査マニュアル⁵²⁾に示される残存緊張力分布調査（面的調査）の目安である 25%～50%に近い計測率となった．

法面 B は 3 段の法面に，それぞれアンカーが 2 段，6～25 列で施工されている．前項に示した配置方法によって緊張力計測位置を決定すると，**図-4.13(a)**に示すように，施工全数の 88 本に対して 10.2% の 9 箇所となる．この計測位置において荷重計計測もしくはリフトオフ試験結果から得られる緊張力の健全度評価は，**図-4.13(b)**に示すように，D⁺は 1 箇所，C⁺は 5 箇所，A⁻は 4 箇所となり，C⁺，D⁺のアンカー

については、隣接する上下左右において追加調査を実施する（図中の黒矢印）。追加調査を実施したアンカーにおいて E⁺が見られ左右にアンカーが無い場合、下のアンカーでさらに追加調査を実施する（図中の赤矢印）。法面 B におけるシミュレーション結果は、図-4.13(c)に示すように、最終的に緊張力計測は 32 箇所となり、施工全数 88 本に対する緊張力計測率は 36.4%であり、調査要領²²⁾および面的調査マニュアル⁵²⁾に示される残存緊張力分布調査（面的調査）の目安である 25%～50%の範囲に入る計測率となった。

法面 C は 1 段の法面において、アンカーが 5 段、28～37 列で施工されている。前項に示した配置方法によって緊張力計測位置を決定すると、図-4.14(a)に示すように、施工全数の 168 本に対して 6.0%の 10 箇所となる。この計測位置において荷重計測もしくはリフトオフ試験結果から得られる緊張力の健全度評価は、図-4.14(b)に示すように、C⁺は 2 箇所、B⁺は 1 箇所、A⁻は 1 箇所、B⁺は 6 箇所となり、C⁺のアンカーについては隣接する上下左右において、B⁺のアンカーについては左右において追加調査を実施する（図中の黒矢印）。追加調査を実施したアンカーにおいて E⁺は見られないため、さらなる追加調査は実施しない。法面 C におけるシミュレーション結果は、図-4.14(c)に示すように、最終的に緊張力計測は 20 箇所となり、施工全数 168 本に対する緊張力計測率は 11.9%となった。法面 C においては、法面 A および法面 B に比べて、緊張力が増加したアンカーが少ないため、緊張力計測率は、それらよりも小さい値となったと考えられる。

法面 C における緊張力計測率の 11.9%は、調査要領²²⁾および面的調査マニュアル⁵²⁾に示される残存緊張力分布調査（面的調査）の目安である 25%～50%よりも小さいものである。このような法面で残存緊張力分布調査（面的調査）を行う場合は、さらなる追加調査において求められる残存緊張力の状況を考慮しながら、計測率 25%をおおむねの上限としてリフトオフ試験を行うことが考えられる。法面 C では、追

加調査で E⁺もしくは D⁻となるアンカーが無いため，さらなる追加調査は実施しないこととなるが，副測線（左-1）および副測線（右-1）周辺に見られる C⁺，D⁺の上下左右のアンカーにおいてリフトオフ試験を実施することとすると，最終的な緊張力計測は図-4.14(d)に示すように，40箇所となり，施工本数の168本に対する計測率は23.8%で，調査要領²²⁾および面的調査マニュアル⁵²⁾に示される残存緊張力分布調査（面的調査）の目安である25%~50%に近い計測率となる。

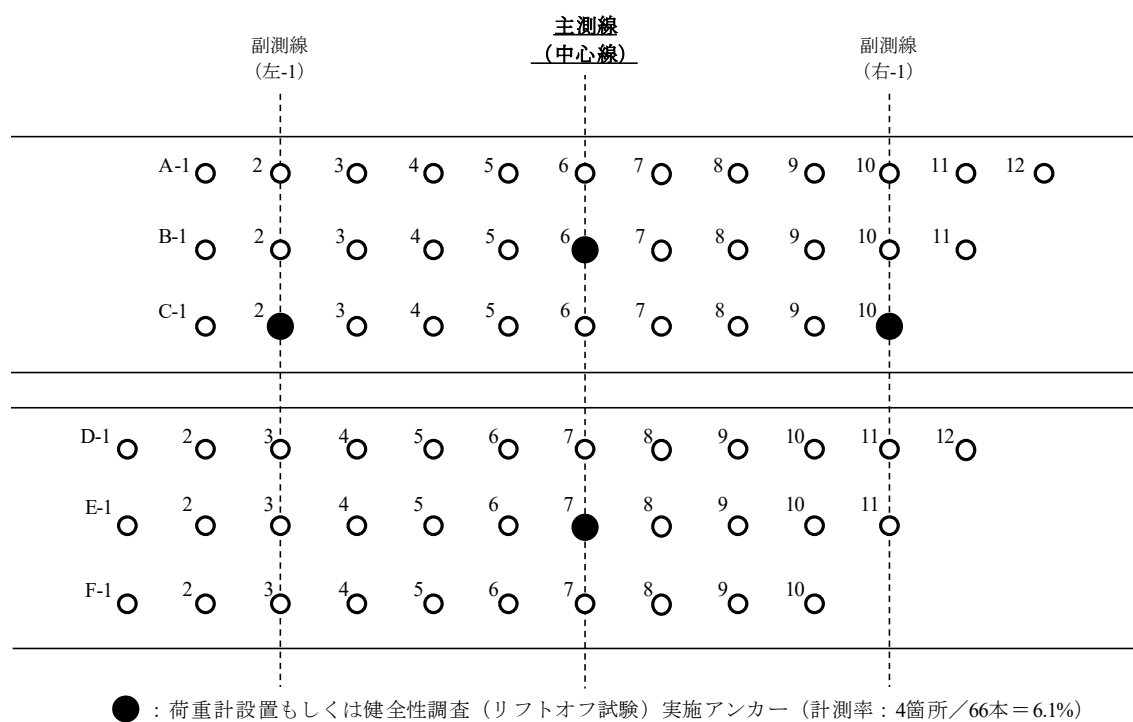


図-4.12(a) 法面 A の荷重計またはリフトオフ試験の計測配置

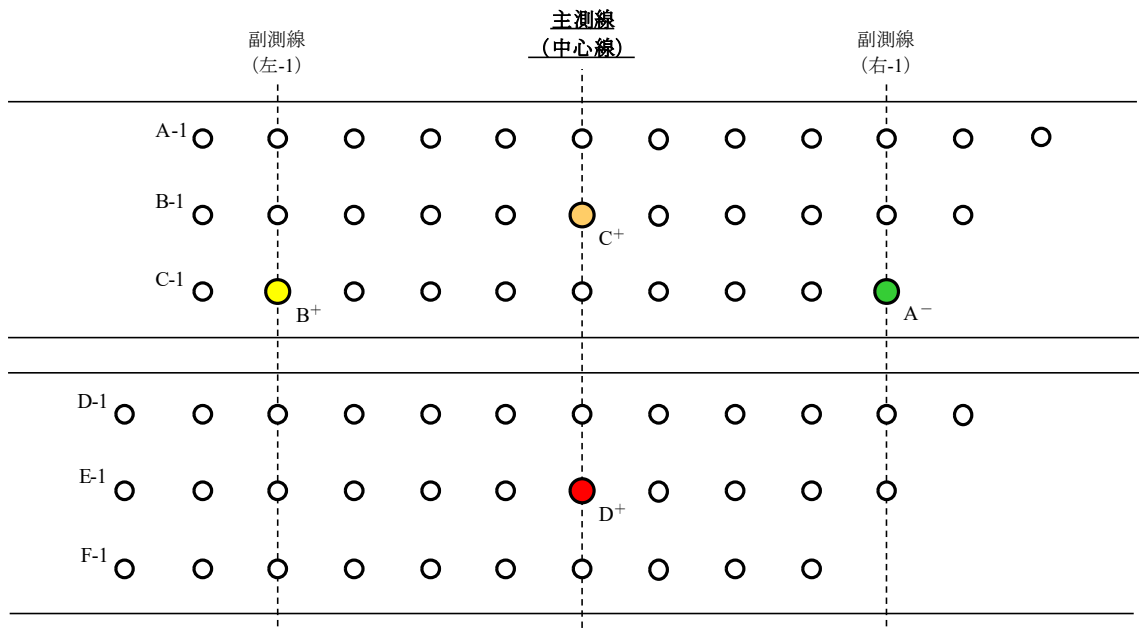
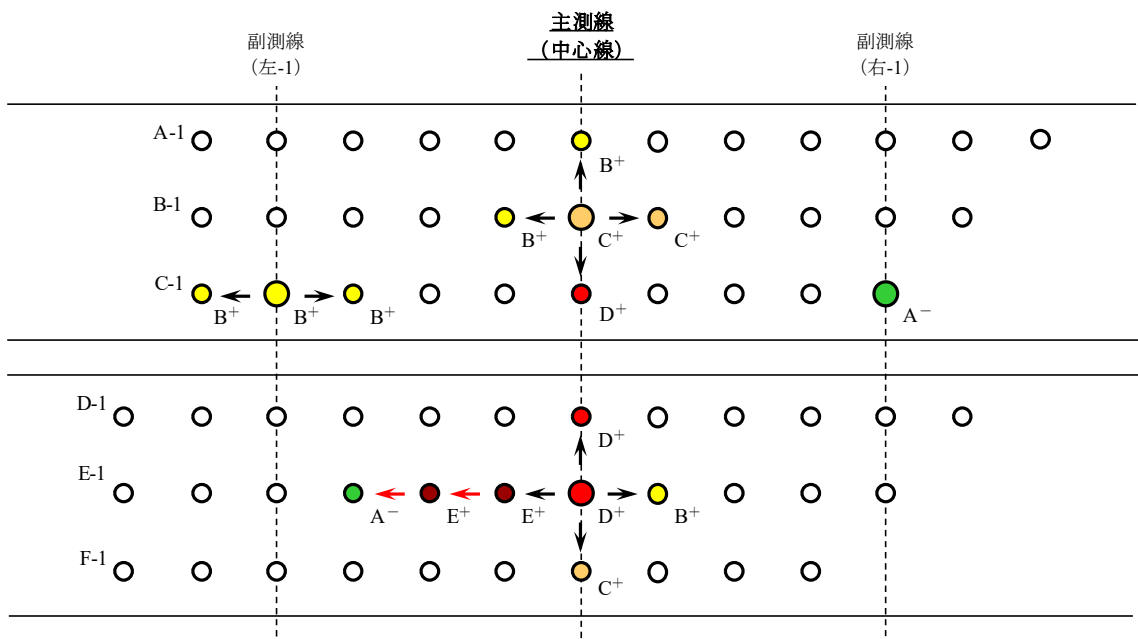


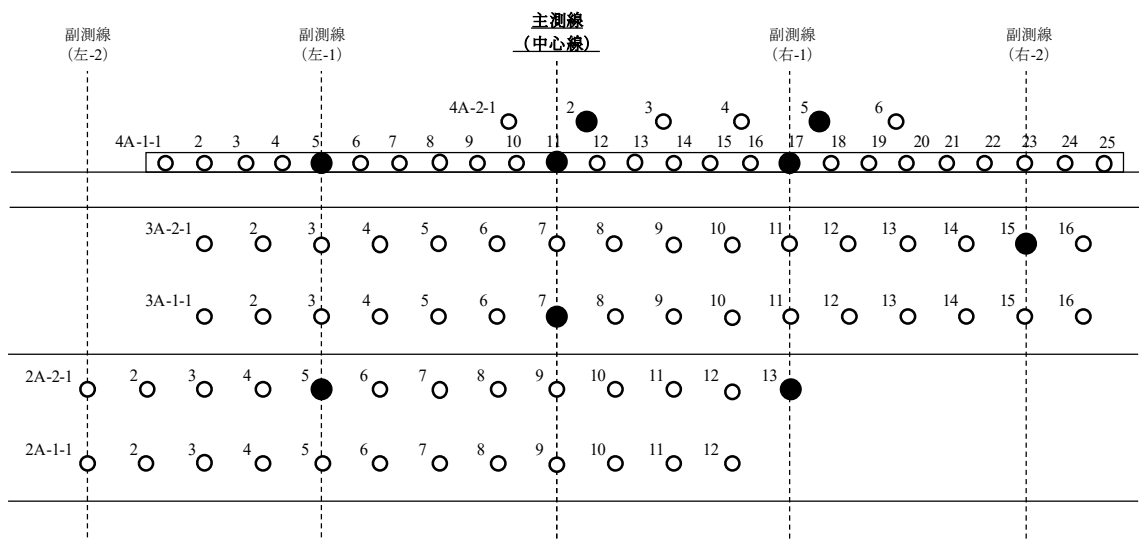
図-4.12(b) 法面 A の荷重計またはリフトオフ試験の計測結果



- ➔ : 荷重計計測もしくは健全性調査で残存緊張力の評価が「B+」以上 (B+, C+, D+, E+) もしくは「C-」以下 (C-, D-) となり、追加調査 (リフトオフ試験) を実施するもの
 B+, C- の場合は、左右のアンカーで追加調査を実施
 E+, D+, C+, D- の場合は、上下左右のアンカーで追加調査を実施
- ➡ : 追加調査で残存緊張力の評価が「E+」または「D-」となり、左または右のアンカーでリフトオフ試験をさらに追加するもの
 リフトオフ試験は、「E+」または「D-」以外の評価になるまで継続する

※荷重計計測・健全性調査率：4箇所／66本＝5.1%，リフトオフ試験実施率：12本／66本＝18.2%
 緊張力計測率：16箇所／66本＝24.2%

図-4.12(c) 法面 A の緊張力計測のシミュレーション結果



● : 荷重計設置もしくは健全性調査（リフトオフ試験）実施アンカー（計測率：9箇所／88本＝10.2%）

図-4.13(a) 法面 B の荷重計またはリフトオフ試験の計測配置

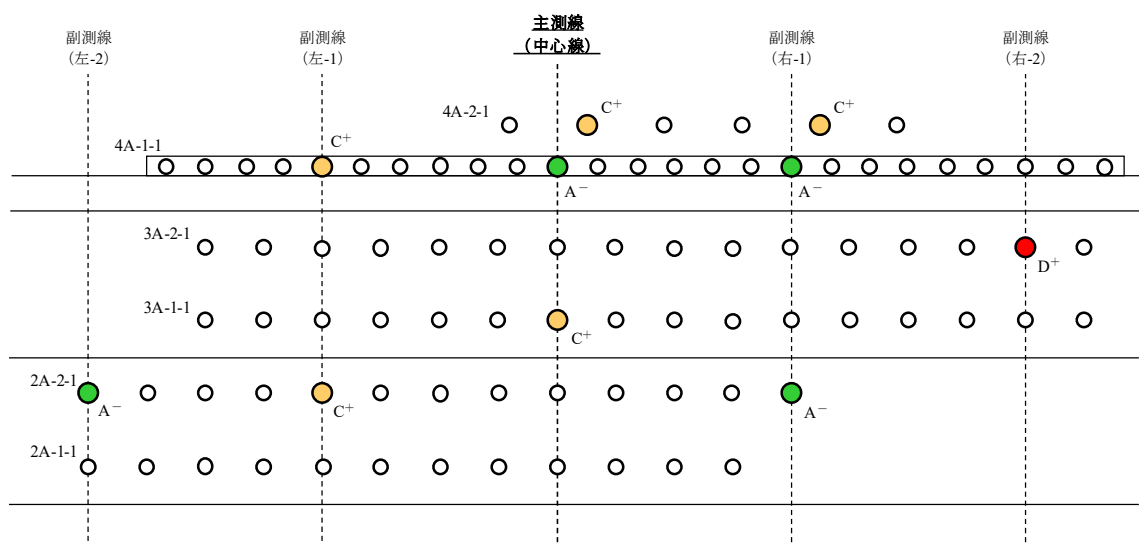
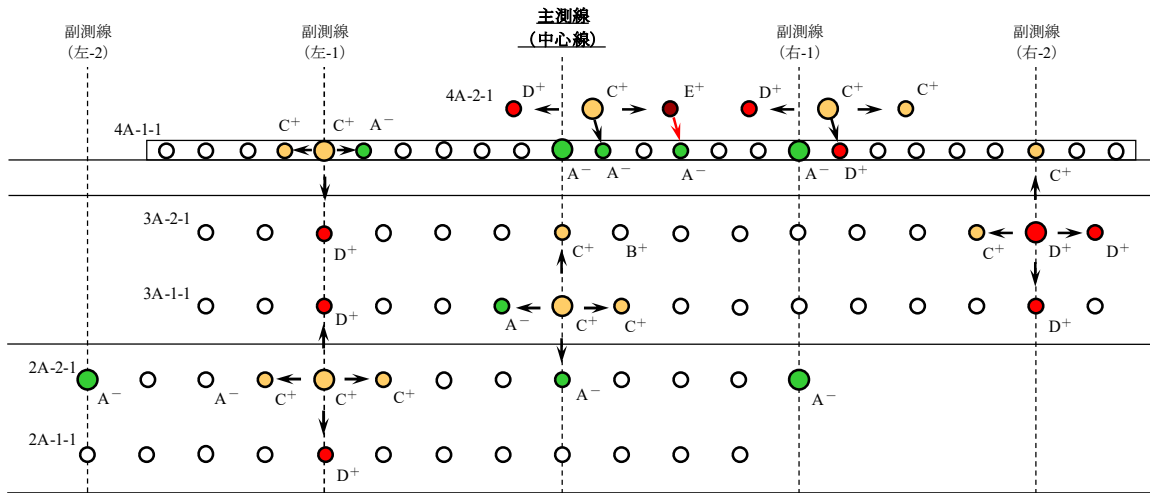


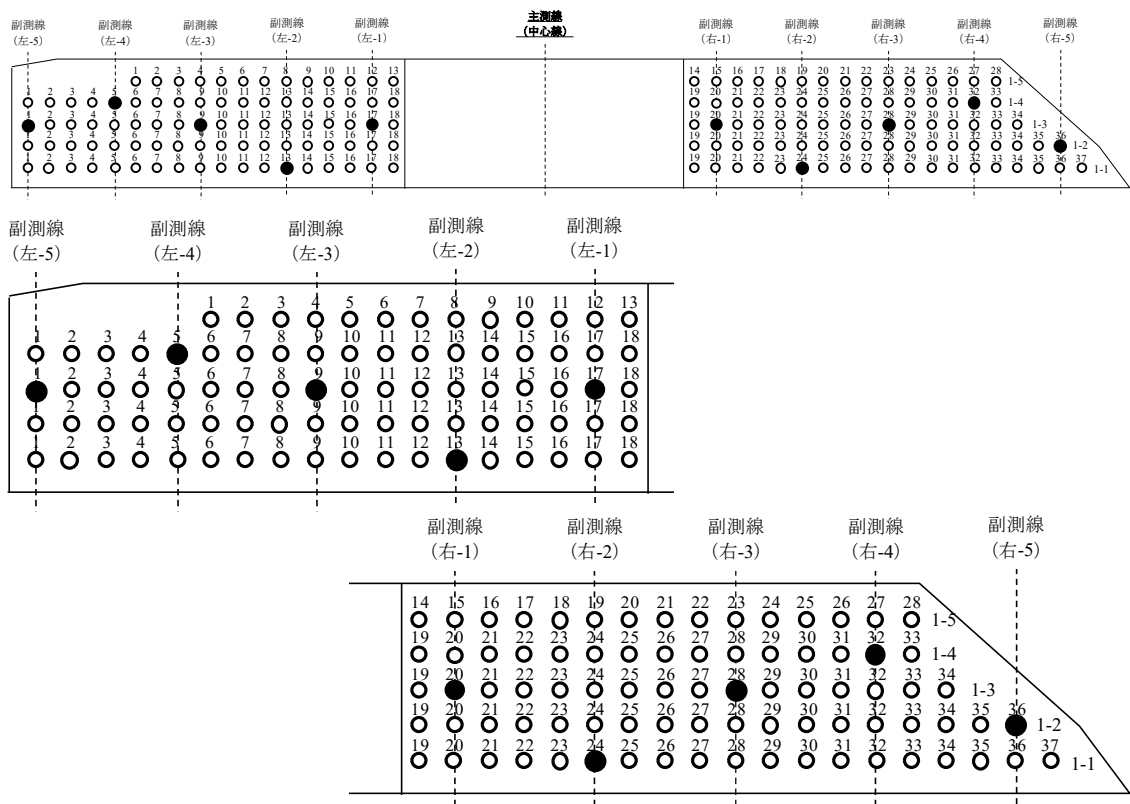
図-4.13(b) 法面 B の荷重計またはリフトオフ試験の計測結果



- ➔ : 荷重計計測もしくは健全性調査で残存緊張力の評価が「B+」以上 (B+, C+, D+, E+) もしくは「C-」以下 (C-, D-) となり、追加調査 (リフトオフ試験) を実施するもの
B+, C- の場合は、左右のアンカーで追加調査を実施
E+, D+, C+, D- の場合は、上下左右のアンカーで追加調査を実施
- : 追加調査で残存緊張力の評価が「E+」または「D-」となり、左または右のアンカーでリフトオフ試験をさらに追加するもの
リフトオフ試験は、「E+」または「D-」以外の評価になるまで継続する

※荷重計計測・健全性調査率：9箇所／88本＝10.2%，リフトオフ試験実施率：23本／88本＝26.1%
緊張力計測率：32箇所／88本＝36.4%

図-4.13(c) 法面 B の緊張力計測のシミュレーション結果



● : 荷重計計測もしくは健全度調査 (リフトオフ試験) 実施アンカー (計測率：10箇所／168本＝6.0%)

図-4.14(a) 法面 C の荷重計またはリフトオフ試験の計測配置

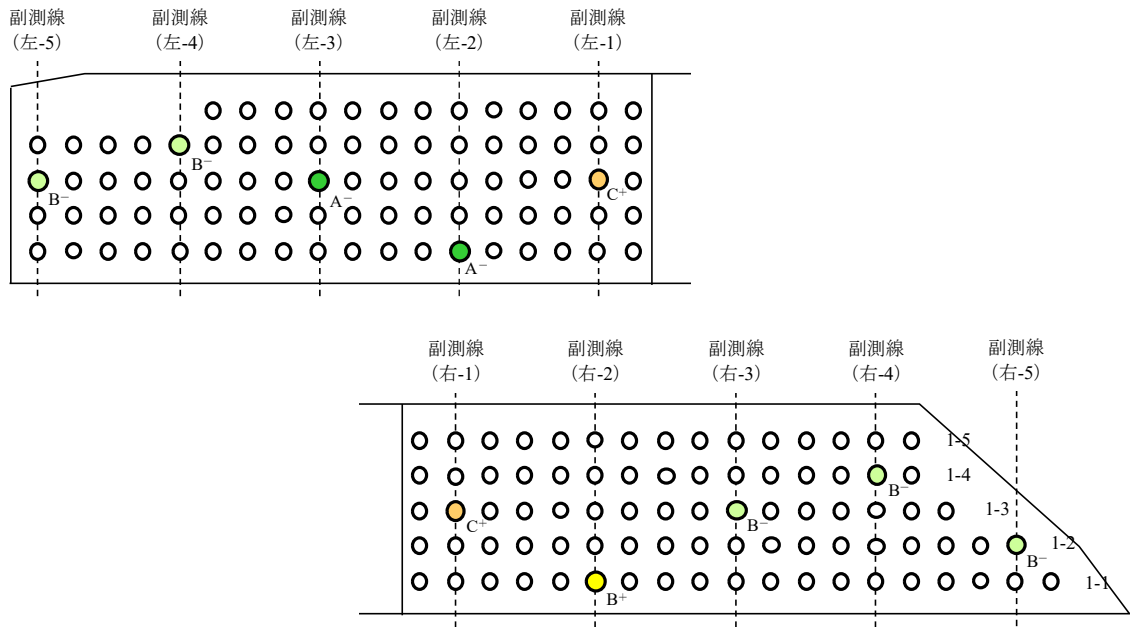
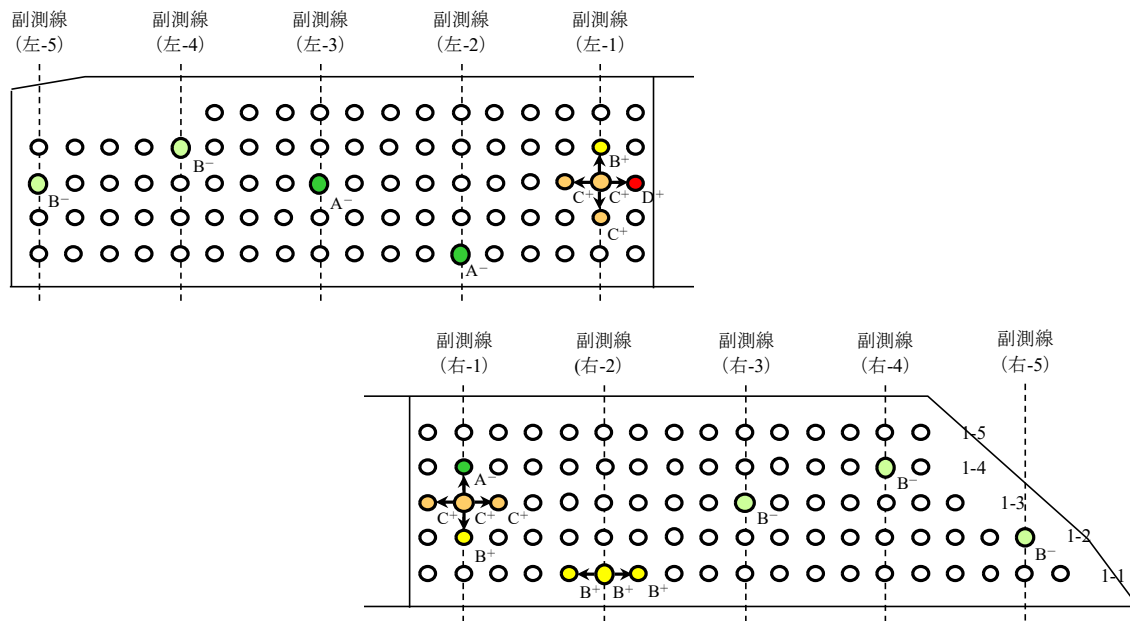


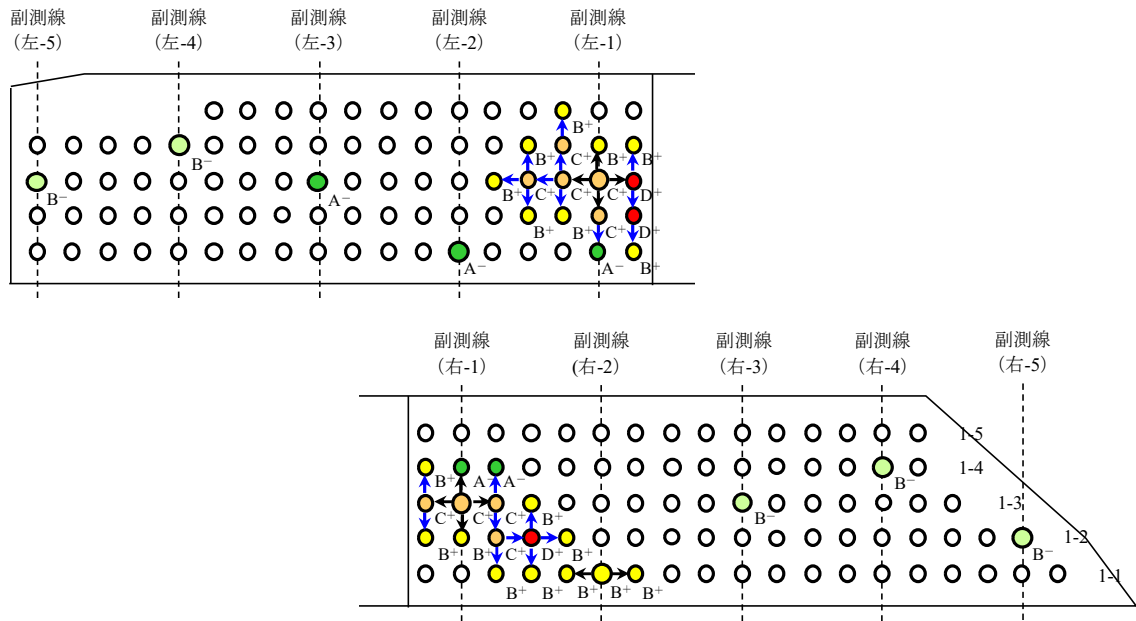
図-4.14(b) 法面 C の荷重計またはリフトオフ試験の計測結果



- ➔ : 荷重計計測もしくは健全性調査で残存緊張力の評価が「B⁺」以上 (B⁺, C⁺, D⁺, E⁺) もしくは「C⁻」以下 (C⁻, D⁻) となり、追加調査 (リフトオフ試験) を実施するもの
 B⁺, C⁻ の場合は、左右のアンカーで追加調査を実施
 E⁺, D⁺, C⁺, D⁻ の場合は、上下左右のアンカーで追加調査を実施
- ➔ : 追加調査で残存緊張力の評価が「E⁺」または「D⁻」となり、左または右のアンカーでリフトオフ試験をさらに追加するもの
 リフトオフ試験は、「E⁺」または「D⁻」以外の評価になるまで継続する

※荷重計計測・健全性評価率：10箇所/168本=6.0%，リフトオフ試験実施率：10本/168本=6.0%
 緊張力計測率：20箇所/168本=11.9%

図-4.14(c) 法面 C の緊張力計測のシミュレーション結果



- ➔ : 荷重計計測もしくは健全性調査で残存緊張力の評価が「B⁺」以上 (B⁺, C⁺, D⁺, E⁺) もしくは「C⁻」以下 (C⁻, D⁻) となり、追加調査 (リフトオフ試験) を実施するもの
B⁺, C⁻ の場合は、左右のアンカーで追加調査を実施
E⁺, D⁺, C⁺, D⁻ の場合は、上下左右のアンカーで追加調査を実施
- ➔ : 面的調査を行う場合は、緊張力測定率25%を目安に、緊張力の高いアンカーもしくは低いアンカーで更なる追加調査を実施する
追加リフトオフ試験は、C⁺, D⁺ または C⁻ のアンカーの周辺を対象に、緊張力計測率25%を上限にして、B⁺, B⁻ になるまで継続するなど、状況に応じてルールを定めると良い

※荷重計計測・健全性調査率：10箇所／168本=6.0%，リフトオフ試験実施率：30本／168本=17.9%
緊張力計測率：40箇所／168本=23.8%

図-4.14(d) 法面 C の計測率 25%を上限とした場合の面的調査

表-4.5 に 3 法面の緊張力計測のシミュレーション結果を示す。法面 A および B のシミュレーションによる施工全数に対する計測率は、それぞれ 24.2%，36.4%と、法面 C の 11.9%よりも大きい値となった。これは、法面 A および B においては、緊張力が増加し C⁺, D⁺, E⁺ 評価となるアンカーが施工全数に対して 25.8%，47.7%と、法面 C の 7.1% に比べて多かつたためと考えられる。また、法面 A に比べて法面 B の計測率が大きいのは、法面 B では C⁺, D⁺, E⁺ となるアンカーが多く、また、法面 A は主測線周辺に多くの緊張力増加アンカーが分布するのに対して、法面 B の緊張力増加の分布はドーナツ状となっており、緊張力の分布状況による緊張力増加アンカーの出現数の影響があると考

えられる。

3 法面におけるシミュレーションは，緊張力が増加したアンカーが多い法面では計測率は大きく，少ない法面では計測率は小さくなる結果となった．緊張力が増加したアンカーが多い法面 A および B の計測率 24%，36%では，NEXCO 調査要領²²⁾に示される緊張力分布調査を行う場合の計測率 25%以上，面的調査マニュアル（案）⁵²⁾に示される面的調査を行う場合の計測率 25%～50%とおおむね同様の値である．法面 C については，追加調査における計測率は 11.9%であるが，緊張力分布調査の 25%を上限とし，例えば C⁺，D⁺となった上下左右のアンカーにおいてリフトオフ試験を行うことで計測率は 23.8%となり，残存緊張力の分状況を見ながら追加調査を実施していくことで，より効率的な緊張力分布調査が可能になると考えられる．

表-4.5 3 法面の緊張力計測と追加調査方法のシミュレーション結果

法面 番号	施工 本数 N (本)	緊張力分布図 (実測および推定数)				シミュレーション					
						荷重計測 または 健全性調査		更なる追加調査 (リフトオフ試験)		総 数	
		調査数 a (%)	調査率 a/N (%)	C ⁺ 以上 C ⁻ 以下数 x(本)	出現率 x/N(%)	計測数 n (本)	計測率 n/N (%)	計測数 n' (本)	計測率 n'/N (%)	計測数 n+n' (本)	計測率 (n+n')/N (%)
A	66	66	100.0	17	25.8	4	6.1	12	18.2	16	24.2
B	88	53	60.2	42	47.7	9	10.2	23	26.1	32	36.4
C	168	46	27.4	12	7.1	10	6.0	10	6.0	20	11.9
※法面Cにおいて計測率25%を上限に緊張力計測を行った場合のシミュレーション											
C	168	46	27.4	12	7.1	10	6.0	30	17.9	40	23.8

次に、法面 A, B, C における緊張力計測のシミュレーション結果から描かれる残存緊張力評価区分の分布図と、各法面で実際に行ったりフトオフ試験結果に基づく残存緊張力評価区分の分布図を比較してみる。図 4-15 から図 4-17 に各法面の残存緊張力評価区分分布図の比較を示す。

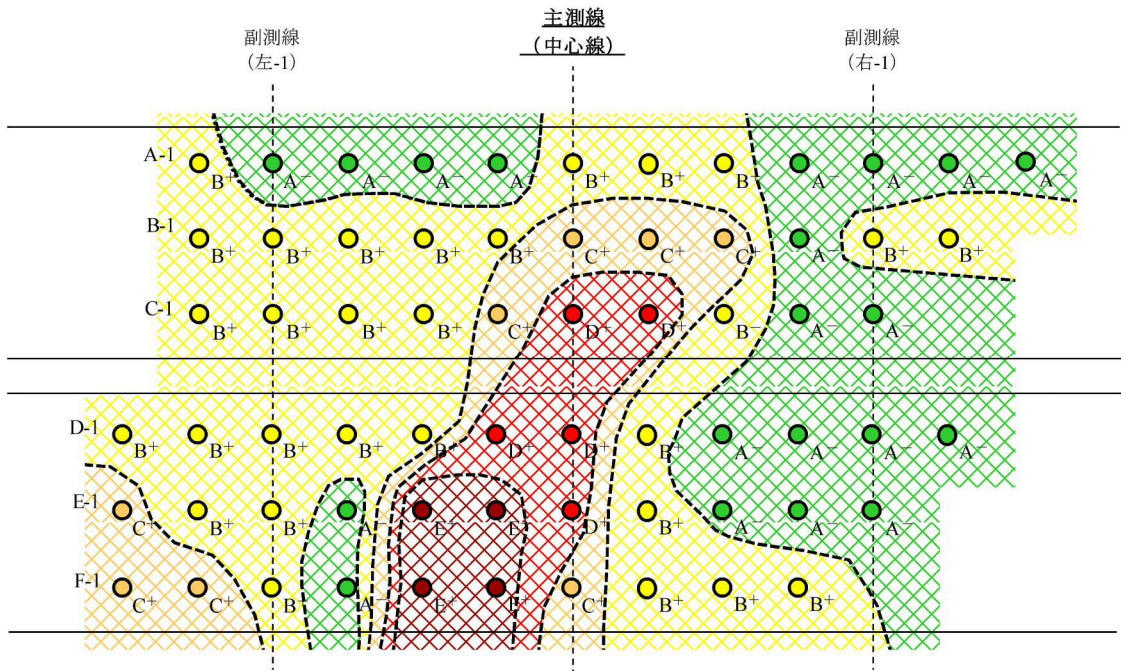
図 4-15 に示す法面 A の全数調査による評価区分の分布図と、シミュレーション（計測率 24.2%）により描いた分布図を比較すると、主測線から副測線（左-1）の間にかけて緊張力が増加し、C⁺、D⁺、E⁺と評価されるアンカーが目玉状に分布する状況が、シミュレーションにより描いた分布図においても全数調査と同様に現れていることが分かる。

図 4-16 に示す法面 B の 60.2%調査による評価区分の分布図とシミュレーション（計測率 36.4%）により描いた分布図を比較すると、最上段の 4A-2 シリーズのアンカーの緊張力増加状況が再現され、主測線から副測線（左-1）および（右-1）の A- の領域とそれを挟んで C⁺、D⁺となるアンカーの分布が現れていることが分かる。

図 4-17 に示す法面 C の 28.0%調査による評価区分の分布図とシミュレーション（計測率 23.8%）により描いた分布図を比較すると、アンカー未施工範囲の中央部の左右の両側において見られる、B⁺、C⁺、D⁺と緊張力が高くなっていく目玉状の分布範囲とその境界が良く現れていることが分かる。

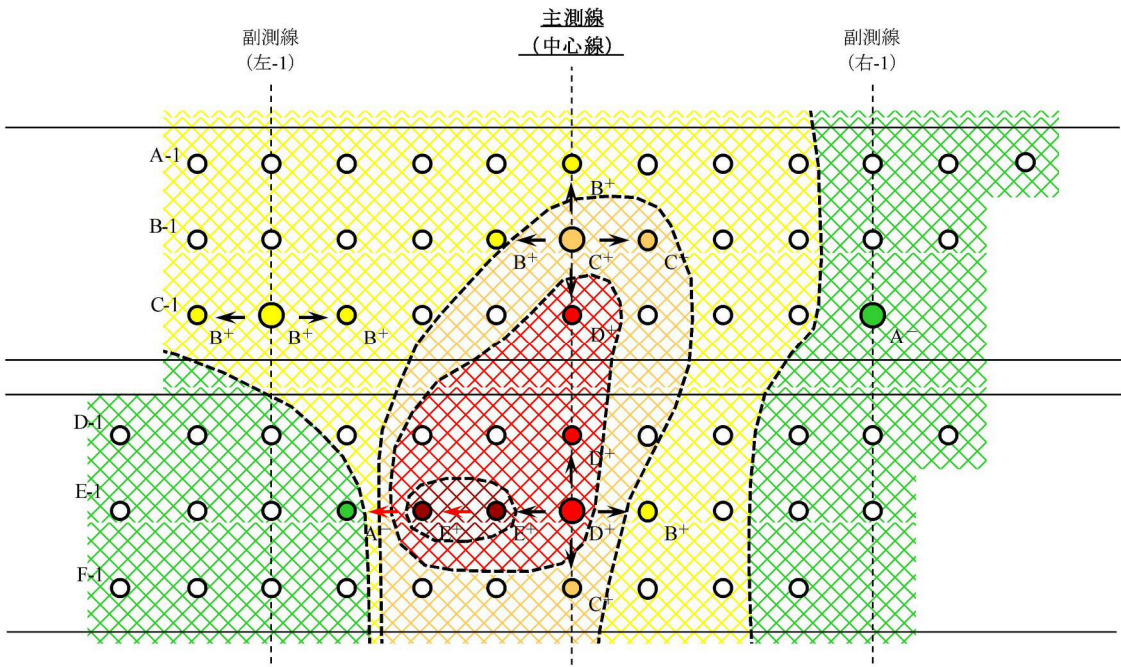
この結果から、本章において提案した緊張力計測配置と追加調査の方法は、危険と評価されるアンカーの存在数と分布状況に応じた効率的な計測が可能にすることができると考えられる。緊張力変化が見られる法面に対し、提案した方法を用いることで効率的な緊張力の計測が可能となると考えられる。

実際のリフトオフ試験により描いた分布図 (計測率=100.0% (全数調査))



※法面Aにおいて実施した緊張力計測 (リフトオフ試験) 結果から描かれる健全性評価の分布図
緊張力計測率 (リフトオフ試験率) : 66箇所/66本 = 100.0% (全数にて試験を実施)

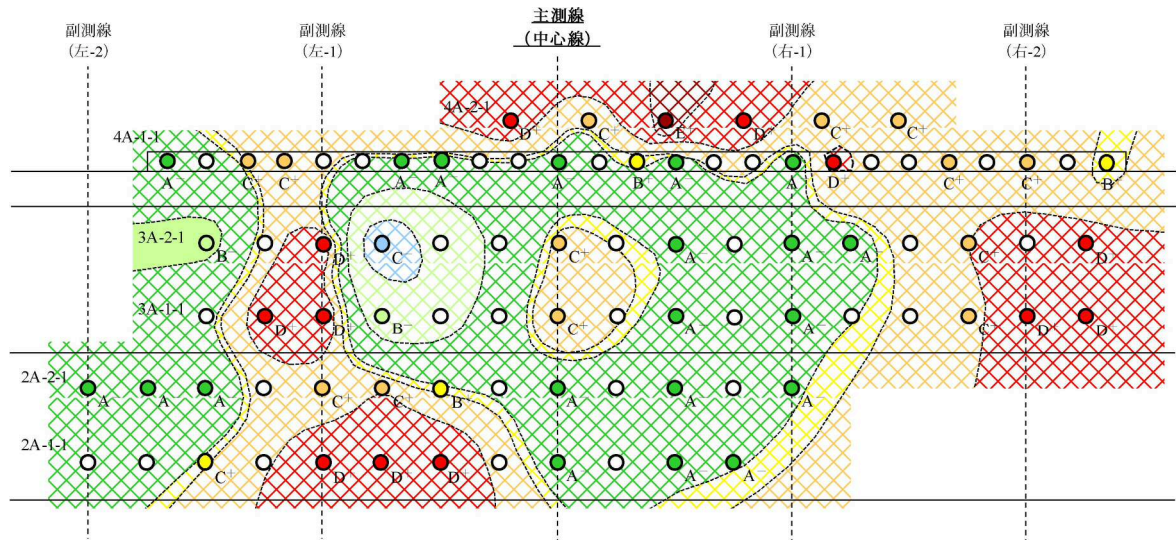
緊張力計測配置と追加調査方法のシミュレーションにより描いた分布図 (計測率=24.2%)



※緊張力計測の流れにしたがって、緊張力を計測した場合に描かれる健全性評価の分布図
緊張力計測率 : 16箇所/66本 = 24.2%

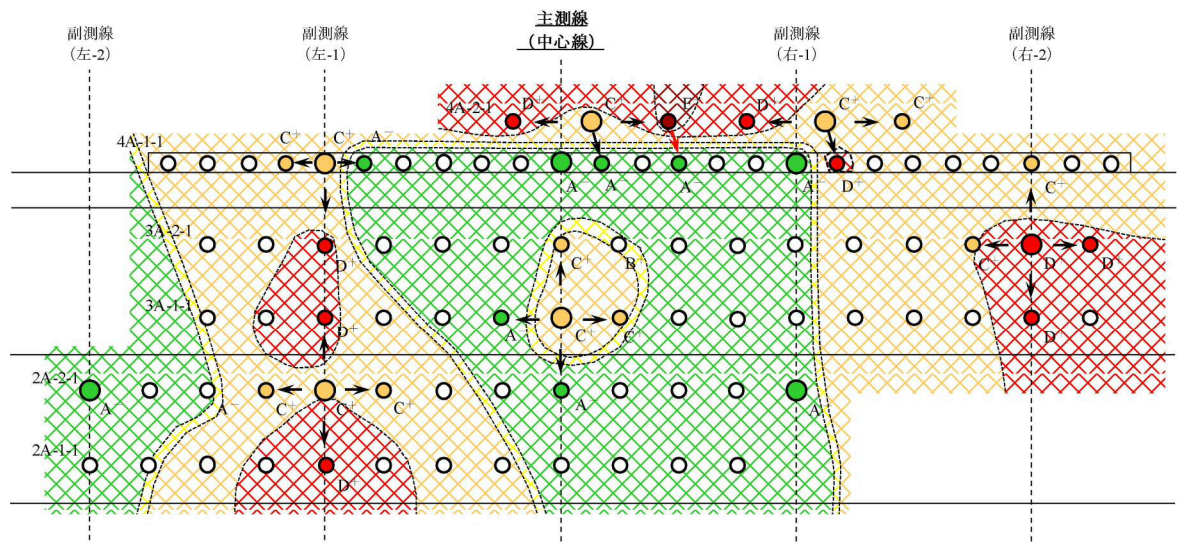
図 4-15 法面 A の残存緊張力評価区分分布図の比較

実際のリフトオフ試験により描いた分布図 (計測率=60.2%)



※法面Bにおいて実施した緊張力計測 (リフトオフ試験) 結果から描かれる健全性評価の分布図
緊張力計測率 (リフトオフ試験率) : 53箇所/53本=60.2%

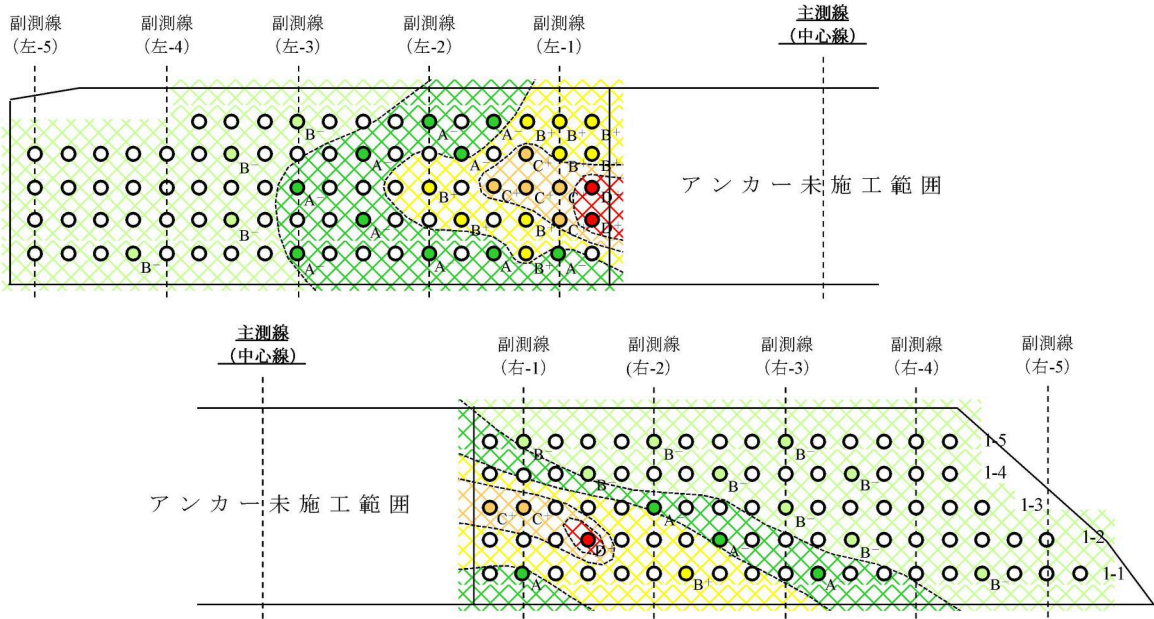
緊張力計測配置と追加調査方法のシミュレーションにより描いた分布図 (計測率=36.4%)



※緊張力計測の流れにしたがって、緊張力を計測した場合に描かれる健全性評価の分布図
緊張力計測率 : 32箇所/66本=36.4%

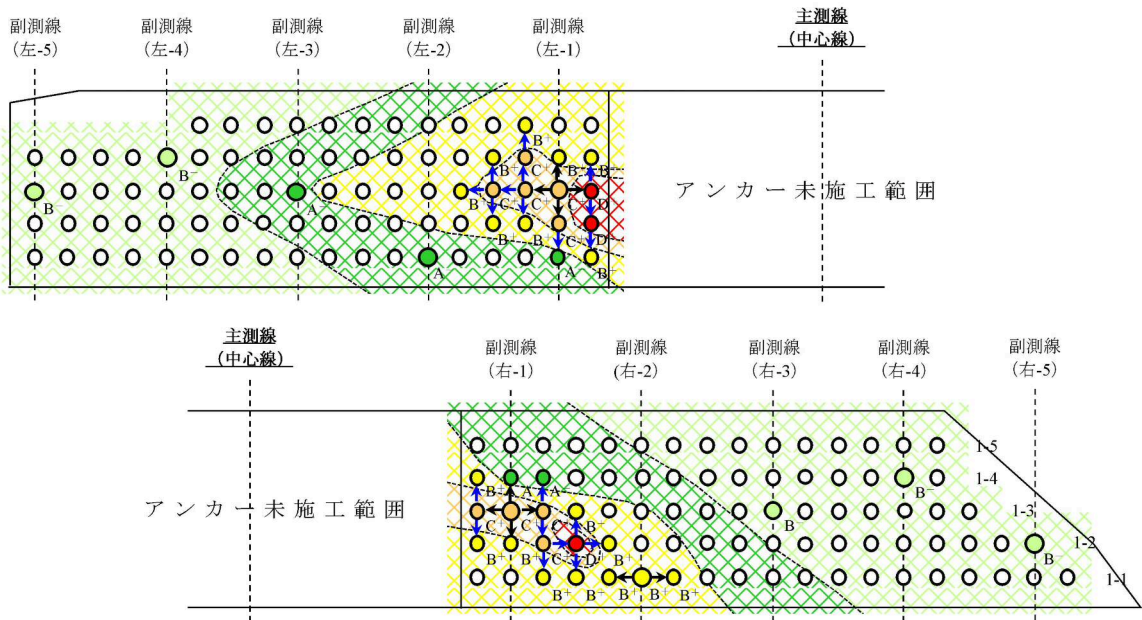
図 4-16 法面 B の残存緊張力評価区分分布図の比較

実際のリフトオフ試験により描いた分布図（計測率=28.0%）



※法面Cにおいて実施した緊張力計測（リフトオフ試験）結果から描かれる健全性評価の分布図
緊張力測定率（リフトオフ試験率）：47箇所／168本=28.0%

緊張力計測配置と追加調査方法のシミュレーションにより描いた分布図（計測率=23.4%）



※緊張力計測の流れにしたがって、緊張力を計測した場合に描かれる健全性評価の分布図
緊張力計測率：40箇所／168本=23.8%

図 4-17 法面 C の残存緊張力評価区分分布図の比較

4.4 維持管理における緊張力評価の流れ

次に、これまで述べてきたアンカーの緊張力低下と地質条件との関係、アンカーに設置した荷重計の変位センサーとしての有効性、緊張力低下アンカーの対応方法である定着時緊張力（ P_t ）の上げ越しと再緊張の有効性、緊張力計測配置と追加調査までの流れに基づき、アンカー緊張力の維持管理の流れを検討する。

各種要領およびマニュアルに示された維持管理によるアンカーの健全性評価の実施頻度の目安を表-4.6に示す。各要領ともに緊張力を計測するリフトオフ試験などを含む健全性調査を、おおむね5年以内の頻度で行うこととしている^{2), 21)}。中には、近接目視による頭部外観調査や頭部露出調査の結果により、健全性調査の実施を判断するものもあるものの、定期点検の実施頻度は5年以内を目安にしている¹⁴⁾。施工後の3年～5年においては、頻度を密にして定期点検や緊張力の観測を行うことが目安としている基準¹⁴⁾および指針²⁸⁾がある。

表-4.6 各種要領・マニュアルによる健全性評価の頻度の目安

要領・マニュアル	調査の種類	頻度の目安
維持管理マニュアル（2008） ²⁾	健全性調査	施工完了後： 5年以内に1回 特に重要度の高いもの：2～3年に1回
地盤工学会基準（2012） ¹⁴⁾	定期点検	施工完了後 3年まで：年1回 3年以降： 3～5年に1回 （重要度の高いもの：年1回） ※徒歩による近接目視点検を行い健全性に問題のある可能性が高く、詳細な調査が必要とされた場合に健全性調査を実施。
点検調査マニュアル（2002） ²¹⁾	健全性調査	最大5年間隔
NEXCO調査要領（2017） ²²⁾	定期点検	年1回（定期点検） 都度（日常点検、異常時点検） ※頭部外観調査により後続調査が必要と判断された場合に健全性調査を実施。
グラウンドアンカー工法設計施工指針（2010） ²⁸⁾	観測	地盤の移動を調査する場合、最初のうち：3～6ヶ月に1回、その後徐々に間隔を空け、構造物の存続する限り： 5年以内に1回 ※観測項目にアンカーも含まれる

本論で述べてきた，緊張力が低下しやすい地質条件での定着時緊張力 (P_i) の上げ越しや，アンカーに設置した荷重計の変位センサーとしての有効性，緊張力計測配置と追加調査までの流れを考慮すると，供用後のアンカーの維持管理を効率的に行うためには，これらの考え方を建設段階から取り入れ，上げ越しや荷重計の設置を行っておくことが重要となる．また，既設のアンカーに対しては，これらの考え方をどのように取り入れていくかを検討しておく必要がある．このため，本論で検討する維持管理の流れは，今後新たに施工が行われるアンカーに対する建設段階から施工後の5年程度まで流れと，既設のアンカーに対する5年程度以降の維持管理の流れに対応する．

図-4.18(a)および図-4.18(b)に建設段階から施工後5年程度までのアンカー緊張力の維持管理の流れを示す．調査・設計段階に行われる地質調査により，アンカー背面地盤の地質条件を把握し，自由長部に分布する地盤が，緊張力が低下しやすい地質条件の場合には，5年以降の長期的な維持管理に向けて，定着時緊張力 (P_i) を設計アンカー力 (T_d) の1.1倍程度で上げ越しすることが効率的である．上げ越しを行うことが考えられる地質条件は，火成岩の場合はD級および土砂，堆積岩と変成岩の場合はC_L~D，D級および土砂である．緊張力の変化を計測するための荷重計は，図-4.7，図-4.8，図-4.9および図-4.10に示した緊張力計測の配置方法によりその配置を決定し，計測を行う．荷重計によるモニタリングを行いながら，その増減の状況に応じて，追加調査の必要性を残存緊張力の健全度の目安によって評価し，追加調査は，図-4.11に示した上下左右の周辺アンカーの追加調査によって行う．ここで，緊張力の健全度評価の目安については，緊張力が低下しやすい地質条件において，定着時緊張力 (P_i) の上げ越しを行ったアンカーについては，緊張力の残存率を R_{td} (設計アンカー力 (T_d) に対する残存緊張力の割合) で評価することが妥当である． R_{td} で評価することにより，緊張力が低下しやすい地質条件のアンカー法面におい

て、10年～20年後に出現する「対策を実施」と評価されるアンカー数は減少する。

上げ越しを行っていないアンカーについては、従来どおり R_{pt} （定着時緊張力（ P_t ）に対する残存緊張力の割合）で評価する。また、施工後5年までの間に、アンカーの増し打ちや緊張力が低下したアンカーの再緊張を行う場合には、新たに荷重計を設置しモニタリングを行うことが望まれる。

次に、5年以降の維持管理の流れを検討する。図-4.19(a)および図-4.19(b)に施工後5年以降のアンカー緊張力の維持管理の流れを示す。5年以降の流れにおいては、既設のアンカーも考慮する必要があるため、健全性調査の計画立案からの流れとした。計画立案においては、健全性調査のリフトオフ試験にあたっては、緊張力計測の配置方法によりその配置を決定する。また、地質条件などの建設記録、動態観測の記録、過去の点検および健全性調査結果の記録を確認することが必要であり、これらは調査結果の評価に対して重要な情報となる。健全度調査の実施から調査結果の評価、追加調査の必要性の判断、追加調査の実施方法、対策工の必要性の評価、対策工の実施については、施工後5年の流れと基本的な考え方は同じである。緊張力についての評価は、残存緊張力とアンカー健全度の目安によって行うこととするが、古いアンカーにあっては、調査、設計および施工に関する記録が残っておらず、設計アンカー力（ T_d ）や定着時緊張力（ P_t ）などの判明が困難なことが考えられる。このような場合、アンカーの材料としての許容力を用いた評価を行わざるをえない。アンカーの設計において算出される設計アンカー力（ T_d ）に対し、これを上回る許容アンカー力（ T_a ）を持つ規格品が導入されることになるため、 T_a は T_d よりも大きな値となる。このため、 T_a に対する緊張力の残存率（ R_{ta} ）で残存緊張力を評価する場合の閾値を検討しておく必要がある。表-4.7にNEXCO名古屋支社における111箇所アンカー法面の許容アンカー力（ T_a ）に対

する設計アンカー力 (T_d) の割合の平均値を示す。また表には、NEXCO 名古屋支社における 111 箇所のアンカー法面の T_d と T_a との関係から求めた、 T_a に対する残存率の目安とすべき値を示す。この残存緊張力の目安値は、表-4.3 に示す残存緊張力とアンカー健全度の目安において、 P_t 、 $0.8 P_t$ 、 $0.5 P_t$ 、 $0.1 P_t$ の閾値の P_t を T_d に読み替え、それら閾値に相当する T_a に対する閾値を求めたものである。NEXCO 名古屋支社における T_d の T_a に対する割合 (T_d / T_a (%)) の 111 のり面の平均値は 80% である。残存緊張力の健全度の目安において、 R_{td} で評価する場合の閾値は、 $0.8 T_d$ 、 $0.5 T_d$ 、 $0.1 T_d$ であり、 $T_d / T_a \cong 80\%$ から T_d に対して $0.8 T_a$ 、 $0.8 T_d$ に対して $0.65 T_a$ 、 $0.5 T_d$ に対して $0.4 T_a$ 、 $0.1 T_d$ に対して $0.1 T_a$ となる。

既設アンカーの残存緊張力の評価にあたっては、表-4.8 に示したケース①からケース④が考えられる。ケース①は従来のとおり、 P_t によって評価する場合であり、評価にあたっては定着時緊張力 (P_t) が判明していることが条件となる。ケース②は、図-4.15(a) に示した建設段階で定着時緊張力 (P_t) に上げ越しを行い、残存緊張力を T_d に対する割合で評価するものである。ケース③は、設計アンカー力 (T_d) を定着時緊張力 (P_t) として採用したものに適用される。また、既設アンカーにおいて、設計アンカー力 (T_d) が判明しているものの、定着時緊張力 (P_t) が判明していない場合もこのケースに含まれる。ケース④は、設計アンカー力 (T_d)、定着時緊張力 (P_t) とともに判明していない場合に適用するもので、 T_a に対する残存率 (0.8, 0.65, 0.4, 0.1) は、NEXCO 名古屋支社の 111 箇所の法面の平均 $T_d / T_a \cong 80\%$ から算出したものである。また、緊張力が低下しやすい地質条件に該当しないアンカーについては、健全性調査において実施する頭部外観調査、頭部露出調査などの目視点検で問題がない場合には、リフトオフ試験の実施を 5 年より延ばし 10 年に 1 回程度とすることが、第 2 章の結果から妥当と考えられる。

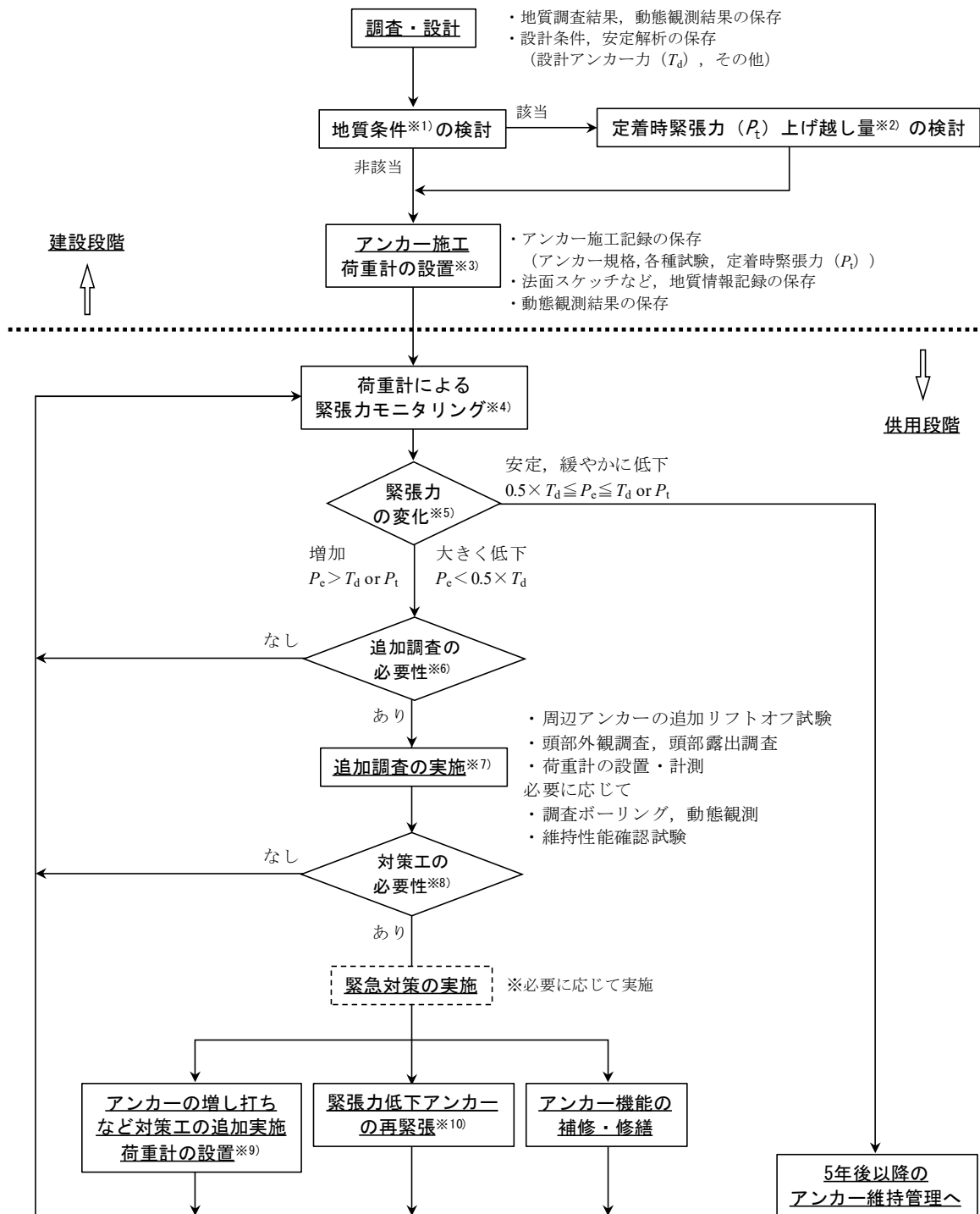


図 -4.18(a) 施工後 5 年程度までの緊張力の維持管理の流れ

- ※1) : アンカー自由長部に分布する主な岩級区分が、以下の地質条件に該当する場合は、緊張力が低下しやすいと評価する。
火成岩：D級，土砂， 堆積岩：C_L～D， D級，土砂， 変成岩：C_L～D， D級，土砂
- ※2) : ※1)の地質条件においては、長期的に緊張力低下が生じるため、定着時緊張力 (P_t) には設計アンカー力 (T_d) の10%程度（大きくても20%程度まで）の上げ越しを行うとよい。
- ※3) : 荷重計の設置箇所は、主測線，副測線を設けて配置する，緊張力計測の配置方法により決定する。
- ※4) : アンカーの維持管理においては、荷重計のモニタリングのほかに、日常点検，定期点検，異常時点検を行う。
- ※5) : 緊張力の変化は、初期的な低下，一時的な低下や増加があっても、その後の計測で一定の値に収束する傾向がみられる場合には、安定と評価する。
緊張力の低下が緩やかに進行していても、 $P_e > 0.5 \times T_d$ であれば経過観察とする。
- ※6) : 追加調査の必要性は、表-4.8のA～Eの残存緊張力の健全度の目安を用いて評価する。
- ※7) : 追加調査のリフトオフ試験では、表-4.8のA～Eの健全度の目安の評価結果から、上下左右の周辺アンカーの追加調査方法により実施する。
追加調査のリフトオフ試験において緊張力の低下や増加が顕著なアンカーには、荷重計を設置し、モニタリングを行う。
緊張力が低下しても、法面の変状や動態観測機器の変動が見られる場合には、すべり面深度がアンカー体（定着部）よりも深い可能性が考えられるため、原因究明の地質調査などを行う。
- ※8) : 緊張力の増加が確認された場合は、法面が不安定化している可能性が考えられるため、法面安定の対策工を検討，実施するとともに、アンカーの飛び出し防止対策，独立受圧板の落下防止対策対策についても検討する。
緊張力が低下していても、法面の変状や動態観測機器の変動が見られず、アンカー機能に問題ないことが確認される場合には、経過観察とすることもできる。
- ※9) : アンカーの増し打ち（追加施工）を行う場合には、荷重計を設置し、モニタリングを行う。
設置位置は、緊張力計測の配置方法により決定する。
- ※10) : アンカーの再緊張を行う場合には、荷重計を設置し、モニタリングを行う。

図 -4.18(b) 施工後 5 年程度までの緊張力の維持管理の流れ

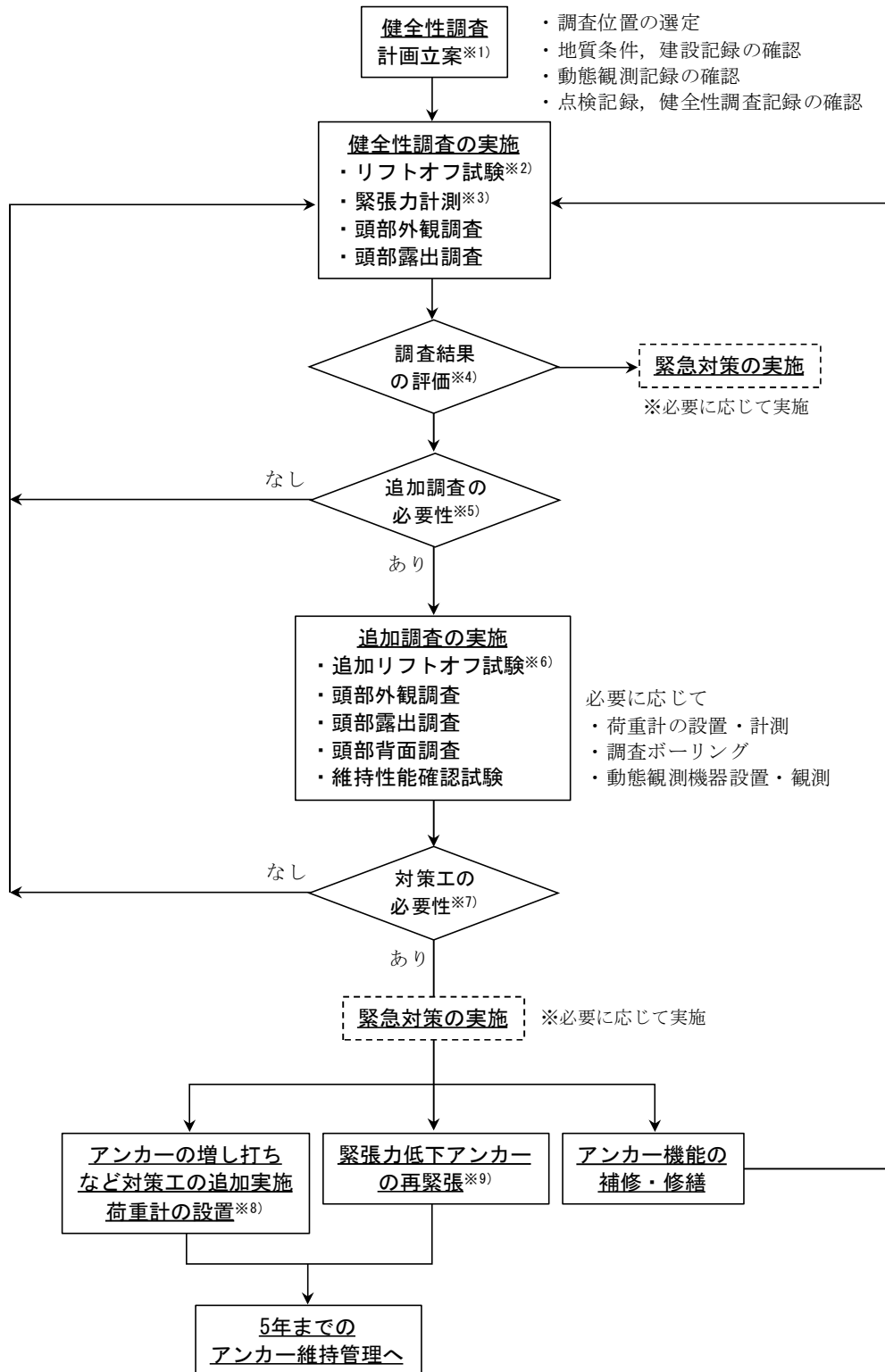


図 -4.19(a) 施工後 5 年以降の緊張力の維持管理の流れ

- ※1) : 緊張力計測（リフトオフ試験）の実施箇所は、緊張力計測の配置方法により決定する。
2回目の健全調査以降は、前回との重複箇所を複数設けつつ、測線を1列ずらすなどして行うとよい。
- ※2) : リフトオフ試験は、アンカー自由長部に分布する主な岩級区分が、以下の地質条件に該当する場合は、緊張力が低下しやすいため、1回/5年の頻度で実施する。法面の一部に以下の地質条件が存在する場合も同様とする。
火成岩：D級，土砂， 堆積岩：C_L～D，D級，土砂， 変成岩：C_L～D，D級，土砂
上記以外の地質条件（岩級区分）については、リフトオフ試験の実施を1回/10年の頻度まで間隔を空けてもよいが、頭部外観調査，頭部露出調査は地質条件に関わらず，1回/5年の頻度で実施する。頭部外観調査，頭部露出調査で異常が確認された場合，法面に変状などが見られる場合には，リフトオフ試験を行うものとする。
- ※3) : 緊張力計測は，荷重計によって行う。荷重計による緊張力計測が，アンカー施工全数の5%程度以上で実施可能な場合には，荷重計による緊張力の計測をもって，リフトオフ試験に替えることができる。
- ※4) : 残存緊張力の評価は，表4.8に示したA～Eの残存緊張力の健全度の目安を用いて評価することを基本とするが，定着時緊張力 (P_i)，設計アンカー力 (T_d) が不明な場合，もしくは施工時の定着時緊張力 (P_i) を上げ越している場合には，表4.8のケース②～④を目安として用いてもよい。
- ※5) : 追加調査の必要性は，※4)の表4.8に示したA～Eの残存緊張力の健全度の目安を用いて評価する。
- ※6) : 追加調査のリフトオフ試験では，A～Eの健全度の目安の評価結果から，上下左右の周辺アンカーの追加調査方法により実施する。
追加調査のリフトオフ試験において緊張力の低下や増加が顕著なアンカーには，荷重計を設置しモニタリングを行う。
緊張力が低下していても，法面の変状や動態観測機器の変動が見られる場合には，すべり面深度がアンカー体（定着部）よりも深い可能性が考えられるため，原因究明の地質調査などを行う。
- ※7) : 緊張力の増加が確認された場合は，法面が不安定化している可能性が考えられるため，法面安定の対策工を検討，実施するとともに，アンカーの飛び出し防止対策，独立受圧板の落下防止対策についても検討する。
緊張力が低下していても，法面の変状や動態観測機器の変動が見られず，アンカー機能に問題ないことが確認される場合には，経過観察とすることもできる。
- ※8) : アンカーの増し打ち（追加施工）を行う場合には，荷重計を設置し，モニタリングを行う。荷重計の設置位置は，緊張力計測の配置方法により決定する。
- ※9) : アンカーの再緊張を行う場合には，荷重計を設置し，モニタリングを行う。荷重計の設置位置は，緊張力計測の配置方法により決定する。
再緊張は，アンカー機能に損失がないことを十分に確認したうえで実施する必要がある。また，再緊張はアンカーの施工から15年～20年後程度に実施することが，緊張力低下への対応に加えて，緊張力の残存率のばらつきの解消に効果的であると考えられる。施工から数年後においての再緊張の実施も一定の効果があると考えられることから，荷重計によるモニタリングを行い，データを蓄積する。

図 -4.19(b) 施工後 5 年以降の緊張力の維持管理の流れ

表-4.7 111箇所のアンカー法面の平均 T_d/T_a と T_a 評価の閾値

評価値	111法面の T_d の T_a に対する 割合の平均値 (%)	決定 目安値 $\times T_a$
T_d	82.8	0.8
$0.8 T_d$	66.2	0.65
$0.5 T_d$	41.4	0.4
$0.1 T_d$	8.3	0.1

T_d : 設計アンカー力

T_a : 許容アンカー力

表-4.8 残存緊張力とアンカー健全度の目安

残存緊張力の範囲				健全度	状 態	対 処 例
ケース①	ケース②	ケース③	ケース④			
$0.9 T_{ys}$	$0.9 T_{ys}$	$0.9 T_{ys}$	$0.9 T_{ys}$	E	破断の恐れあり	緊急対応を実施
$1.1 T_a$	$1.1 T_a$	$1.1 T_a$	$1.1 T_a$	D	危険な状態になる恐れあり	対策を実施
T_a	T_a	T_a	T_a	C	許容値を超えている	
T_d	P_t	T_d	$0.8 T_a$	B	—	経過観察により対策の必要性を検討
P_t	T_d			A	健全	—
				A	健全	—
$0.8 P_t$	$0.8 T_d$	$0.8 T_d$	$0.65 T_a$	B	—	経過観察により対策の必要性を検討
$0.5 P_t$	$0.5 T_d$	$0.5 T_d$	$0.4 T_a$	C	機能が大きく低下している	対策を実施
$0.1 P_t$	$0.1 T_d$	$0.1 T_d$	$0.1 T_a$	D	機能していない	

T_{ys} : テンドンの降伏引張り力, T_a : 許容アンカー力,

T_d : 設計アンカー力, P_t : 定着時緊張力

ケース① : 定着時緊張力 (P_t) が判明している場合の評価範囲

ケース② : 長期的な緊張力低下に備えて定着時緊張力 (P_t) を上げ越して与えた場合の評価範囲

ケース③ : 設計アンカー力 (T_d) を定着時緊張力 (P_t) とした場合, もしくは,

設計アンカー力 (T_d) が判明し, 定着時緊張力 (P_t) が判明していない場合の評価範囲

ケース④ : 設計アンカー力 (T_d), 定着時緊張力 (P_t) とともに判明していない場合の評価範囲

現在, アンカーの維持管理を行う上で, 当該アンカーの建設記録が残っておらず, 設計アンカー力 (T_d), 定着時緊張力 (P_t) が不明なものも存在する. このようなアンカーの残存緊張力の評価は, 表-4.8 に示すケース④に該当する. グラウンドアンカー維持管理マニュアルは

2020年9月に改訂版が発刊されており⁵³⁾、残存緊張力の判定の目安として、表-4.9の範囲が示された。この判定方法は、アンカーの引張り材（テンドン）の強度（降伏引張り力（ T_{ys} ）、極限引張り力（ T_{us} ））との関係から、その状態を判定することとしており、アンカーの設計アンカー力（ T_d ）、定着時緊張力（ P_t ）が不明な場合にも判定が可能なものとなっている。設計アンカー力（ T_d ）、定着時緊張力（ P_t ）が不明な場合には、同マニュアル⁵³⁾の判定方法を用いることが考えられる。

表-4.9における $0.6T_{us}$ は許容アンカー力に相当する。表-4.10に T_a ならびに111箇所の法面の T_d の T_a との関係から算出した、引張り材（テンドン）の強度（ T_{ys} 、 T_{us} ）との関係を示す。 T_a との関係を見ると、 $0.3T_{us}$ は $0.5T_a$ 、 $0.1T_{us}$ は $0.2T_a$ におおむね相当する。 T_d との関係を見ると、 $0.65T_{us}$ は $1.3T_d$ 、 $0.6T_{us}$ は $1.2T_d$ 、 $0.3T_{us}$ は $0.6T_d$ 、 $0.1T_{us}$ は $0.1T_d$ に相当し、引張り材（テンドン）の強度との関係から判定を行う方法⁵³⁾は、従来のマニュアル²⁾による設計アンカー力（ T_d ）、定着時緊張力（ P_t ）との関係から評価する方法とおおむね同様の判定となる。

法面や斜面におけるアンカーは、複数が一体となることで抑止効果を発揮するものであり、維持管理においては、個々のアンカーのみならず、面としての評価が重要である。近年、残存緊張力の分布特性に着目したアンカー法面の維持管理手法³⁵⁾や、アンカーが施工された法面としての評価手法に関する研究⁵⁴⁾がなされている。これらの手法は、アンカーの健全性調査におけるリフトオフ試験結果などに基づき、アンカーの面としての健全性を評価するものである。また、既設アンカーに荷重計を設置する技術が開発され^{24)・25)}、荷重計による緊張力のモニタリングが比較的容易で安価に行うことができるようになってきており、このような荷重計は後付け荷重計とも呼ばれる。アンカーの緊張力の維持管理には、後付け荷重計による緊張力の計測を取り入れながら、アンカー個別の評価に加えて、面としての機能、法面の安定性を評価していくことが効率化につながると考えられる。

表-4.9 残存緊張力の判定の目安⁵³⁾

残存緊張力の範囲	評価	状態
$0.9 T_{ys}$	D	破断の恐れあり
$0.65 T_{us}$	C	危険な状態になる恐れあり
$0.6 T_{us}$	B	健全性が低下傾向にある
$0.3 T_{us}$	A	健全
$0.1 T_{us}$	B	健全性が低下傾向にある
	C	機能していない
	D	引抜け、飛び出しが見られる

注) T_{ys} : テンドンの降伏引張り力 (kN)

T_{us} : テンドンの極限引張り力 (kN)

表-4.10 残存緊張力の判定の目安と T_a , T_d の関係

残存緊張力の範囲 ⁵³⁾	評価	T_{us} と T_a の関係 から算出した T_a から見た範囲	11箇所の法面の T_a に対する T_d の割合 から算出した T_d から見た範囲	状態
$0.9 T_{ys}$	D	$0.9 T_{ys}$	$0.9 T_{ys}$	破断の恐れあり
$0.65 T_{us}$	C	$1.1 T_a$	$1.3 T_d$	危険な状態になる恐れあり
$0.6 T_{us}$	B	T_a	$1.2 T_d$	健全性が低下傾向にある
$0.3 T_{us}$	A	$0.5 T_a$	$0.6 T_d$	健全
$0.1 T_{us}$	B	$0.2 T_a$	$0.1 T_d$	健全性が低下傾向にある
	C			機能していない
	D			引抜け、飛び出しが見られる

注) T_{ys} : テンドンの降伏引張り力 (kN)

T_{us} : テンドンの極限引張り力 (kN)

T_a : 許容アンカー力 (kN) ※ $T_a = 0.6 T_{us}$

T_d : 設計アンカー力 (kN) ※ $T_d \leq T_a$

4.5 まとめ

本章においては、緊張力が低下しやすい地質条件におけるアンカーへの対応方法として、施工から 15.4 年後に緊張力低下が大きかった堆積岩の S-3 法面を例に、建設段階の上げ越し量の検討、供用段階における再緊張の有効性について検討した。また、法面における効率的な緊張力計測配置について、緊張力増加が見られた 3 法面を例に、荷重計設置と健全性評価におけるリフトオフ試験位置の配置方法と追加調査の実施方法を検討した。さらに、これらの結果に基づき、アンカーの維持管理の流れについて検討を行った。その結果、以下の事項を明らかにすることができた。

- (1) 火成岩の D 級および土砂、堆積岩および変成岩の $C_L \sim D$, D 級および土砂のような緊張力低下が大きい地質条件のアンカーへの対応として、上げ越しによる方法を検討した結果、建設段階において定着時緊張力の 10%の上げ越しを行うことにより、10 年～15 年後に出現する R_{pt} が 50%を下回るアンカー数が減少することが想定された。しかしながら、上げ越しのみでは十分かつ効果的な対応を行うことができない可能性があるため、建設段階においては、再緊張を行いやすい構造のアンカーを採用しておく必要があると考えられる。
- (2) 緊張力低下が大きいアンカーへの供用段階の対応方法としては、 R_{pt} が 50%を下回っても直ちに「対策を実施」と評価せず、アンカー機能の健全性調査を行ったうえで、対応を検討することが妥当であると考えられる。また、再緊張は緊張力低下および R_{pt} のばらつきの解消に効果があり、その実施時期は、施工から 15 年～20 年後が効果的ではないかと考えられる。施工後間もない数ヶ月後の時期もしくは、数年後における再緊張の実施も一定の効果があると考えられるため、このような事例を収集し、再緊張の実施時期の検証を行う必要がある。
- (3) 2 段の法面に 1 法面あたり 2 段、3 段、4 段および 5 段ずつ、23 列

のアンカーが施工された4ケースの緊張力計測の配置について、追加調査を考慮した効果的な方法を検討した。緊張力計測の配置方法は、いずれのケースにおいても、主測線（中心線）では列方向に2段間隔で緊張力計測を配置し、左右に設ける副測線は3列飛ばしとし、左右の1番目となる副測線では、主測線と千鳥になるよう2段間隔以上で主測線より数量を少なくして配置する。左右の2番目となる副測線では、主測線と同様の数量を千鳥になるように配置し、左右の3番目の副測線では、1番目の副測線と同様の数量を千鳥になるように配置する。左右の3番目よりもさらにアンカーが施工される場合には、奇数および偶数の副測線において繰り返し千鳥で配置していくことで、施工本数に対する計測率が5～10%の効果的な配置となる。これらに対応しない場合、例えば、1段目の法面にはアンカーが4段、2段目の法面にはアンカーが2段施工されている場合には、1法面あたり4段のケースと2段のケースを組み合わせることで効率的な配置が可能となる。

- (4) 荷重計計測および健全性調査のリフト試験結果において緊張力増加もしくは低下が見られ、残存緊張力分布調査（面的調査）を実施する場合の流れについては、荷重計計測またはリフト試験による緊張力の計測結果が残存緊張力の健全度の目安において、 C^+ 以上（ C^+ 、 D^+ 、 E^+ ）または C^- 以下（ C^- 、 D^- ）となった場合には、上下左右のアンカーを対象に追加のリフトオフ試験を行い、 B^+ および C^- の場合は、左右のアンカーを対象に追加のリフトオフ試験を行う。追加のリフトオフ試験において緊張力が E^+ または D^- となった場合には、さらに左または右（左右にアンカーが無い場合は上下）のアンカーを対象に、 E^+ または D^- 以外の評価になるまでリフトオフ試験を繰り返して行う。このように、リフトオフ試験を順次追加していくことで危険もしくは機能していないと判定されるアンカーの分布を効率的に把握でき、実際に緊張力の増加や低下が大きいアンカ

ーの存在数に応じた調査が可能になる。

- (5) アンカー緊張力の効率的な維持管理の流れにおいて、アンカーの緊張力低下と地質条件との関係、アンカーに設置した荷重計の変位センサーとしての有効性、緊張力低下アンカーの対応方法である定着時緊張力 (P_t) の上げ越し、緊張力計測の配置方法について、設計、施工段階から取り入れる方法について提案を行った。また、既設のアンカーについても緊張力計測の配置方法、追加調査の流れを取り入れる方法の提案を行った。アンカー緊張力の維持管理は、施工から5年後程度までと5年後以降の流れを分けて検討し、既設アンカーで定着時緊張力や設計アンカー力が不明な場合であっても、アンカーの引張り材（テンドン）の強度による評価を行うことで、前者と同等の評価ができることを提案した。

第 5 章 総括

5.1 本研究で得られた成果

アンカーは、引張り材に緊張力を加えて、その両端を地盤内と地表面で固定し、法面の安定を図る構造物であるため、アンカーの維持管理においては、荷重計やリフトオフ試験によって計測される残存緊張力を指標にした健全度の評価が行われている。従来、アンカーの緊張力は、施工後の初期に地盤のクリープや引張り材のリラクセーションによって徐々に低下した後、一定の値に収束するとされている⁷⁾。しかしながら、アンカーの緊張力は、これ以外にもアンカーが施工された背面地盤の地質や地山の条件に影響を受けて変化することが想定されているものの、地質条件と緊張力低下の関係、あるいは背面地盤の変動に伴う緊張力変化について、現在まで適切な評価が行われていない。また、地盤工学会基準⁷⁾や維持管理マニュアル²⁾などに示される残存緊張力の健全度評価は、これまでアンカー緊張力の変化の原因が不明確であったため、定性的な評価により緊張力が低下もしくは増加している場合一律な目安となっており、地質や地山の条件に影響を受けて変化するアンカー緊張力を利用した緊張力計測の配置や、危険と判断された場合の追加調査ならびに対処方法について不明瞭な部分が多かった。アンカーは、1957年に日本ではじめて導入されて以来¹⁾、道路、ダム、河川、砂防などの分野で広く採用されており、高速道路だけでも120,000本以上あるアンカーの効率的かつ効果的な維持管理が求められる。このため、地質条件と緊張力低下の関係、あるいは背面地盤の変動に伴う緊張力変化について評価し、アンカー緊張力を利用した維持管理の手法が確立できれば、より効率的で効果的なアンカーおよびアンカーが施工された法面の維持管理を行うことができると考えられる。

本論では、アンカー緊張力の維持管理における課題を解決するため、複数の法面において行われた荷重計およびリフトオフ試験による緊張力の計測結果と、建設段階および維持管理段階におけるボーリング調査などの地質調査データ、法面における変位観測データを比較検討し、これらの検討結果に基づいた、緊張力計測の効率的な配置方法と維持管理方法に関する研究に取り組んだ。各章のうち、まず第2章においては、アンカーの緊張力低下と背面地盤の地質や風化程度との関係について検討を行った。次に、第3章においては、従来から用いられる変位観測機器とアンカーに設置した荷重計の計測結果を比較し、アンカーの緊張力が背面地盤の変位を捉えるセンサーとして機能することに関する検討を行った。そして、最後に第4章においてアンカー緊張力を利用したアンカーの効率的な維持管理の方法に関する検討を行い、アンカーの緊張力変化を基にした、アンカー法面の新たな維持管理についての提案を行った。

以下に各章で得られた知見をとりまとめた総括を示す。

5.1.1 アンカー緊張力低下と地質条件の関係

アンカー緊張力は、一般的に地盤のクリープや引張り材のリラクゼーションにより、時間の経過とともに徐々に低下し、一定の値に収束するとされ⁷⁾、アンカーの維持管理において緊張力はアンカーの健全度を評価する一つの指標となっている²⁾。アンカーが施工される法面の地質条件は、火成岩、堆積岩および変成岩などの岩種、風化の程度、亀裂、節理および片理の発達の度合いなど様々であり、アンカーの緊張力低下は、初期的にも長期的にもこれら地質条件の影響を受けて変化することが考えられるものの、現在これらの関係を考慮した設計や維持管理は行われていない。このような課題に対して、アンカーの緊張力低下とアンカー自由長部に分布する岩級区分¹⁸⁾との関係について、火成岩、堆積岩、変成岩の岩種において、複数の安定した法面を対象に、アンカーの施工から30日後の初期的、数ヶ月から最大で40

年後の長期的な緊張力の残存率 (R_{pt}) と岩級区分を 8 段階に分けた地質条件の関連性について検討を行った。その結果、アンカーの緊張力低下は、初期的にも長期的にもアンカーが施工された背面地盤の岩級区分に関係し、 C_H , $C_H \sim C_M$, C_M , $C_M \sim C_L$, C_L , $C_L \sim D$, D 級、土砂へと地質条件が悪くなるにしたがって大きくなり、緊張力低下は、施工から 30 日程度以内の初期的なものよりも、それ以降の長期的な期間において大きいことが明らかになった。長期的な緊張力低下は、火成岩、堆積岩、変成岩のいずれにおいても、 C_H , $C_H \sim C_M$, C_M 級では、施工から 20 年が経過しても平均の R_{pt} で 90% が保持され、 C_H , $C_H \sim C_M$ 級は、15 年～25 年後の堆積岩において、平均の R_{pt} で 90% が保持される。 $C_M \sim C_L$ 級では、火成岩においては平均 R_{pt} で 90% 前後を示すが、堆積岩では 60%～70% と小さい値を示す。火成岩の D 級および土砂、堆積岩の $C_L \sim D$, D 級および土砂、変成岩の D 級では、15 年～20 年後に平均 R_{pt} で 50% 程度もしくは 50% を下回るようになり、残存緊張力とアンカー健全度の目安において、「対策を実施」と評価されるアンカーが出現する、緊張力が低下しやすい地質条件であるといえることができる。このような傾向は、火成岩に比べて堆積岩で多く見られ、変成岩の緊張力低下の傾向は堆積岩に類似することが明らかになった。また、アンカーの長期的な緊張力低下は、地質条件が C_L , $C_L \sim D$, D 級および土砂の場合、5 年～15 年後、15 年～25 年後においても継続する傾向が顕著に見られ、これらの地質条件においては、時間の経過に伴い R_{pt} の最大値と最小値の差とばらつきが大きくなっていくことが明らかになった。さらに、地下水の有無と緊張力低下の関係については、地質条件が C_H , $C_H \sim C_M$, C_M 級では、地下水の有無が緊張力低下や R_{pt} のばらつきに与える影響は小さいと考えられるものの、地質条件が $C_M \sim C_L$, C_L , $C_L \sim D$, D 級および土砂では、地下水が存在することで、地下水が無い法面に比べて、ばらつきが大きくなる傾向が見られる結果が得られた。

5.1.2 アンカー荷重計と変位観測機器の関係

現在、地すべりや斜面崩壊などにおける変位観測には、従来から地表伸縮計、地盤傾斜計、光波測量、GPS観測、パイプ歪計、孔内傾斜計、地中伸縮計などが用いられている。アンカーの緊張力の変化は、地盤内のテンドン自由長の伸び縮みに依存することから、地盤に変位が見られる場合、アンカーに設置した荷重計の計測値は、地盤の変動に伴って増加し、従来の各種変位観測機器と同様に、地盤の変動をダイレクトに捉えるセンサーとしての機能を有していると考えられる。しかしながら、現在まで各種変位観測機器で確認された変化量と、アンカーに設置された荷重計による緊張力の計測値との関係について十分な評価は行われていない。このような課題に対して、従来の変位観測手法である光波測量、地中伸縮計、挿入型孔内傾斜計、設置型孔内傾斜計、パイプ歪計の観測結果と、これらと同時に計測を実施した荷重計によるアンカー緊張力の計測結果を基に、アンカーの緊張力が従来の変位観測機器と同等に地盤変動を捉え、変位センサーとして利用できる可能性について検討を行った。その結果、荷重計による緊張力の計測値は、各種変位観測機器（光波測量、地中変位計、挿入型傾斜計、設置型孔内傾斜計、パイプ歪計）の変位に良く追従して変化し、両者の関係は一次回帰式で近似でき、変位観測機器の変化量が小さい場合でも相関は高く、荷重計による緊張力の計測値は、変位観測機器と同等に地盤変動を捉えていることが明らかになった。緊張力の変化量から算出されるテンドン自由長の伸び量は、各種変位観測から求められる値の75%～80%程度であり、各種変位観測機器とアンカーに設置した荷重計による緊張力の変化は、変位方向とアンカー方向のなす角が40度程度まで斜交しても高い相関を示すことが明らかになり、アンカーに設置した荷重計は、従来の変位観測機器と同様に、地盤の変動を捉えるセンサーとしての機能を有することが確認された。

5.1.3 維持管理におけるアンカー緊張力の利用

アンカーの緊張力の評価は、これまでアンカー緊張力の変化が不明確であったため、維持管理マニュアルに示されたアンカーの残存緊張力の健全度の目安²⁾のような定性的な評価により、緊張力が低下もしくは増加している場合一律に、アンカーもしくは法面に問題があると判定されており、これらの関係を考慮した効率的な施工および維持管理が行われていない。こうした課題に対して、アンカーの緊張力低下と地質条件の関係、アンカー緊張力が変位センサーとしての役割を果たすことについての検討結果に基づき、効率的なアンカーの維持管理に向けての提案、緊張力が低下しやすい地質条件における建設段階の上げ越し量、供用段階の緊張力低下アンカーに対応する再緊張の提案、アンカー維持管理における緊張力計測の面的配置の提案、およびアンカー緊張力変化を基にした新たな法面の管理手法について検討を行った。その結果、建設段階に行う上げ越しは、緊張力低下の程度が異なることに起因する法面での R_{pt} のばらつきのため、法面に施工する全てのアンカーで一律に上げ越しを行うと、法面には残存率が高いアンカーが存在し、 T_d を超える過大なアンカーが多数存在するようになる状態が想定されるとともに、上げ越しを行うことで、より大きい規格のアンカーや受圧構造物を要することになる。このため、建設段階の P_t の上げ越し量は、 T_d に対して 10%程度が妥当であることが明らかになった。また、供用段階に行う再緊張は、緊張力低下したアンカーの対応方法として効果があることが明らかになり、再緊張は施工から 15 年～20 年後程度に行うことが緊張力低下および R_{pt} のばらつきの解消に効果的ではないかと考えられた。

これらの結果を踏まえ、アンカーの緊張力を利用したアンカー維持管理における荷重計やリフトオフ試験にによる緊張力計測の配置方法については、2 段の法面に 1 法面あたり 2 段、3 段、4 段および 5 段づつ、23 列のアンカーが施工された 4 ケースの緊張力計測の配置につい

て、追加調査を考慮した効果的な方法を検討した。緊張力計測の配置方法は、いずれのケースにおいても、主測線（中心線）では列方向に2段間隔で緊張力計測を配置し、左右に設ける副測線は3列飛ばしとし、左右の1番目となる副測線では、主測線と千鳥になるよう2段間隔以上で主測線より数量を少なくして配置する。左右の2番目となる副測線では、主測線と同様の数量を千鳥になるように配置し、左右の3番目の副測線では、1番目の副測線と同様の数量を千鳥になるように配置する。左右の3番目よりもさらに両端にアンカーが施工される場合には、奇数および偶数の副測線の配置を繰り返し千鳥で配置していくことで、施工本数に対する計測率が5%～10%の効果的な配置となる。緊張力計測の結果から、残存緊張力分布調査（面的調査）を実施する場合の流れについて、残存緊張力の健全度に応じて、上下左右または左右のアンカーを対象に、順次リフトオフ試験を行うことで、危険もしくは機能していないと判定されるアンカーの分布が効率的に把握できる方法を提案した。

最後に、アンカー緊張力変化を基にした新たな法面の管理手法について、従来の維持管理の流れを施工から5年後程度までと5年後以降の流れに分けて検討し、アンカーの緊張力低下と地質条件との関係、アンカーに設置した荷重計が地盤の変動を捉えるセンサーとしての機能を有すること、緊張力低下アンカーの対応方法である定着時緊張力（ P_t ）の上げ越し、緊張力計測の配置方法について、設計、施工段階から取り入れる方法を提案した。さらに、既設アンカーで定着時緊張力や設計アンカー力が不明な場合であっても、アンカーの引張り材（テンドン）の強度（テンドンの極限引張り力（ T_{us} ）、許容アンカー力（ T_a ））、との関係を用いた評価を行うことで、設計、施工条件（設計アンカー力（ T_d ）、定着時緊張力（ P_t ））と同等の評価ができる目安を提案した。

5.2 本研究における今後の課題

本論では，アンカーの緊張力はアンカーが施工された背面の地盤条件の影響を受けて変化することを中心に分析を行い，緊張力を用いたアンカーの維持管理の方法について提案を行った．

アンカーの緊張力低下と地質条件では，アンカー自由長部に分布する地盤の岩級区分¹⁸⁾に着目し両者の関係を検討した．検討に用いた法面は，引張型で独立受圧板を受圧構造物とするアンカーが多かったため，今後は種々のアンカータイプ，受圧構造物のデータをより多く収集，蓄積したうえで，さらなる検討を加える必要がある．また，岩級区分は，風化の程度，岩塊の硬さ，節理あるいは亀裂の状態の三要素からなる定性的な評価方法である．この評価方法は，地質調査において広く用いられており，様々な強度定数や物理定数との比較がなされている．このため，アンカーの緊張力低下の評価においては，地盤の変形係数や亀裂係数，弾性波速度，N値などとも関係することが考えられ，今後それらとの関係についても検討を加える必要がある．また，本論に用いたアンカー緊張力の計測データは，最大で40年後のものであり，それ以外の多くは施工から20年～25年のものである．これらのアンカーについては今後も維持管理が必要であり，リフトオフ試験などによる緊張力の計測がなされていくことになる．今後これらのデータを蓄積し，検討を重ねることでより効率的で効果的なアンカーの維持管理が可能になると考える．

アンカー緊張力と変位観測機器との関係については，光波測量，地中伸縮計，挿入型もしくは設置型孔内傾斜計，パイプ歪計の変位と荷重計による緊張力の計測値の変化との比較を行った．アンカーの緊張力の変化には，地すべりや崩壊発生などによる変動のみならず，切土の進行や盛土の地形改変，トンネル掘削，集中降雨やダムの湛水などによる地下水位の変化，地震など，様々な要因が関係することが考えられる．今後もこのようなデータを蓄積し，検討を行うことでアンカ

一に設置した荷重計が変位センサーとしての機能を有することについて、その信頼性が高まると考えられる。

再緊張は緊張力低下アンカーの対応方法の一つとして有効と考えられ、その実施時期については、 R_{pt} が50%を下回り、 R_{pt} のばらつきが大きくなる15年～20年後が効果的ではないかと考えられた。しかし、施工後間もない数ヶ月後の時期もしくは、数年後における再緊張の実施も一定の効果があると考えられるため、このような事例を収集し、再緊張の実施時期の検証を行うことで、より効果的な時期における再緊張の実施が可能になると考える。

謝 辞

本論文をまとめるにあたって、三重大学大学院生物資源学研究科の酒井俊典教授には終始親切なるご指導，ご鞭撻を賜りました．ここに深い感謝の意を表します．また，三重大学大学院生物資源学研究科の保世院座狩屋教授，岡島賢治教授，教養研究院の大野研教授には貴重なご意見，ご指導を賜りました．深く御礼を申し上げる次第です．

本論文は，筆者が中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社にて在籍しながら実施してきた研究成果に，三重大学大学院 生物資源学研究科 博士後期課程 共生環境学専攻の在籍中に行った研究成果を加えて取りまとめたものであります．本論文の分析および検討に使用した多くのデータは，中日本高速道路株式会社 名古屋支社において長年に渡り蓄積されたものであります．そのような貴重なデータを使用させて頂きました中日本高速道路株式会社 名古屋支社ならびに中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋株式会社に深い感謝を申し上げます．研究を始めたころには，アンカーの緊張力低下と背面地盤の地質条件に関係があること，緊張力上昇時にはアンカーが地盤の変形を捉えるセンサーとしての役割を果たし，これらをアンカーの維持管理に利用できるのではないか，という漠然とした思いがありました．建設段階などの地質情報の整理，荷重計やリフトオフ試験による緊張力の測定結果の分析が進むにつれ，緊張力の変化と地質条件および地盤変動との関係が次第に明らかになってきました．蓄積された膨大なデータを分析することで，維持管理におけるアンカー緊張力の利用について提案することができました．

三重大学大学院に通学し研究を行うにあたって，同会社の中村武夫社長，太田睦男前社長，塚本周一取締役，矢崎賢一名古屋支店長，村田正徳前名古屋副支店長（現 名工建設株式会社），日下部竹彦前名古屋支店企画総務部長（現 中日本高速道路株式会社），高木三男前名古

屋支店道路技術部長（現 株式会社道雄技研）、中村茂樹名古屋支店道路技術部長には、ご支援とご理解を頂きました。深く御礼を申し上げます。

この研究を進めるにあたって、同社の先輩、道路技術部の多くの上司および同僚のご指導とご協力を頂きました。研究の初期段階の資料収集にあたっては、同社の櫛田末治技術アドバイザー、小野山利之課長代理、西本朝彦技術主任には多大なご協力とご支援を頂きました。特に、櫛田末治技術アドバイザーにおいては、多忙な中、論文などを見て頂くほか、法面の地質に関する情報の収集にあたって、適切なご指導を頂きました。また、試験データの整理には、同社の小林浩氏に多大なご協力を頂きました。心より感謝を申し上げます。

さいごに、本研究の一部は、科学研究費助成事業（課題番号 19K04595）の支援を受けて行われました。ご協力頂きました関係各位に深く感謝いたします。

2021年 3月吉日

山崎 充

引用文献

- 1) 大窪克己, 竹本将, 天野淨行: 高速道路のグラウンドアンカーについて, 日本道路会議論文集, Vol.27, p.15, 2007.
- 2) 独立行政法人 土木研究所, 社団法人 日本アンカー協会: グラウンドアンカー維持管理マニュアル, 2008.
- 3) 大窪克己, 藤岡一頼, 竹本将: 高速道路における土工構造物の維持管理, 土と基礎, Vol.56, No.2, pp.2-3, 2008.
- 4) 緒方健治: アンカーの防食について, 基礎工, Vol.28, No.10, pp.12-15, 2000.
- 5) 地盤工学会: 地盤工学会基準 グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, 1990.
- 6) 藤田圭一, 菊池祐悦: 内外のアンカー基準の動向と使用状況, プレストレスコンクリート, Vol.31, No.4, pp.13-19, 1989.
- 7) 前川豊, 森屋幸一: 甦るダム Barrage de CHEURFAS II -アルジェリア シェルファダム II 工事報告-, 月刊ダム日本, No.535, pp.57-73, 1989.
- 8) 内田勉: 地すべり対策としてのアンカー技術の道程と課題, 日本地すべり学会誌, Vol.51, No.5 (187), pp.9-16, 2014.
- 9) British Standard : BS8081, 1989 : Code of Practice of Ground Anchorages, 1989.
- 10) Fédération Internationale de la Précontrainte(FIP) : Design and construction of prestressed ground anchorages, 1996.
- 11) Post-Tensioning Institute(PTI) : Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors, 1996.
- 12) Road and Traffic Authority, New South Wales, Australia, QA Specification, QA DCM B114 : Permanent Rock Anchors, 1997.
- 13) 中日本高速道路(株): グラウンドアンカー設計・施工要領, 2007.
- 14) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, 2012.

- 15) 一般社団法人 日本アンカー協会：2019 年度版グラウンドアンカー技術ガイドブック，2019.
- 16) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議：インフラ長寿命化基本計画，2013.
- 17) 内閣官房：国土強靱化基本計画－強くて，しなやかなニッポンへ－，2018.
- 18) 国土交通省 道路局 国道・技術課：道路土工構造物点検要領，2018.
- 19) 中日本高速道路(株)：土工施工管理要領，2017.
- 20) 地盤工学会：地盤工学会基準 グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説（JGS4101-2000），2000.
- 21) 日本道路公団：グラウンドアンカー工の点検および健全度調査マニュアル（案），2002.
- 22) 中日本高速道路(株)：調査要領 第一編 地盤・土工構造物・舗装，2017.
- 23) 藤原優，竹本将，横田聖哉，酒井俊典，常川善弘：高速道路におけるグラウンドアンカー維持管理への取り組み，基礎工，Vol.38，No.9，pp.32-36，2010.
- 24) 独立行政法人 土木研究所，日特建設(株)，ライト工業(株)，(株)共和電業，(株)エスイー，(株)東横エルメス，坂田電機(株)，(株)東京測器研究：アンカーへの取り付け・交換が容易な新型アンカー荷重計の開発に関する共同研究報告書，共同研究報告書第 407 号，2010.
- 25) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーの残存引張り力のモニタリング手法に関する検討，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.68，No.3，pp.547-563，2012.
- 26) アンカーアセットマネジメント研究会：SAAM を用いた既設アンカーのり面の面的評価マニュアル（案）－地質から見た「アンカーのり面の評価」に向けて－，2018.
- 27) 土木学会：軟岩－調査・設計・施工の基本と事例－，pp.1-6，1984.

- 28) グラウンドアンカー技術協会：グラウンドアンカー工設計施工指針， pp.248-255. 2010.
- 29) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 4 グラウンドアンカーの調査・設計から施工まで， pp.1-359. 1997.
- 30) 常川善弘， 酒井俊典， 小野誠， 山崎尚明：グラウンドアンカーの初期緊張力管理について，全地連「技術 e-フォーラム 2009」松江， 2009.
- 31) 田久勉， 下田薫， 川崎廣貴， 田村武：グラウンドアンカー自由長部における摩擦損失，地盤工学ジャーナル， Vol.5. No.2. pp.281-291, 2010.
- 32) 新関信， 生田雄康， 小山章一， 東耕太郎：グラウンドアンカー緊張力の経時的変化，第 29 回土質工学会研究発表会， pp.1787-1788, 1994.
- 33) 朝日一雄， 吉村雅弘， 田山聡， 山田浩：グラウンドアンカーの有効緊張力の変動に関する一考察，土木学会第 45 回年次学術講演会， pp.888-889, 1994.
- 34) 野口功， 小寺重郎， 高田穰之， 大町武司：橋脚の岩盤定着に関する実験，土と基礎， Vol.18, No.2, pp.11-26, 1970.
- 35) 藤原優， 酒井俊典：グラウンドアンカーの残存引張り力分布特性に着目したアンカー法面の維持管理，土木学会論文集 C(地圏工学)， Vol.68, No.2, pp. 260-273.2012.
- 36) 田中治雄：土木技術者のための地質学入門， pp.55-49, 1964.
- 37) 日本応用地質学会：岩盤分類，応用地質特別号， pp.103-118, 1984.
- 38) 財団法人 日本建設情報総合センター：ボーリング柱状図作成要領（案）解説書， pp.17-20. 1986.
- 39) 中日本高速道路株式会社：NEXCO 試験法，第 1 編，土質関係試験方法， pp. 64-67, 2010.
- 40) 藤原優， 竹本将， 横田聖哉：グラウンドアンカーのリフトオフ試

- 験における大的なリフトオフ値について，土木学会第 64 回年次学術講演会， pp.709-710， 2009.
- 41) 中日本高速道路(株):NEXCO 試験法，第 1 編，土質関係試験方法， pp.64-67. 2013.
- 42) 地すべり対策技術協会：いつでも，どこでも役に立つ地すべり観測便覧， pp.49-55. 2012.
- 43) 山崎充，岩崎真二郎，酒井俊典：アンカー荷重計の変位センサーとしての活用について，第 57 回日本地すべり学会研究発表会講演集， pp.139-140. 2018.
- 44) 酒井俊典，常川善弘，田口浩史，阪口和之，藤原優，市橋義治：アンカー緊張力および温度を用いたグラウンドアンカーの維持管理，日本地すべり学会誌， Vol.51， No.6， pp.19-24. 2014.
- 45) 吉中龍之進，桜井春輔，菊池宏吉：岩盤分類とその適用， pp.39-112， 1989.
- 46) 菊池宏吉：地質工学概論， pp.92-123. 1990.
- 47) PC フレーム協会：PC フレーム工法， pp.7-8. 2002.
- 48) フローテックアンカー協会：施工性，耐食性に配慮したエポキシストランドアンカー，スーパーフローテックアンカー， pp.2-16. 2012.
- 49) VSL 協会：VSL 永久アンカー工法， pp.5-6， 2012.
- 50) KJS 協会：エポキシ PC 鋼より線を使用した高耐久性アンカー，EHD アンカー， pp.2-5， 2012.
- 51) 中日本高速道路(株)：土質地質調査要領， pp.171-188. 2012.
- 52) 酒井俊典：SAAM ジャッキを用いた既設アンカーのり面の面的調査マニュアル(案)，国土交通省建設技術研究開発助成制度「SAAM ジャッキを用いた効果的なアンカーのり面の保全手法の開発」委員会， 2010.
- 53) 独立行政法人 土木研究所，社団法人 日本アンカー協会，国立大学法人 三重大学，株式会社高速道路総合技術研究所：グラウンド

アンカー維持管理マニュアル，2020.

- 54) 藤原優，酒井俊典：「点」から「面」へと展開するグラウンドアンカーの健全性評価手法の検討，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.73. No.4， pp.460-474， 2017.