

博士論文

グラウンドアンカーの残存引張り力特性に基づく
アンカー法面の維持管理手法に関する研究

平成25年3月

三重大学大学院生物資源学研究科

藤原 優

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	6
1. 3 本論の目的と検討方法	15
1. 4 まとめ	22
1. 5 本論において用いる用語の定義	23
第 2 章 リフトオフ試験方法の検討	27
2. 1 はじめに	27
2. 2 リフトオフ試験	27
2. 3 試験条件および残存引張り力の評価	30
2. 4 まとめ	58
第 3 章 腐食の発生したアンカーの健全性評価	60
3. 1 はじめに	60
3. 2 アンカーの持つ機能の健全性評価	60
3. 3 腐食の発生したアンカーの健全性調査	64
3. 4 まとめ	93
第 4 章 荷重計計測の問題点と改善策	95
4. 1 はじめに	95
4. 2 荷重計によるアンカーの緊張力の計測	95
4. 3 既設アンカーに設置された荷重計の機能検定方法	98
4. 4 既設アンカーにおける緊張力のモニタリング	107
4. 5 荷重計の計測値と外気温の関係	126
4. 6 適切な緊張力のモニタリング手法	136

4. 7	まとめ	138
第 5 章	アンカーの面的調査とその評価	140
5. 1	はじめに	140
5. 2	残存引張り力の面的分布評価のための調査数量	141
5. 3	アンカーの残存引張り力の面的分布の特性	147
5. 4	まとめ	183
第 6 章	総括	185
6. 1	本研究で得られた成果	185
6. 2	本研究における今後の課題	192
	謝辞	194
	引用文献	196

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）工法は日本に 1957 年に導入されて以降¹⁾、抑止杭などに比べて材料手配や施工が容易という利点から、地すべり対策工や切土法面、ダムなどの安定対策工として毎年多くの施工が行われている。（社）日本アンカー協会の調べでは²⁾、平成 17 年の 1 年間の施工実績は、工事件数 2,287 件、総延長 1,670km 余りとなっている。アンカーは地山に施工されているため、背面地山の作用や鋼材の腐食等による機能低下が懸念され²⁾、特に開発初期に導入されたアンカー工法は、仮設の抑止工法として採用された経緯¹⁾から、アンカー頭部やアンカー引張り部とアンカー体部の境界において防食機能が十分でなかった³⁾。そのため水や空気が進入し、鋼材の腐食が進行しやすい構造であった⁴⁾。アンカー工法が抑止工として本格的に導入されてくる中、1980 年代中頃になると、アンカーが施工された法面では引張り部が腐食により破断し、図-1.1 に示すように、アンカー頭部の浮き上がりや飛



(a)浮き上がり



(b)飛び出し

図-1.1 アンカー頭部の変状

び出し等の変状が見られるようになった³⁾。このため、1988年には旧土質工学会（現在の地盤工学会）の基準が改訂され、防食機能を改善したアンカー工法が採用され始めた⁵⁾。

高速道路では、制約された事業用地内で脆弱な地山を切盛して建設せざるをえない場合があり、急勾配な法面を安定させるためにアンカー工法が多く採用されてきた。東・中・西日本高速道路会社が管理する高速道路（以下、高速道路）では、図-1.2に示すように、1969年頃にアンカー工法が採用され、1985年以降その施工量は徐々に増加し、現在までに施工されたアンカーは120,000本以上の実績がある¹⁾。これらの中には施工後約40年が経過したものも存在し、施工当初の機能を維持できていないアンカーも存在する。このため、今後既設アンカーを適切に維持管理していくことが大きな課題とされている。

アンカーは、引張り材に導入された緊張力の働きにより法面の安

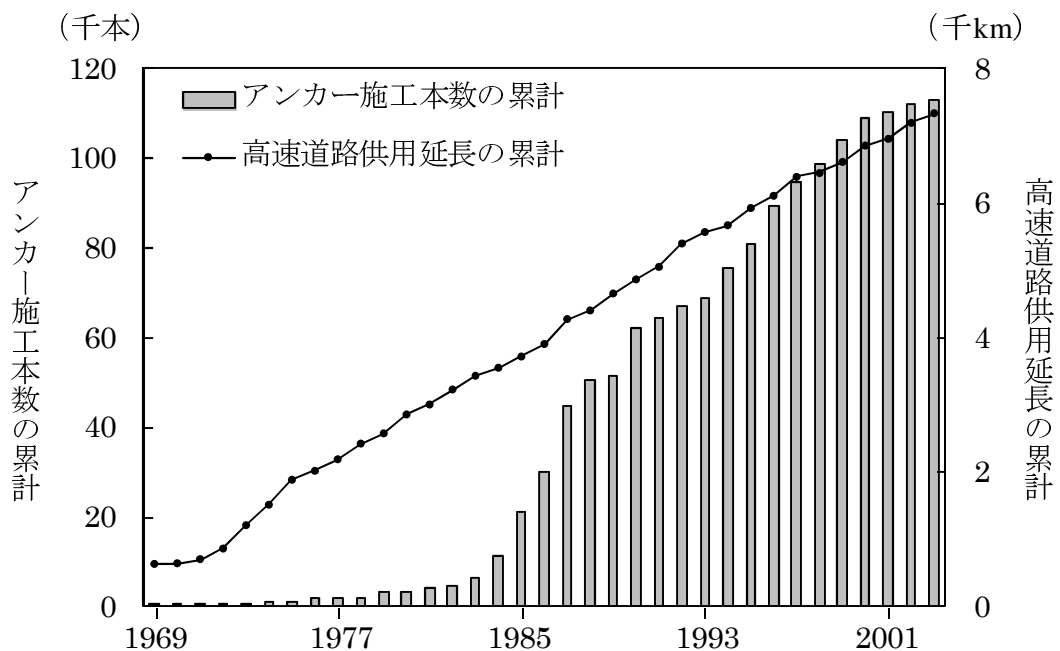


図-1.2 高速道路におけるアンカーの施工状況¹⁾

定性を維持している。しかし、アンカーは、供用時に残存引張り力が変化したり、材料の劣化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ため、アンカーの残存引張り力特性を踏まえ維持管理を行うことが重要と考えられる。一般的に、アンカーの残存引張り力が設計アンカー力や定着時緊張力に対して管理基準から大きく増加する場合、法面が不安定化する恐れから対策が実施されることがある。しかしながら、アンカーの引張り材は、法面の不安定化に寄与しないような背面地山の風化や地表面の沈み込み、受圧構造物の変形などによるアンカー頭部のわずかな動きに対しても反応し、これによってアンカーの残存引張り力が変化している可能性がある⁶⁾。こうした特性からアンカーが示す緊張力は、背面地山あるいは材料の状態を示すセンサー的な役割を有すると考えられ、アンカーの残存引張り力を適切に評価し、適切な維持管理につなげる方法について検討を行う必要がある。

2000年に改訂された「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）」⁷⁾や2008年の（独）土木研究所・（社）日本アンカー協会共編による「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）」⁸⁾では、アンカーの維持管理に関する基本的な点検項目や点検数量、点検方法などは紹介されているものの、アンカーの残存引張り力や健全性などを評価する実務的な手法までは示されていない。また、アンカー1本当りの残存引張り力を評価する基準は、「維持管理マニュアル」⁸⁾などで示されているものの、複数のアンカーが施工された法面（以下、アンカー法面）においてアンカーの残存引張り力を調査し、法面全体の健全性などを評価する手法は現在確立されていない。

アンカーは、施工時に設計アンカー力に近い緊張力を導入することにより定着し、一般的にこの状態を供用時においても保つよう残存引張り力を管理することが法面の安定化に必要と考えられてい

る。これに対して、アンカーは、時間の経過とともに残存引張り力が増減し、個々のアンカーの残存引張り力がばらつきながらも均衡を保つことで法面の安定性を維持する性質を持つと考えられるため、より確実な維持管理を行う上でも複数のアンカーに対する調査結果を基に評価する必要があると考えられる。

高速道路では、維持管理において目視や打音等により定期的にアンカーの状態を点検することとしているものの、現在までアンカーの劣化を原因とした法面崩壊等が顕在化していないことや、点検に手間を要することから、予防保全を目的とした維持管理は十分に行われていないのが現状である。しかし、高速道路に施工されているアンカーには、施工後既に40年以上が経過しているものもあり、地山条件や施工状況によっては機能低下が進行し、法面を不安定化させる恐れが考えられる。図-1.3は、昭和45年にアンカーにより対策され約7年経過した時点の法面の状況を示している。この時点

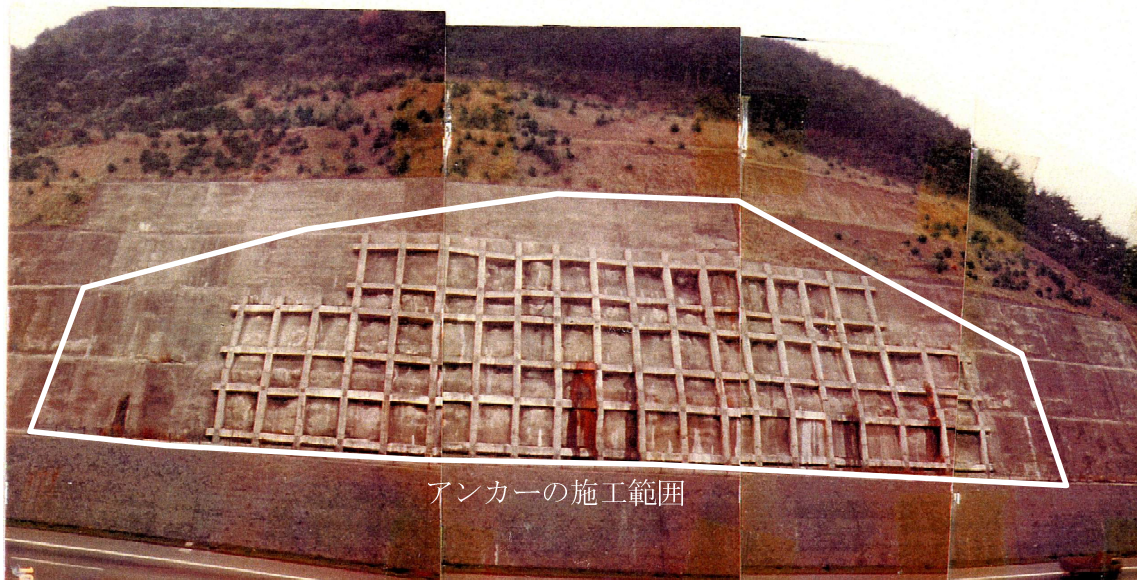


図-1.3 アンカーにより対策された法面（昭和45年に施工され約7年経過した時点の状況）



(a)腐食によるアンカー頭部の劣化
(昭和63年調査時点)



(b)表面クラックの発生
(平成3年調査時点)

図-1.4 施工後の法面の状況



(a)くさび定着



(b)ナット定着



(c)くさびナット定着

図-1.5 主なアンカーの定着タイプ

において表面には湧水や遊離石灰などが見られる。その後、昭和63年には、図-1.4に示すように、アンカー頭部の定着具や引張り材に激しい腐食が認められ、平成3年には吹付けコンクリート表面にクラックが発生している。こうした事例からも、法面が不安定化するリスクは、時間の経過とともに増していくことが予想され、今後ア

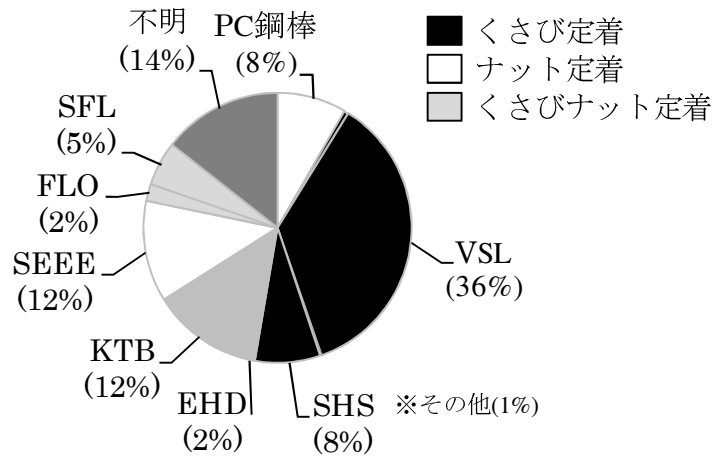


図-1.6 高速道路におけるアンカー工法の内訳⁹⁾

ンカーの維持管理の重要性は高まっていくと考えられる。

アンカー工法は、現場での経験に基づき改良・開発が進められており、引張り材にはPC鋼より線、多重PC鋼より線、PC鋼棒などの種類があり、定着部の支持方式も引張り型、圧縮型に分類されるなど多種多様の工法形式が存在する⁷⁾。また、アンカー頭部の定着タイプは、図-1.5に示すようにくさび定着タイプとナット定着タイプに分類され、くさび定着タイプにはナットを併用したくさびナット併用定着タイプがある。図-1.6は、2006年までの高速道路におけるアンカー工法の施工実績を集計した結果である⁹⁾。内訳を見ると、くさび定着タイプであるVSL工法が最も多く、次いでくさびナット併用定着タイプのKTB工法、ナット定着タイプのSEEE工法が多くなっている。

1.2 アンカーの維持管理

アンカーは、図-1.7に示すようにアンカー頭部、引張り部、アン

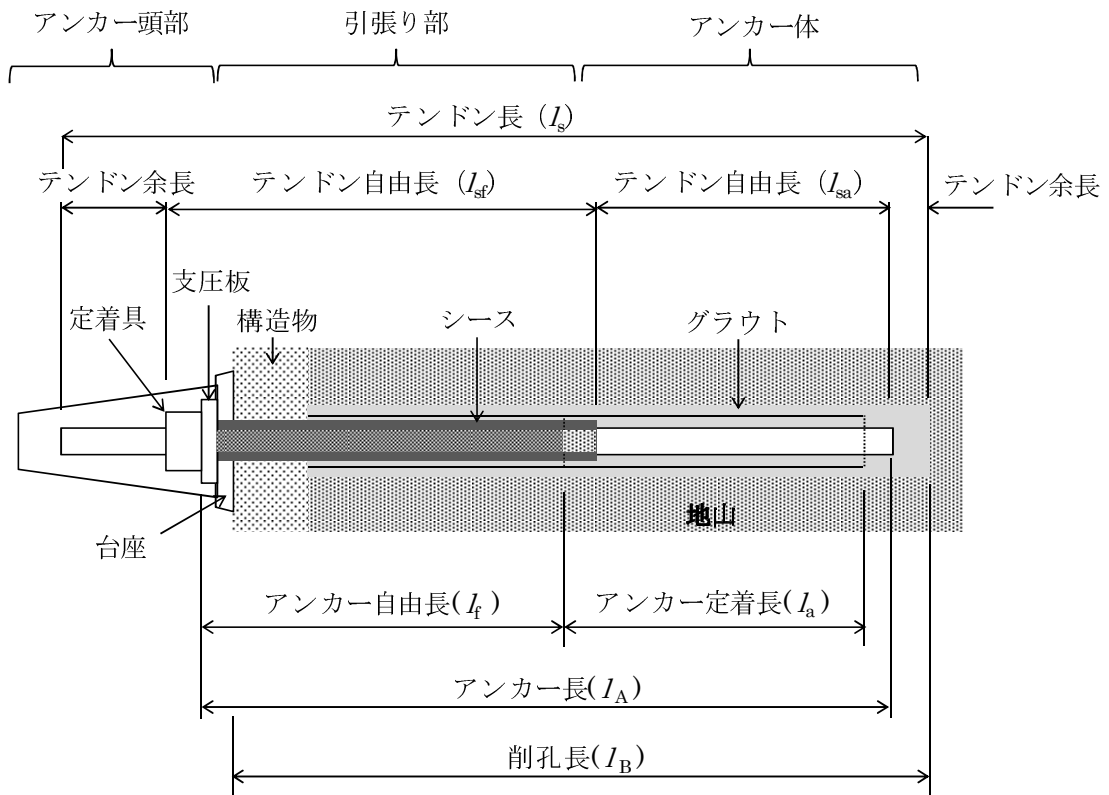


図-1.7 アンカーの構造 7)

カー体により構成され、「地盤工学会基準」7)にアンカーの構造が定義されている。また、「地盤工学会基準」7)では、アンカーの維持管理において、施工されたアンカーおよびアンカーされた構造物が、供用期間中その機能を十分に果たしているかどうか確認し、必要な処置について検討することが述べられている。アンカーの維持管理は図-1.8に示すように、初期点検後、日常点検や定期点検、降雨・地震といった異常事態が発生した場合の異常時点検などにおいて、車上月視や徒歩での近接目視などによりアンカー頭部の点検を行い、緊急対策までを必要としない場合に健全性調査が実施される。健全性調査の中では、アンカーの残存引張り力の評価などを行い、健全性低下の要因がアンカーに起因する場合対策工が実施される。アンカーは、残存引張り力が大きく増加した場合には、法面が不安

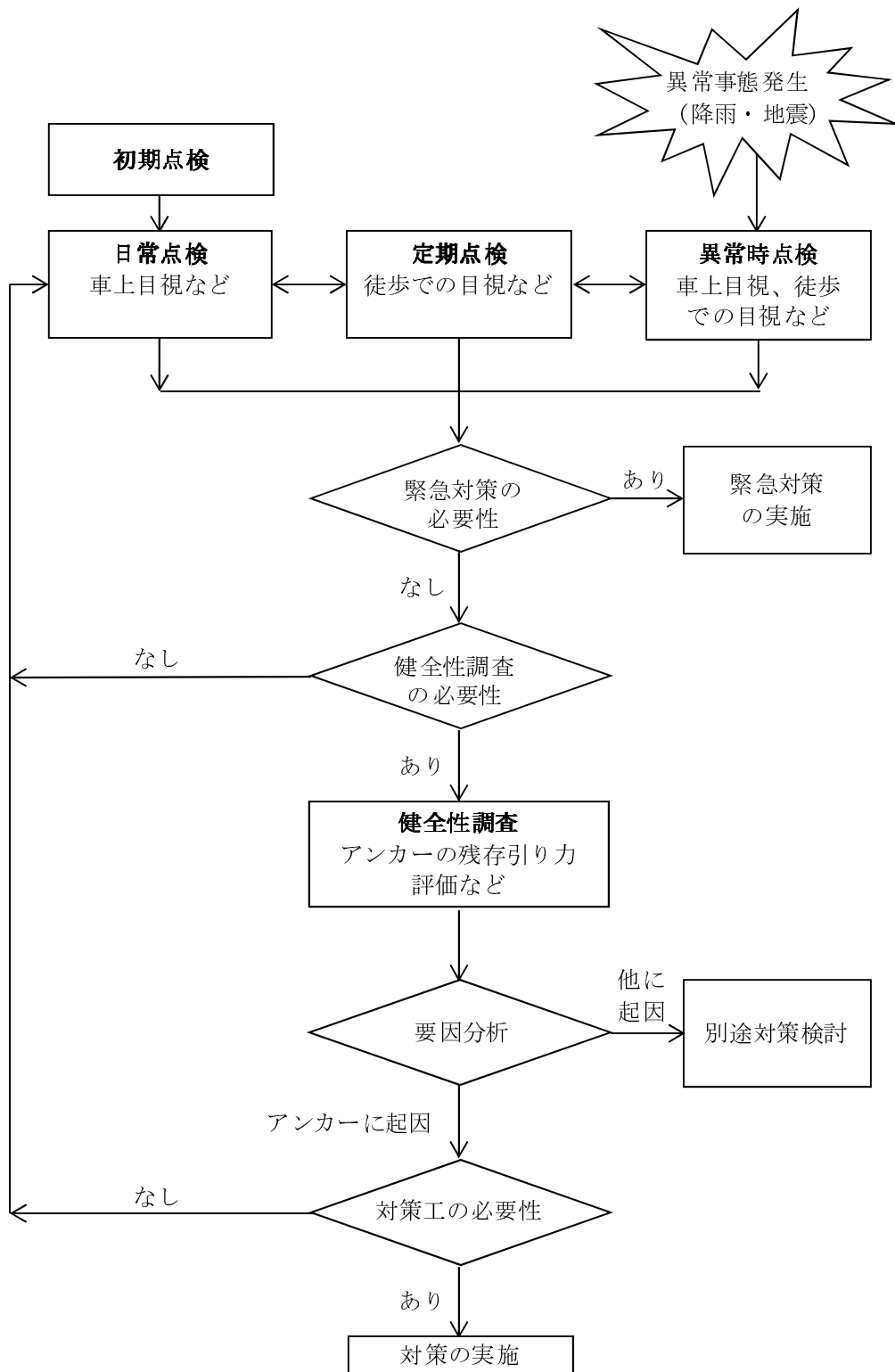


図-1.8 アンカーの維持管理フロー⁸⁾

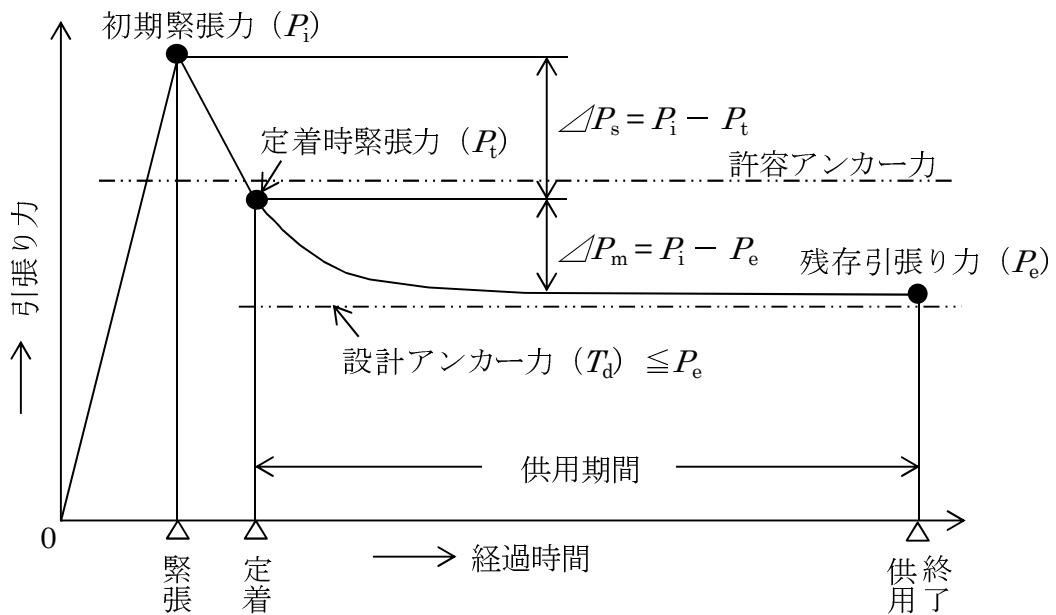


図-1.9 アンカーの緊張力の経時変化¹⁰⁾

定化していることが考えられるため、維持管理において残存引張り力を適切に管理しアンカーが抑止工法として効果を果たしていることを評価することが重要となる。

アンカーに導入された初期緊張力の一般的な経時変化を図-1.9に示す⁹⁾。アンカーの緊張力は、リラクセーションやクリープなど材料や地盤の性状により低下し、その後徐々に一定の値に収束していく傾向にある。また、アンカーは初期緊張力を導入し定着させる際、アンカー頭部に引張り材がわずかに食い込むセットロスにより緊張力が低下することがあるため、アンカーの工法毎にセットロスの影響を考慮して初期緊張力が導入されている⁷⁾。

高速道路では、2002年の「グラウンドアンカー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）」¹¹⁾において、点検頻度や点検項目などを定め、リフトオフ試験における残存引張り力調査の結果を基に対策の必要性の判定や、アンカーの健全性を評価するための目安を示している。2003年には高速道路の「土

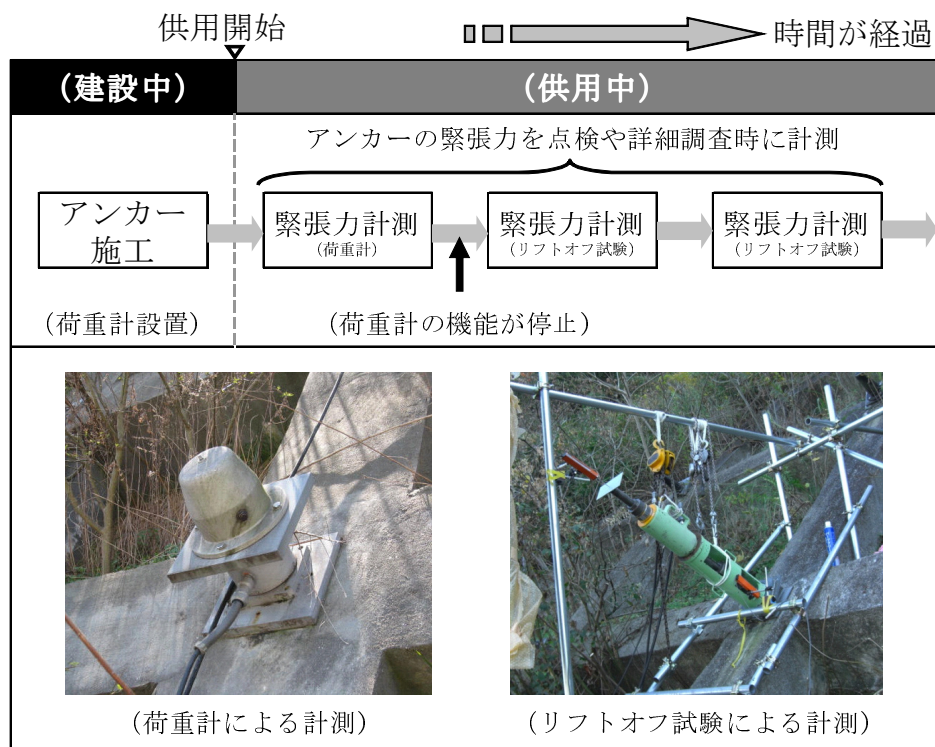


図-1.10 高速道路におけるアンカーの緊張力管理 ¹³⁾



図-1.11 リフトオフ試験の実施状況

工施工管理要領」が改訂され¹²⁾、アンカー施工時に一部のアンカーに対し荷重計測用のモニタリング機器(以下、荷重計)を設置して、施工後の緊張力管理を頻繁に行うことにより法面の安定性を確認するよう定めている。また、2008年の「維持管理マニュアル」⁸⁾では、「点検調査マニュアル」¹¹⁾の内容を発展させ、残存引張り力の評価をA～Eの5段階に分類して段階毎の対処例を示すとともに、アンカーの健全性評価については、「調査点検マニュアル」と類似した目安が示され、正常と評価できる引張り材の伸び率の範囲を見直すことで評価方法をより明確にしている。

高速道路におけるアンカーの緊張力管理の一般的な流れを図-1.10に示す¹⁾。建設段階において切土法面では、地山の掘削による法面の不安定化が懸念されるため、一部のアンカーに対して荷重計を設置し、荷重計の計測値の変化を頻繁に確認しながら施工を進めていく。その後、荷重計の計測値が一定の値に収束すると、計測頻度を緩和した緊張力管理が行われる。荷重計は自然条件下にさらされるため、供用された初期の期間では、荷重計の機能低下なども無く施工時に設置された荷重計をそのまま利用して管理することができるものの、時間の経過に伴い荷重計の機能が低下し、正確なデータを得られなくなることがある。現在まで荷重計は、既設アンカーに対し交換や後付けが極めて難しく、必要個所のアンカーに対する残存引張り力の調査は、油圧ジャッキをアンカー頭部に設置して行うリフトオフ試験により計測されるのが一般的である。

リフトオフ試験は、アンカーの引張り材に直接引張り荷重を加え、アンカーが実際に保持している緊張力である残存引張り力を計測する試験である。リフトオフ試験では、現在まで一般的に重量が1,000N～2,000N(100kgf～200kgf)の施工用の油圧ジャッキが用いられており、供用中の道路に近接する急峻斜面などでは図-1.11に示すように仮設備の設置を伴う大掛りな作業を必要とすること

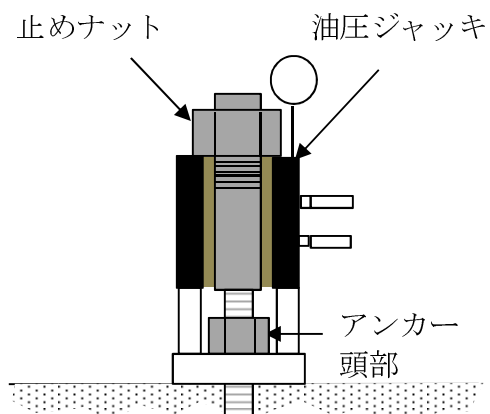


図-1.12 SAAM ジャッキ¹⁴⁾

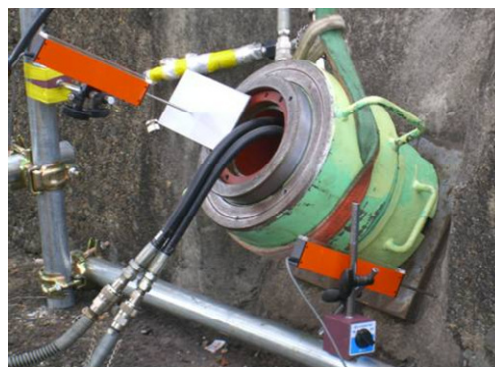
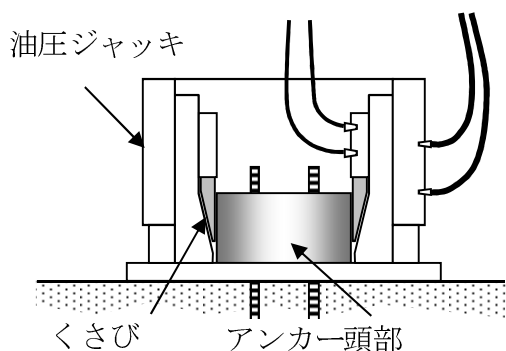


図-1.13 特殊ジャッキ¹⁵⁾

がある。これに対し最近では試験の効率化を図るため、リフトオフ試験専用で軽量化されたSAAMジャッキ¹⁴⁾ (図-1.12) や、アンカー頭部の定着具を直接引張り上げる特殊ジャッキ¹⁵⁾ (図-1.13) が開発され現地で利用され始めており、これらの適用の拡大が予想される。

アンカーに導入された緊張力の評価にあたり、施工時にアンカーが適切に施工されているかを確認する品質保証試験は、アンカー全数に対し実施することが義務付けられており、国外の基準などを参

考にして載荷速度や載荷保持時間、計画最大荷重などの具体的な試験方法が「地盤工学会基準」⁷⁾によって定められている。一方、リフトオフ試験については、供用中の道路法面などにおいて試験の実施が困難なことや、アンカーの維持管理の重要性がこれまで十分に認識されてなかったこともあり試験実績は少なく、アンカー頭部の定着タイプの違いや、載荷・除荷速度、変位計測位置の違いなど試験条件の違いによる影響について十分な検証は行われていない。このため、「地盤工学会基準」⁷⁾にも具体的な試験方法が示されておらず、試験方法や試験結果の評価方法が現地の技術者毎で異なり適切な維持管理が行われていないといった課題がある。

アンカーは、その大部分が地中に埋設されていることから引張り材の腐食などを直接確認することが困難な状態にある。アンカー機能が低下する要因には、土圧の作用による引張り材の拘束やアンカー体の劣化などが考えられ、「維持管理マニュアル」⁸⁾などに、リフトオフ試験において残存引張り力を越えた引張り材の伸び率を健全な状態の伸び率と比較することによりアンカー機能の健全性を評価する方法が提案されている。しかしながら、防食機能が十分でないアンカーの場合、引張り材の腐食なども健全性が低下する要因の一つとして考えられ、佐藤ら¹⁶⁾ (2003)は、防食機能が改善される前の複数のアンカーをオーバーコアリングにより回収して腐食の発生状況などを分析し、腐食環境の低い地盤でも0.001 mm/年～0.022mm/年の腐食が進行し、施工後40年程度で設計アンカー力以下に機能低下することを指摘している。また、他にも施工時のシース内へのグラウト侵入なども健全性を低下させる要因として考えられ⁷⁾、こうした不具合が複合的に発生しているアンカーの健全性を、現在の「維持管理マニュアル」⁸⁾などに基づいた評価方法を適用して判定するには限界があると考えられる。

アンカーは不均質な地盤に設置されているため、様々な外的要因

の影響を受けアンカーの残存引張り力が増減することが考えられる⁷⁾。一般的に、施工時アンカーに導入された定着時緊張力は、土圧の作用などによる引張り材への負担が小さい場合、時間経過に伴い一定の値に収束する傾向にある。常川ら⁶⁾(2009)は、切土法面に施工されたアンカーを対象として、背面地質毎の定着時緊張力の低下状況を確認するため、複数の荷重計を設置して計測値のモニタリングを実施している。その結果、DL級の軟岩では設計アンカー力の8%程度、DH級、CL級では5%程度の定着時緊張力の低下を確認し、背面地質毎で定着時緊張力の低下の割合が異なることを指摘している。また、荷重計の計測値が一定の状態に収束した場合においても、設計アンカー力に対し2%~3%にあたる10kN程度の増減が継続することも示している。このように、荷重計の計測値は、安定した地山であっても周辺環境の影響などにより一定値を示さない特性を持っていることから、1回の計測により評価されたアンカーの残存引張り力が健全でないからといって法面が不安定化しているとは言い難く、一定期間の観測結果を踏まえ法面の安定性を評価することが重要と考えられるものの、現在までこれらの評価手法は確立されていない。

また、荷重計の計測値をモニタリングするための荷重計の設置数量や、残存引張り力を確認するためのリフトオフ試験の実施数量⁷⁾は、FIP基準¹⁷⁾においてアンカー全数の1/20~1/10、「点検調査マニュアル」¹¹⁾においてアンカー全数の1/20かつ5本以上と定められており、一般的にアンカー全数の1/20~1/10程度となっている。こうした調査数量は、荷重計の設置やリフトオフ試験の実施に時間と手間を要するという実態を考慮して定められており、複数のアンカーが施工された法面全体に対する残存引張り力の評価に対して十分な数量といえない可能性がある。酒井ら¹⁸⁾(2010)は、複数の法面において、アンカーの全数の1/4以上について面的な残存引張り

力を調査し、供用後のアンカー法面は変状などが見られない場合においても一様な残存引張り力の分布を示さないことを明らかにしている。このことから、アンカー法面は時間の経過とともに法面全体の安定性を面的に維持できるよう、個々のアンカーで残存引張り力が異なる変化を示す特性を持つと考えられる。上述のように、現在個別アンカーの残存引張り力の評価については「維持管理マニュアル」⁸⁾などで示されているものの、複数のアンカーの残存引張り力からアンカー法面の健全性について評価する手法は確立されておらず、アンカー法面の維持管理を適切に行うためにも、これら評価手法を確立することは重要と考えられる。

1.3 本論の目的と検討方法

本論は、複数の道路法面などで実施されたリフトオフ試験や荷重計の計測結果を分析して、アンカーが持つ残存引張り力特性を明らかにするとともに、アンカーの実務的な維持管理手法について提案することを目的としている。本論の検討内容は以下に示す4項目に分けることができる。

- ① リフトオフ試験においては、アンカー頭部の定着タイプの違いや、変位計測位置の違いなど試験条件の違いによる影響について十分に検証されておらず、適切な残存引張り力の管理が行われていない。このため、本論では複数の種別の異なるアンカーを選定し、試験条件を変化させた試験を実施することにより各試験条件が試験結果へ与える影響を確認し、適切なリフトオフ試験方法について検討を行う。
- ② アンカー機能の健全性は、リフトオフ試験の結果を分析することにより評価されているものの、鋼材の腐食などの影響について十分に検証されていない。このため本論では、防食機能が十分

でないアンカーに対してリフトオフ試験や引抜き試験を実施し、アンカー機能の健全性を評価するとともに、掘り起こしによりアンカー材料を回収して鋼材の腐食状況の確認を行い、アンカーの健全性評価を行う。

- ③ アンカーに設置された荷重計の計測値は、安定した地山であっても周辺環境の影響などにより一定値を示さないことがあり、荷重計の計測値をモニタリングする場合、こうした特性を踏まえ評価することが重要である。このため、本論では複数の新設・既設アンカーに設置された荷重計の計測値を分析することにより、荷重計計測の問題点を指摘し改善策について検討を行う。
- ④ 個別アンカーの残存引張り力の評価については、「維持管理マニュアル」⁸⁾などで示されているものの、複数のアンカーを対象とした残存引張り力の面的分布状況からアンカー法面の健全性を評価する手法は現在まで確立されていない。このため、本論では変状の程度が異なる複数の法面における残存引張り力の面的分布調査の結果を基に、アンカー法面の健全性を評価する新たな手法について検討を行う。

本論のフローを、図-1.14、図-1.15 に示す。本論では、第 2 章でリフトオフ試験方法を決定し、その上で、第 3 章および第 4 章においてアンカー機能の健全性評価や荷重計計測の問題点とその解決策を示し、第 5 章においてアンカーの面的調査の必要性と健全性評価への適用について検討を行い、最後に第 6 章で総括を行う。以下に本論における各章の内容を述べる。

1.3.1 リフトオフ試験方法の検討（第 2 章）

アンカーの残存引張り力を評価するリフトオフ試験の結果は、個別アンカーの健全性を推定するとともに、対策方法などを決定する基礎的なデータとして扱われる。最近では、リフトオフ試験専用軽量化された SAAM ジャッキなどが開発され、現地で利用される

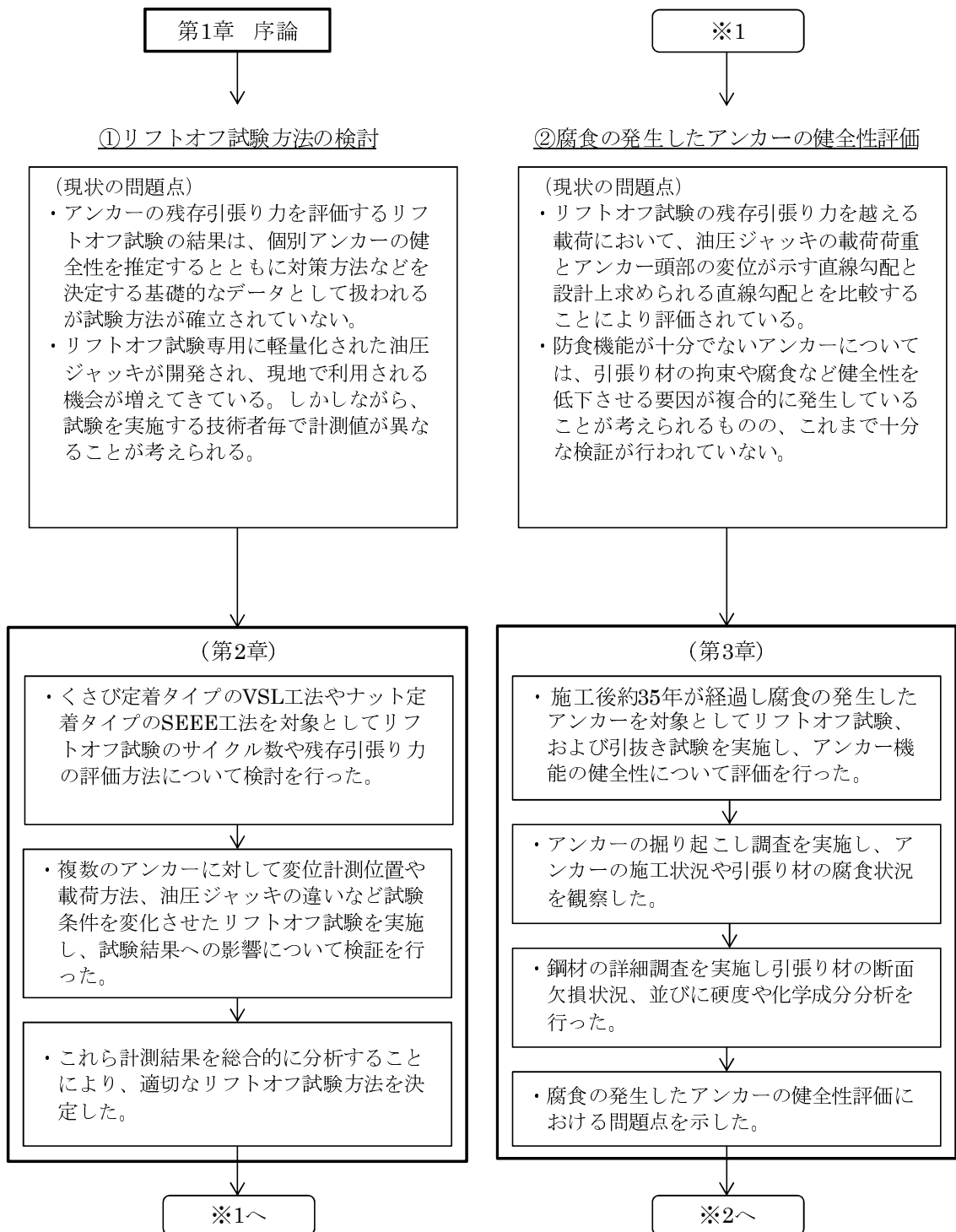


図-1.14 研究フロー（第1章～第3章）

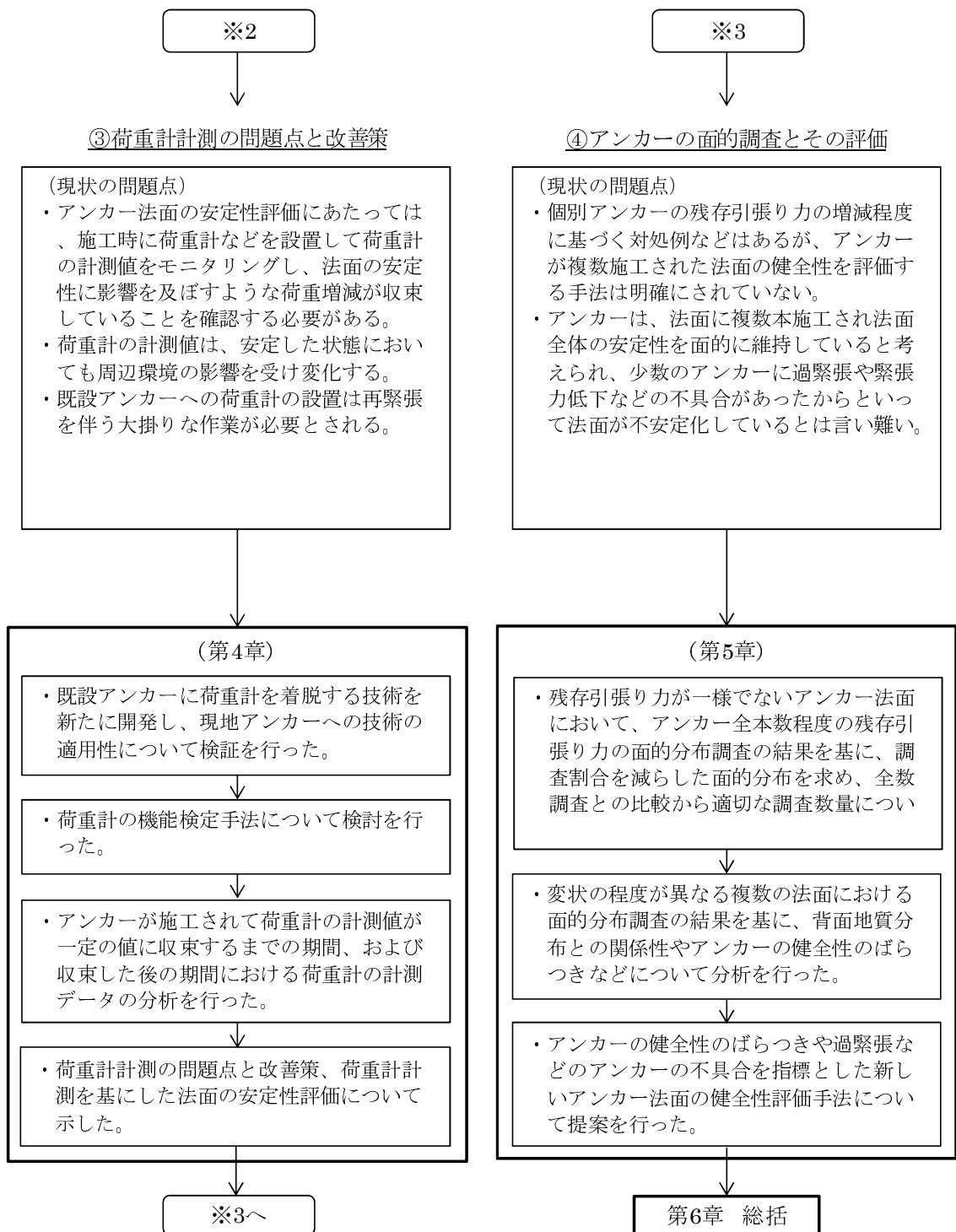


図-1.15 研究フロー（第4章～第6章）

機会が増えてきている。これにより、短期間で複数のアンカーを調査して残存引張り力の面的分布を求めることが可能となっており、正確な分布状況を捉えるためにも、試験方法を明確にしておく必要がある¹⁹⁾。「地盤工学会基準」⁷⁾において、リフトオフ試験の実施により評価される残存引張り力は、載荷時において、定着具が支圧板から離れはじめた（変位 0.1mm～1.0mm）ときの荷重とされている⁷⁾。しかしながら、リフトオフ試験実施時にこの瞬間を捉えるのは容易ではなく、試験を実施する技術者毎で計測値が異なることが考えられる。

アンカーの継続的な緊張力管理にあたり試験結果の精度が重要となることから、本論では、くさび定着タイプの VSL 工法やナット定着タイプの SEEE 工法などを対象としてリフトオフ試験のサイクル数や残存引張り力の評価方法について検討するとともに、複数のアンカーに対して変位計測位置や載荷方法、油圧ジャッキの違いなど試験条件を変化させたリフトオフ試験を実施し、試験結果への影響について検証した。その上で、これら計測結果を総合的に分析することにより、適切なリフトオフ試験方法について検討を行った。

1.3.2 腐食の発生したアンカーの健全性評価（第3章）

アンカーの残存引張り力の変化に対し、引張り材などアンカーを構成する材料が健全な状態にあれば、アンカーは適切に機能していると考えられる。現在、アンカー機能の健全性は、「維持管理マニュアル」⁸⁾などに従い、リフトオフ試験の残存引張り力を越える載荷において、油圧ジャッキの載荷荷重とアンカー頭部の変位が示す直線勾配に対し、設計上求められる直線勾配とを比較することにより評価されているものの十分ではない。アンカー機能の健全性に低下が認められる場合、補修・補強が必要となることから、リフトオフ試験の結果を適切に評価する必要がある。また、防食機能が十分

でないアンカーについては、引張り材の拘束や腐食など健全性を低下させる要因が複合的に発生していることが考えられるものの、これまで十分な検証は行われていない。

本論では、施工後約 35 年が経過し腐食の発生したアンカーを対象としてリフトオフ試験、および引抜き試験を実施し、アンカー機能の健全性について評価を行った。加えて、アンカーの掘り起こし調査を実施し、アンカーの施工状況や引張り材の腐食状況を観察するとともに、鋼材の詳細調査を実施し、引張り材の断面欠損状況、並びに硬度や化学成分分析を行い、これらを総合的に分析することにより腐食の発生したアンカーの健全性評価における問題点について検討を行った。

1.3.3 荷重計計測の問題点と改善策（第 4 章）

アンカー法面の安定性評価にあたっては、施工時に荷重計などを設置して計測値をモニタリングし、法面の安定性に影響を及ぼすような緊張力の増減が収束していることを確認する必要がある。緊張力の増減が収束した後も引き続き荷重計を利用して計測値をモニタリングすることが求められるが、荷重計には耐用年数があり時間経過に伴う機能低下が懸念される。このため、アンカーの緊張力管理を適切に行うためにも、荷重計の機能を検定し評価することが重要である。また、アンカー法面は、供用後においても想定を超える土圧などの作用により不安定化し頻繁な緊張力管理が必要となる場合がある。しかし、既設アンカーへの荷重計の設置は再緊張を伴う大掛りな作業が必要とされ困難である。さらに、荷重計の計測値が収束した状態においても外気温の変化の影響により荷重計の計測値が増減することが確認されている²⁰⁾。このため、既設アンカーに対し荷重計の計測値などを基にアンカー法面の安定性を適切に評価する手法が求められている。

本論では、荷重計の機能検定方法を確立することを目的として、

複数の荷重計が設置された既設アンカーを対象としてリフトオフ試験を実施し、求められた残存引張り力と荷重計の計測値との比較を基にした検定手法について検討を行った。次に、これまで困難とされてきた、既設アンカーに荷重計を着脱する技術を新たに開発するとともに、現地アンカーへの着脱手法の適用性について検証を行った。一方、荷重計の計測値のモニタリングを適切に行うために、外気温の変化により荷重計の計測値が変化する特性について明らかにすることが重要である。このため、既設アンカーに設置された荷重計の一定期間の計測値から、荷重計の計測値と外気温の変化について検討を行った。その上で、アンカーが施工されて荷重計の計測値が一定の値に収束するまでの期間、および収束した後の期間における計測値の評価を基に、荷重計計測の問題点と維持管理における適用性について検討を行った。

1.3.4 アンカーの面的調査とその評価（第5章）

現在、「維持管理マニュアル」⁸⁾などにおいて、個別アンカーの残存引張り力の増減程度に基づく対処例などが示されているものの⁸⁾、アンカーが複数施工された法面に対する健全性の評価手法は明確にされていない。また、既往の調査結果¹⁸⁾から、アンカーは、安定した法面であっても残存引張り力が個々のアンカーでばらつきながら法面の安定性を維持する特性を持っていると考えられ、少数のアンカーに過緊張や緊張力低下などの不具合があったからといって法面が不安定化しているとは言い難い場合がある¹¹⁾。このため、アンカー法面の健全性を適切に評価するためにも、法面全体でのアンカーの残存引張り力特性を把握する必要がある。

現在、SAAM ジャッキなどを利用することにより従来よりも短時間でリフトオフ試験が実施できることから、残存引張り力の面的分布を把握できるようになっているものの¹⁴⁾、複数存在するアンカー全てを調査するには時間と手間を要する。このため、調査を効

率的に行う上で、調査数量を減らした分散調査が必要となるものの、適切な調査数量は十分明らかにされておらず、調査数量によっては残存引張り力の面的分布の評価が実態と異なることが考えられる。そこで、本論では、まず残存引張り力が一様でないアンカー法面において、アンカー全数に対する残存引張り力の面的分布調査の結果を基に、調査割合を減らした面的分布を求め、全数調査との比較から適切な調査数量についての検討を行うことで、適切なアンカーの面的調査手法の提案を行った。その上でこの知見を踏まえ、変状の程度が異なる複数の法面における残存引張り力の面的分布調査の結果を基に、アンカーの残存引張り力が変化する要因として考えられる背面地質分布との関係性について検討を行った。最後に、アンカー法面の健全性を定量的に評価するため、アンカーの健全性のばらつきと過緊張などのアンカーの不具合を指標とした新たなアンカー法面の健全性における評価手法について提案を行った。

1.4 まとめ

アンカーは、高速道路だけでも現在までに 120,000 本以上が施工されており、今後も施工量が増加していくことが予想される。法面の安定性を長期にわたり維持するためにも、アンカーを適切に維持管理していく必要がある。現在、アンカーの維持管理については、「地盤工学会基準」⁷⁾や「維持管理マニュアル」⁸⁾などに点検項目や残存引張り力の評価基準などが示されているものの、リフトオフ試験方法が具体化されていないことや、鋼材の腐食がアンカー機能の健全性に与える影響について検証されていないことがあり、十分な管理が行われていないことが考えられる。また、荷重計の計測値のモニタリングは、施工後荷重計が正常に機能する期間に限定され、耐用年数を過ぎるとリフトオフ試験の実施により残存引張り力を

確認せざるを得ない現状がある。さらに、「地盤工学会基準」⁷⁾や「維持管理マニュアル」⁸⁾などは、個別アンカーの評価にとどまり、複数のアンカーを評価する手法までは示されていない。このため、点検結果から法面の安定性を判断することが困難な場合がある。

こうした課題に対し、リフトオフ試験の方法を決定し、腐食の発生したアンカーの健全性評価や荷重計計測の問題点と解決策を示すとともに、アンカーの残存引張り力の面的調査からアンカー法面の健全性を評価することができれば、効率的・効果的なアンカーの維持管理が行えるものと考えられる。そこで、これらの問題に対し本論では、まず複数の法面を選定し試験条件を変化させたリフトオフ試験を実施し、その結果を分析することにより適切なリフトオフ試験方法の検討を行う。次に、腐食などにより健全性が低下しているアンカーについて、リフトオフ試験や引抜き試験、掘り起こし調査を実施し、腐食の発生したアンカーの健全性評価における問題点を示す。さらに、荷重計の機能検定手法の検討、既設アンカーに荷重計を着脱する技術の開発を行うとともに、新設・既設アンカーに設置された荷重計の計測データを分析することにより、荷重計計測の問題点と解決策について検討を行う。最後に、アンカーの残存引張り力の面的分布を得るための調査数量を、アンカー全数の調査結果と数量を減少させた分散調査の結果との比較により求めるとともに、複数のアンカー法面の面的調査の結果から残存引張り力の変化する要因を分析することにより新たなアンカー法面の健全性評価手法の提案を行う。

1.5 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」⁷⁾、「維持管理マニュアル」⁸⁾、高速道路の「グラウンドアンカー工設計指針」²²⁾、

などを参照して以下のように定義した。

- ・ アンカー体：引張り部からの引張り力を地盤に伝達するために設置する部分をいう。
- ・ 引張り部：アンカー頭部からの引張り力をアンカー体に伝達するために設置する部分をいう。
- ・ アンカー頭部：構造物からの力を引張り力として引張り部に伝達させるための部分で定着具と支圧板からなる。
- ・ 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。
- ・ クリープ：静的かつ一定の引張り力が引張り材に作用した場合、時間とともにアンカー体のグラウトと引張り材または地盤との接触面に生じる変位のことをいう。
- ・ 過緊張：設計アンカー力に対し、残存引張り力が上回ることをいう。
- ・ 変状：アンカー材料が錆び、腐食等から材料の機能が低下する劣化や、アンカー材料の破損等によりアンカー機能が低下または機能が失われる損傷をいう。
- ・ 破断：アンカー材料の断ち切れによりアンカー機能が低下または機能が失われることをいう。
- ・ 引抜け：アンカー体の引抜けによりアンカー機能が低下または機能が失われることをいう。
- ・ アンカー法面：法面の安定化を図るためにアンカーが施工されている法面をいう。
- ・ 設計アンカー力 (T_d)：設計に用いるアンカー力をいう。
- ・ 緊張力 (P)：引張り材に作用している引張り力をいう。
- ・ 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引張り材に作用している引張り力をいう。
- ・ 残存引張り力 (P_e)：アンカーが定着された後に引張り材に作用

している引張り力をいう。

- 引張り力残存率 (R_{td}) : 設計アンカー力に対する残存引張り力の割合をいう。
- リフトオフ試験 : アンカー頭部の引張り材の余長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けるアンカーの残存引張り力などを評価する試験をいう。
- リフトオフ : アンカー定着具が支圧板から離れ始めたことをいう。
- リフトオフ荷重 : リフトオフ試験の載荷時において、定着具が支圧板から離れ始めるリフトオフしたときの荷重をいい、残存引張り力として評価される。
- 予備載荷 : 載荷計画に基づき、残存引張り力を求めるための1回目の載荷で、定着時の定着具のずれなど、残存引張り力を求める際に、荷重-変位曲線への影響を無くすための載荷をいう。
- 本載荷 : 予備載荷後に実施する実際に残存引張り力を求める載荷をいう。
- 荷重計 : アンカー頭部に設置し、残存引張り力をモニタリングする機器をいう。
- モニタリング : アンカー頭部に荷重計等の機器を設置して計測値の継時変化を確認することによりアンカーの状態を評価することをいう。
- 面的調査 : アンカー法面の全体的な残存引張り力の分布を捉えるために、複数のアンカーについてリフトオフ試験を実施することをいう。
- アンカーの健全性評価 : アンカー自由長において引張り材などアンカーを構成する材料としての健全性を評価することをいう。
- アンカー法面の安定性評価 : 一定期間の残存引張り力のモニタリングにより、アンカー法面の状態変化を評価することをいう。

- ・ アンカー法面の健全性評価：アンカー法面において、複数のアンカーが機能し維持している法面の状態を評価することをいう。

第2章 リフトオフ試験方法の検討

2.1 はじめに

リフトオフ試験は、アンカー頭部に油圧ジャッキを設置して引張り荷重を与え、残存引張り力と等しくなる載荷荷重を計測する方法により行われる。このリフトオフ試験の実施により、個別アンカーの残存引張り力の確認や、アンカーの健全性評価を行うことができる。また、複数本の試験データを分析することによりアンカー法面の健全性評価を行うことなども可能になると考えられる。しかしながら、「地盤工学会基準」⁷⁾などにおいて、リフトオフ試験の具体的な試験方法や残存引張り力の評価方法が明確にされていないため試験方法や試験結果が技術者毎で異なり、適切な残存引張り力の評価・管理が行われていないのが現状である。

本章では、VSL工法、SEEE工法、SFL工法、KTB工法、FLO工法のアンカーを対象として、リフトオフ試験のサイクル数や残存引張り力の評価方法について検討するとともに、変位計測位置や載荷方法、油圧ジャッキの違いなど試験条件を変化させたリフトオフ試験を実施し、試験結果への影響について検証を行った。その上で、これら計測結果を総合的に分析することにより、適切なリフトオフ試験方法について検討を行った。

2.2 リフトオフ試験

リフトオフ試験は、アンカー頭部の引張り材の余長部分に油圧ジャッキを設置し、引張り荷重を載荷する方法により行われる。くさび定着タイプにおけるアンカーのリフトオフ試験は、アンカー頭部の余長部分に、テンションバーを固定する仮プーリングヘッドを設

置し⁷⁾、テンションバーに引張り荷重を載荷する方法により行われる。試験では、載荷過程においてアンカーの残存引張り力が確認され一定の変位を与えた後、載荷荷重の除荷が行われる。リフトオフ試験の載荷過程・除荷過程におけるアンカー頭部の状態を図-2.1に示す。また、その時に描かれる一般的な荷重－変位曲線の形状を図-2.2に示す。リフトオフ試験の載荷過程において、アンカー頭部が支圧板から離れ始める前の段階では、アンカー頭部の変位はわずかであり、荷重－変位曲線の直線勾配は急な傾きを示す（図-2.1；II、図-2.2；O→A）。さらに油圧ジャッキの引張り荷重を増加させ、

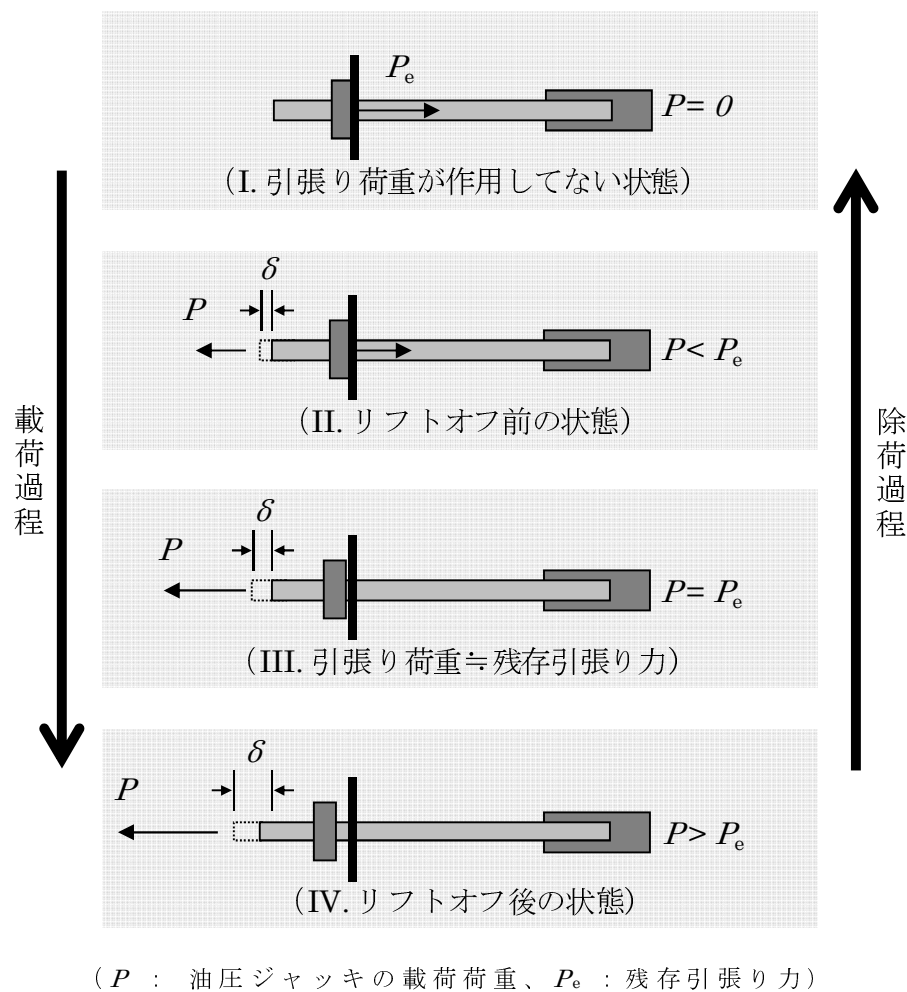


図-2.1 引張り荷重の載荷過程・除荷過程におけるアンカーの状態

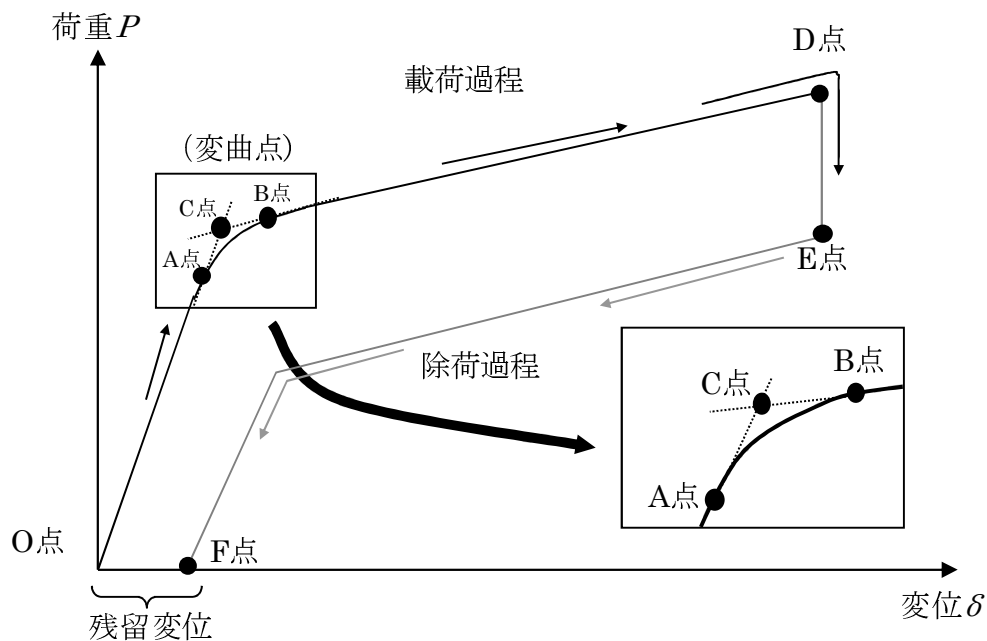


図-2.2 荷重－変位曲線

載荷荷重が残存引張り力と等しくなった直後からアンカー頭部が支圧板から離れ始める（図-2.1；III、図-2.2；A点）。この現象は一般的に「リフトオフ」と呼ばれ、荷重－変位曲線のリフトオフした時点における荷重の計測値が「リフトオフ値」とされ、アンカーの残存引張り力として評価される。リフトオフした後さらに引張り荷重を増加させると、O-A間の直線勾配の傾きから徐々に変化し始める（図-2.1；IV、図-2.2；A→B）。その変化が一定になると、アンカーの自由長部分に引張り荷重が伝達し、荷重－変位曲線は、引張り材の弾性係数に依存する緩やかな勾配の直線を示す（図-2.1；IV、図-2.2；B→D）。アンカーの残存引張り力を評価するために必要な引張り荷重の載荷が行われた後、載荷荷重を除荷する（図-2.2；D→E→F）。なお、載荷・除荷の1サイクルが完了した後、載荷前後の変位差である残留変位（図-2.2；O-F）が発生することがある。

2.3 試験条件および残存引張り力の評価

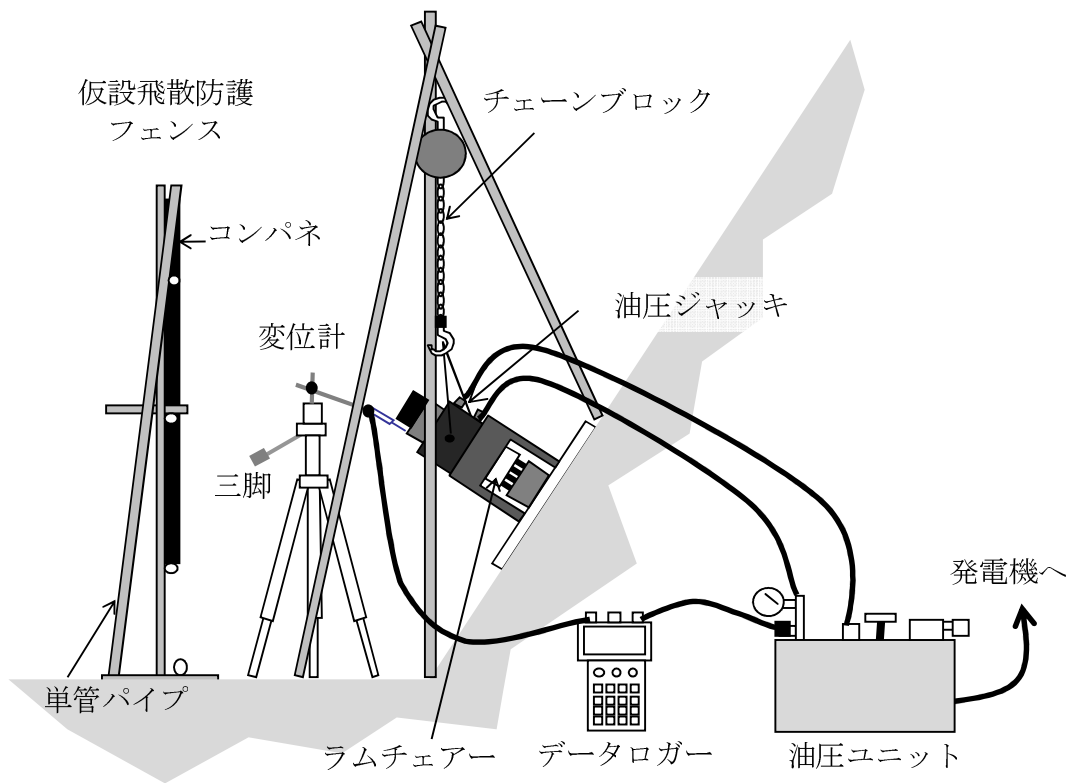
2.3.1 調査・試験

1) 使用機器および使用材料

リフトオフ試験のサイクル数や残存引張り力の評価方法、試験条件の違いが試験結果に与える影響の検討について、最大引張り荷重 600kN～1,000kN のセンターホールジャッキを用いてリフトオフ試験を実施した。なお、油圧ジャッキの違いによる影響についての検証は、最大引張り荷重 700kN の特殊ジャッキを用いてリフトオフ試験を実施し、センターホールジャッキとの違いを比較した。センターホールジャッキを用いた場合と特殊ジャッキを用いた場合の機器配置を図-2.3、図 2.4 に示す。試験では、アンカーの破断等により油圧ジャッキが落下することのないようチェーンブロックなどで吊り下げ、アンカーの飛び出しに対しては単管パイプとコンパネで組み立てた仮設飛散防護フェンスを設置した。変位測定は、容量が 10mm～50mm の東京測器研究所製のダイヤルゲージ式変位変換器（DDP-A）を使用し、固定不良による計測値の乱れが発生しないよう三脚や単管パイプでしっかりと固定した。データの計測は、東京測器研究所製のハンドヘルドタイプのデータロガー（TC-32K）を使用し、油圧ジャッキと変位計の出力値を同時に計測した。

2) 検証方法

調査対象としたアンカーの工法毎の試験条件と試験数量について表-2.1 に示す。VSL 工法、SEEE 工法、SFL 工法、KTB 工法、FLO 工法のアンカーを対象としてリフトオフ試験を実施し、リフトオフ試験のサイクル数や残存引張り力の評価方法の検討、変位計測位置の違い、油圧ジャッキの違い、引張り荷重の載荷速度の違い、載荷保持の方法の違いによる影響について検討を行った。図-2.5 にアンカーの構造、表-2.2 に試験対象としたアンカーの設計アンカ

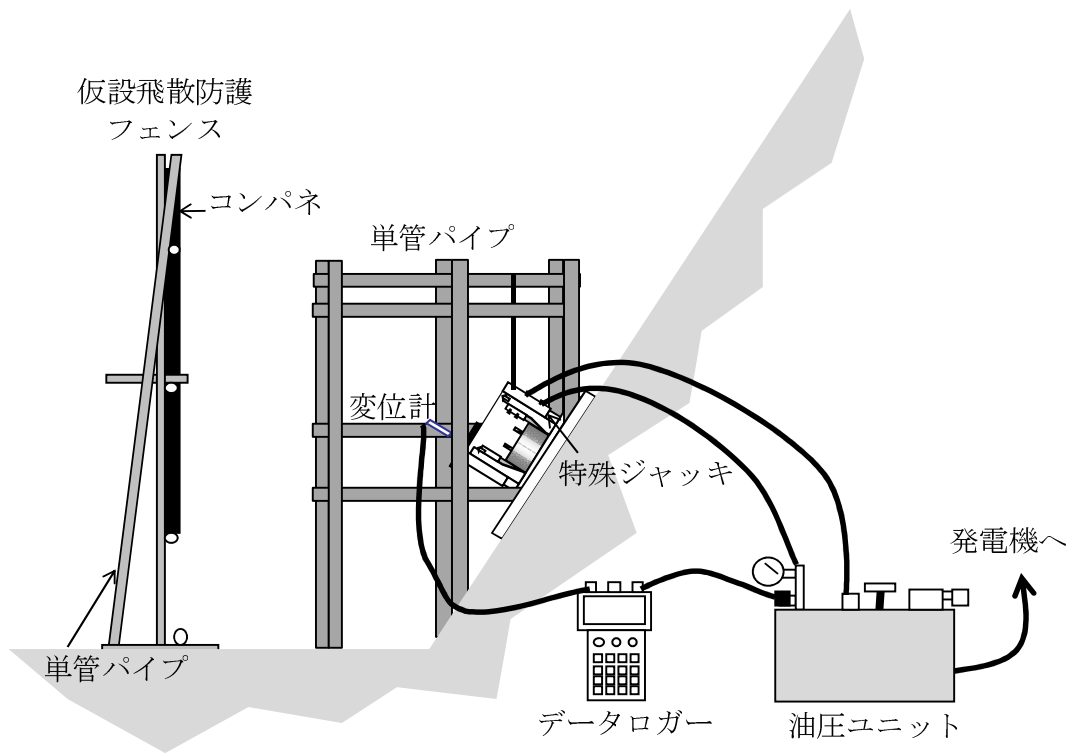


(a) 機械配置



(b) 試験の実施状況

図-2.3 センターホールジャッキを用いたリフトオフ試験



(a)機械配置



(b)試験の実施状況

図-2.4 特殊ジャッキを用いたリフトオフ試験

表-2.1 アンカーの条件別試験本数（単位：本）

試験条件	工法					合計 (本)
	VSL	SEEE	SFL	KTB	FLO	
① サイクル数、残存引張力 の評価方法の検討	18	10	—	—	—	28
② 変位計測位置の違いによ る試験結果への影響	2	2	—	—	—	4
③ 油圧ジャッキの違いによ る試験結果への影響	4	—	—	—	—	4
④ 载荷速度の違いによる試 験結果への影響	17	12	4	4	4	41
⑤ 载荷保持有無による試験 結果への影響	10	2	—	—	—	12

※1本のアンカーで複数の試験条件を実施している場合がある。

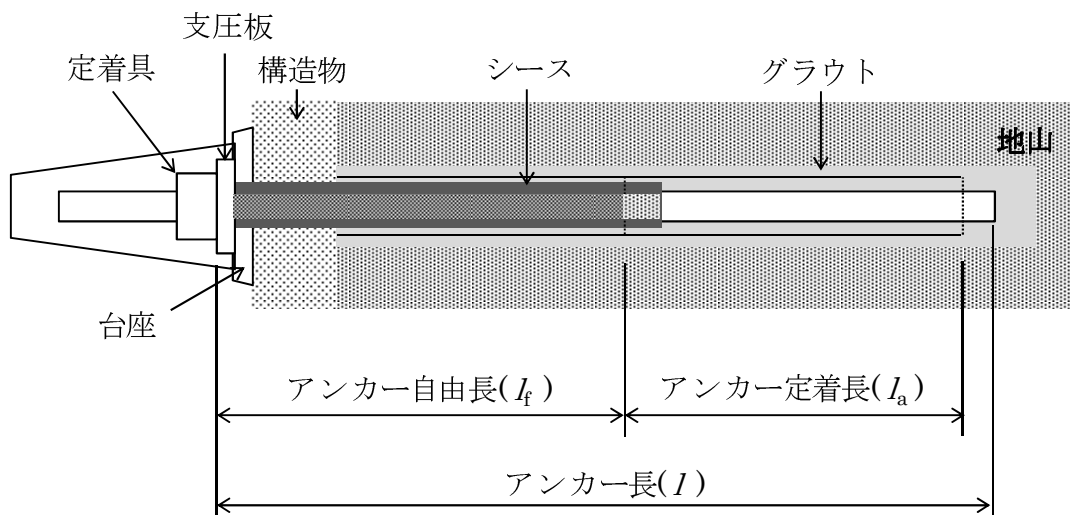


図-2.5 アンカーの構造 7)

表-2.2 試験対象アンカーの設計緒元と試験条件別の実施区分

アンカー No	工法の 種類	アンカー のタイプ	防錆方法 (新旧区分)	設計アンカ ー力(T_d) (kN)	アンカー 自由長(l_d) (m)	アンカー 体長(l_a) (m)	試験条件				
							①	②	③	④	⑤
A-1	VSL	E5-7	旧	不明	19.0	7.0	○			○	
B-1	VSL	E5-5	旧	475	28.6	9.5	○			○	○
B-2	VSL	E5-9	新	1,089	30.0	7.0	○			○	○
C-1	VSL	E5-7	旧	453	19.0	7.0	○		○	○	○
C-2	VSL	E5-7	旧	453	19.0	7.0	○		○	○	○
D-1	VSL	E5-12	旧	不明	7.0	7.0	○	○		○	
D-2	VSL	E5-12	旧	不明	5.0	7.0	○	○		○	
E-1	VSL	E5-5	新	不明	11.1	不明	○			○	○
E-2	VSL	E5-5	新	不明	11.1	不明	○			○	○
F-1	VSL	E5-5	旧	不明	8.5	8.5	○			○	○
F-2	VSL	E5-5	旧	不明	9.0	9.0	○			○	○
G-1	VSL	E5-4	新	不明	6.0	6.0	○			○	○
G-2	VSL	E5-4	新	不明	7.6	7.6	○			○	○
H-1	VSL	E5-18	旧	1,912	12.5	12.5	○			○	
H-2	VSL	E5-18	旧	1,912	37.9	35.9	○			○	
I-1	VSL	E5-4	旧	513	25.0	不明	○		○	○	
I-2	VSL	E5-4	旧	359	12.0	不明	○		○	○	
J-1	VSL	E5-4	旧	359	12.0	不明	○			○	
K-1	SEEE	F60TA	新	343	14.0	6.0	○			○	
K-2	SEEE	F100TA	新	547	21.0	9.0	○			○	
L-1	SEEE	F30TA	新	107	6.0	5.0	○	○		○	○
L-2	SEEE	F30TA	新	107	6.0	5.0	○	○		○	○
M-1	SEEE	F100	旧	438	4.0	7.0	○			○	
M-2	SEEE	F100	旧	438	4.0	7.0	○			○	
M-3	SEEE	F100	旧	438	4.0	7.0				○	
M-4	SEEE	F100	旧	438	4.0	7.0					
N-1	SEEE	F50TA	新	不明	12.0	3.0	○			○	
N-2	SEEE	F50TA	新	不明	13.0	3.0	○			○	
O-1	SEEE	F270	旧	不明	10.0	7.0	○			○	
O-2	SEEE	F270	旧	不明	10.0	7.0	○			○	
P-1	SFL	SFL-3	新	不明	不明	不明				○	
P-2	SFL	SFL-3	新	不明	不明	不明				○	
Q-1	SFL	SFL-5	新	不明	8.0	8.0				○	
Q-2	SFL	SFL-5	新	不明	8.0	8.0				○	
R-1	KTB	K5-6	新	不明	不明	不明				○	
R-2	KTB	K5-6	新	不明	不明	不明				○	
S-1	KTB	K6-6	新	813	24.0	8.0				○	
S-2	KTB	K6-6	新	813	24.0	8.0				○	
T-1	FLO	FLO-7	新	1,093	15.0	6.0				○	
T-2	FLO	FLO-7	新	1,093	15.0	6.0				○	
T-3	FLO	FLO-7	新	1,093	15.0	6.0				○	
T-4	FLO	FLO-7	新	1,093	15.0	6.0				○	
合計							28	4	4	41	12

※防食基準が改善される前に施工されたアンカーを「旧タイプアンカー」、改善された後に施工されたアンカーを「新タイプアンカー」としている。

※表-2.1の①～④の試験条件毎に、試験を実施したアンカーを「○」と表示している。

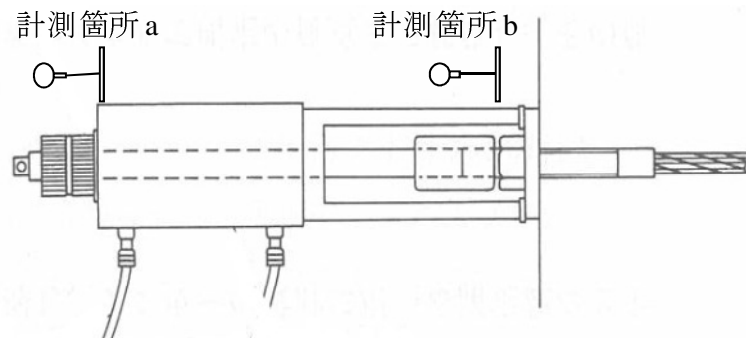


図-2.6 変位計測器の設置状況

一力 (T_d) やアンカー自由長 (l_f)、アンカー定着長 (l_a) などの設計緒元と試験条件別の実施区分を示す。

リフトオフ試験のサイクル数、残存引張り力の評価方法の検討については、VSL 工法のアンカー18本、SEEE 工法のアンカー10本を対象として、3サイクル～5サイクル程度のリフトオフ試験を実施し、各サイクル毎の残留変位の発生状況を比較する方法により検討を行った。なお、リフトオフ試験における引張り荷重の載荷・除荷はセンターホールジャッキを用いて実施し、変位計測は図-2.6に示すテンションバーの先端（計測箇所 a）とした。

変位計測位置の違いによる試験結果への影響については VSL 工法のアンカー2本、SEEE 工法のアンカー2本を対象として、図-2.6に示すテンションバーの先端（計測箇所 a）と、仮プーリングヘッド（計測箇所 b）に変位計を設置して変位を同時計測し、試験結果に与える影響について検討を行った。

油圧ジャッキの違いによる試験結果への影響については、VSL 工法のアンカー4本を対象として、センターホールジャッキと特殊ジャッキを用いた場合の試験結果について検討を行った。

引張り荷重の載荷速度の違いによる試験結果への影響については、VSL 工法のアンカー17本、SEEE 工法のアンカー12本、SFL 工法のアンカー4本、KTB 工法のアンカー4本、FLO 工法のアン

カー4本を対象として、載荷速度を20 kN/min、30 kN/min、60kN/minとした連続載荷を行い、荷重－変位曲線における載荷速度の影響について検討を行った。

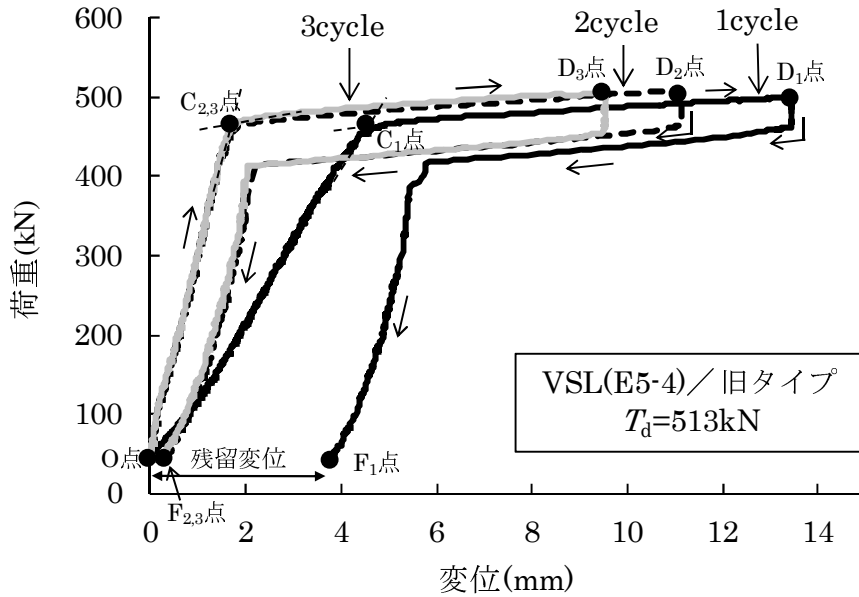
引張り荷重の載荷時の保持有無による試験結果への影響については、VSL工法のアンカー10本、SEEE工法のアンカー2本を対象として、載荷速度を20kN/minとし、試験最大荷重時に10分間保持した場合、同様の載荷速度で品質保証試験に準じた20kNの載荷毎に1分間保持した場合、載荷速度を10kN/minとし試験最大荷重時に10分間保持した場合について行い、これらの試験方法の違いによる影響について検討を行った。

最後に、以上の結果から得られた結果をとりまとめ、適切なリフトオフ試験方法の提案を行った。

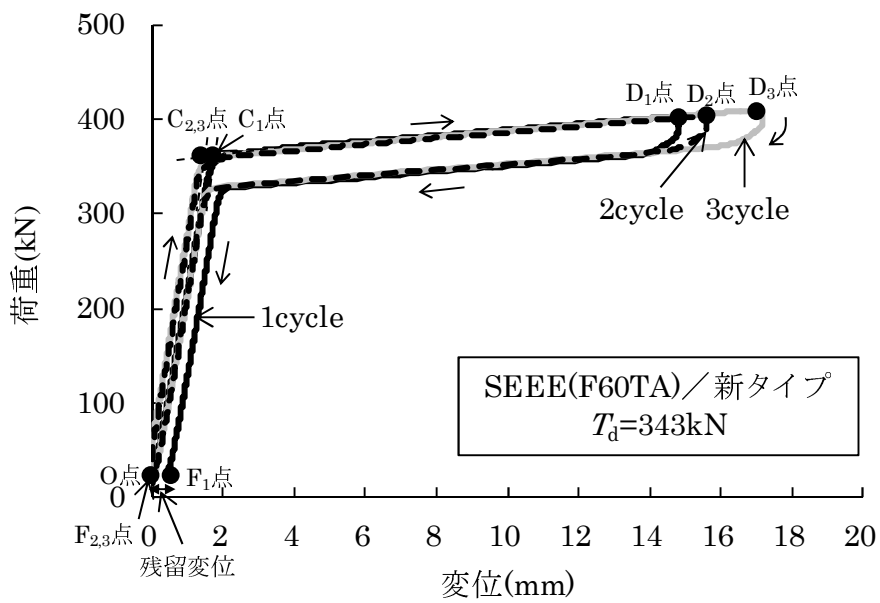
2.3.2 試験結果および考察

1) リフトオフ試験時の試験サイクル数の影響

試験結果の一例として、VSL(E5-5)、SEEE(F60TA)を対象とした3サイクルのリフトオフ試験結果を図-2.7に示す。既存の設計資料より設計アンカー力は、VSL(E5-5)が513kN、SEEE(F60TA)が343kNであることが判明しているものの、定着時緊張力は両者とも不明である。リフトオフ試験の載荷時・除荷時の荷重－変位曲線においては、VSL(E5-4)では1サイクル目に約3.8mmと大きな残留変位が認められるものの、SEEE(F60TA)では残留変位は1mm以下と小さくなっている。なお、両者とも2サイクル目・3サイクル目の試験では残留変位がほとんど発生せず、荷重－変位曲線は近似した形状を示している。まず、VSL(E5-4)について見てみると、リフトオフ試験の1サイクル目における載荷初期段階では、2サイクル目以降より緩やかな一定の直線勾配で増加し（図-2.7(a)、O→C₁）、リフトオフは、変曲点を迎えた設計アンカー力より約20kN低い490kN付近で確認された（図-2.7(a)、C₁点）。さらに



(a)くさび定着タイプ (アンカーNo.I-1)



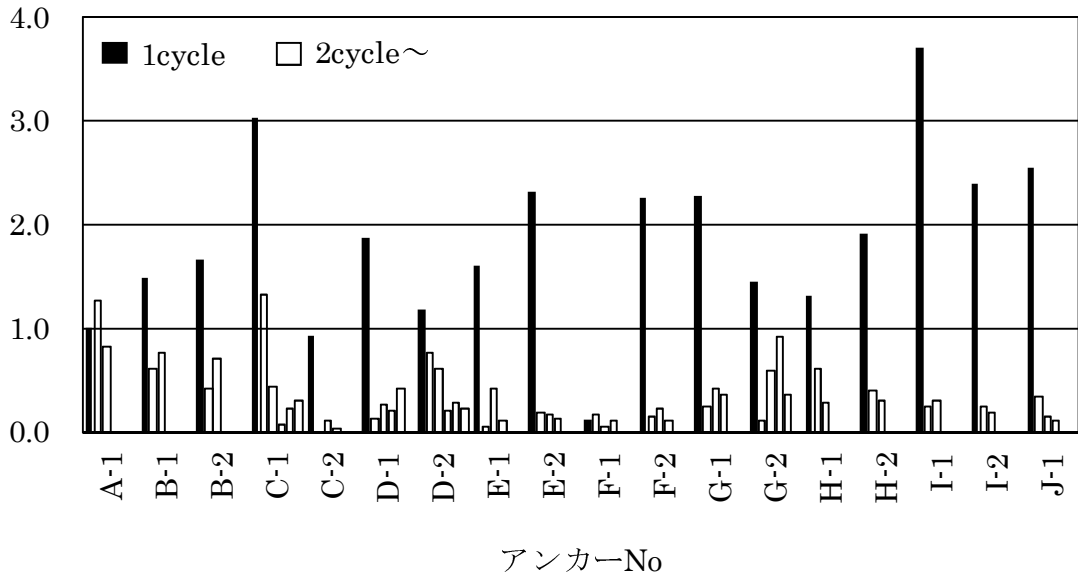
(b)ナット定着タイプ (アンカーNo.K-1)

図-2.7 荷重-変位曲線の残留変位

載荷を継続すると、載荷初期よりもさらに緩やかな一定の直線勾配で増加した（図-2.7(a)、 $C_1 \rightarrow D_1$ ）。その後載荷荷重の除荷を行ったところ、最終的に約 3.8mm の残留変位が確認された（図-2.7(a)、 $O \rightarrow F_1$ ）。2 サイクル目・3 サイクル目についても 1 サイクル目と同様の方法で載荷・除荷を行ったところ、載荷初期段階では 1 サイクル目よりも急な直線勾配による増加が確認された（図-2.7(a)、 $O \rightarrow C_{2,3}$ ）。リフトオフは、1 サイクル目と同等の 490kN 付近で確認され（図-2.7(a)、 $C_{2,3}$ 点）、さらに載荷を継続すると、載荷初期段階よりも緩やかな一定の直線勾配で増加した（図-2.7(a)、 $C_2 \rightarrow D_2$ 、 $C_3 \rightarrow D_3$ ）。2 サイクル目・3 サイクル目とも、リフトオフ試験時の直線形状についてはほぼ同様であり、除荷後の残留変位は 1mm 以下であった（図-2.7(a)、 $O \rightarrow F_{2,3}$ ）。

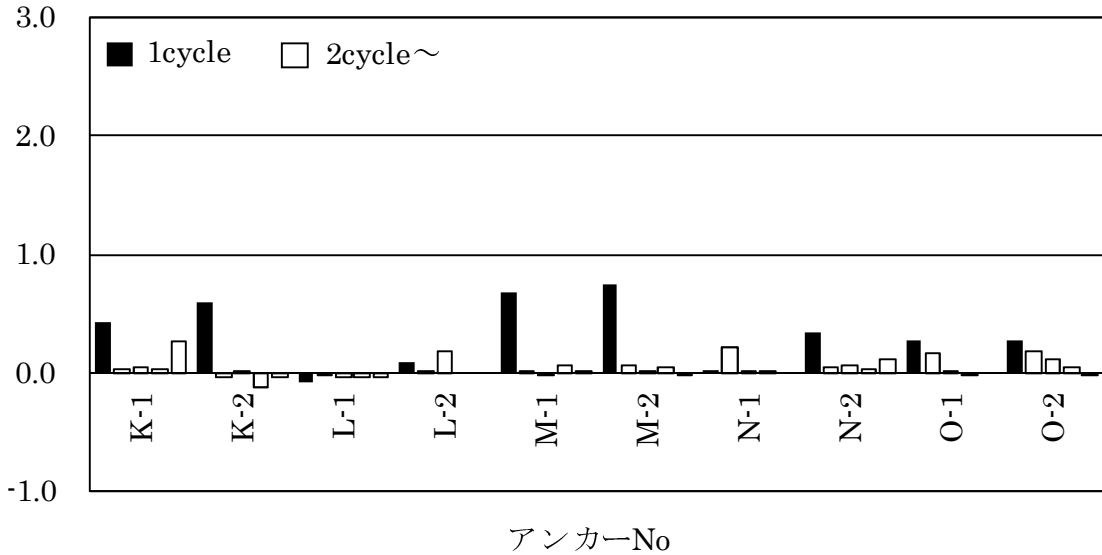
次に、SEEE(F60TA)について見てみると、リフトオフ試験の 1 サイクル目における載荷初期段階では、2 サイクル目以降とほぼ等しい一定の直線勾配で増加し（図-2.7(b)、 $O \rightarrow C_1$ ）、リフトオフは、変曲点を迎えた設計アンカー力より約 20kN 高い 360kN 付近で確認された（図-2.7(b)、 C_1 点）。さらに載荷を継続すると、載荷初期よりもさらに緩やかな一定の直線勾配で増加した（図-2.7(b)、 $C_1 \rightarrow D_1$ ）。その後載荷荷重の除荷を行ったところ、最終的に約 0.5mm の残留変位が確認された（図-2.7(b)、 $O \rightarrow F_1$ ）。2 サイクル目・3 サイクル目についても 1 サイクル目と同様の方法で載荷・除荷を行ったところ、載荷初期段階では 1 サイクル目と近似した直線勾配による増加が確認された（図-2.7(b)、 $O \rightarrow C_{2,3}$ ）。リフトオフは、1 サイクル目と同様の 360kN 付近で確認され（図-2.7(b)、 $C_{2,3}$ 点）、さらに載荷を継続すると、載荷初期よりもさらに緩やかな一定の直線勾配で増加した（図-2.7(b)、 $C_2 \rightarrow D_2$ 、 $C_3 \rightarrow D_3$ ）。2 サイクル目・3 サイクル目とも、リフトオフ試験時の荷重－変位曲線の形状についてはほぼ同様であり、除荷後の残留変位は 0.5mm 以下

残留変位(mm)



(a)くさび定着タイプ (VSL 工法)

残留変位(mm)



(b)ナット定着タイプ (SEEE 工法)

※1本のアンカーに対し数サイクルの载荷・除化を行っており、1サイクル目の残留変位は黒色棒グラフ、2サイクル目以降の残留変位は白色棒グラフで表示している。

図-2.8 サイクル数と残留変位量の関係

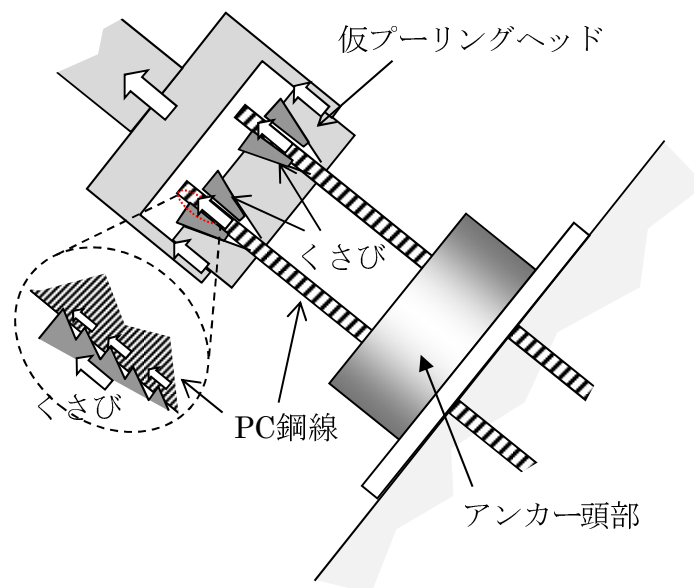


図-2.9 仮プーリングヘッドの仮定着

と小さかった（図-2.7(a)、O-F_{2,3}）。

図-2.8は、くさび定着タイプのVSL工法のアンカー18本、ナット定着タイプのSEEE工法のアンカー10本の残留変位を各サイクルについて比較した結果である。VSL工法の残留変位は、1サイクル目では1mm～4mm程度の発生が見られ、2サイクル目以降では0mm～1.5mm程度と小さくなっている。一方、SEEE工法の残留変位は、1サイクル目で0mm～1mm程度と小さく、2サイクル目以降は0mm～0.5mm程度とさらに小さくなっている。この結果、VSL工法、SEEE工法とも、2サイクル目以降の残留変位は1サイクル目と比較して小さくなる傾向を示している。この要因として、1サイクル目では引張り材とシースの付着抵抗などによる影響が考えられ、2サイクル目以降においてこれらの影響が解消されることにより残留変位は小さくなると考えられる。また、VSL工法の1サイクル目の残留変位が大きくなる原因としては、図-2.9に示すように、載荷時に仮プーリングヘッドで仮定着を行うことによるくさ

びの食い込みの影響も考えられる。SEEE 工法の 1 サイクル目の残留変位が 1mm 以下と小さいのは、アンカー頭部の引張り材のネジ切りを利用して仮プーリングヘッドが設置されるため、载荷による仮プーリングヘッドとネジ切りの食い込みが、ほとんどないことによるものと考えられる。

以上の結果から、リフトオフ試験において残存引張り力を求める場合、引張り材とシースの付着抵抗やくさびの食い込みが考えられる 1 サイクル目は予備载荷とし、2 サイクル目以降において残留変位が収束したのを確認した上で、本载荷として試験を実施する必要があると考えられる。

2) 残存引張り力の評価

a) 計測値の読み取り方の違いによる影響

リフトオフ試験により得られる残存引張り力は、アンカー頭部が支圧板から離れ始めた時点を目視で捉え、その時の油圧ジャッキの载荷荷重を計測する方法により確認することができる。しかしながら、アンカー頭部の浮き上がりの瞬間を現場で確認することは困難であるため、技術者毎で観測結果がばらつくことが予想される。「地盤工学会基準」⁷⁾では、残存引張り力は、定着具が支圧板から離れはじめた（変位 0.1mm～1.0mm）ときの測定荷重という幅のあるかたちで示されており、明確にリフトオフ値は定義されていない。リフトオフ試験により得られる残存引張り力は、荷重－変位曲線の直線勾配が変化する付近に存在することが考えられ、図-2.2 に示す直線勾配が変化する A 点や、変位が卓越しはじめる B 点の荷重などが考えられるが、変曲点前後の直線を延長した交点である C 点とされることが多い。

ナット定着タイプのアンカーは、引張り材が複数の PC 鋼より線からなるケーブル構造であるため、荷重－変位曲線の直線勾配の変曲点が比較的明瞭であることが多い。これに対し、くさび定着タイ

2cycleを基準とした場合の1cycle~6cycle
の残存引張り力の計測値の割合(%)

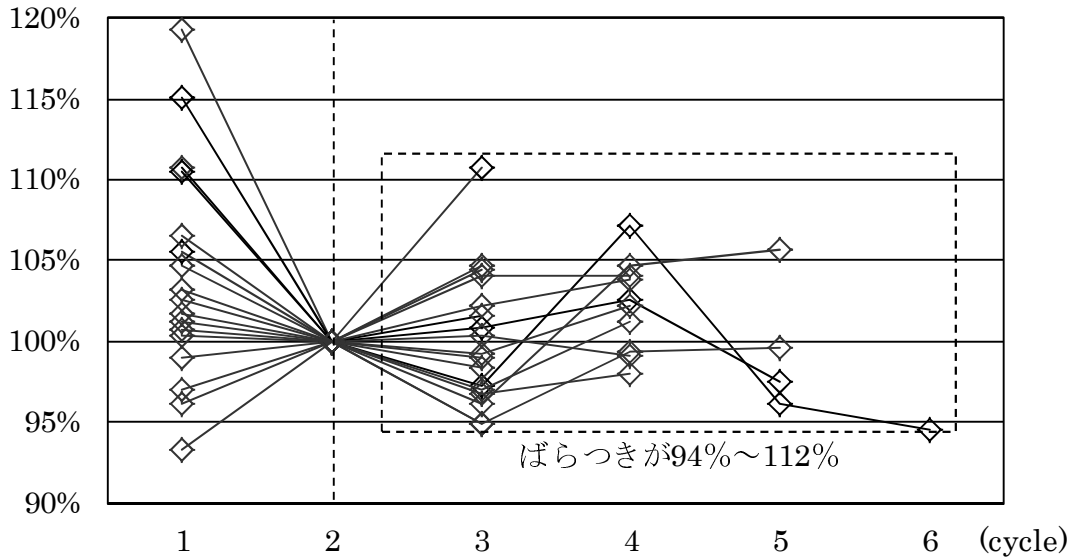


図-2.10 残存引張り力のばらつき (変曲点 1)

2cycleを基準とした場合の1cycle~6cycle
の残存引張り力の計測値の割合(%)

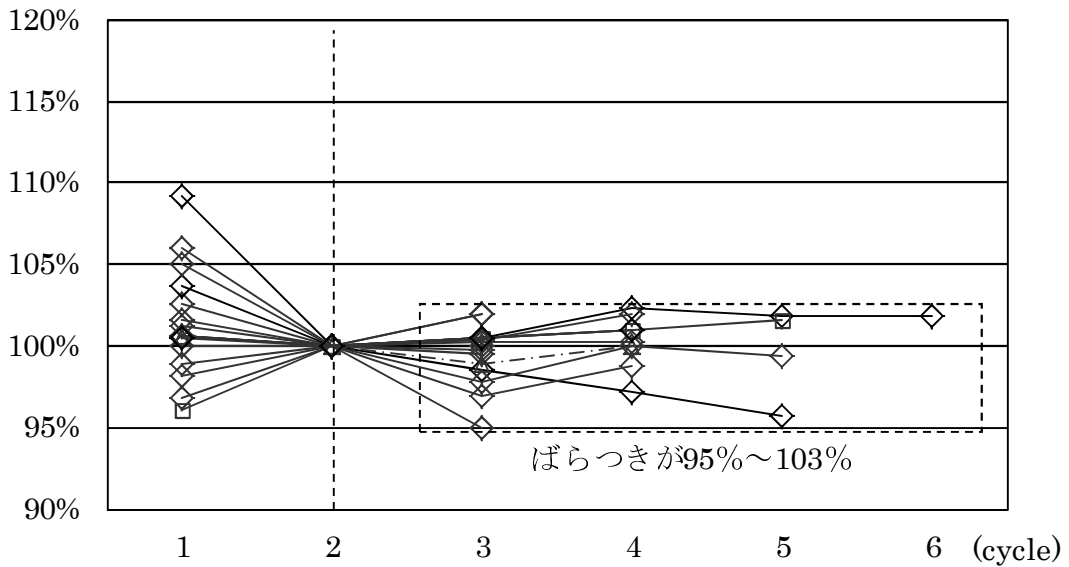


図-2.11 残存引張り力のばらつき (変曲点 2)

2cycleを基準とした場合の1cycle~6cycle
の残存引張り力の計測値の割合(%)

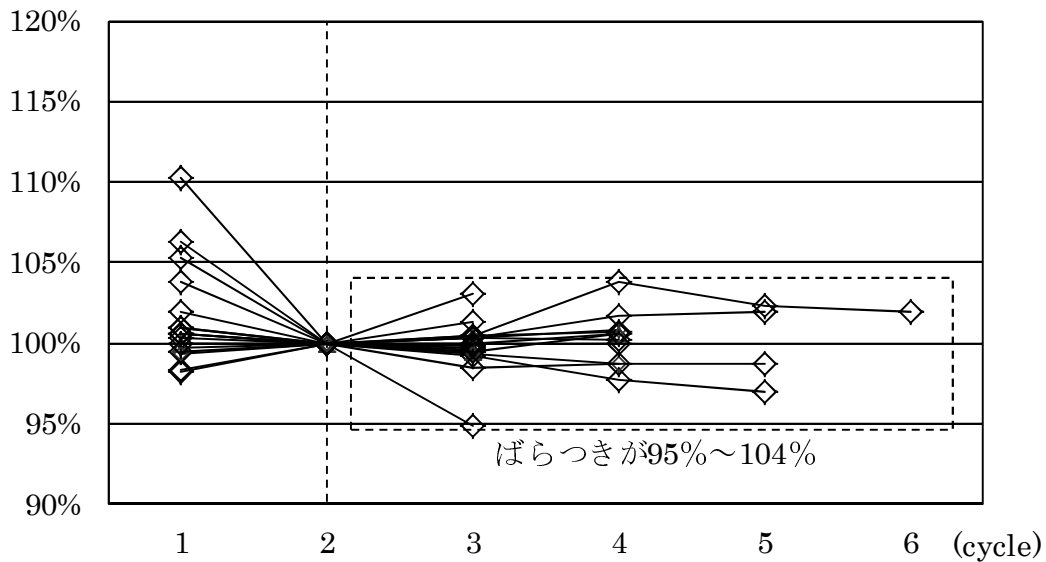


図-2.12 残存引張り力のばらつき（接線法）

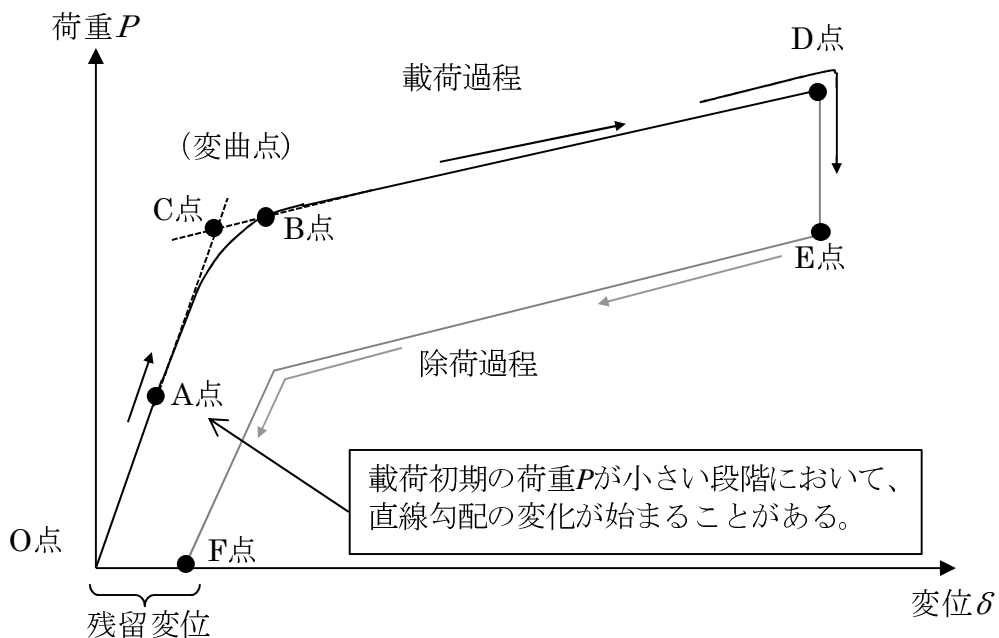


図-2.13 荷重初期に直線勾配が変化する荷重－変位曲線

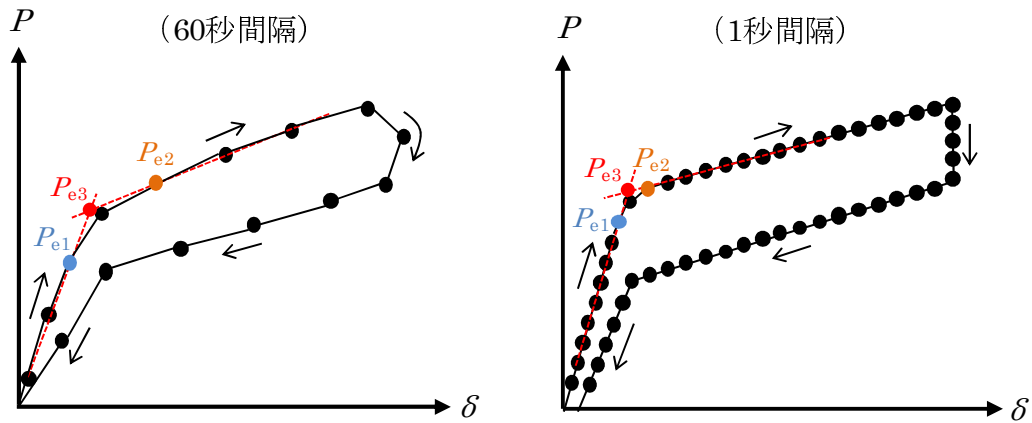
プヤくさびナット併用定着タイプのアンカーは、各 PC 鋼より線が個々に独立して荷重を負担する構造となっているため、PC 鋼より線毎に荷重が偏心し直線勾配の変曲点が明瞭に現れないことがある。そこで、くさび定着式タイプのアンカーを対象として、A 点を「変曲点 1」、B 点を「変曲点 2」、C 点を「接線法」としてそれぞれの残存引張り力を求め、これら 3 つの残存引張り力の計測値のばらつきから試験結果の精度について検討を行った。

計測値については、1 サイクル目を予備载荷とし、2 サイクル目～6 サイクル目について変曲点 1、変曲点 2、接線法による計測値のばらつきを求めた。図-2.10、図-2.11、図-2.12 は、変曲点 1、変曲点 2、接線法の計測値が、2 サイクル目の計測値に対してどの程度の割合となるかを示したものである。変曲点 1 の 2 サイクル目以降のばらつきは 94%～112% と大きいものの、変曲点 2 と接線法のばらつきは 95%～103%、95%～104% と小さい。変曲点 1 の計測値のばらつきが大きい原因として、アンカーによっては、図-2.13 に示すようにリフトオフ前の载荷荷重が小さい段階から、荷重－変位曲線の直線勾配が変化し始めるものがあり、このような場合には直線勾配の変曲点が捉えづらいことが考えられる。一方、変曲点 2 ではリフトオフ荷重を越えた荷重まで载荷が行われることから、荷重－変位曲線の直線勾配がある程度安定した領域にあると考えられ、変曲点 1 よりもばらつきは小さくなると推定される。

また、接線法の場合、リフトオフ前後の直線勾配の交点により便宜的に残存引張り力が決定されるため、変曲点 1 や変曲点 2 のような変曲点を捉える必要がなく、測定者の見解などによらない計測値を得ることができる。このため、残存引張り力の値を評価する場合には接線法を採用することが適切と考えられる。

b) データの記録間隔の違いによる影響

リフトオフ試験により求められる荷重－変位曲線から残存引張



- ・ 変曲点 1 の残存引張り力の差 = $P_{e1}(60s) - P_{e1}(1s)$
- ・ 変曲点 2 の残存引張り力の差 = $P_{e2}(60s) - P_{e2}(1s)$
- ・ 接線法の残存引張り力の差 = $P_{e3}(60s) - P_{e3}(1s)$

図-2.14 記録間隔 60s と記録間隔 1s における残存引張り力の差

り力を計測する場合、データの記録間隔により計測値がばらつくことが考えられる。すなわち、データの記録間隔が長くなると、データ計測が粗くなり計測数が少なくなるため、正確な残存引張り力の計測値を捉えることができない可能性がある。そこで、変曲点 1、変曲点 2、接線法についてデータの記録間隔を変化させた場合の計測値のばらつきについて比較検討を行った。検討は、リフトオフ試験において、図-2.14 に示すように、データの記録間隔を 60 秒間隔とした場合と 1 秒間隔とした場合の荷重－変位曲線を作成し、それぞれの荷重－変位曲線において、変曲点 1、変曲点 2、接線法による残存引張り力を求め、これらの計測値の差を比較した。比較対象としたサンプルは、リフトオフ試験を実施したアンカーから無作為に抽出した 12 本のアンカーとした。また、各アンカーは多サイクルの載荷・除荷を繰り返しているため、抽出した各アンカーから任意の一サイクルを抽出して比較を行った。表-2.3 はサンプリング

表-2.3 サンプル間隔の違いによる計測値の荷重差

アンカー No.	60 秒間隔の場合の 計測値 (kN)			1 秒間隔の場合の 計測値 (kN)			両計測値の 荷重差 (kN)		
	変曲点 1	変曲点 2	接線 法	変曲点 1	変曲点 2	接線 法	変曲点 1	変曲点 2	接線 法
A-1_1	591	699	690	619	695	691	28	4	1
C-1_1	196	237	216	200	223	218	4	14	2
C-1_6	178	243	214	171	219	214	7	<u>24</u>	0
D-1_1	578	596	587	580	587	584	2	9	3
E-1_1	276	336	336	337	343	337	61	7	1
E-1_2	243	331	334	336	344	338	<u>93</u>	13	4
F-1_9	137	159	158	134	163	158	3	4	0
F-1_10	122	158	150	132	166	159	10	8	9
G-1_1	300	320	312	284	314	307	16	6	5
H-2_14	1,592	1,666	1,646	1,615	1,678	1,658	23	12	<u>12</u>
I-1_1	441	467	466	454	469	466	13	2	0
I-1_3	474	458	473	466	478	472	8	20	1
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $\frac{A-1_1}{\uparrow \quad \uparrow}$ アンカーNo サイクル番号 </div>						平均値	22.3	10.3	3.2
						標準偏差	26.4	6.4	3.7

※1つのアンカーに対し多サイクルの載荷・除荷を行っており、アンカーNoの後の数字はサイクル番号を示している。

※アンダーラインは、両計測値の荷重差 (kN) の最大値を示している。

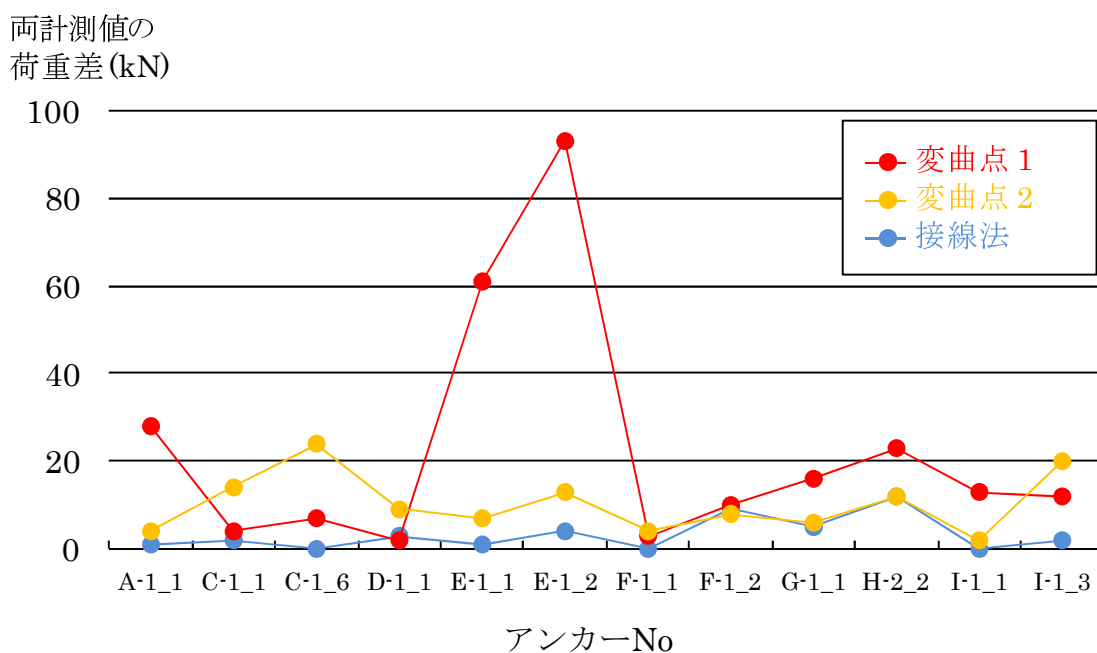


図-2.15 計測方法毎の残存引張り力の差

を 60 秒間隔、1 秒間隔とした場合の変曲点 1、変曲点 2、接線法の残存引張り力の計測値と、両計測値の荷重差を示したものである。また、図-2.15 は、表-2.3 の残存引張り力の荷重差をグラフ化したものである。なお、図中のアンカーNo の後の数字は抽出したアンカーのリフトオフ試験時のサイクル数を示している。両計測値の荷重差のばらつきを見ると、変曲点 1 では標準偏差 26.4 と最も大きく、サンプリング間隔の違いによる荷重差は、最大約 90kN、平均約 20kN と最も大きい値を示した。変曲点 2 では、標準偏差 6.4 と小さく、サンプリング間隔の違いによる荷重差は最大約 20kN、平均約 10kN であった。接線法では標準偏差 3.7 と最も小さく、サンプリング間隔の違いによる荷重差は、最大約 10kN、平均約 3kN であった。

アンカーの残存引張り力は、支圧板からアンカー頭部が離れたリフトオフ時の荷重として定義されており、変曲点 1 により求められ

る荷重が実際の残存引張り力に近いと考えられる²³⁾。しかし、変曲点1の場合、本試験結果から測定間隔によるばらつきが最も大きくなることが明らかとなった。また、実際の現場では、試験中にアンカー頭部が支圧板から離れ始めた時点を正確に捉えることは困難である。同一のアンカーにおいてリフトオフ試験を定期的実施する場合、試験結果の再現性が重要となることから、測定間隔によるばらつきが少ない接線法により得られる計測値を残存引張り力として評価することが適切であると考えられる²⁴⁾。

3) 変位計測方法の評価

a) 変位計測位置の違いによる計測値の影響

リフトオフ試験において、精度の高い計測結果を得るためには、油圧ジャッキの載荷荷重およびアンカー頭部変位を正確に計測することが必要とされる。しかしながら、現在まで変位の計測位置の違いによる試験結果への影響についての評価は行われていない。そこで、リフトオフ試験に用いるセンターホールジャッキを対象として、図-2.16に示すテンションバーの先端（計測箇所 a）と、仮プーリングヘッド（計測箇所 b）に変位計を設置して変位を同時に計

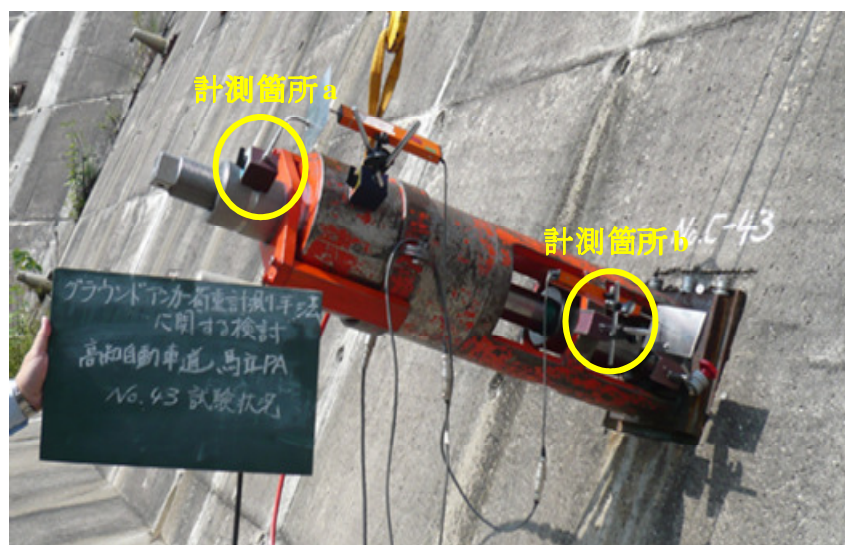
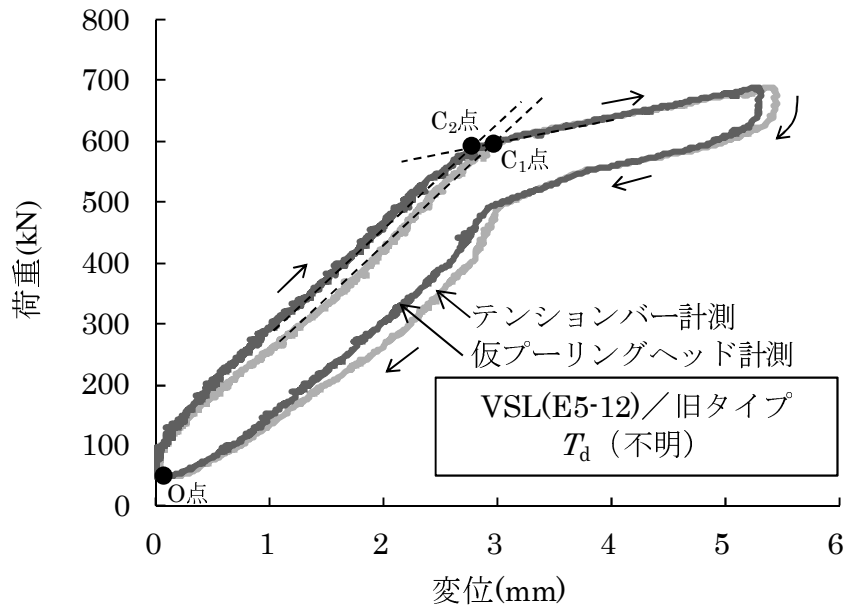
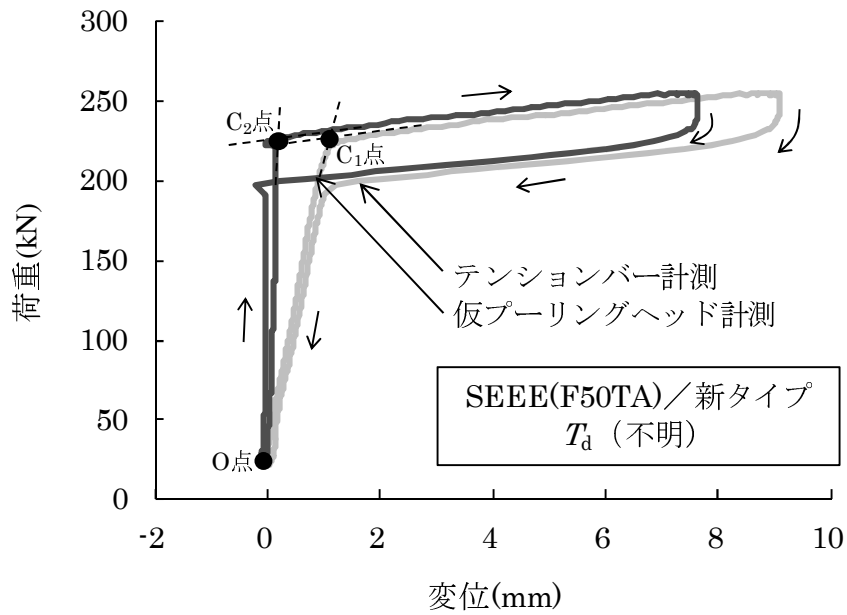


図-2.16 変位計測器の設置状況



(a) くさび定着タイプ (アンカーNo.D-1)



(b) ナット定着タイプ (アンカーNo.N-2)

図-2.17 変位計測位置の違い

測し、テンションバーの伸びが試験結果に与える影響について検討を行った。

図-2.17に VSL(E5-12)、SEEE(F50TA)を対象としてリフトオフ試験を実施した結果を示す。なお、両者とも設計アンカー力は不明である。また、残存引張り力の評価は接線法により行った。残存引張り力は、図-2.17に示すように、VSL(E5-12)ではテンションバーの先端で計測した場合（図-2.17(a)、C₁点）と仮プーリングヘッドに設置した場合（図-2.17(a)、C₂点）に大きな差は認められなかった。しかし、リフトオフ前の直線勾配は、テンションバー先端（計測箇所 a）で計測した場合（図-2.17(a)、O→C₁）の方が、仮プーリングヘッド（計測箇所 b）で計測した場合（図-2.17(a)、O→C₂）よりやや緩くなる傾向が認められた。また、図-2.17(b)に示すように SEEE(F50TA)のアンカーについても、両者の残存引張り力に大きな差は認められず、リフトオフ前の直線勾配は、テンションバー先端（計測箇所 a）で計測した場合（図-2.17(b)、O→C₁）の方が、仮プーリングヘッド（計測箇所 b）で計測した場合（図-2.17(b)、O→C₂）よりも緩くなる傾向が認められた。これらリフトオフ前の荷重過程段階では、引張り材の変位はわずかであるため、変位計測位置の違いによる荷重－変位曲線の差は、テンションバーの伸びによる影響と考えられる。

b) 荷重ジャッキの違いによる計測値の影響

リフトオフ試験専用開発されたテンションバーの短い特殊ジャッキや SAAM ジャッキは、従来のセンターホールジャッキに比べ軽量かつコンパクトであるため、短期間で複数のアンカーを調査することが可能である¹⁴⁾。このうち、特殊ジャッキは、引張り材の余長が短くリフトオフ試験が困難なくさび定着タイプのアンカーにおいても、アンカー頭部をこの油圧ジャッキで直接引き上げる方法により試験を実施することができる¹⁵⁾。図-2.18に VSL(E5-4)

を対象として、センターホールジャッキと特殊ジャッキを用いてリフトオフ試験を実施した荷重－変位曲線を示す。図中の I-2_1、I-2_2 はセンターホールジャッキを用いた場合、I-2_3、I-2_4 は特殊ジャッキを用いた場合の荷重－変位曲線を示している。なお、両者とも変位計は油圧ジャッキの先端部に設置し、残存引張り力は接線法により評価を行った。

この結果、センターホールジャッキを用いた場合の残存引張り力（図-2.18、 $C_{1,2}$ 点）と特殊ジャッキを用いた場合の残存引張り力（図-2.18、 $C_{3,4}$ 点）に大きな差は認められない。しかし、センターホールジャッキを用いた場合のリフトオフ前の直線勾配（図-2.18、 $O \rightarrow C_{1,2}$ 点）は、特殊ジャッキを用いた場合の直線勾配（図-2.18、 $O \rightarrow C_{3,4}$ 点）よりも緩くなっている。酒井ら²⁵⁾は、センターホールジャッキと SAAM ジャッキの荷重測定結果について、図-2.19 に示す室内試験および現場試験で得られたデータから検討を行うことにより、図-2.20 に示すようにセンターホールジャッキでは試験

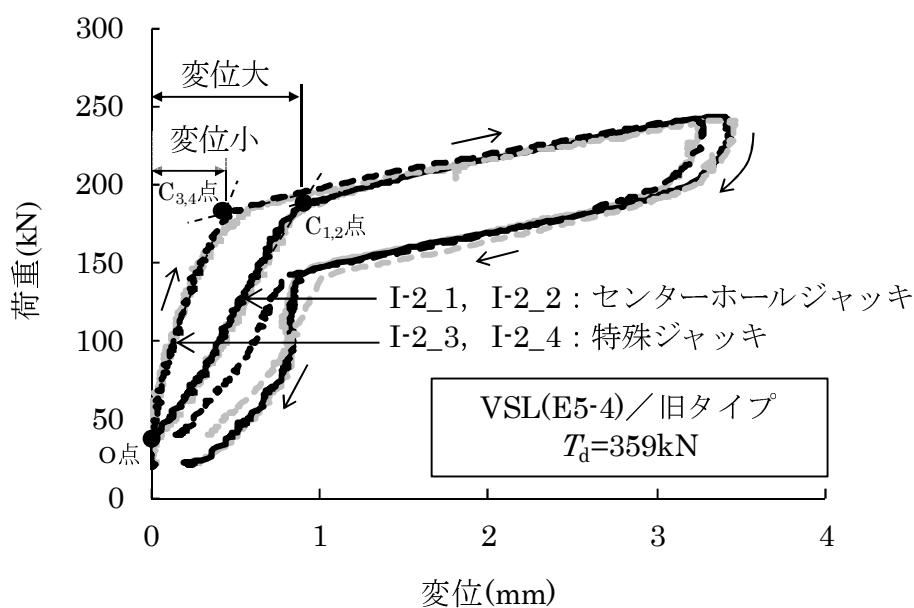
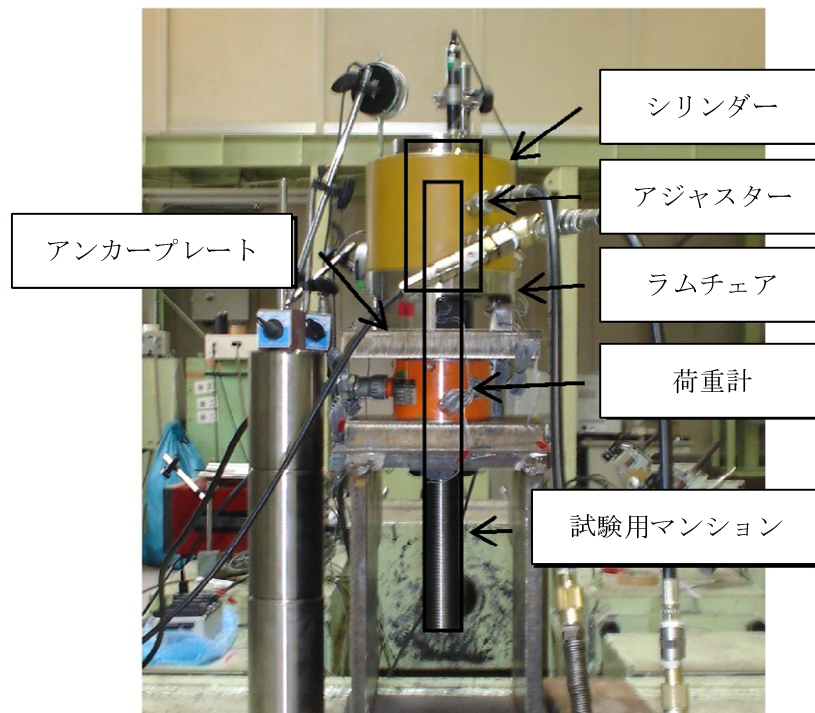
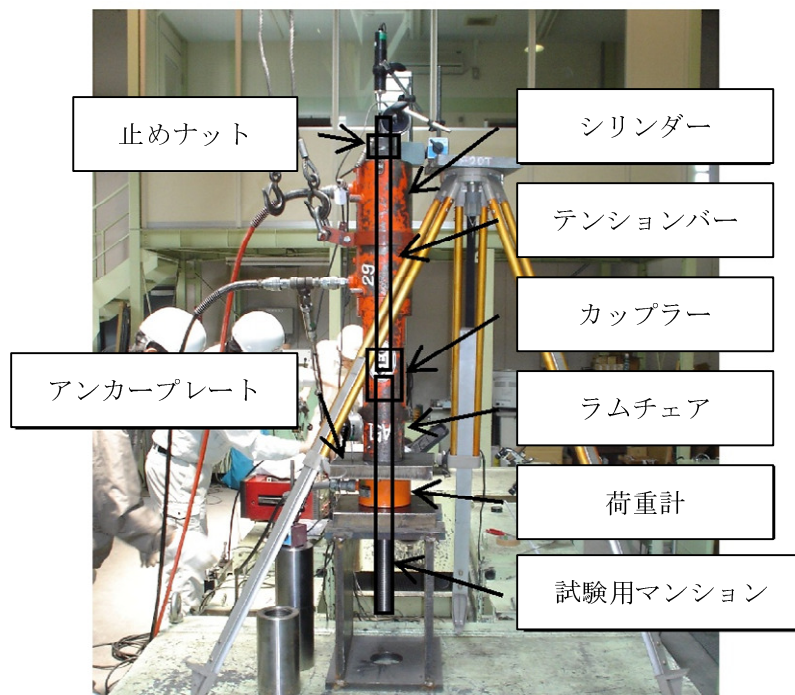


図-2.18 載荷ジャッキの違い（アンカーNo.I-2）



(a)SAAM ジャッキ



(b) センターホールジャッキ

図-2.19 酒井ら²⁵⁾の実施した室内試験の状況

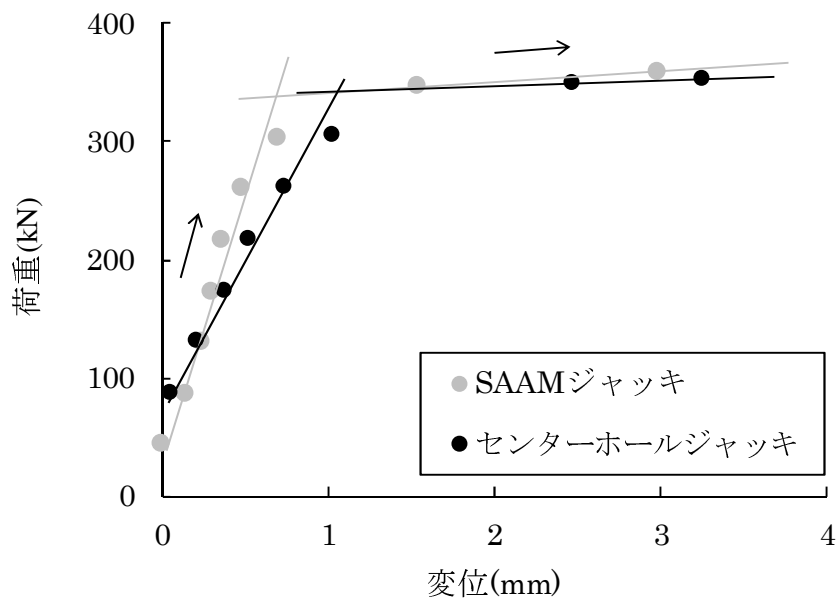


図-2.20 酒井ら²⁵⁾の研究により得られたSAAMジャッキとセンターホールジャッキを用いた場合の荷重－変位曲線の比較結果

時にテンションバーの伸びの影響が考えられることを述べている。このため、リフトオフ試験において、特にセンターホールジャッキを用いてテンションバーの先端で変位を計測する場合、テンションバーの伸びの影響を踏まえた評価が必要であると考えられる。

アンカーの維持管理において、定期的にリフトオフ試験を実施し、残存引張り力あるいは荷重－変位曲線の変化を比較することにより、アンカーの健全性などを推定することができるものと考えられる²⁶⁾。しかし、定期的な点検において以前との結果に差が認められた場合、過去の点検の試験条件が明確でないと、この差が試験条件の違いによる影響であるのか、アンカーの残存引張り力の変化や材料の劣化等による影響であるかの判断が困難となる。このため、リフトオフ試験の実施にあたっては試験結果だけではなく、試験に使用した油圧ジャッキの種類や変位計測位置などの試験条件についても記録しておくことが重要である。

4) 荷重方法の違いによる影響

アンカーの品質保証試験では、計画最大荷重を10段階に分け、各々の段階毎に1分間の保持を行う段階荷重が行われている⁷⁾。しかし、アンカーの残存引張り力を対象としているリフトオフ試験の荷重方法は現在まで明確に定められていない。そこで、同一アンカーに対し荷重速度を変化させたリフトオフ試験を実施し、残存引張り力における荷重速度の影響について検討を行った。図-2.21は、VSL(E5-12)についてリフトオフ試験時の荷重速度を20 kN/min、30 kN/min、60kN/minと変化させた、1サイクル目の予備荷重を除く2サイクル目～5サイクル目における荷重－変位曲線を示したものである。いずれの荷重速度においても荷重過程・除荷過程で描かれる荷重－変位曲線はほぼ一致し、また、接線法により評価される残存引張り力の計測値にも大きな差は認められなかった。

次に、荷重保持方法の違いによる影響について検証するために、同一アンカーに対し、荷重速度を20kN/minとし試験最大荷重時に

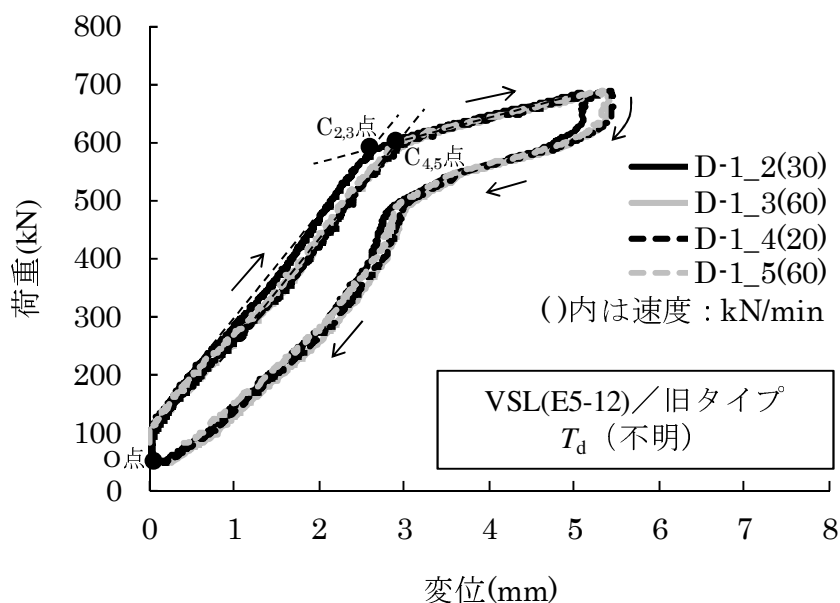
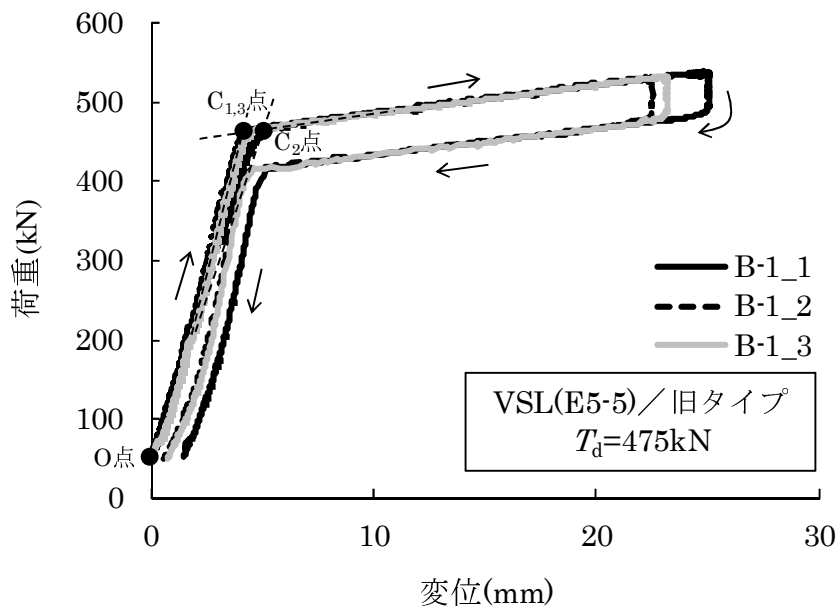


図-2.21 荷重速度の違い（アンカーNo.D-1）



- ※B-1_1： 荷重速度を 20kN/min とし試験最大荷重時に 10 分間保持している。
- ※B-1_2： 荷重速度を 20kN/min とし 20kN の荷重毎に 1 分間保持している。
- ※B-1_3： 荷重速度を 10kN/min とし試験最大荷重時に 10 分間保持している。

図-2.22 荷重時の保持の違い（アンカーNo.B-1）

10分間保持した場合、同様の荷重速度で品質保証試験に準じ20kNの荷重毎に1分間保持した場合、荷重速度を10kN/minとし試験最大荷重時に10分間保持した場合の試験結果を比較しており、図-2.22は、VSL(E5-5)のリフトオフ試験の結果を示している。いずれの条件においても荷重-変位曲線はほぼ一致するとともに、残存引張り力の値にも大きな差は認められなかった。酒井ら²⁷⁾は、SAAMジャッキを使用したリフトオフ試験において、荷重速度による影響をSEEE工法のアンカーを対象として現地試験および室内試験により検証を行っている。その結果、品質保証試験に準じた段階荷重、ならびに荷重速度を変化させた連続荷重において荷重-変位曲線に大きな差は見られず、荷重方法および荷重速度が残存引張り力に与える影響は考慮しなくてよいことを述べている。これらの結果か



図-2.23 破断したアンカーの引張り材の腐食状況²⁸⁾

ら、リフトオフ試験において、引張り荷重の載荷速度の違いや載荷保持の方法の違いによる影響は無いものと考えられる。

「地盤工学会基準」⁷⁾では、リフトオフ試験時の試験最大荷重を、設計アンカー力の1.2倍程度と定めている。しかし、現場でのリフトオフ試験で、設計アンカー力が438kNのSEEE工法のアンカーにおいて、設計アンカー力に到達する前の予備載荷の段階で引張り材の破断が確認された²⁸⁾。このアンカーについて引張り材の破断箇所を確認したところ、図-2.23に示すように、著しい腐食が確認された。図-2.24にこのアンカーの荷重－変位曲線を示す。また、図-2.25は同じ規格の比較的健全なアンカーの荷重－変位曲線である。両者を比較すると、破断したアンカーではリフトオフする前の直線勾配（図-2.24、O→C）が緩く、リフトオフするまでに1mmを超える変位が発生している。これに対し、健全なアンカーの場合、リフトオフする前の変位は約0.5mmと小さくなっている⁹⁾。ところで、残存引張り力は、予備載荷で破断したアンカーでは180kN付近（図-2.24、

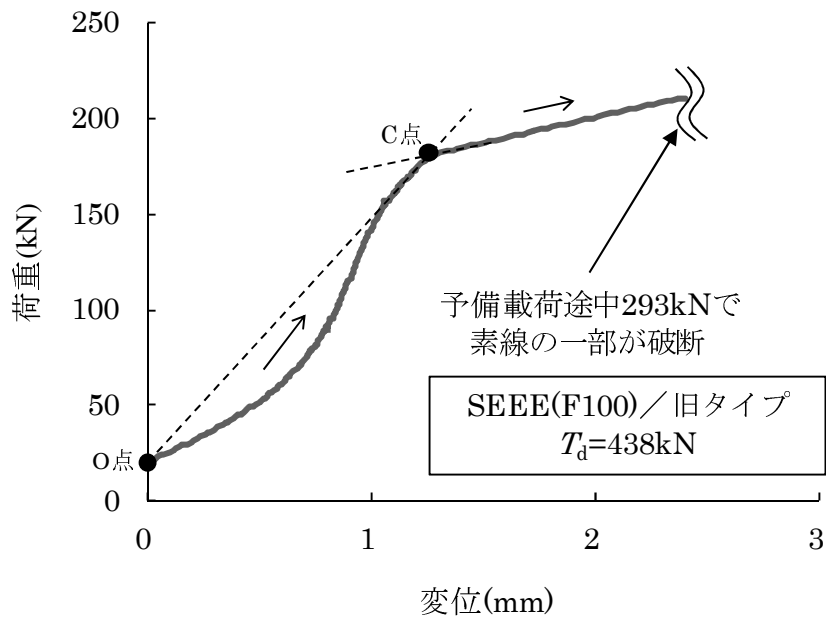


図-2.24 予備載荷で破断したアンカー（アンカーNo.M-4）

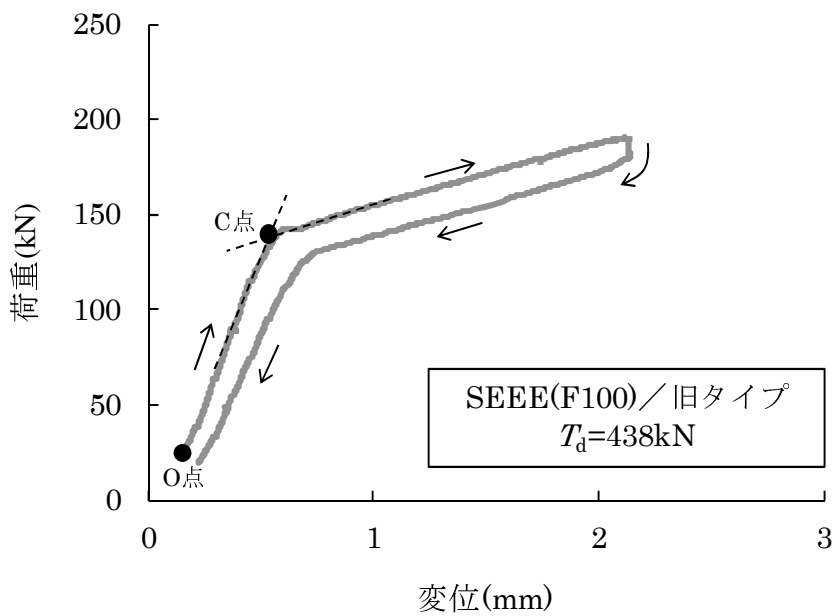


図-2.25 同じ地点の健全なアンカー（アンカーNo.M-2）

C点)、健全なアンカーでは150kN付近(図-2.25、C点)と破断したアンカーの方が大きい値を示した。これらのアンカーに対しリフトオフ試験前の頭部点検では明確な健全性の差は認められなかった。このため、リフトオフ試験にあたってはアンカーの破断等の危険を回避するため、予備載荷時は載荷速度を遅くしてアンカーの状態を目視により確認しながら慎重に実施する必要がある。また、破断したアンカーの結果から、アンカー材料が腐食などにより劣化している場合、荷重-変位曲線が正常な場合と異なることが考えられる。この点については、第3章において詳細な検討を行う。

2.4 まとめ

本章において、くさび定着タイプおよびナット定着タイプ、くさびナット併用定着タイプのアンカーを対象としてリフトオフ試験を実施し、この結果を基に適切なリフトオフ試験のサイクル数や残存引張り力の評価方法について検討を行った。また、変位計測位置や試験機器の違いがアンカーの残存引張り力に与える影響について検討を行った。その結果、下記の事項が明らかとなった。

- (1) リフトオフ試験において、1サイクル目の残留変位は大きいものの、2サイクル目以降の残留変位は1mm以下と小さく荷重-変位曲線はほぼ一致した。このため、リフトオフ試験の実施にあたり、1サイクル目は予備載荷とし、2サイクル目以降において残留変位が収束したのを確認した上で、本載荷としての試験を実施することが適切と考えられる。
- (2) リフトオフ試験から得られる残存引張り力の評価について、定着具と支圧板が離れ始める実際にリフトオフした時点の荷重を採用した場合、計測値のばらつきが大きくなった。このため、荷重-変位曲線においてリフトオフ前後の直線勾配の交点から

得られる計測値を残存引張り力とする評価方法が妥当であると
考えられる。

- (3) センターホールジャッキでは、テンションバーの伸びの影響から、変位計測位置の違いによりリフトオフするまでの荷重－変位曲線の変位量が異なることが明らかとなった。また、特殊ジャッキや SAAM ジャッキなどの維持管理用の油圧ジャッキは、アンカー頭部に直接引張り荷重を与える方法で载荷を行うため、テンションバーの伸びの影響が少ないことが明らかとなった。このことから、リフトオフ試験により得られる荷重－変位曲線をアンカーの状態や健全性を推定するためのデータとして有効に利用するためにも、試験を行う際は使用した油圧ジャッキの種類や変位計測位置等の試験条件を試験結果とともに記録しておくことが重要である。
- (4) リフトオフ試験において、载荷速度や载荷保持時間が試験結果に与える影響は認められなかった。このため、リフトオフ試験を実施する場合、アンカーに負担が掛からない範囲で残存引張り力を確認できる適切な载荷速度およびデータの記録間隔を設定すればよいと考えられる。なお、予備载荷ではアンカーの破断等が懸念されるため、アンカーの状態を目視により確認できる载荷速度を設定し慎重に実施する必要がある。

第 2 章の検討結果を基に、第 3 章以降において、1 サイクル目を予備载荷とし 2 サイクル目以降の荷重－変位曲線から接線法により残存引張り力を評価するリフトオフ試験方法を「高速道路試験法」と定義する。

第3章 腐食の発生したアンカーの健全性評価

3.1 はじめに

アンカーは、背面土圧の作用によるアンカー自由長の引張り材の拘束や、アンカー定着長のグラウトの劣化などにより、設計上期待される機能を発揮できない状態になることが考えられる。こうしたアンカー機能の健全性は、「維持管理マニュアル」⁸⁾などに従い、リフトオフ試験の荷重－変位曲線のリフトオフ後の直線勾配を用いて評価されることがある。しかし、防食機能が十分でない旧タイプアンカーについては、鋼材の腐食などもアンカー機能が低下する要因の一つとして考えられる。このため、腐食によりアンカー機能が低下しているものを対象として、アンカーの健全性評価の妥当性について検討する必要がある。

本章では、施工後約35年が経過し機能低下したアンカーを対象としてリフトオフ試験、および引抜き試験を実施し、荷重－変位曲線のリフトオフ後の直線勾配および引抜き荷重からアンカー機能の健全性について評価を行った。加えて、アンカーの掘り起こし調査を実施して鋼材の腐食状況を確認し、これらを総合的に評価することにより、腐食の発生したアンカーの健全性評価における問題点について検討を行った。

3.2 アンカー機能の健全性評価

アンカーの残存引張り力に増加が見られる場合、背面の土圧などの作用により引張り材に負担が掛っていることが考えられる。これに対し、残存引張り力に低下が見られる場合には、引張り材のリラクゼーションや地盤クリープなどの作用が考えられる。「維持管理

マニュアル」⁸⁾では、アンカーの残存引張り力が定着時緊張力の 0.8 倍以上かつ設計アンカー力以内であれば健全な状態で、外力の作用に対しアンカーは有効に機能しているものと規定している。また、図-3.1 に示す荷重－変位曲線において、残存引張り力以上の载荷により得られる直線勾配の角度を θ とすると、アンカー機能が健全な場合、 $\tan\theta$ は下記の式により表される設計を基準に得られる $\tan\theta_0$ に近い値になると考えられる。

$$\tan\theta_0 = \frac{E \cdot A_s}{l_f} \quad (1)$$

- ここに、
- E : アンカー引張り材の弾性係数 (kN/mm²)
 - A_s : テンドン断面積 (mm²)
 - l_f : アンカー自由長 (mm)
 - $\tan\theta_0$: 設計を基準に得られるアンカー自由長の伸び率 (kN/mm)

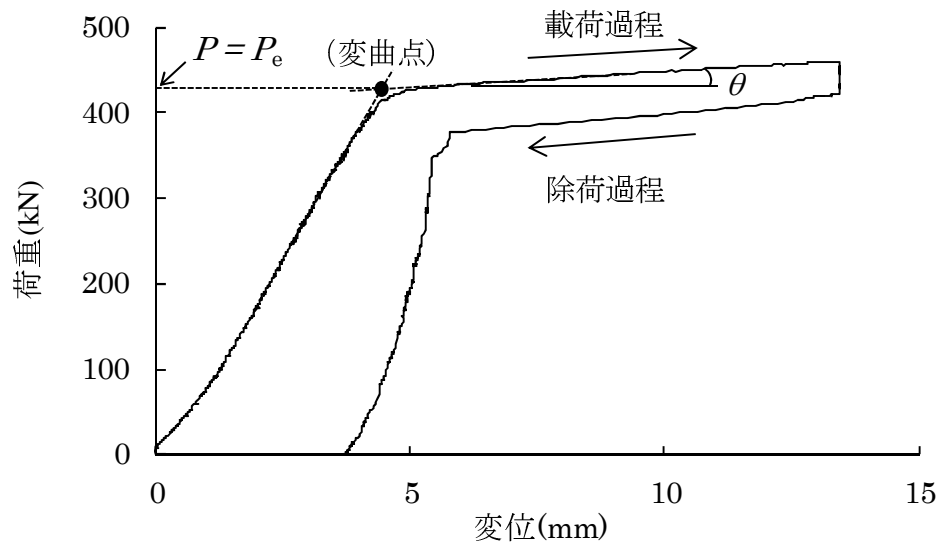
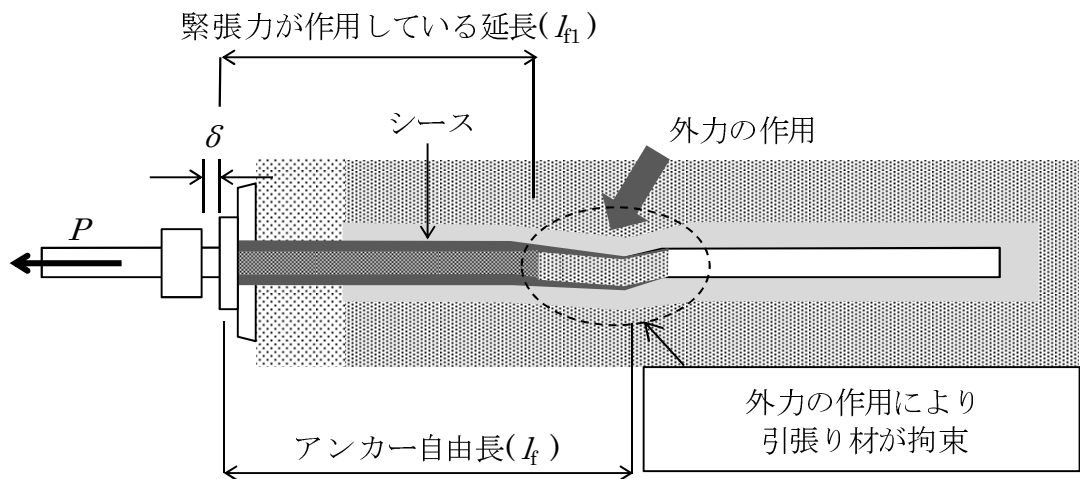
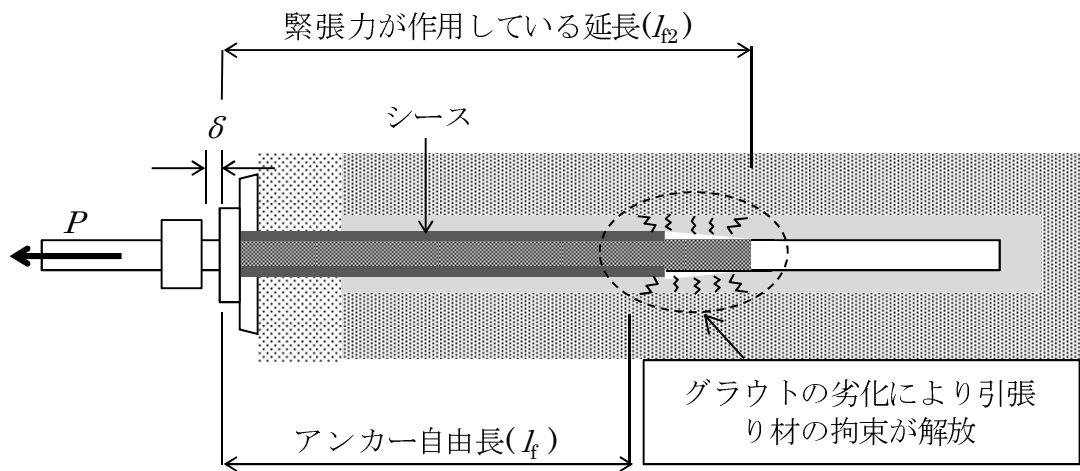


図-3.1 荷重－変位曲線の直線勾配の角度 θ



$$E \cdot A / I_{f1} (= \tan \theta) > E \cdot A / I_f (= \tan \theta_0)$$

(a)外力の作用による機能低下



$$E \cdot A / I_{f2} (= \tan \theta) < E \cdot A / I_f (= \tan \theta_0)$$

(b)グラウトの劣化による機能低下

図-3.2 アンカー機能の健全性低下の例

「維持管理マニュアル」⁸⁾では、 $\tan\theta$ からアンカー機能の健全性を評価するための目安が規定されている。図-3.2は、アンカー機能の健全性低下の一例を示したものである。図-3.2(a)に示すように外力の作用により引張り材が拘束される場合の $\tan\theta$ の値を考えると、 I_f が小さくなるため $\tan\theta$ は大きくなる。また、図-3.2(b)に示すようにアンカー定着長のグラウトの劣化により引張り材の拘束が解放される場合を考えると、 I_f が大きくなるため $\tan\theta$ は小さくなる。これらのことを考慮し、「維持管理マニュアル」⁸⁾では $\tan\theta$ が $E \cdot A / (1.1 \cdot I_f)$ 以上、かつ $E \cdot A / (0.8 \cdot I_f)$ 以下の範囲内にあるときをアンカー機能が正常な状態と規定している。この評価方法は、設計に従う施工が確実に行われ、引張り材を構成する材料が腐食等を伴わない健全な状態にある場合において、適切な評価を得ることができると考えられる。しかしながら、防食機能が改善される前に施工された、いわゆる旧タイプアンカーの場合、施工時の品質管理技術が現在と比べて十分でないことが考えられ、腐食に伴う有効断面積 A の減少や、アンカー自由長 I_f が設計値と異なるといった不具合が複合的に発生している可能性がある。また、アンカーはその大部分が地中に埋設されており、直接引張り材の健全性などを確認することが困難な状態にあるため、例えば健全性の低いアンカーであったとしても、 (A/I_a) の値が健全な状態のものと同等であることも予想され、 $\tan\theta$ のみでは適切な評価とならない可能性がある。このため、引張り材の腐食による断面欠損や施工上の不具合が発生しているアンカーにまで本基準を適用するには限界があると考えられ、腐食によりアンカー機能が低下しているものに対する健全性評価の妥当性について検証する必要があると考えられる。

3.3 腐食の発生したアンカーの健全性調査

3.3.1 調査・分析

1) 調査地の概要

調査地は、三波川結晶片岩が広く分布する地点であり、アンカーは図-3.3、図-3.4に示すように、高速道路法面の擁壁に2段の施工が行われている。アンカーはSEEE（F100）であり、施工は防食機能が改善される以前の昭和49年頃で、現在施工後約35年が経過していると考えられる。調査は、高速道路法面の擁壁に設置された2段アンカーのうち上段のNo.1～No.4のアンカー4本を対象として行った。表-3.1は調査アンカーの諸元を示している。アンカー1本当りの設計アンカー力は438kNであることが分かっているが、定着時緊張力は不明である。本アンカーにおいて設計を基準に得られる $\tan\theta_0$ は25.3 kN/mmであり、「維持管理マニュアル」⁸⁾に従えば、本アンカーの場合、リフトオフ試験により得られる $\tan\theta$ が23.0 kN/mm以上、かつ31.6 kN/mm以下の範囲内にあるとき正常な状態と評価される。

2) 使用機器及び使用材料

本調査では、アンカー機能の健全性を確認するためのリフトオフ試験や引抜き試験を実施した。その試験状況を図-3.5、図-3.6に示す。現地ではアンカーの飛び出しに対する対策として、単管パイプとコンパネで組み立てた仮設飛散防護フェンスを設置した。油圧ジャッキは最大引張り荷重1,100kNのセンターホールジャッキを使用し、変位計は容量が200mmの東京測器研究所製の変位計（DDP-A）を用いた。データ計測は、東京測器研究所製のハンドヘルドタイプのデータロガー（TC-32K）を使用し油圧ジャッキと変位計の出力値を同時に計測した。

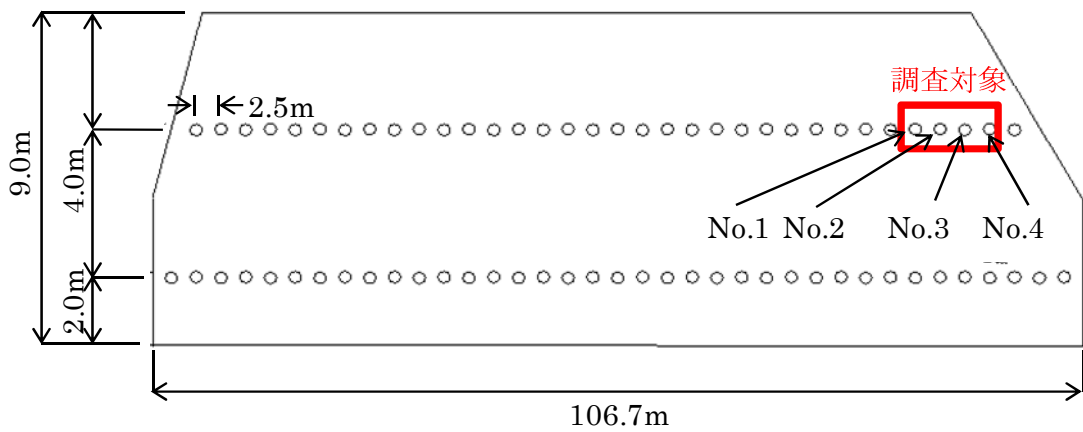
3) 調査方法

調査は、対象とした4本のアンカーについて、まずアンカーの頭

部点検を実施するため、図-3.7に示すように擁壁からアンカー頭部をはつり出して露出させ、頭部状態の確認を行った。その後、第2章に示した1サイクル目を予備載荷とし2サイクル目以降の荷重

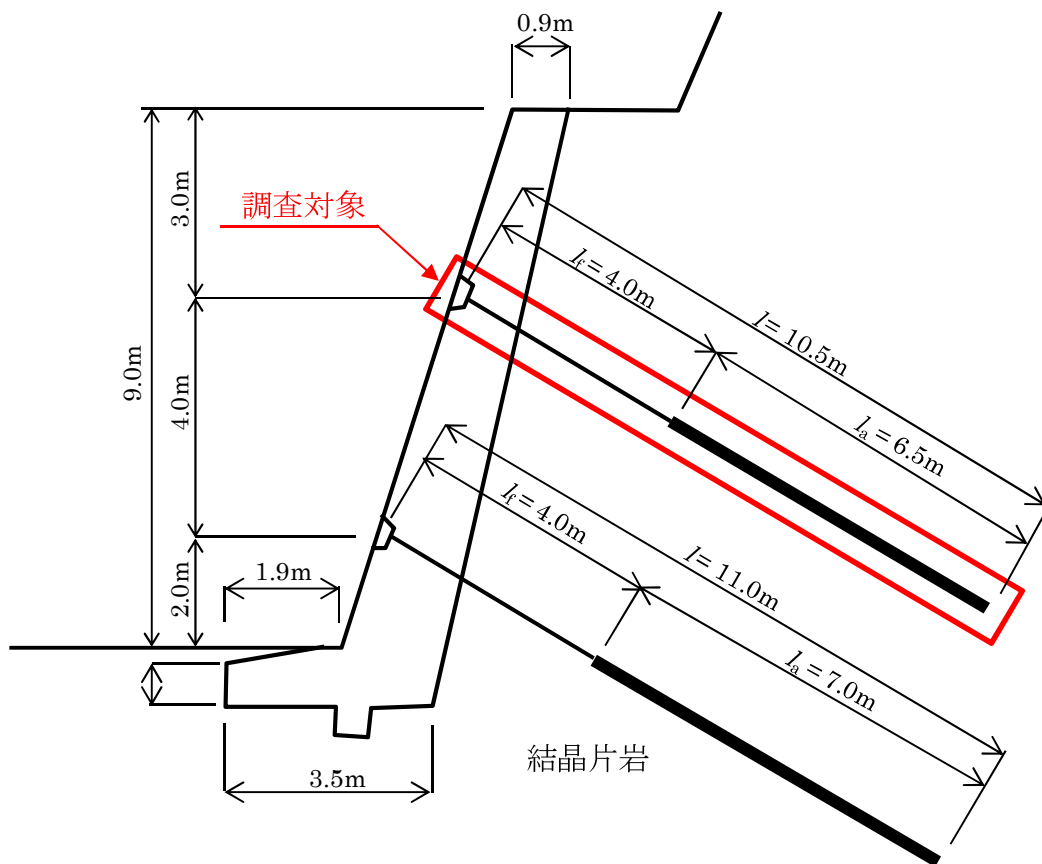


(a)調査箇所の状況



(b)調査対象アンカー

図-3.3 調査箇所



(a)調査対象アンカー



(b)調査対象アンカー

図-3.4 調査対象アンカーの構造

表-3.1 調査アンカーの諸元

項目	記号	設計値
設計アンカー力	T_d	438 kN
アンカー降伏荷重	T_{ys}	826 kN
アンカー長	l	10.5 m
アンカー自由長	l_f	4.0 m
アンカー体長	l_a	6.5 m
有効断面積	D_a	519 mm ²
弾性係数	E	195 N/mm ²
設計上のアンカー自由長の伸び率	$\tan \theta_0$	25.3 kN/mm



図-3.5 仮設設備の状況

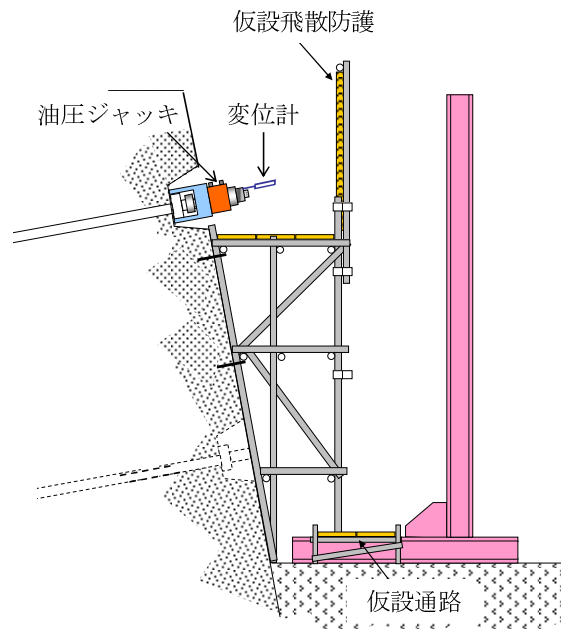


図-3.6 リフトオフ試験の実施状況



図-3.7 アンカー頭部露出のための擁壁のはつり



図-3.8 掘り起こしの状況

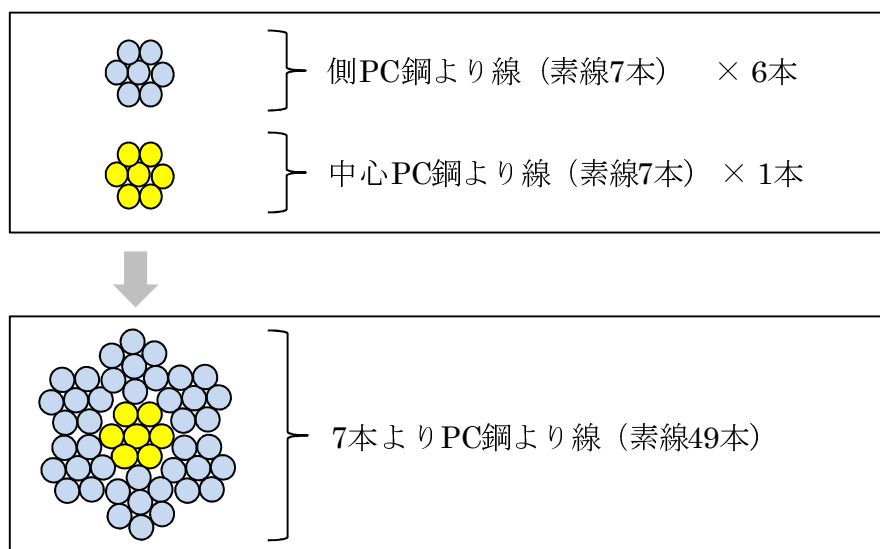


図-3.9 SEEE(F100)の断面構造

－変位曲線から接線法により残存引張り力を評価する「高速道路試験法」に従いリフトオフ試験を実施した。

その後、リフトオフ後の荷重－変位曲線から $\tan\theta$ を求め、アンカー機能の健全性評価を行った。さらに調査では、4本のアンカー

に対し引張り材の降伏や破断に至る荷重を確認するために引抜き試験を実施した。また、引抜き試験を行ったアンカーに対し、アンカーの頭部背面やアンカー自由長、アンカー体の施工状況や引張り材を構成する材料の腐食状況を直接確認するため、アンカーの掘り起こし調査も実施した。掘り起こし調査では、油圧ショベルで地山を掘削して図-3.8に示すようにアンカーを露出させ、引張り材の状態の確認を行った。

掘り起こし調査により回収したアンカー材料については、室内試験による鋼材検査を行った。SEEE(F100)の構造は、図-3.9に示すように7本のPC鋼より線から構成され、それぞれのPC鋼より線は7本の素線から構成される。調査では、まず引抜き試験で引張り材の破断が発生したアンカーについて、この総数49本の素線の破断面の確認を行った。また、長期にわたる引張り荷重の作用や腐食等により鋼材の性状が変化していることが考えられるため、金属組織調査により腐食の詳細を観察するとともに、ビッカース硬度試験(JIS Z 2244)による硬度の測定や化学成分分析(JIS G 3502)も行った。

3.3.2 試験結果・考察

1) アンカーの頭部調査

No.1～No.4のアンカーについて、アンカー頭部の観察を行った



図-3.10 はつり作業により露出させたアンカー頭部 (No.1)

ところ、図-3.10 に示すようにいずれのアンカーも軽微な腐食は認められるものの目立った損傷は認められなかった。また、引張り材の余長部分は、PC 鋼より線の滑り込みやアンカー頭部の浮きなども認められなかった。このことから、アンカーの頭部点検においてアンカーの健全性に対する異常を認識するには至っていない。また、アンカーNo.1～No.4 は引張り材の余長が 4cm 以上確保されており、リフトオフ試験や引張り試験を行うことが可能な状態にあった。

2) リフトオフ試験及び引抜き試験

a) リフトオフ試験

図-3.11～図-3.14 にリフトオフ試験により得られた No.1～No.4 の荷重－変位曲線を、表-3.2 にリフトオフ試験の結果を示す。No.1 の残存引張り力は、設計アンカー力の 40%程度の 176kN であった。残存引張り力を確認した後 300kN まで載荷を継続したところ、一定の直線勾配による荷重増加傾向が確認されたため、その後除荷を行った。No.2 の残存引張り力は、No.1 と同じ 176kN であった。残存引張り力を確認した後 230kN まで載荷を継続したところ、一定の直線勾配による荷重増加傾向が確認されたため、その後除荷を行った。No.3 については、予備載荷において変曲点を確認した後載荷を継続したところ、293kN で素線の一部が破断する現象が発生したため載荷を中止した。このため、No.3 の残存引張り力は、予備載荷の荷重－変位曲線の変曲点から 182kN と推定した。No.4 の残存引張り力は、設計アンカー力の 33%程度の 143kN であった。残存引張り力を確認した後 180kN まで載荷を継続したところ、一定の直線勾配による荷重増加傾向が確認されたため、その後除荷を行った。いずれのアンカーも、残存引張り力は設計アンカー力 438kN の 3 割～4 割程度であった。予備載荷で素線の一部に破断が発生したため No.3 は、他のアンカーと比較して健全性が大きく低下していると推定できる。

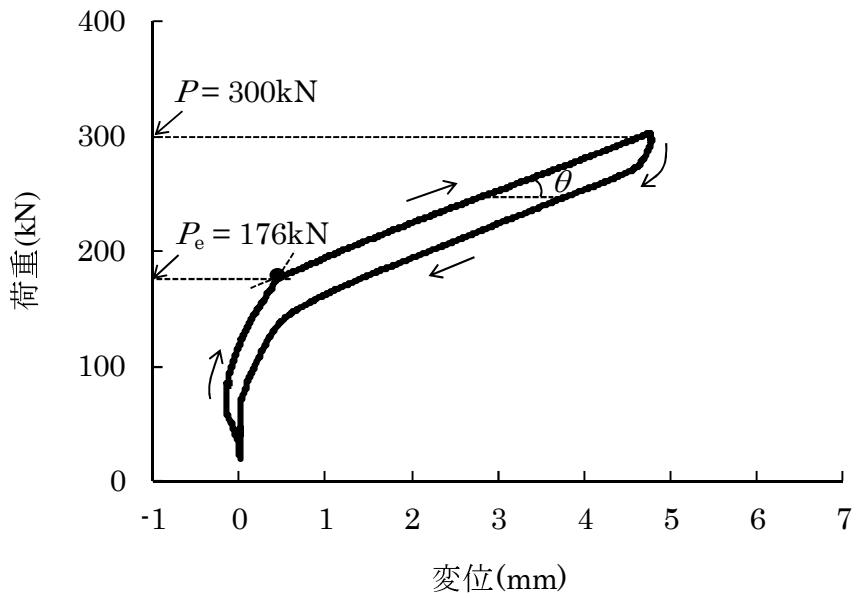


図-3.11 荷重－変位曲線（No.1の本載荷）

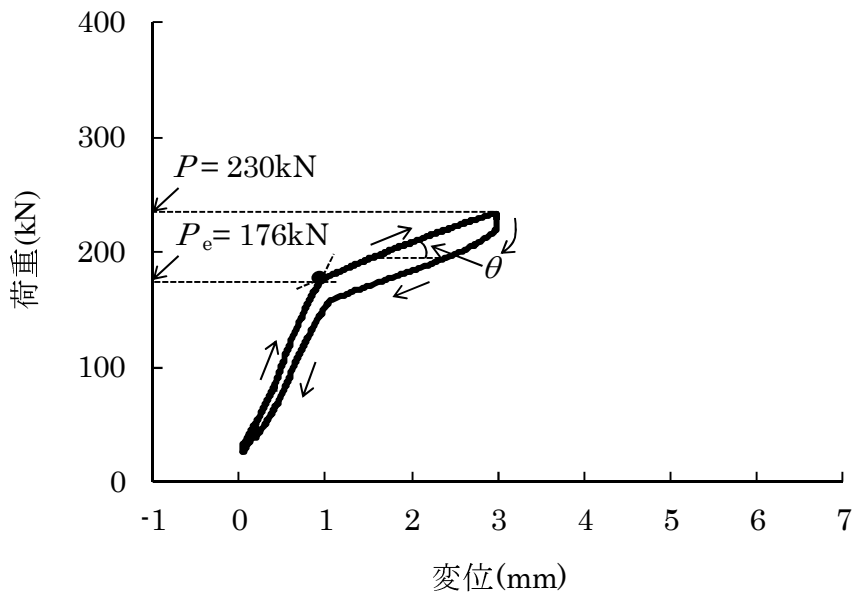


図-3.12 荷重－変位曲線（No.2の本載荷）

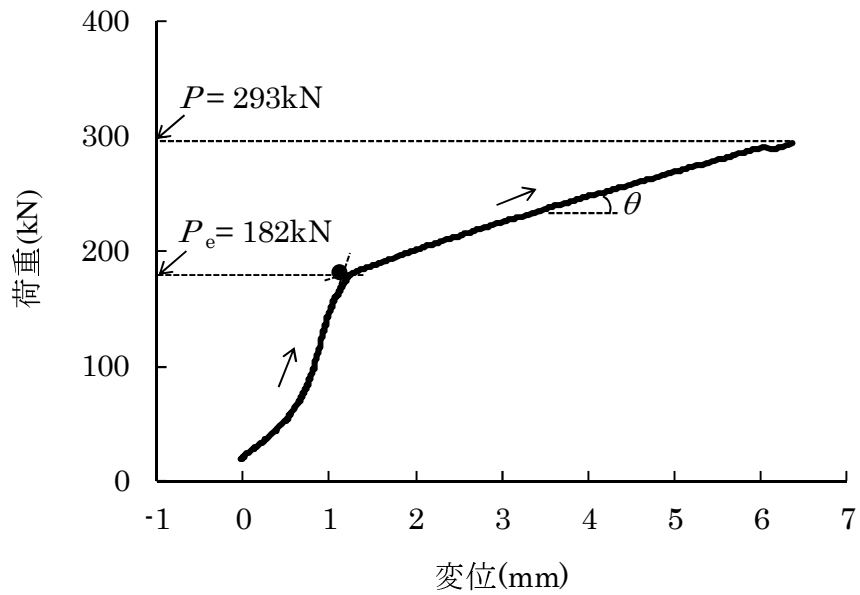


図-3.13 荷重－変位曲線（No.3 の予備載荷）

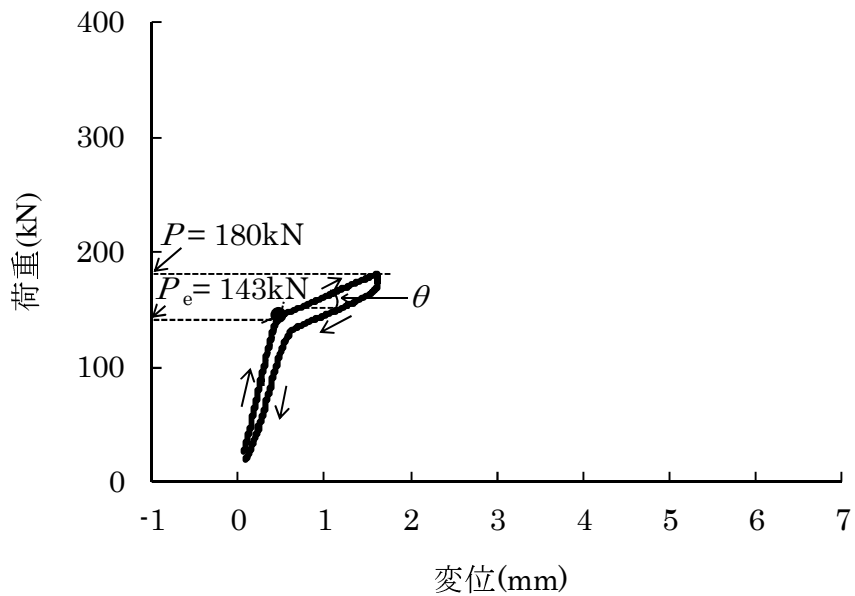


図-3.14 荷重－変位曲線（No.4 の本載荷）

表-3.2 リフトオフ試験結果

アンカーNo	No.1	No.2	No.3	No.4
残存引張り力 P_e	176kN	176kN	182kN	143kN
P_e/T_d	40%	40%	42%	33%
$\tan\theta$	30.6 kN/mm	28.2 kN/mm	24.9 kN/mm	32.4 kN/mm
$\tan\theta$ 評価	○	○	○	×

※設計アンカー力：438kN、設計上のアンカー自由長の伸び率:25.3kN/mm。

※○： $\tan\theta$ が $23.0 \leq \tan\theta \leq 31.6$ の範囲内の場合。

※×： $\tan\theta$ が $23.0 \leq \tan\theta \leq 31.6$ の範囲外の場合。

これらアンカーの残存引張り力が設計アンカー力より低い要因として、定着時緊張力を設計アンカー力よりも低くし、土圧が引張り材に作用したときにアンカーが機能を発揮する待ち受け型アンカーとして施工されていたことが考えられる。また、本アンカーの残存引張り力がばらつく要因として、定着部の押し出しや引張り材の腐食進行などが考えられるものの、定着部の押し出しについては、長期にわたり擁壁やその周辺に変状が見られなかったことから、その可能性は低いといえる。そこで、引張り材の腐食進行による劣化について検討を行ってみる。各アンカーにおける引張り材の健全性を示す $\tan\theta$ は、No.1 で 30.6 kN/mm、No.2 で 28.2 kN/mm、No.3 で 24.9 kN/mm、No.4 で 32.4 kN/mm と、値は No.4、No.1、No.2、No.3 の順に小さくなり、「維持管理マニュアル」⁸⁾による基準では No.4 を除いて健全と判定される。 $\tan\theta_0$ は $E \cdot A/l_f$ で示されることから、仮に引張り材の弾性係数 E とアンカー自由長 l_f に変化が無く、腐食により有効断面積 A が減少したと仮定すると $\tan\theta$ は小さな値を示すことから、 $\tan\theta$ が最も小さい値を示した No.3 は、4本のアンカーの中で最も腐食が進行していると考えられる。しかし、「維持管理マニュアル」⁸⁾に従う $\tan\theta$ を用いた健全性評価では、

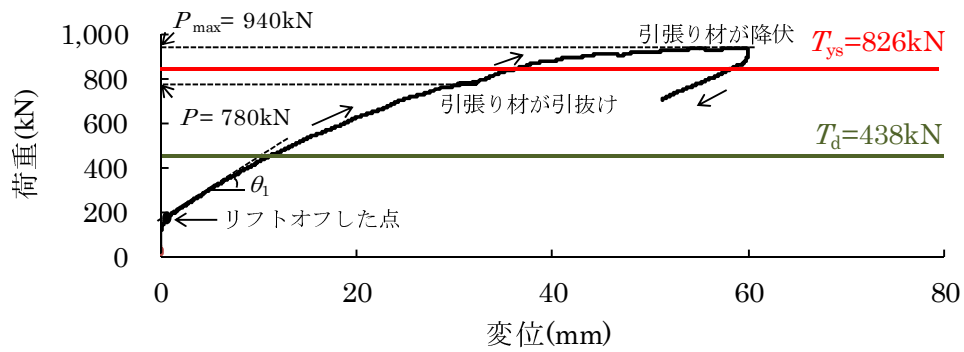


図-3.15 荷重－変位曲線 (No.1)

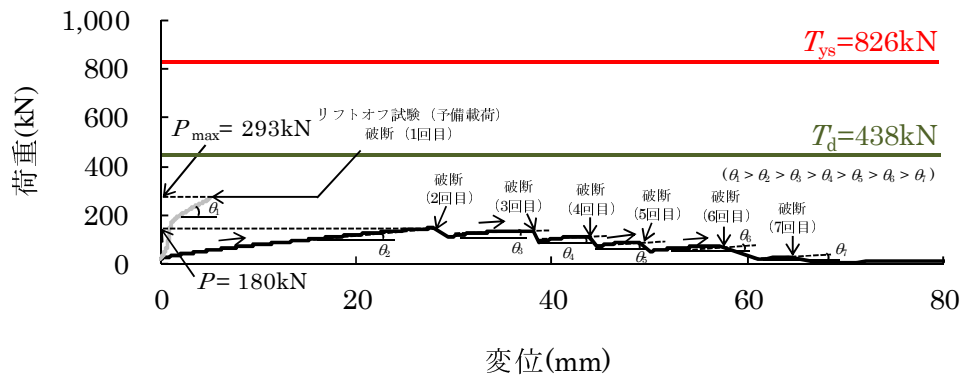


図-3.16 荷重－変位曲線 (No.3)

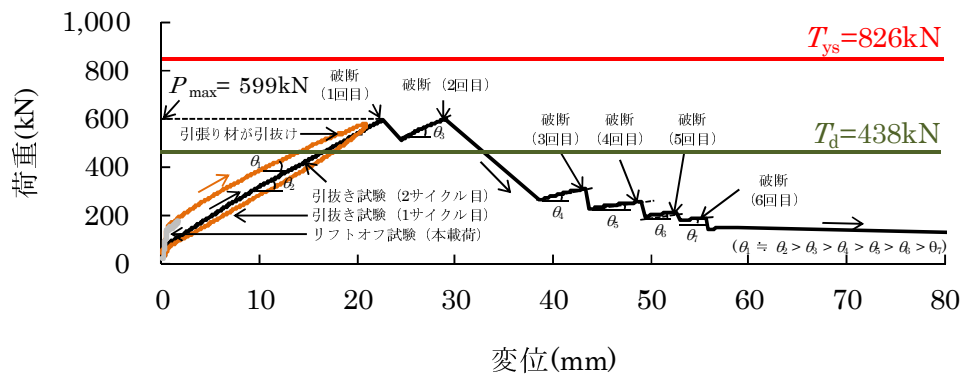


図-3.17 荷重－変位曲線 (No.4)

No.3 は健全とされ実態とは異なる結果となっている。

b) 引抜き試験

リフトオフ試験の結果を基に $\tan\theta$ を用いた「維持管理マニュアル」⁸⁾の健全性評価において、比較的健全と判定された No.1 と No.3、および健全性評価において異常と判定された No.4 を対象として、アンカー材料の健全性を比較するため引抜き試験を実施した。また、No.2 については、地山内でアンカーが緊張されている状態で掘り起こし調査を実施し、アンカー材料の確認を行った。

図-3.15～図-3.17 は、引抜き試験により得られた No.1、No.3、No.4 の荷重－変位曲線であり、表-3.3 に引抜き試験の結果、表-3.4 に荷重－変位曲線の勾配を示す。No.1 は 780kN 付近で引張り材の引抜けが発生し、降伏荷重である 826kN を越える 940kN で引張り材の降伏が見られた。No.3 は、180kN で素線が破断し、さらに載荷を継続したところ計 7 回の破断を繰り返し、最終的に荷重が 0kN となった。No.4 は、1 サイクル目の載荷において 500kN 付近で引張り材の引抜けが発生したため、580kN まで載荷した後除荷を行

表-3.3 引抜き試験結果

アンカーNo	No.1	No.3	No.4
引抜き荷重 P_{\max}	780kN	280kN	599kN
P_{\max}/T_{ys}	94%	64%	73%
$\tan\theta_1$	29.1 kN/mm	24.9 kN/mm	25.0 kN/mm
$\tan\theta$	30.6 kN/mm	24.9 kN/mm	32.4 kN/mm
健全性の判定	○	×	△

※ テンドンの降伏荷重 (T_{ys}) : 826kN。

※ 設計アンカー力 (T_d) : 438kN。

※ ○ : $P_{\max} \geq T_{ys}$ 、△ : $T_d \leq P_{\max} < T_{ys}$ 、× : $P_{\max} < T_d$ 。

※ No.3 の P_{\max} 、 θ_1 はリフトオフ試験の予備載荷から求めた P_{\max} 、 θ としている。

表-3.4 荷重－変位曲線の勾配

アンカーNo	No.1	No.3	No.4
$\tan \theta_1$	29.1 kN/mm	24.9 kN/mm	25.0 kN/mm
$\tan \theta_2$	—	9.5 kN/mm	25.7 kN/mm
$\tan \theta_3$	—	7.2 kN/mm	20.1 kN/mm
$\tan \theta_4$	—	5.1 kN/mm	10.5 kN/mm
$\tan \theta_5$	—	3.2 kN/mm	6.7 kN/mm
$\tan \theta_6$	—	2.1 kN/mm	4.6 kN/mm
$\tan \theta_7$	—	1.5 kN/mm	1.8 kN/mm

った。そして、2 サイクル目の載荷を行ったところ、599kN で素線が破断し、さらに載荷を継続したところ計 6 回の破断を繰り返し、最終的に 100kN 程度の荷重を示した。引抜き試験において素線の破断が見られた No.3、No.4 のアンカーでは、破断する毎に約 40kN ～300kN の荷重低下が認められており、設計上の素線 1 本当りの破断荷重が約 20kN であることを考慮すると、一度に 2 本～15 本の素線が切断されたことが推定される。引抜き試験により引張り材の破断が発生した No.3、No.4 の荷重－変位曲線を見ると、破断を繰り返すに従い直線勾配が緩くなる傾向が認められた。これらの引抜き試験の結果から、No.1、No.4、No.3 の順に健全性が低下していることが考えられた。

c) 試験結果の検討

図-3.18 は、一例としてリフトオフし直線勾配の変化が一定となる前の a 点を試験最大荷重とした場合の直線勾配 $\tan \theta_a$ と、一定となった後の b 点を試験最大荷重とした場合の直線勾配 $\tan \theta_b$ を比較したものである。この場合、 $\tan \theta_a$ の方が $\tan \theta_b$ より大きい値を示すことから、 $\tan \theta$ の捉え方によっては健全性評価の結果が異なることが考えられる。表-3.2 より No.1～No.4 のリフトオフ試験によ

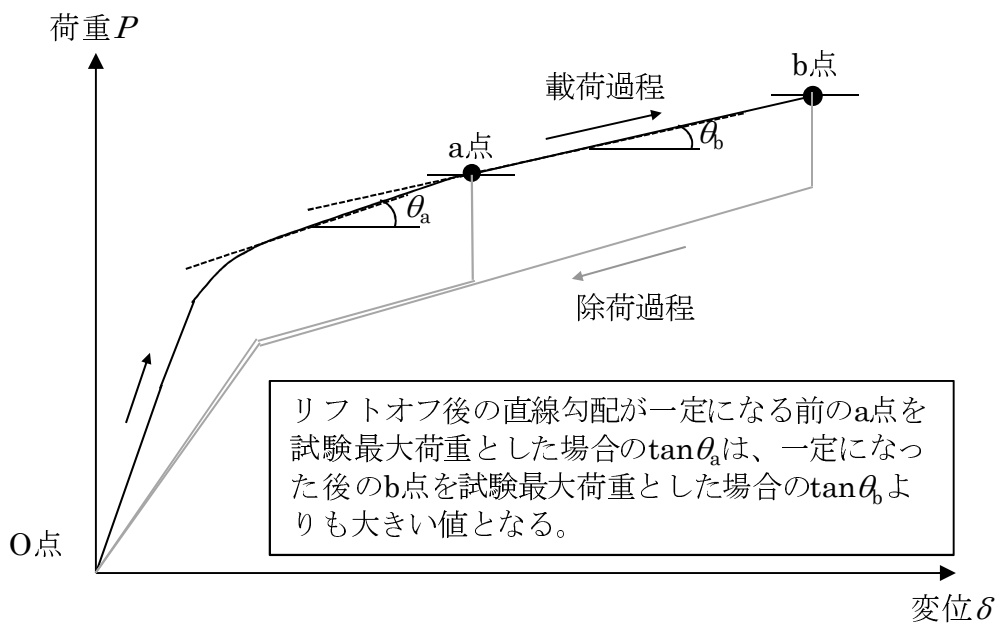


図-3.18 試験最大荷重が異なる場合の $\tan\theta$ の違い

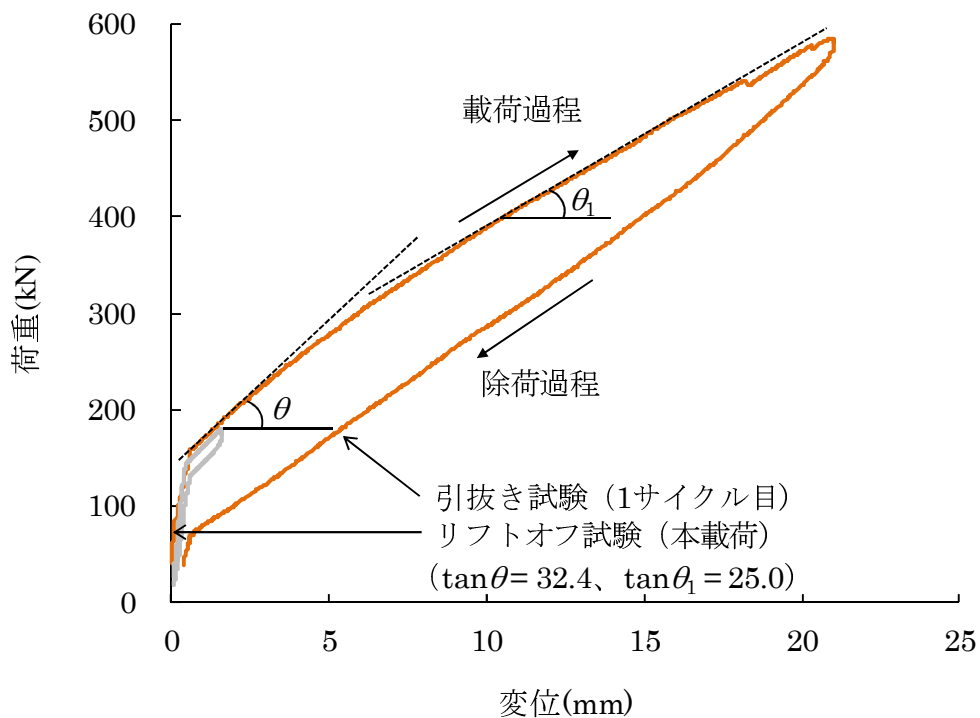


図-3.19 リフトオフ試験と引抜き試験の $\tan\theta$ の違い (No.4)

り得られた各アンカーの $\tan\theta$ を比較すると、No.4、No.1、No.2、No.3 の順に値が小さくなっている。No.1、No.2、No.3 については、200kN を超えるまで載荷した直線勾配を基に $\tan\theta$ を求めているのに対して、No.4 は 180kN 程度までの載荷による直線勾配から $\tan\theta$ を求めている。図-3.19 より No.4 の 1 サイクル目の引抜き試験の結果では、リフトオフし引抜けに至るまで直線勾配 $\tan\theta_1$ は 25.0 kN/mm であるのに対し、160kN 程度の載荷により求めた $\tan\theta$ は 32.4 kN/mm であった。No.4 は、引抜き試験の結果から設計アンカー力を越える機能は有しているものの降伏荷重よりも低い載荷荷重により鋼材の一部に破断の発生が見られた。このため、No.4 は引張り材に軽微な機能低下が発生していることが考えられる。リフトオフ直後の直線勾配の変化は、こうした軽微な機能低下の影響を捉える性質を持っていると考えられ、載荷荷重が増大するほど実際のアンカー材料が示す健全性に対応した直線勾配に近づくと考えられる。

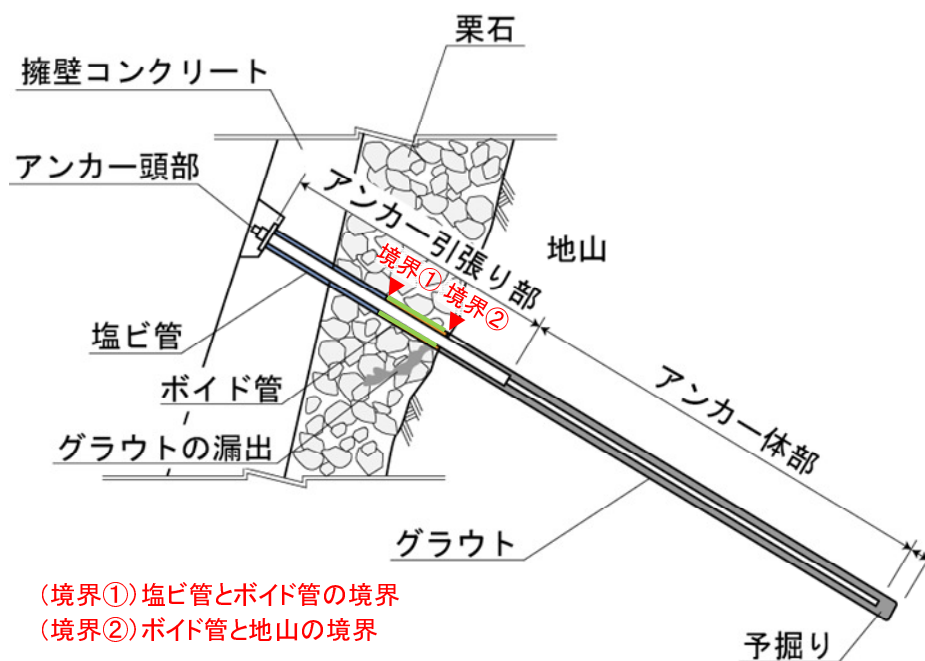


図-3.20 アンカーの施工状況

3) アンカー掘り起こし調査

No.1～No.4のアンカーについて、施工状況や引張り材などの腐食状況について確認するために掘り起こし調査を行った。一例として、リフトオフ試験および引抜き試験から健全な状態を維持できていると考えられた No.1 のアンカーの施工状況を図-3.20 に示す。アンカーは、擁壁に頭部が定着された構造となっており、擁壁背面の地山の中に詰められた厚さ 1.5m～2.0m の裏込めの栗石部を通過していた。裏込めの栗石は粒径 10cm～20cm 程度で、余掘り部の引張り材は塩ビ管とボイド管で被覆されて地山部へと繋がっており、地山部の削孔された孔にはグラウトが充填されていた。

図-3.21～図-3.24 は、No.1～No.4 のアンカーにおいて掘り起こしにより確認された擁壁背面部、アンカー自由長とアンカー定着長の境界部、アンカー定着長の先端部の状況を示したものである。まず、擁壁背面部について見てみると、No.1 は、引張り材は塩ビ管およびボイド管により保護されており、引張り材には腐食が見られるものの断面欠損は見られなかった。これに対し、No.2、No.3、No.4 にはボイド管がなく、引張り材が剥き出しとなっていた。これは、施工時に栗石を投入する際にボイド管が破損し亡失した可能性が考えられる。また、No.3、No.4 で見られた引張り材の破断は、引張り材が防護されていない範囲において発生していることが確認された。また、No.4 の塩ビ管は削孔された地山に埋設されていたことから、引張り材の挿入時に押し込まれたものと考えられる。アンカー自由長のシースについては、引張り材が防護されている No.1 では健全な状態であったが、引張り材が防護されていない No.2、No.3、No.4 では腐食進行などにより部分的に消失している状態が確認された。

次にアンカー自由長とアンカー体長の境界部について見てみると、いずれのアンカーとも概ね設計された位置にアンカー自由長と

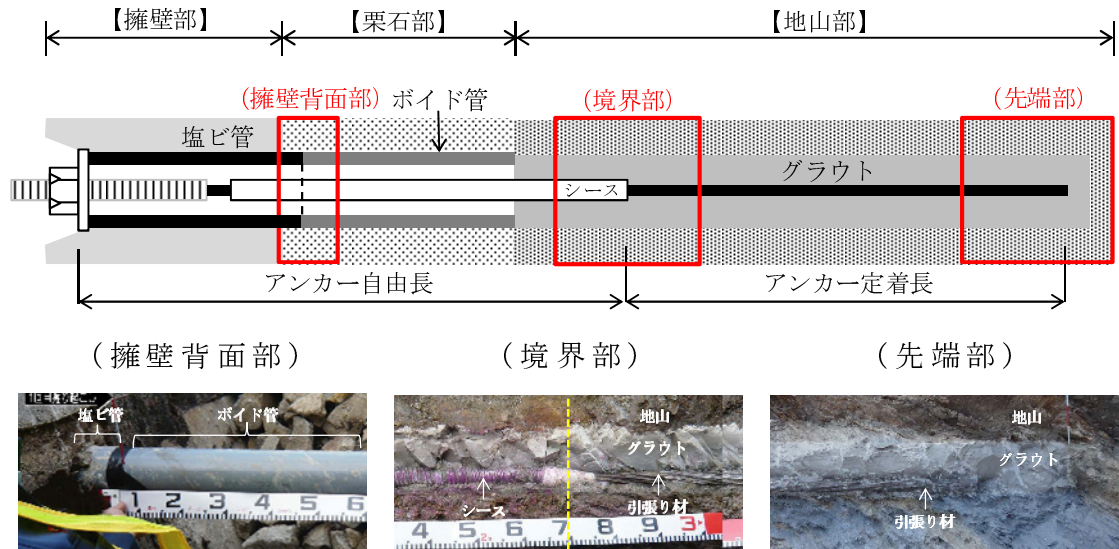


図-3.21 地山内のアンカーの設置状況 (No.1)

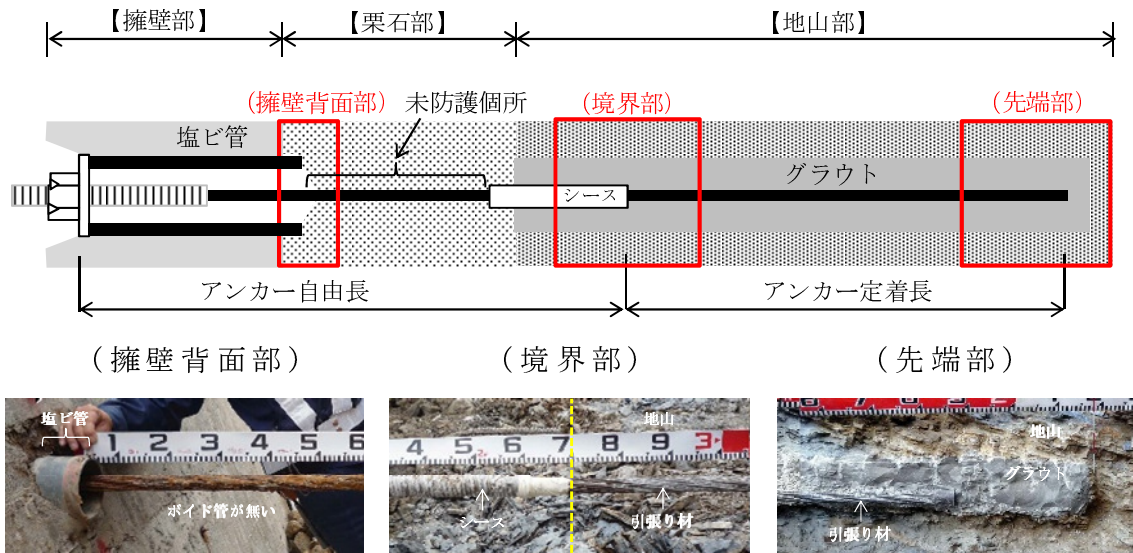


図-3.22 地山内のアンカーの設置状況 (No.2)

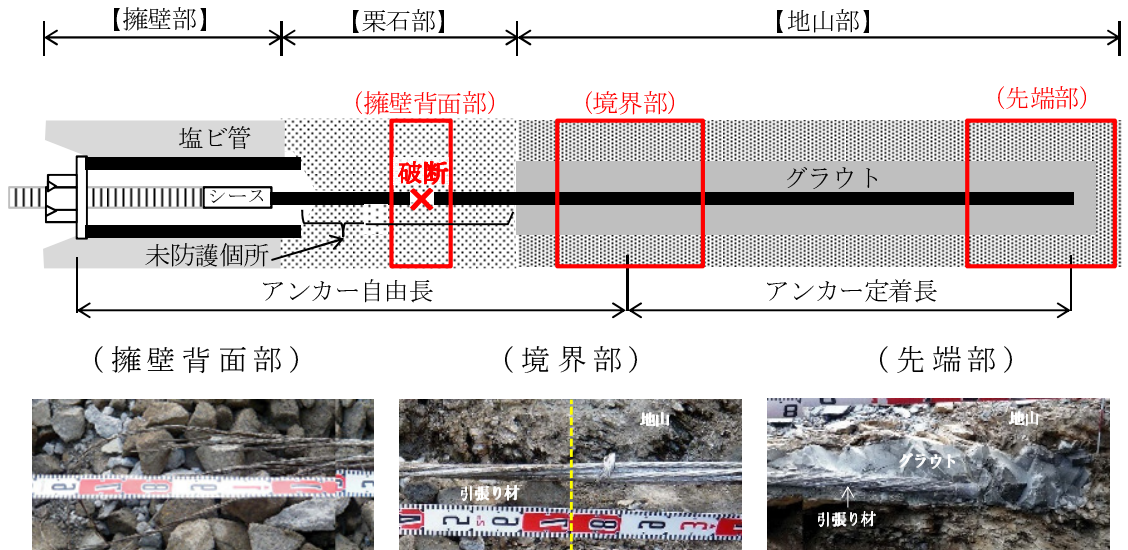


図-3.23 地山内のアンカーの設置状況 (No.3)

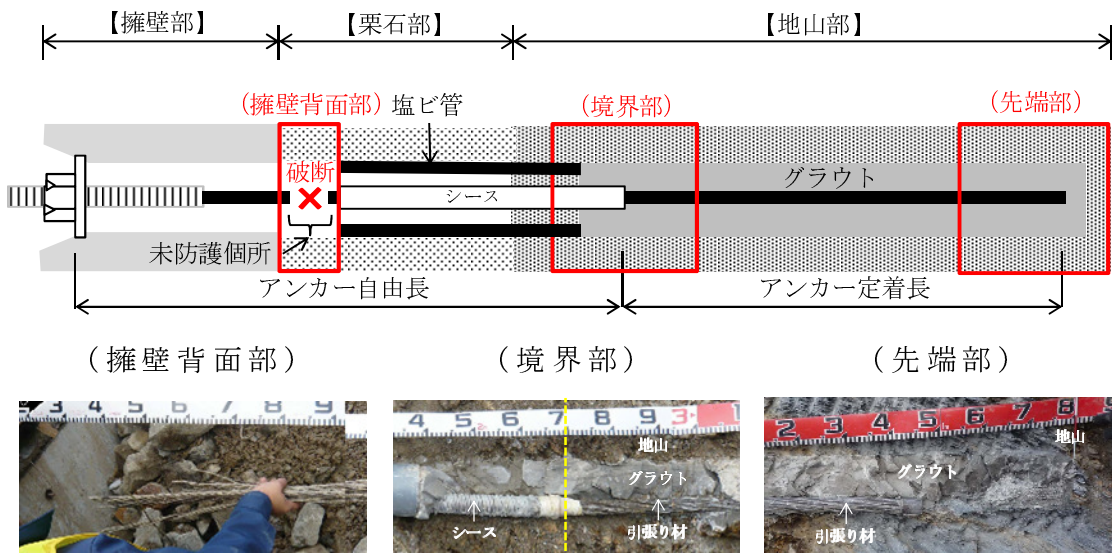


図-3.24 地山内のアンカーの設置状況 (No.4)

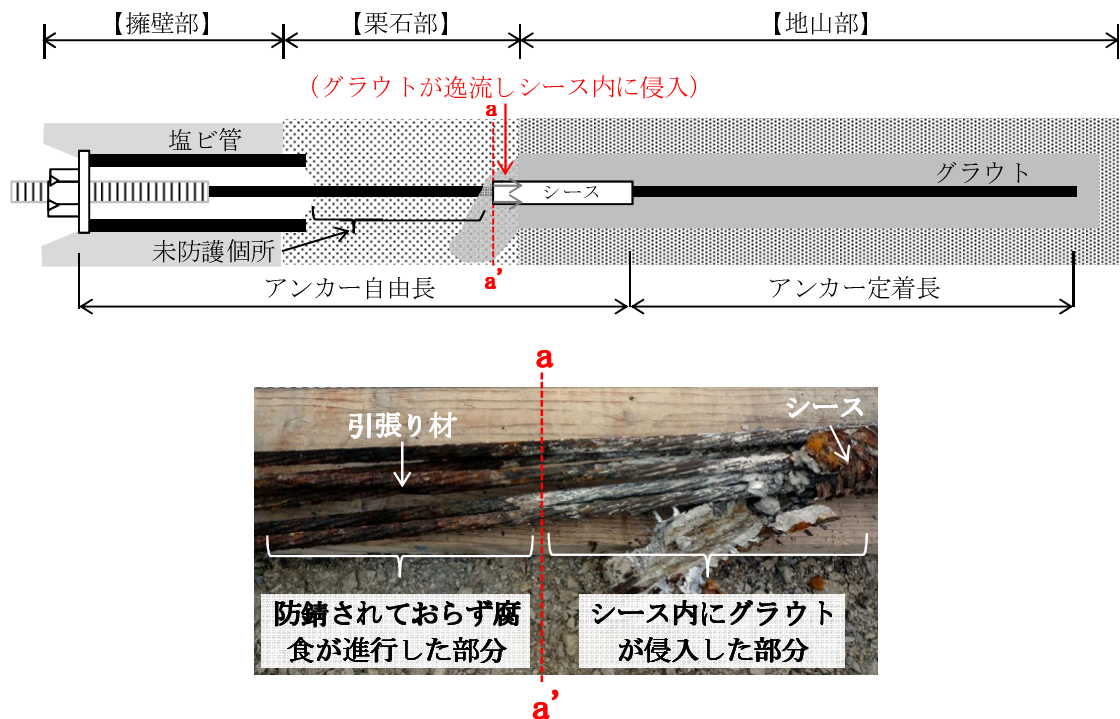


図-3.25 グラウトの亀裂を原因とする引張り材の腐食(No.2)

アンカー定着長の境界を確認することができた。図-3.25 は No.2 のアンカー自由長において、グラウトがシース内に侵入していた部分を示したものである。この部分においては、アンカー自由長の引張り材の機能がグラウトによる拘束により阻害されていたことが考えられる。

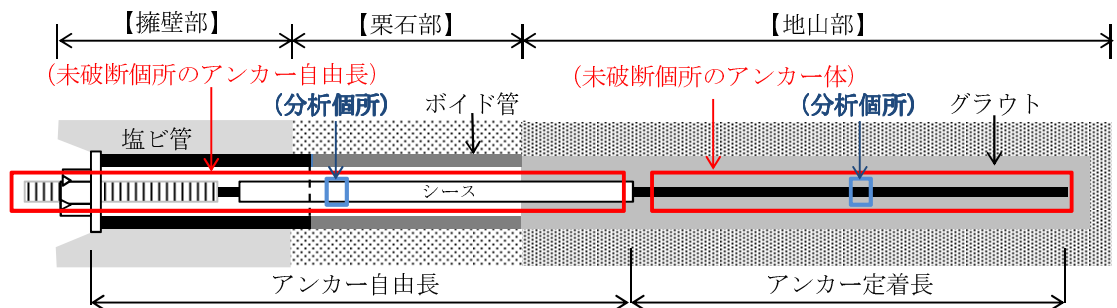
最後にアンカー定着長の先端部について見てみると、いずれのアンカーもグラウトが確実に充填されていた。No.2 ではグラウトの亀裂からの水の浸入によると考えられる鋼材の軽微な腐食が見られたものの、アンカーの機能に影響するような顕著な腐食ではなかった。

以上の調査結果から、これらアンカーにおいて残存引張り力が設計アンカー力より低い範囲でばらつく要因は、定着部の押し出しに

よるものではなく、腐食などを原因とするアンカー材料の健全性の低下によるものと考えられる。

4) 鋼材検査

アンカーの腐食に伴う断面欠損や金属組織変化の実態を確認するため、回収した引張り材について外観検査を行った後、室内試験により鋼材検査を行った。検査は、図-3.26～図-3.28に示す比較的健全な状態にあり破断していない No.1 のアンカー自由長とアンカー体を基準とし、腐食進行が見られるものの破断していない No.2 のアンカー自由長と、破断した No.3 のアンカー自由長の状態を比較する方法により行った。検査では、これら4本のアンカーの引張り材の一部（図-3.26～図-3.28に示す青枠部）について、外観検査、金属組織調査、化学成分調査を実施し、引張り材の健全性に関する詳細な分析を行った。



(a)アンカー自由長



(b)アンカー体

図-3.26 鋼材検査の対象としたアンカー材 (No.1)

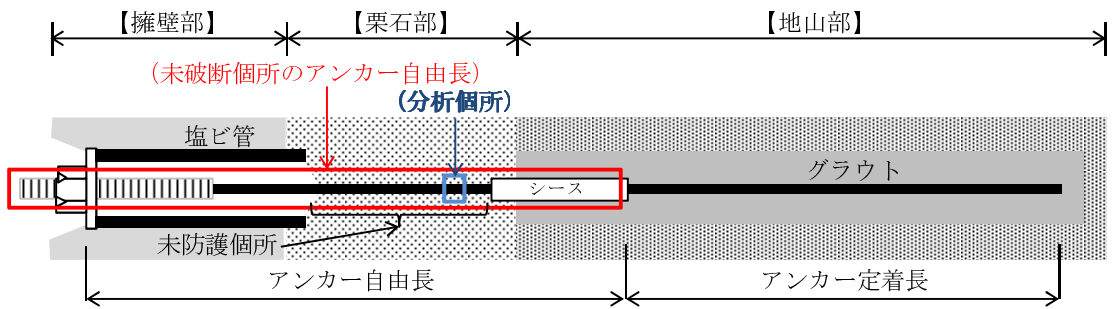


図-3.27 鋼材検査の対象としたアンカー材 (No.2)

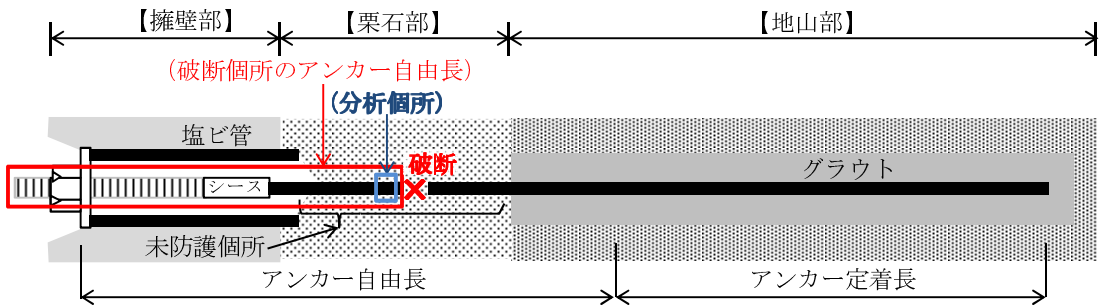
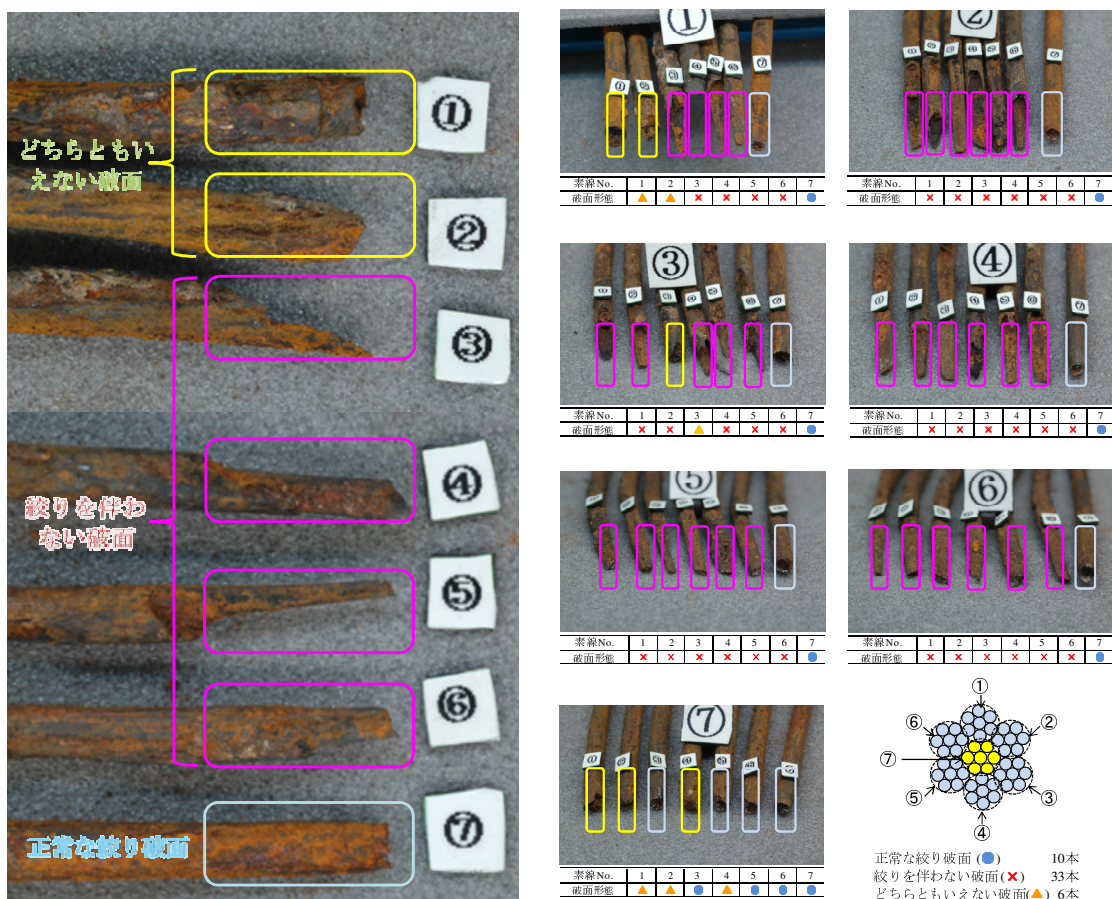


図-3.28 鋼材検査の対象としたアンカー材 (No.3)

a) 外観検査

No.1 のアンカー自由長は、全長にわたってグラウトが付着しており、部分的に軽微な腐食の発生が見られた。また、アンカー一体においては全長にわたりグラウトが付着しており腐食は認められなかった。これに対し No.2 は、グラウトの付着部において腐食が認められるものの、全面にわたって断面欠損に発展する可能性のある顕著な腐食の発生を確認することができた。しかし、グラウトの未付着部に比べると腐食の程度は小さかった。予備載荷において破断が発生した No.3 の破断部（図-3.28 の青枠部）の PC 鋼より線の状



(a) PC 鋼より線

(b) PC 鋼よりの素線

図-3.29 PC 鋼より線 (No.3)

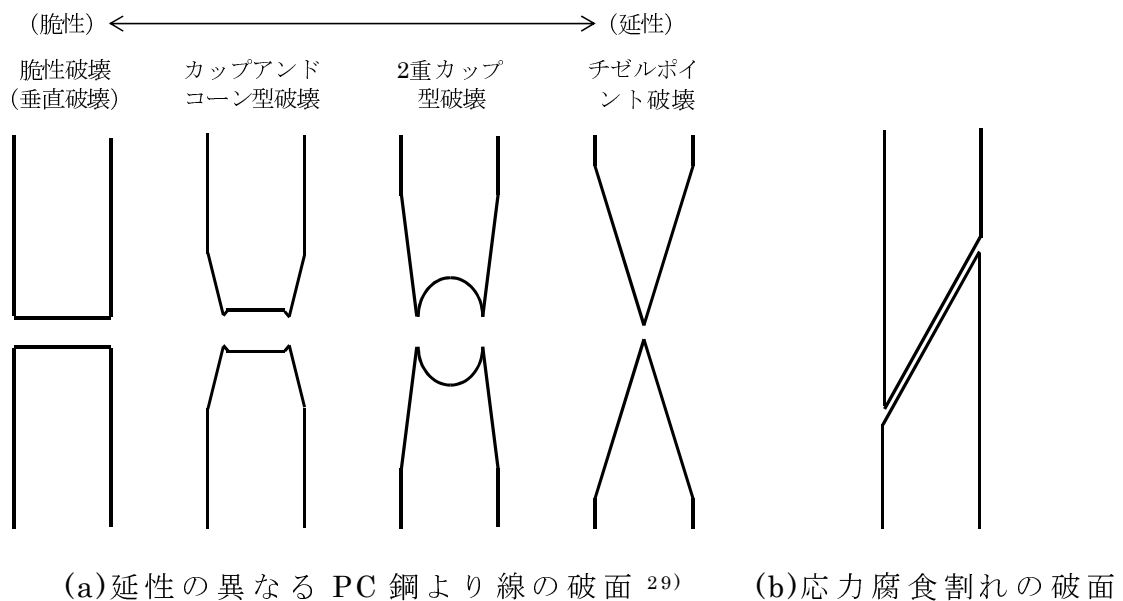


図-3.30 破断の形態

況を図-3.29 に示す。各素線は全長にわたり腐食が進行し、顕著な断面欠損が認められた。図-3.30 に延性の異なる PC 鋼より線の破面と応力腐食割れの破面を示す ²⁹⁾。鋼材が正常な場合、一般的に見られるのがカップアンドコーン型破壊であり、破面は絞りを伴う形状となる。これに対し、応力腐食割れの破面は絞りを伴わない形状となる。図-3.29(a)に示す No.3 の 7 本の PC 鋼より線の破断は、中心線の 1 本 (図-3.29(a)⑦) は正常な絞り破面であるのに対し、その周囲の 4 本 (図-3.29(a)③～⑥) は絞りを伴わない破面となり、残りの 2 本 (図-3.29(a)①・②) は明確に判定できない破面であった。図-3.29(b)には No.3 の素線 49 本の外観を示す。各素線の破面の観察より正常な絞り破面が 10 本、絞りを伴わない破面が 33 本、どちらともいえない破面が 6 本であった。佐藤ら ¹⁶⁾は、防食機能が改善される前の複数のアンカーを調査し、PC 鋼より線の健全性は腐食により低下することを述べている。本調査結果からも、PC 鋼より線の腐食は外周部分から進行し、これにより健全性が低

下していくことが確認できた。

b) 引張り試験

腐食が顕著な No.3 の素線の観察結果から、PC 鋼より線は空気や水と直接接触する外周部分から腐食が始まり、これらが進行することにより中心線にまで腐食が進行すると考えられる。そこで、No.1～No.3 のアンカーについて腐食進行が最も遅いと考えられる中心線の PC 鋼より線を対象として、引張り試験により破断荷重の確認を行った。また、リフトオフ試験で引張り材に破断が発生した

表-3.5 引張り試験結果

アンカーNo	部位	破断荷重 (kN)	評価
No.1	アンカー自由長の中心線	143	○
	アンカー体の中心線	143	○
No.2	アンカー自由長の中心線	129	×
No.3	アンカー自由長の側線	95	×
	アンカー自由長の中心線	124	×

※JIS 破断荷重は 138kN。

※○：破断荷重が 138kN 以上の場合、×：破断荷重が 138kN 未満の場合。

表-3.6 No.1 のアンカー自由長を基準とした断面積比

アンカー No	部位	断面積比 (%)
No.1	アンカー自由長	100
	アンカー体	99
No.2	アンカー自由長	95
No.3	アンカー自由長	85

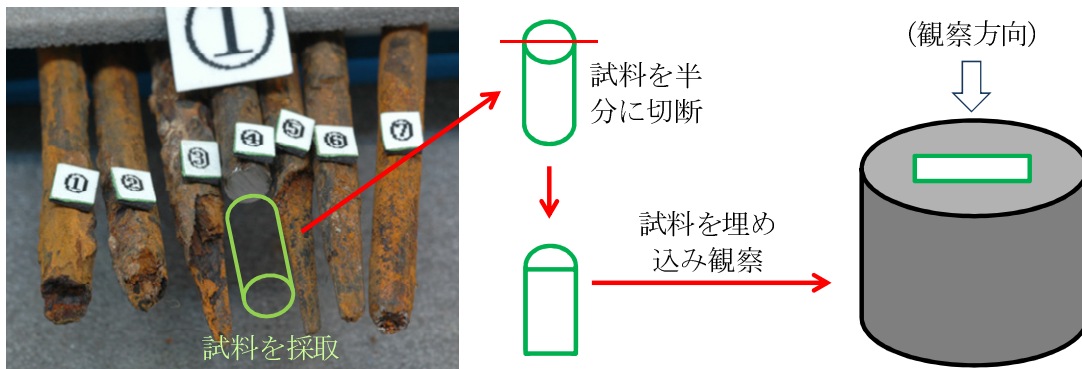
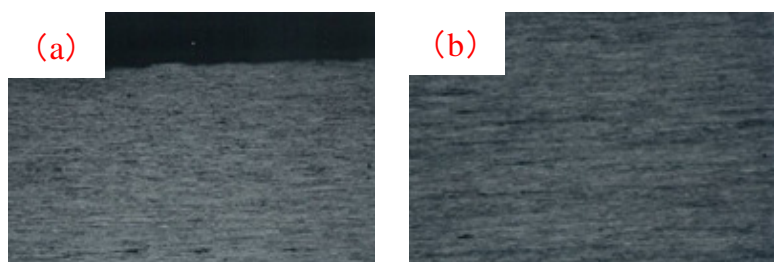
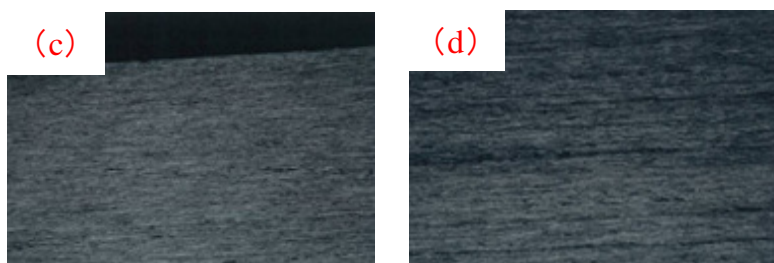


図-3.31 試料の観察方法



(a)アンカー自由長の中心部



(b)アンカー体の中心部

図-3.32 組織観察結果 (No.1)

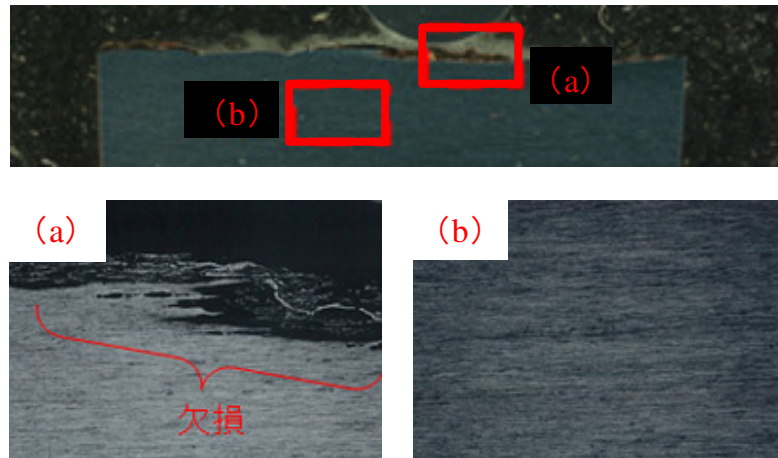


図-3.33 組織観察結果 (No.2)

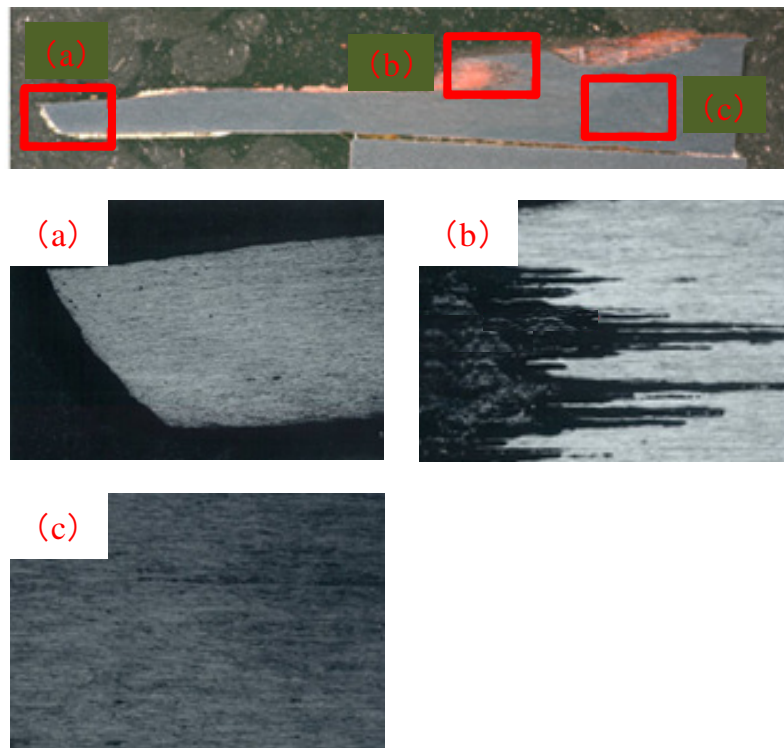


図-3.34 組織観察結果 (No.3)

No.3 については、7本で構成される PC 鋼より線の側線 1 本について破断荷重の確認を行った。なお、引張り試験は、図-3.26～図-3.28 の青枠部で示した部分の材料について実施した。表-3.5 に試験結果

を示す。アンカーが比較的健全な状態にある No.1 については、アンカー自由長の中心線およびアンカー体の中心線の破断荷重は JIS G 3536 の規格値である 138kN を満足する 143kN となっている。これに対し、No.2、No.3 のアンカー自由長の中心線の破断荷重は 129kN および 124kN と JIS 規格値を下回っていた。また、No.3 のアンカー自由長側線の PC 鋼より線の破断荷重は 95kN と大きく低下しており、外周部から中心部に腐食が進行し引張り荷重が低下した状態が確認された。

各引張り材において腐食による断面積の減少が考えられることから、この減少の影響について評価するため、No.1 のアンカー自由長の引張り材の断面積を基準として、各引張り材の断面積比を求めたものを表-3.6 に示す。No.2 では約 5%、No.3 では約 15%が腐食により断面欠損しており、No.3 において腐食進行が著しいことが確認できる。

c) 金属組織調査

アンカーとしての機能低下が見られる No.2 や No.3 については、腐食等により鋼材の金属組織に異常が発生していることが考えられる。そこで、No.1～No.3 のアンカーにおいて図-3.26～図-3.28 に示す青枠部の個所について金属組織調査を行った。金属組織調査は、図-3.31 に示すように、採取した素線を半分に切断し断面の金属組織を観察する方法により行った。図-3.32～図-3.34 に金属組織調査結果を示す。図-3.32 に示す No.1 は、アンカー自由長の中心部、アンカー体の中心部とも正常な鋼材が示すパーライト組織が見られ金属組織的に異常は認められなかった。また、図-3.33 に示す No.2 のアンカー自由長のグラウト未付着部や、図-3.34 に示す No.3 のアンカー自由長の破断部近傍の金属組織について、腐食が原因と考えられる欠損は認められるものの、パーライト組織を確認することができ金属組織に異常は認められなかった。この結果から、本調

査の対象としたアンカーは、腐食による断面欠損が発生しているものの、金属組織に大きな異常は発生していないと考えられる。

d) 硬度測定及び化学成分分析

金属組織観察で用いたサンプルを対象に、金属組織的に異常が無いことを裏付けるために、ビッカース硬さ試験（JIS Z 2244）による硬度測定、および化学成分分析（JIS G 3502）を実施した。このうち硬度測定は、図-3.32～図-3.34に示す No.1 の a～d、No.2 の a・b、No.3 の a・b の部分について行った。

硬度測定の結果については、表-3.7に示すように全サンプルとも 511Hv～525Hv とほぼ同じ値を示した。良好な PC 鋼より線のビッカース硬さは、490Hv 以上の値を示すことから、硬度に大きな異常は認められないと考えられた。また、化学成分分析の結果については、表-3.8に示すように全サンプルとも JIS 規格を満足し異常は認められなかった。

5) 調査対象アンカーの健全性評価

表-3.9に各アンカーの検討結果をとりまとめたものを示す。リフトオフ試験により得られた $\tan\theta$ や引抜き試験の引張り荷重などが

表-3.7 硬度試験結果

No	測定部位	測定位置	硬度(Hv)	評価
No.1	アンカー自由長	a	519	○
		b	514	○
	アンカー体	c	513	○
		d	517	○
No.2	アンカー自由長 (グラウト未付着部)	a	525	○
		b	514	○
No.3	アンカー自由長 (破断部近傍)	a	511	○
		b	516	○

表-3.8 化学成分分析結果

No	測定部位	(JIS 規格)						評価
		C	Si	Mn	P	S	Cu	
		0.75 ~ 0.80	0.12 ~ 0.32	0.60 ~ 0.90	0.025 以下	0.025 以下	0.20 以下	
No.1	アンカー自由長	0.77	0.26	0.84	0.01	0.01	0.02	○
	アンカー体	0.77	0.26	0.82	0.01	0.01	0.02	○
No.2	アンカー自由長	0.76	0.25	0.83	0.01	0.01	0.03	○
No.3	アンカー自由長	0.77	0.25	0.83	0.01	0.01	0.02	○

表-3.9 調査対象アンカーの健全性評価

No	頭部 調査	リフトオフ 試験		引 抜 き 試 験	引 張 り 試 験	断面 欠損 率 (%)	硬 度 試 験	化学 成分 分析	総合評価	
		P_e/T_d (%)	$\tan\theta$ 評価						健全性	順位
No.1	健全	40	○	○	○	100	○	○	健全	1
No.2	健全	40	○	—	×	95	○	○	不健全	3
No.3	健全	42	○	×	×	85	○	○	不健全	4
No.4	健全	33	×	△	—	—	—	—	健全	2

※リフトオフ試験において、○： $23.0 \leq \tan\theta \leq 31.6$ の範囲内の場合、×： $\tan\theta$ が $23.0 \leq \tan\theta \leq 31.6$ の範囲外の場合。

※No.3 はリフトオフ試験の予備载荷で引張り材の破断が発生。

※引抜き試験において、○： $P_{max} \geq T_{ys}$ 、△： $T_d \leq P_{max} < T_{ys}$ 、×： $P_{max} < T_d$ 。

※断面欠損率(%)は No.1 を基準として算出。

※引張り試験、硬度試験、化学成分分析において、○：試験結果が基準を満たす、

×：試験結果が基準を満たさない。

らアンカーの健全性を推定し、掘り起こし調査や鋼材検査の結果からこれらの健全性低下の要因が、金属組織の異常を伴わない腐食を要因とする引張り材の断面欠損によることが判明した。このうちNo.1は、引張り材がシースやグラウトにより確実に防護されており、比較的健全な状態を維持できていると考えられた。No.2は、グラウト付着部と未付着部が存在し、引張り材が防護されていないアンカー自由長では全面にわたる腐食進行から、断面欠損に発展している部分が認められた。No.3は、引張り材が防護されていないアンカー自由長において、全面にわたり腐食が進行し断面欠損の発生が認められた。一連の調査結果を総合すると、No.1、No.4、No.2、No.3の順に健全性が低下していると考えられる。

3.4 まとめ

防食機能が改善される前のアンカーを対象として実施したリフトオフ試験や引抜き試験、掘り起こし調査の結果を踏まえ、腐食の発生したアンカーの健全性評価における知見を以下に示す。

- (1)アンカーの健全性の低下は、アンカー頭部に明瞭な変状として現れないことがあり、外観調査のみでは健全性を適切に評価できないことがある。
- (2)リフトオフ試験における荷重－変位曲線において、リフトオフ直後の直線勾配は軽微な機能低下の影響を捉える性質を持っているとみられ、載荷荷重が増大するほどアンカー材料全体としての健全性を示す直線勾配に近づくと考えられる。
- (3)本調査において、「維持管理マニュアル」⁸⁾に示されている荷重－変位曲線の $\tan\theta$ を用いたアンカー機能の健全性評価を行ったところ、腐食による鋼材の断面欠損などの影響により実際の健全性と異なる評価結果となった。

- (4) リフトオフ試験の実施において、可能であれば少なくとも設計アンカー力を超えるまで載荷することにより、設計上必要とされる抑止力が維持できているか確認することができる。
- (5) グラウトの充填が不十分な個所や、引張り材が直接空気や水と接触するような部分においては、断面欠損が生じるほどの腐食が認められるものの、鋼材の金属組織や硬度、化学成分に異常は認められなかった。
- (6) リフトオフ試験や引抜き試験の結果、健全性の低いアンカーほど $\tan\theta$ が小さくなる傾向が確認され、これは腐食による引張り材の断面積の減少によるものと考えられる。

第4章 荷重計計測の問題点と改善策

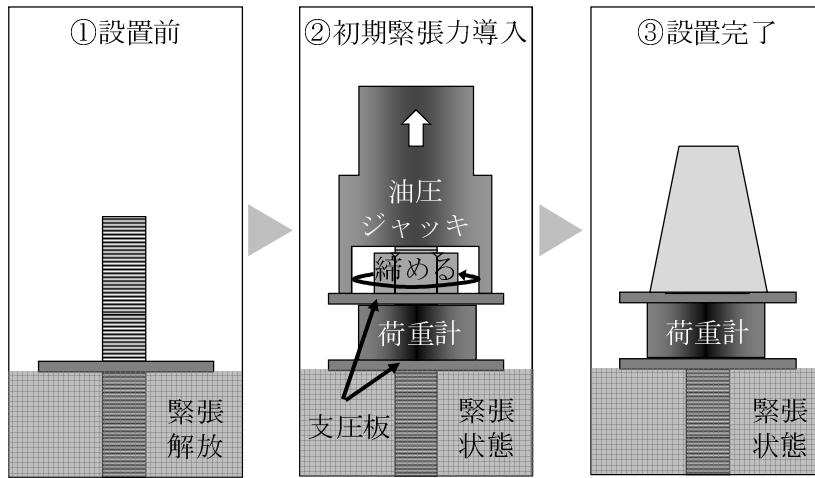
4.1 はじめに

残存引張り力の継続的な変化は、アンカーに設置された荷重計の計測値をモニタリングすることにより確認することができる。荷重計は、地中あるいは地表の変状を計測する孔内傾斜計や伸縮計などと同様に、一定期間の計測結果から法面の安定性などを評価するためのセンサーとして利用できると考えられる。しかしながら、施工時にアンカーに設置された荷重計は、機能低下した場合の機能検定や交換が困難といった課題があると同時に、法面の安定性に寄与しないような外気温の変化により計測値が変化することが考えられるものの⁶⁾、これらの問題について十分な検討は行われていない。

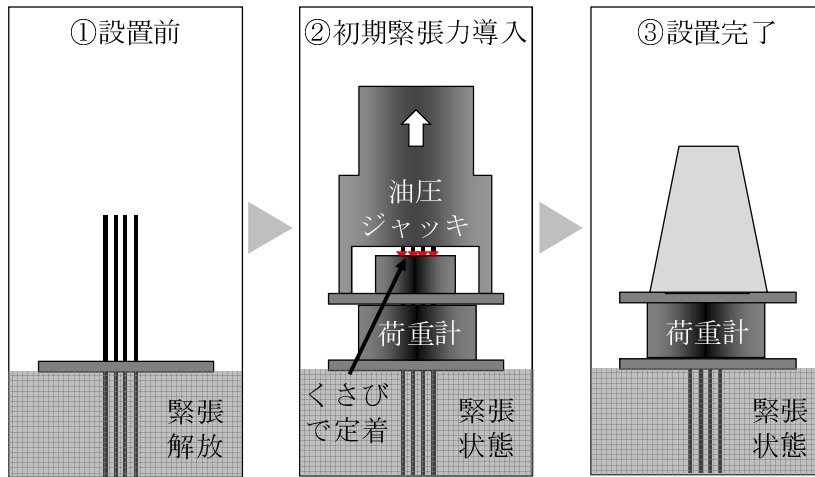
こうした課題に対し、本章ではアンカーに設置された荷重計の簡便な機能検定方法の提案、並びに既設アンカーに荷重計を着脱する新たな方法についての検討、および現地アンカーへの適用性について検証を行った。さらに、既設アンカーに設置された荷重計の計測値を基に、外気温の変化が荷重計の計測値に与える影響について検討を行い、その上で、アンカーを施工してから荷重計の計測値が一定の値に収束するまでの期間、および収束後における計測結果を基にした荷重計の計測値のモニタリング手法についての検討を行った。

4.2 荷重計によるアンカーの緊張力の計測

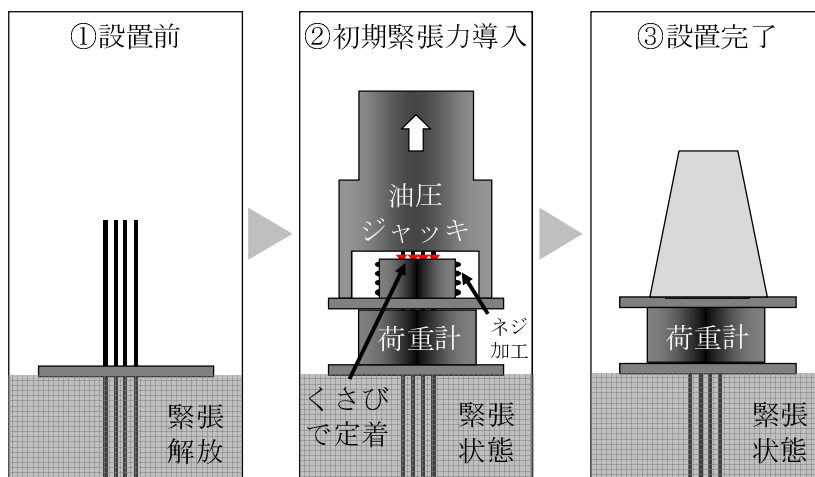
アンカーは、頭部構造によりくさび定着タイプ、ナット定着タイプ、くさびナット併用定着タイプに分類される。それぞれのタイプにおける、一般的な荷重計の設置方法を図-4.1に示す。図-4.1(a)



(a) ナット定着タイプ



(b) くさび定着タイプ



(c) くさびナット併用定着タイプ

図-4.1 荷重計の設置手順



図-4.2 磁歪式の荷重計（Mリング）

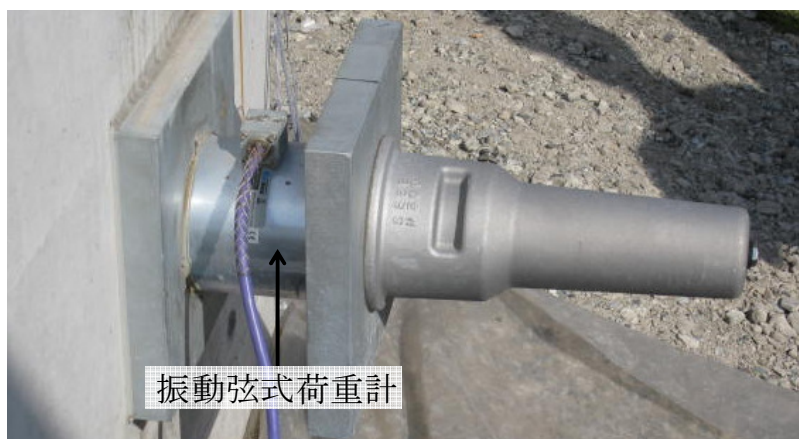


図-4.3 振動弦式の荷重計

に示すナット定着タイプの場合、まず緊張力を導入する前に2枚の支圧板の間に荷重計を設置し、定着具のナットを設置する。次に、油圧ジャッキを用いて初期緊張力を導入し、ナットを締め付けて定着させる。図-4.1(b)に示すくさび定着タイプ、図-4.1(c)に示すくさびナット併用定着タイプの場合も同様の方法により荷重計を設置するものの、これらのタイプのアンカーはアンカー頭部にくさびを食い込ませることにより引張り材を定着させる。いずれのアンカーも定着することにより、荷重計に緊張力が伝達された状態となり、

荷重計に計測器を接続して緊張力の計測を行うことが可能となる。ところで、このような設置構造をした既設アンカーに対し、荷重計を交換したり新規に設置しようとする場合、緊張力を一旦解放し荷重計を設置した上で再緊張させる必要があるため、大掛りな作業が必要となる³⁰⁾。高速道路のアンカーの場合、歪ゲージ式の荷重計が設置されるのが一般的であるが、急峻斜面等で長期にわたり頻繁に荷重計の計測値を確認する必要がある場合には、図-4.2に示す長期耐久性に優れた磁歪式のMリングセンサー（以下、Mリング）³¹⁾が採用されることがある。Mリングは緊張力の作用による荷重計の歪の変化を捉えて残存引張り力を評価するもので、Mリングの外周に設置された8箇所の歪を専用の計測器により計測し、その平均値を残存引張り力として評価するものである。これ以外にも、長期耐久性に優れた荷重計として、図-4.3に示すような、緊張力の変化に応じてワイヤの固有振動が変化するしくみを利用した振動弦式の荷重計なども存在する。

4.3 既設アンカーに設置された荷重計の機能検定方法

高速道路法面を対象として既設アンカーに設置された荷重計の機能検定方法について検討を行った。対象とした法面は、野洲川層群の岩礫砂岩を主体とする地質構造からなり、図-4.4に示す一部のアンカーに共和電業製（BL-50TB）の荷重計が設置されている。荷重計A1～荷重計A4はSMC工法、荷重計A5～荷重計A8はSFL工法のアンカーに設置されている。図-4.5は、本地点の8箇所の既設アンカーに設置された荷重計の計測値を示したものである。荷重計A1の計測値は、大きい振れを伴う大幅な荷重の増加が見られる。荷重計A2、荷重計A3、荷重計A4の計測値は、ほぼ一定値を示しており、荷重計A2については2008年6月9日以降欠測している。荷重

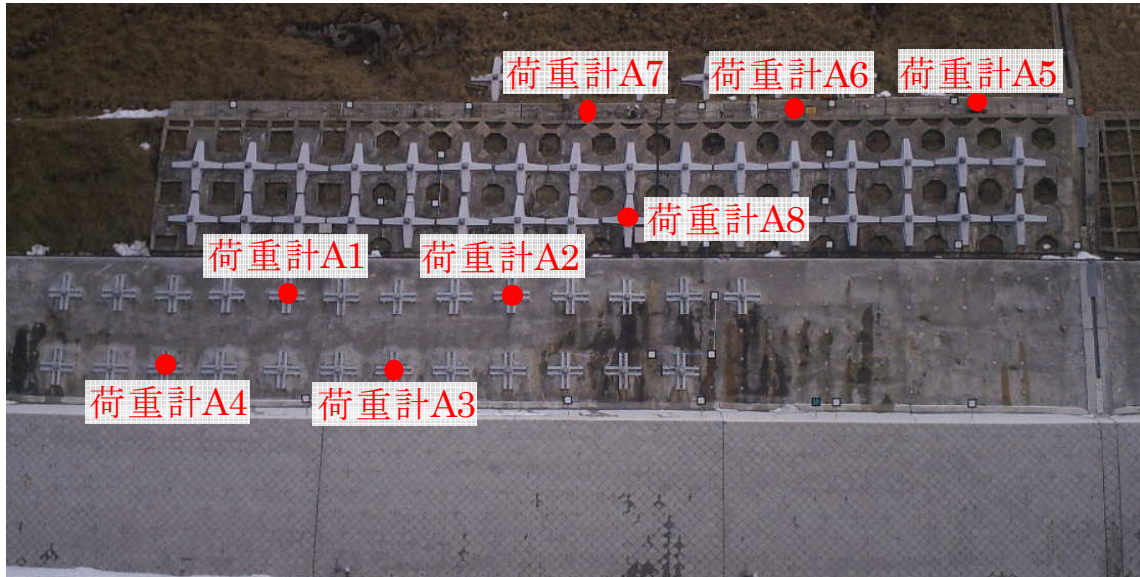


図-4.4 調査対象法面

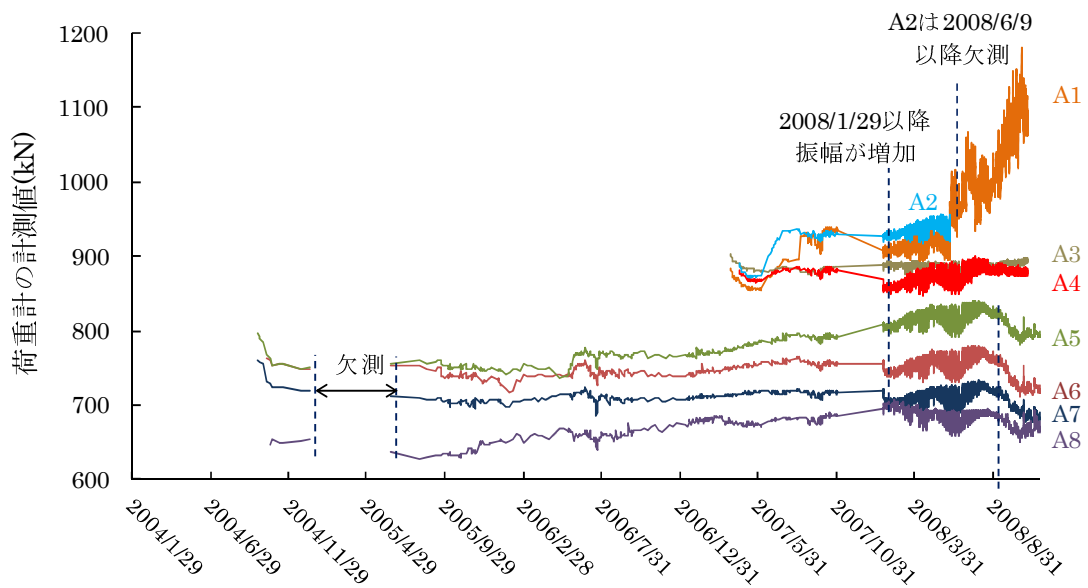


図-4.5 荷重計A1～荷重計A8の計測値の変化

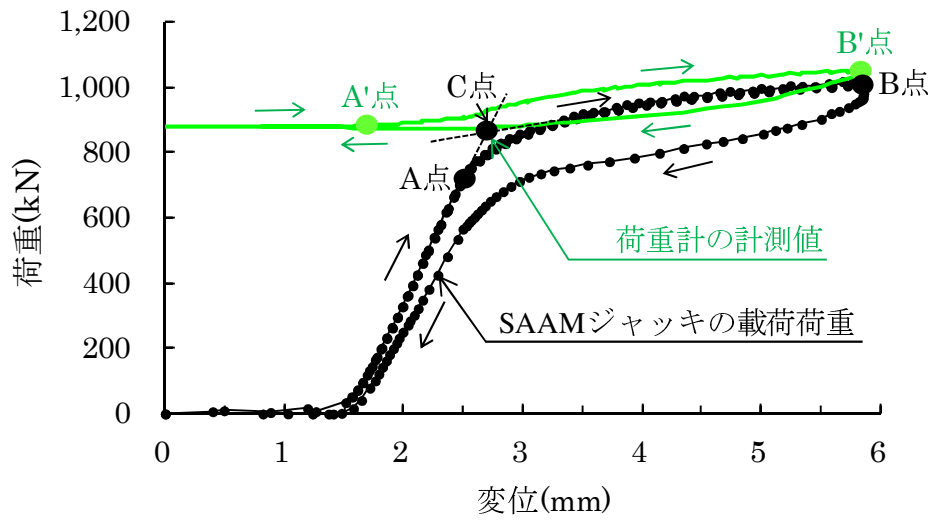


図-4.6 SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値 (荷重計A1)

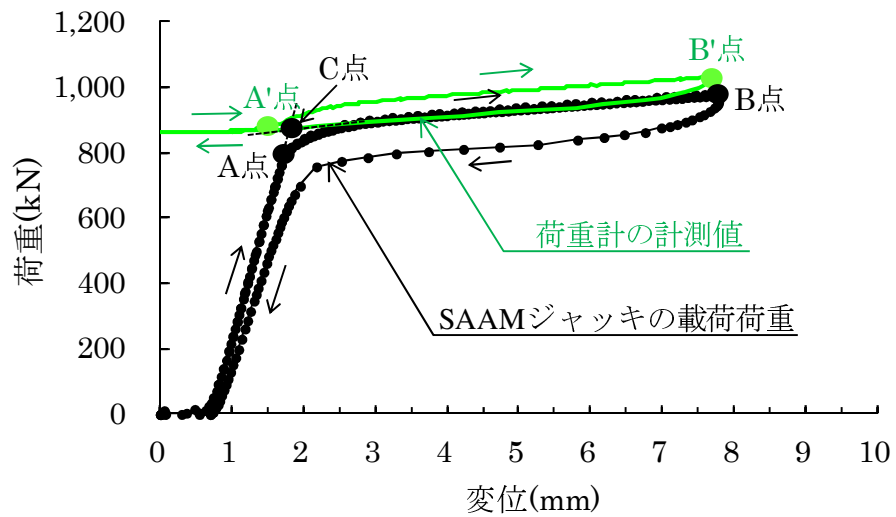


図-4.7 SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値 (荷重計A3)

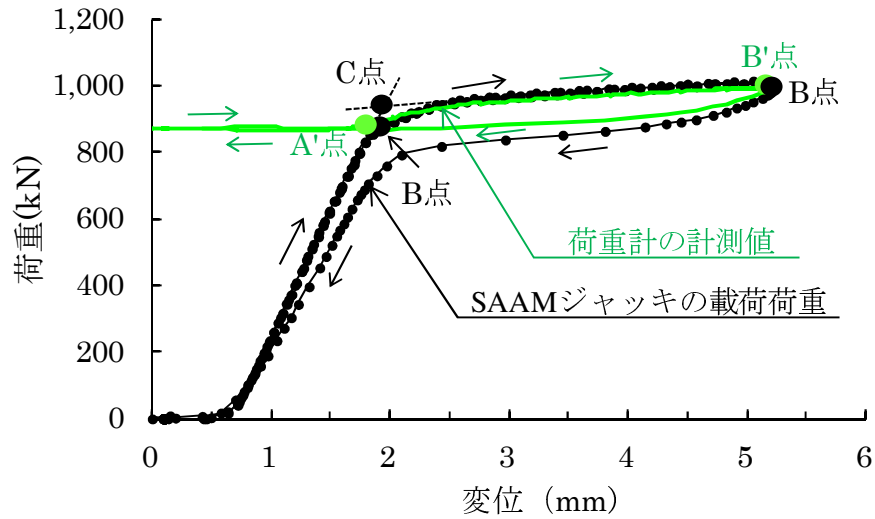


図-4.8 SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値 (荷重計A4)

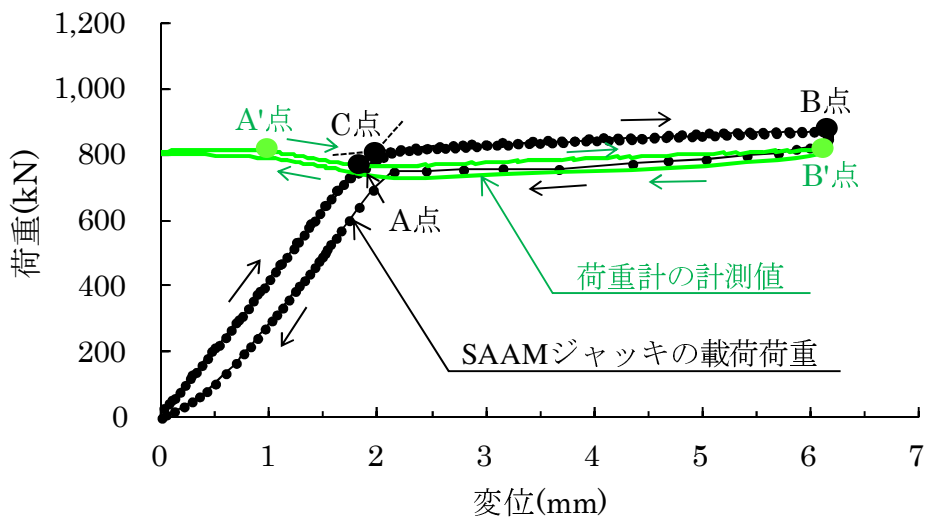


図-4.9 SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値 (荷重計A5)

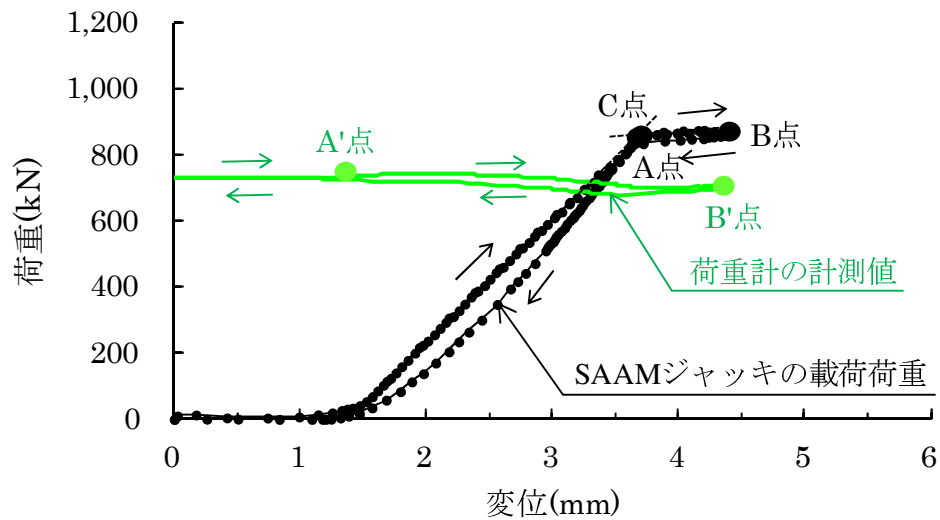
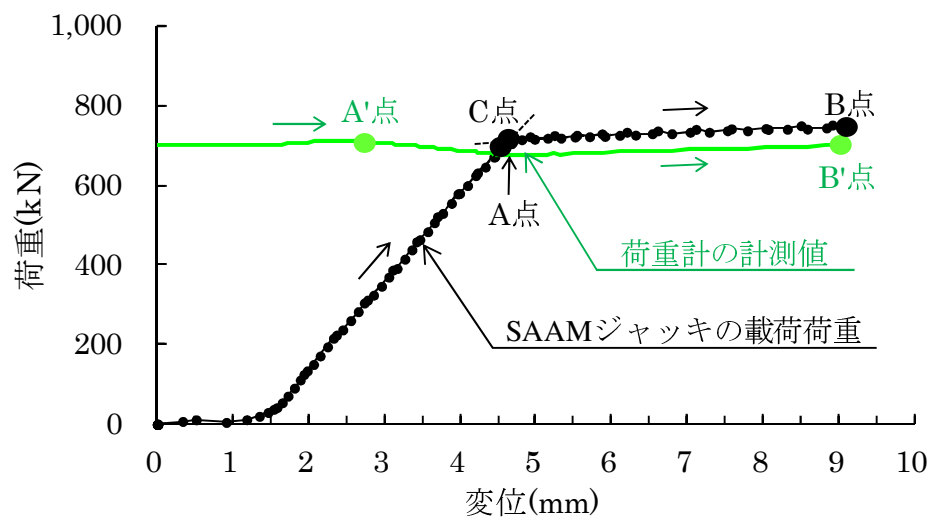


図-4.10 SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値（荷重計A6）



※除荷時のデータは記録されていない。

図-4.11 SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値（荷重計A7）

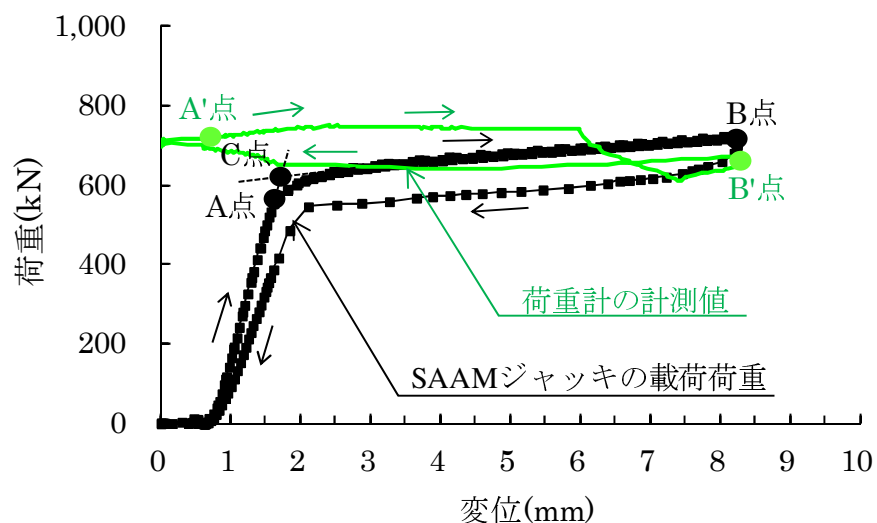
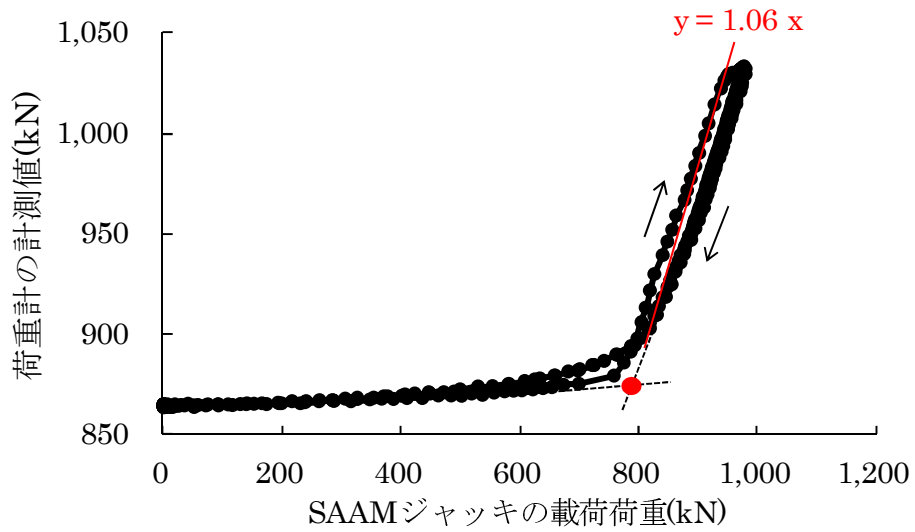


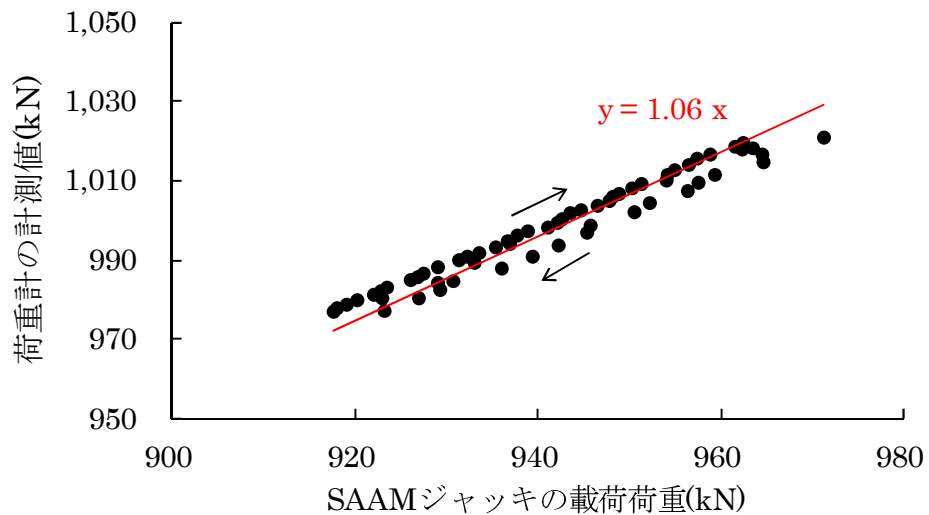
図-4.12 SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値（荷重計A8）

計A5、荷重計A6、荷重計A7、荷重計A8の計測値は、2008年8月31日以降低下が見られる。データが欠測している荷重計A2を除く7箇所の既設アンカーについて、SAAMジャッキを用いてリフトオフ試験を実施し、SAAMジャッキの載荷荷重と荷重計の計測値とを比較する方法により荷重計の機能検定を行った。図-4.6～図-4.9にSAAMジャッキと荷重計により求められた荷重－変位曲線を示す。A点→B点の経路は、SAAMジャッキ荷重と変位の関係において、載荷時に直線勾配の変化が始まり除荷するまでを表している。一方、A'点→B'点の経路は、荷重計の計測値と変位の関係において、載荷時の一定状態から変化が始まり除荷するまでを表している。この2つの経路を比較することで、両者の追従性を評価することができる。荷重計A1、荷重計A3、荷重計A4については、SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値が示す経路に追従性が見られる。このうち載荷過程において、荷重計A4は両計測値がよく一致しているものの、荷重計A1、荷重計A3は荷重計の計測値が若干高い値を示している。荷重計A1、荷重計A3のような場合、SAAMジャッキの載荷荷重と

荷重計の計測値とに追従性が見られることから、荷重計は正常に機能していると考えられるものの、校正係数が変化している可能性がある。そこで、荷重計A3を対象として、リフトオフ時の荷重値を基準として荷重計の校正係数の検討を行ってみる。図-4.13は、SAA



(a) 載荷開始から除荷完了までの関係



(b) リフトオフ後の関係

図-4.13 SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値の関係 (荷重計A3)

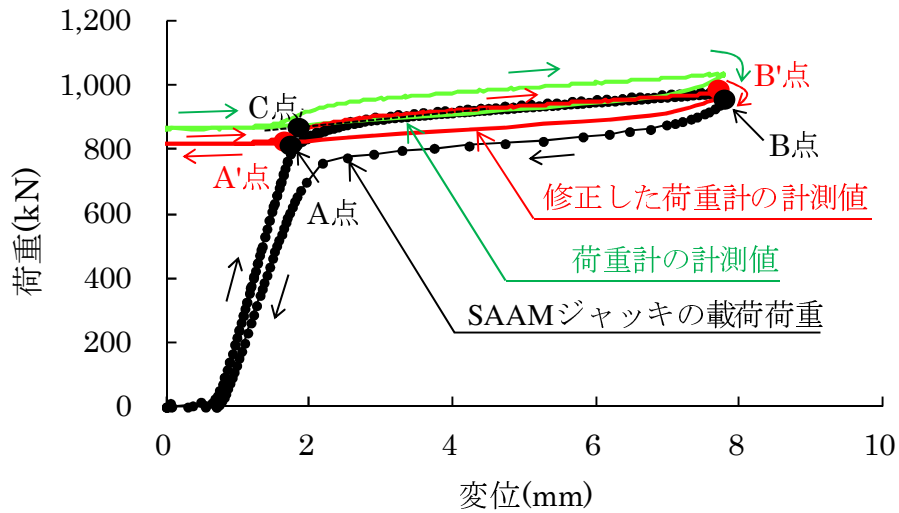


図-4.14 SAAMジャッキ荷重と荷重計の修正計測値（荷重計A3）

表-4.1 残存引張り力と荷重計の計測値の比較

荷重計	残存引張り力 (① C 点の荷重) (kN)	荷重計の計測値 (② A' 点の荷重) (kN)	荷重差 (① - ②) (kN)	両グラフの 追従性の有無
A1	917	880	37	有り
A3	883	864	19	有り
A4	944	873	71	有り
A5	814	804	10	無し
A6	861	729	132	無し
A7	715	699	16	無し
A8	633	694	-61	無し

Mジャッキと荷重計の荷重値の関係を示したものである。リフトオフ後の載荷過程において荷重－変位曲線が直線となる区間を対象に、原点を通る1次回帰式として両者の関係を求めたところ、荷重計の計測値はSAAMジャッキより求まる荷重値より1.06倍程度大きい値を示している。この結果を基に、荷重計の計測値に1/1.06を乗じ調整を行ったところ、図-4.14に示すように、SAAMジャッキ荷重と変位が示す経路（A点→B点）と、荷重計の計測値と変位が示す経路（A'点→B'点）はほぼ一致した追従性が見られる³²⁾。

図-4.9～図-4.12に示す荷重計A5～荷重計A8については、荷重計の計測値が一定値を示すものや、載荷により計測値が低下するものなど、SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値が示す経路に追従性は認められなかった。このため、これら荷重計はいずれも正常に機能していない可能性が考えられる。

表-4.1は、SAAMジャッキ荷重と荷重計の計測値の追従性を基に各荷重計の機能検定の結果をまとめたものである。ここで、荷重計が正常に機能していると考えられる荷重計A4について、接線法より求めた残存引張り力と荷重計の計測値を比較すると、それぞれ944kN、873kNと一致しない。リフトオフ試験により得られる既設アンカーの残存引張り力は、「地盤工学会基準」⁷⁾によれば、アンカー頭部が支圧板から離れ始めた(変位0.1m～1.0mm)ときの荷重とされており⁷⁾、図-4.8に示す荷重－変位曲線の直線勾配が変化し始めるA点に対応する。しかし、第2章においてリフトオフ試験においてリフトオフした時点を確認することは困難であるため、残存引張り力を評価する場合、接線法による評価が適切であることを示した。荷重計の機能検定を行う場合、接線法により評価される残存引張り力（C点）と、荷重計が捉える実際のリフトオフ荷重（A'点）とは一致しないことが考えられ、この点を理解した上で荷重－変位曲線の追従性に基づいた評価を行う必要がある。

4.4 既設アンカーにおける緊張力のモニタリング

4.4.1 既設アンカーへの荷重計の着脱手法

現在、既設アンカーに設置された荷重計を交換しようとする場合、図-4.15に示すように、アンカー頭部のナットなどの定着具を取り外してアンカーに導入されている緊張力を全て解放した後に荷重計を交換する必要がある。このため、荷重計の再設置時にストロークが長いセンターホールジャッキなど施工用の油圧ジャッキを用いて緊張力を再度導入しなくてはならず、供用中の急峻斜面など、現地条件によっては作業が困難となる場合がある。また、荷重計が設置されていない既設アンカーに新しく荷重計を設置しようとする場合、図-4.16に示すように、定着具を取り外して緊張力を全て除荷することに加え、荷重計を設置したときに、荷重計を付加する定着具を設置するために必要とされる引張り材の余長が不足することが考えられる。また、既設アンカーが過緊張状態で、余長が十分でない場合には、除荷により引張り材が地中に引き込まれることも考えられ、その場合復旧が困難になる可能性がある。さらに、くさび定着タイプのアンカーの場合、アンカー頭部がくさびで固定さ

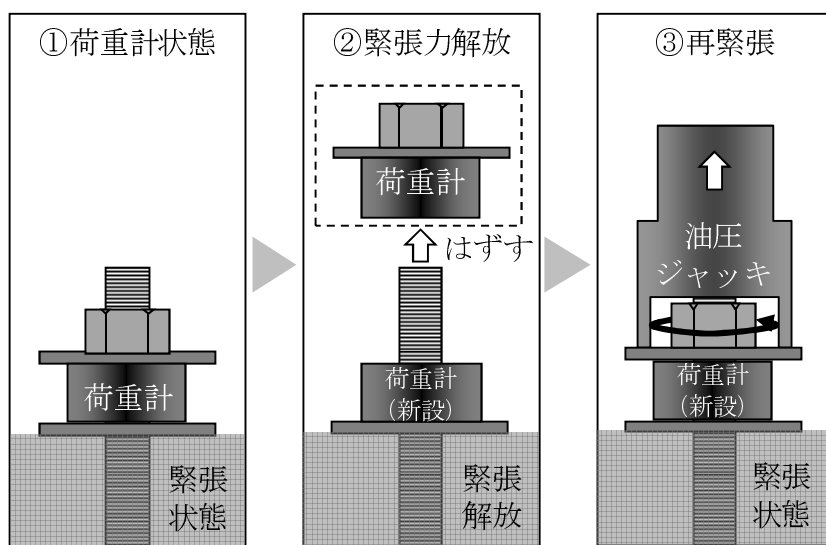


図-4.15 荷重計を交換する場合

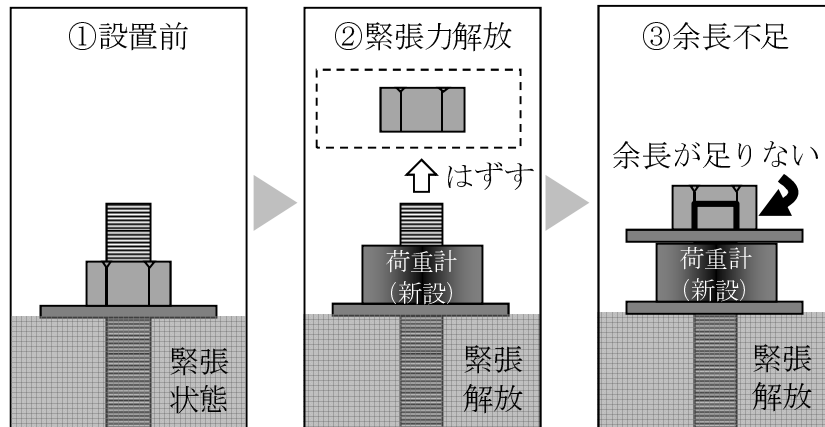


図-4.16 既設アンカーに荷重計を設置する場合



(a)ナット定着用³⁰⁾



(b)くさび定着用³³⁾

図-4.17 荷重計の着脱用治具（アジャスター）

れているため取り外しは容易でなく、除荷が困難なことも考えられる³³⁾。こうした多くの課題に対し、既設アンカーを除荷すること無く荷重計を着脱できる新たな手法について検討を行った。

新たな荷重計の着脱手法において、既設アンカーへの荷重計の設置は、荷重計を設置するための余長延長を確保するため図-4.17に示すアジャスターと、緊張力を簡易に導入するためにSAAMジャック



図-4.18 荷重計の設置作業状況

キを用いて図-4.18に示すように行う。既設アンカーへの荷重計の設置は、ナット定着タイプ、くさび定着タイプ、くさびナット併用定着タイプそれぞれ図-4.19、図-4.20、図-4.21に示す方法により行うものとし、その手順を以下に示す。

(ナット定着タイプ)

- ① 頭部キャップを取り外す。
- ② アジャスターを設置する。
- ③ 台座を設置しその上に荷重計を設置する。
- ④ SAAMジャッキにより現状の残存引張り力よりも高い緊張力を導入し、新設ナットで締めつけて定着させる。
- ⑤ 既設ナットを緩める。
- ⑥ 頭部キャップを設置する。

(くさび定着タイプ)

- ① 頭部キャップを取り外し、外周がネジ切り加工された再緊張用ア

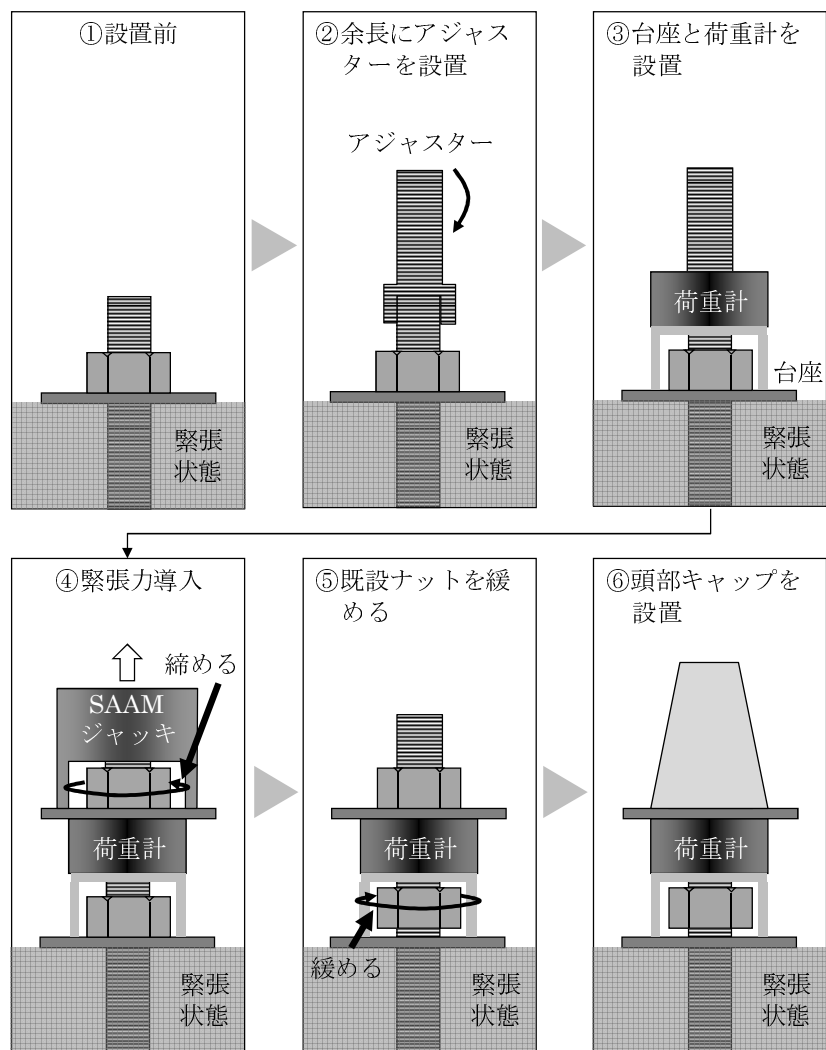


図-4.19 既設アンカーへの荷重計設置手順（ナット定着タイプ）³⁰⁾

ンカーヘッドを設置する。

- ②外周・内周がネジ切り加工されたアジャスターを設置し、再緊張用アンカーヘッドと接続させる。
- ③台座を設置しその上に荷重計を設置する。
- ④新設ナットを設置する。
- ⑤SAAMジャッキにより現状の残存引張り力よりも高い緊張力を導入し、新設ナットで締めて付けて定着させる。
- ⑥頭部キャップを設置する。

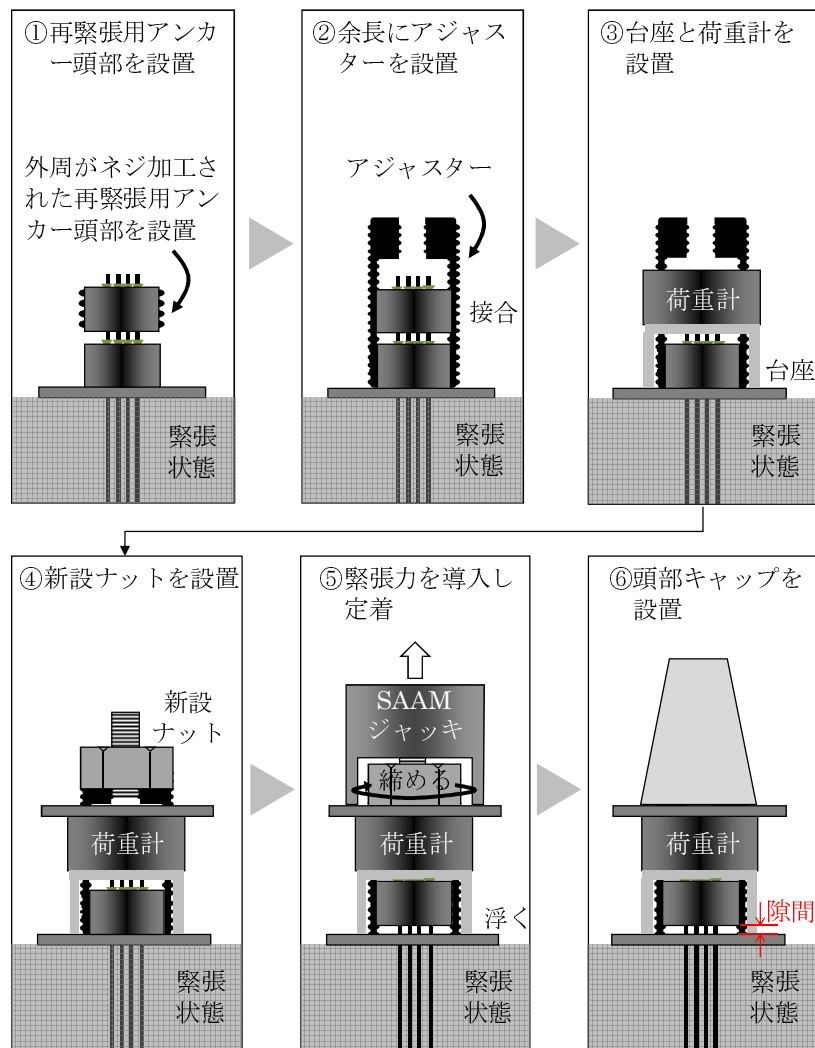


図-4.20 既設アンカーへの荷重計設置手順（くさび定着タイプ）³³⁾

（くさびナット併用定着タイプ）

- ① 頭部キャップを取り外す。
- ② 外周・内周がネジ切り加工されたアジャスターを設置し、再緊張用アンカーヘッドと接続させる。
- ③ 台座を設置しその上に荷重計を設置する。
- ④ 新設ナットを設置する。
- ⑤ SAAMジャッキにより現状の残存引張り力よりも高い緊張力を導入し、新設ナットで締め付けて定着させる。

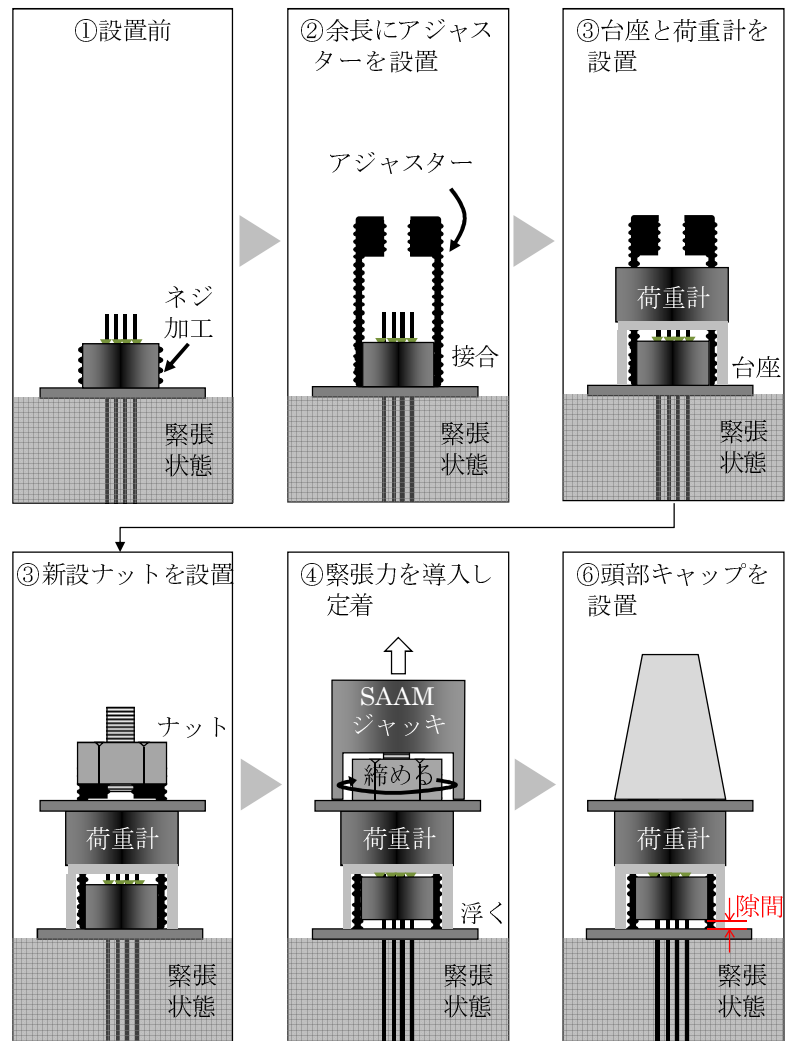


図-4.21 既設アンカーへの荷重計設置手順
(くさびナット併用定着タイプ)

⑥ 頭部キャップを設置する。

なお、ナット定着タイプのアンカーの場合には、既設のナットを緩め緊張力の調整を行うことが容易であるものの、くさび定着タイプのアンカーの場合には、アンカー頭部に固定されたくさびを緩めることが困難であるため、リフトオフ荷重よりも若干高い荷重で定着させ、支圧板とアンカー頭部とに隙間を設ける必要がある³³⁾。

設置した荷重計を撤去する場合には、設置とは逆の手順で既設の

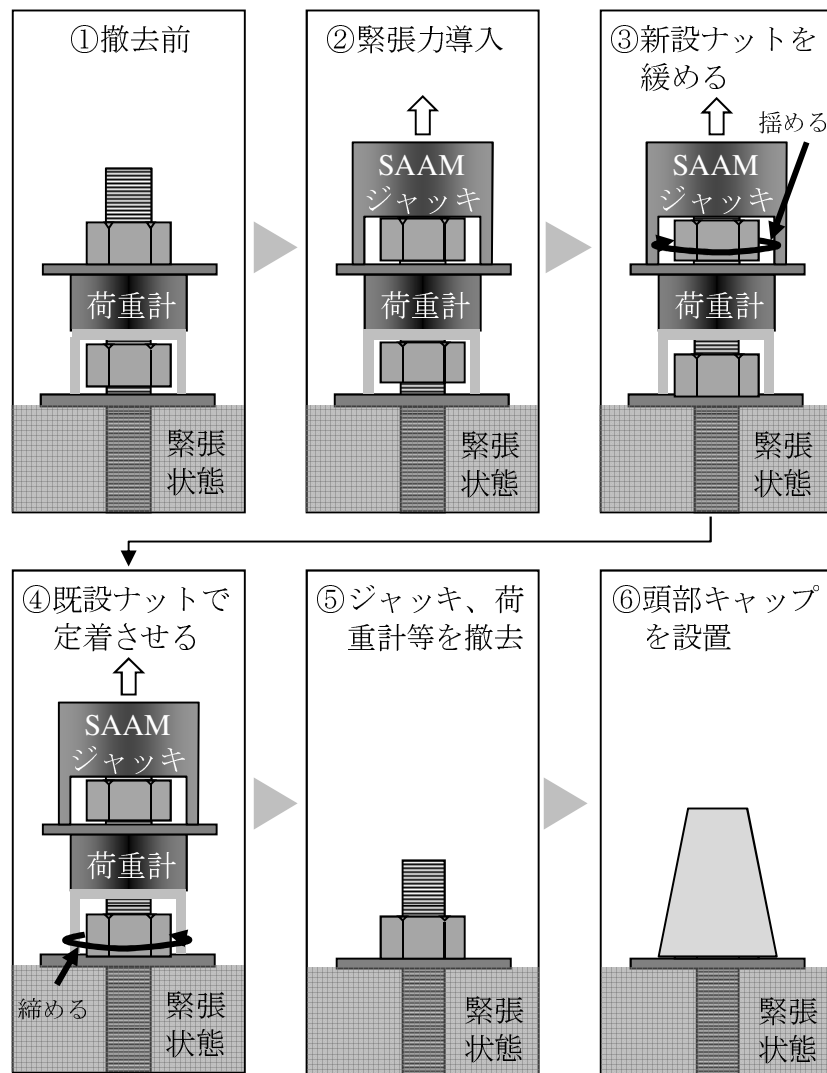


図-4.22 荷重計の撤去手順（ナット定着タイプ）

定着具で再度定着させた上で、新設の定着具や荷重計を取り外す。図-4.22に、ナット定着タイプの荷重計の撤去方法を示す。撤去手順は以下に示すとおりである。

- ① 頭部キャップを取り外す。
- ② SAAMジャッキにより現状の残存引張り力よりも高い緊力を導入する。
- ③ 新設ナットを緩める。

- ④既設ナットで定着させる。
- ⑤SAAMジャッキ、荷重計などを撤去する。
- ⑥頭部キャップを設置する。

くさび定着タイプのアンカーもナット定着タイプと同様の手順に従い荷重計を撤去することができる。

4.4.2 荷重計の着脱手法の現地への適用性検証

高速道路法面に施工されたSEEE工法、VSL工法の既設アンカーを対象として、歪ゲージ式荷重計の着脱手法の現地への適用性検証を行った。また、他のセンターホール型荷重計に対する着脱手法について検証するため、SEEE工法の既設アンカーを対象として、長期耐久性に優れたMリングの設置についても検討を行った。各試験では、図-4.23に示すように、SAAMジャッキを用いて荷重計の設置前後と撤去前後にリフトオフ試験を実施した。このとき荷重計設置前と荷重計設置後には荷重計の機能検定を同時に行った。リフトオフ試験は、第2章で定義した「高速道路試験法」に従い実施することを基本とした。さらに、荷重計の計測値が変化する要因の一つとして外気温による影響が考えられるため、計測結果を基に荷重計の計測値と外気温との関係についても検討を行った。

a) ナット定着タイプ

ナット定着タイプであるSEEE工法の既設アンカーを対象として共和電業製の歪ゲージ式荷重計（BLW-A-1MN）を着脱手法を用いて新たに設置し、図-4.24に示すように東京測器研究所製のデータロガー（TC-32K）により荷重計の計測値のモニタリングを行った。対象とした既設アンカーは、F-50TA で、設計アンカー力297kN、アンカー長さ15.5m、定着長3.0mである。荷重計設置前のリフトオフ試験により得られた荷重－変位曲線、および試験状況を図-4.25に示す。接線法により求まる計測値は225kN（A点）であった。その後、着脱手法により荷重計を設置した。荷重計設置後のリフトオ

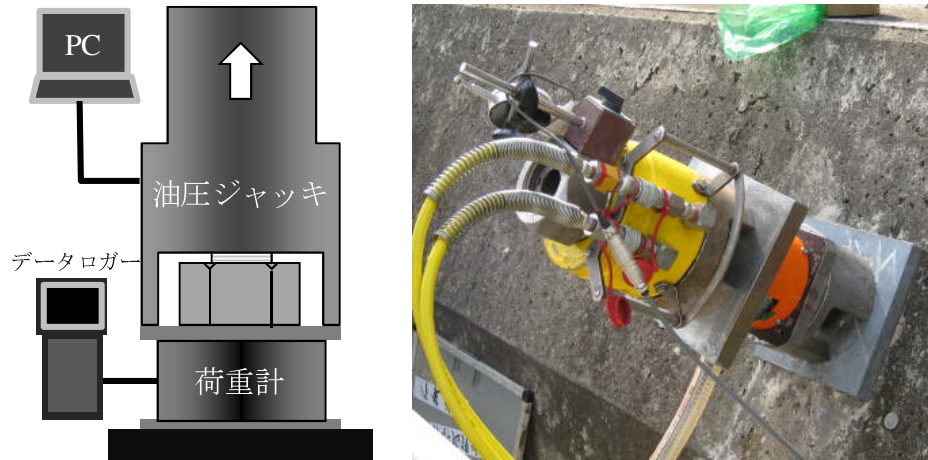
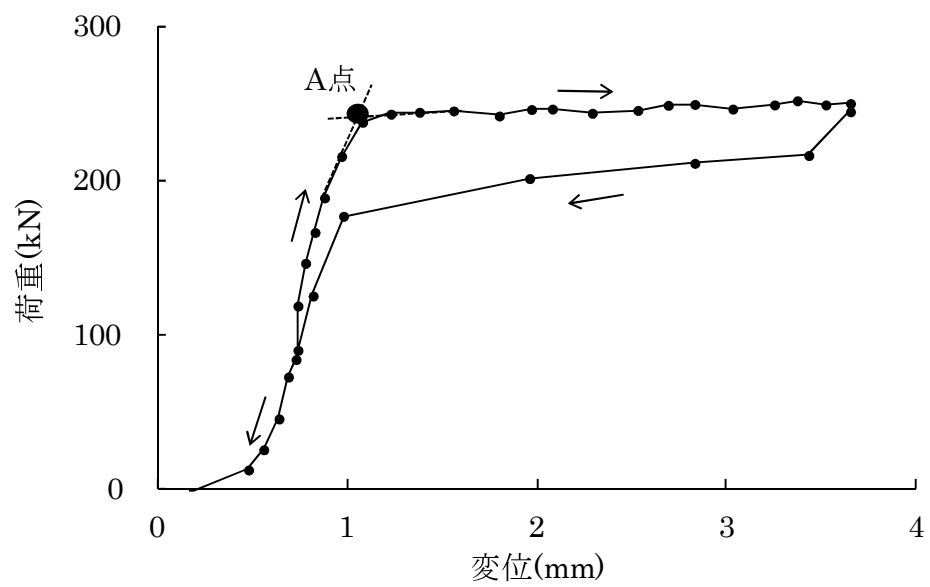


図-4.23 SAAMジャッキの載荷時の荷重計計測



図-4.24 荷重計の計測値のモニタリング (SEEE工法)

フ試験により得られた荷重－変位曲線、および試験状況を図-4.26に示す。接線法により求まる計測値は231kN (C点)、荷重計の計測値は218kN (A'点)であり、両者の計測値の差は13kNであった。ナット定着タイプのアンカーは、PC複合鋼より線の端部がネジ切

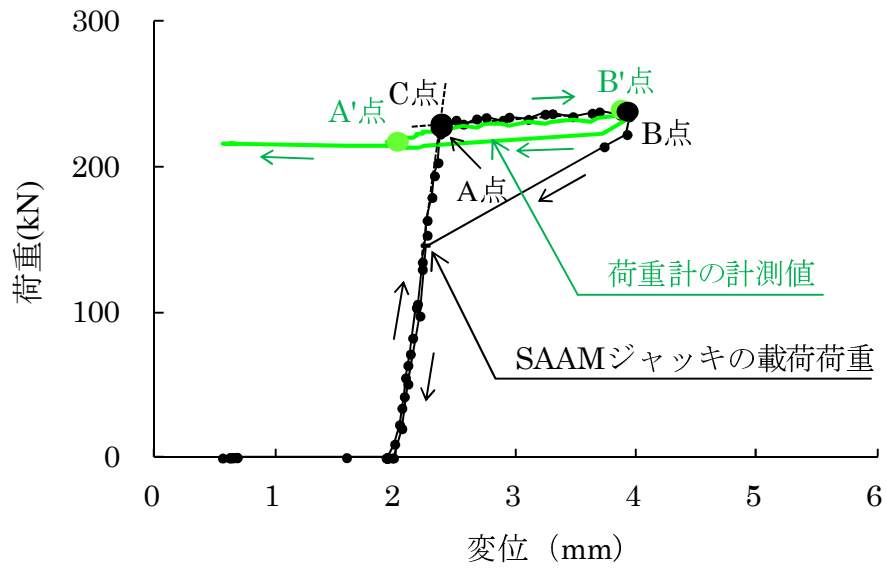


(a) 荷重 - 変位曲線



(b) リフトオフ試験の状況

図-4.25 荷重計設置前 (SEE工法)

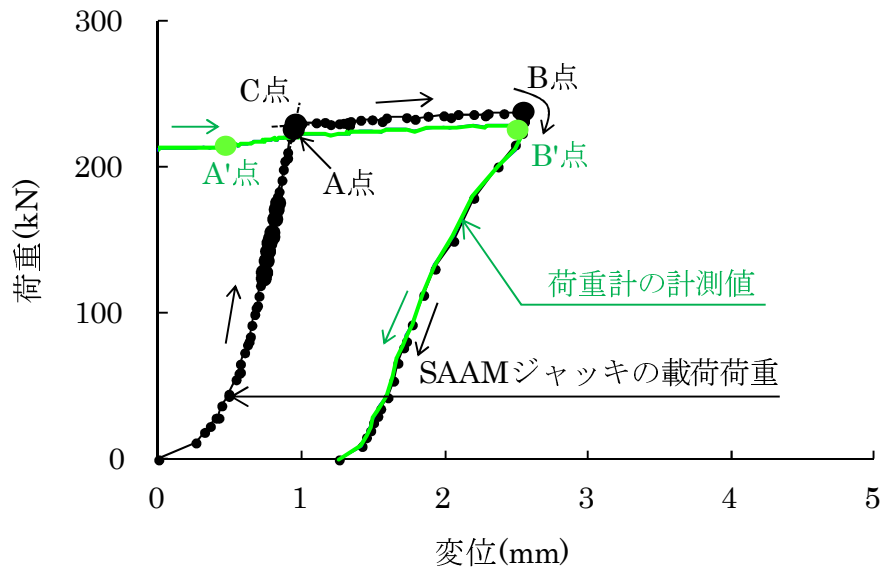


(a) 荷重 - 変位曲線



(b) リフトオフ試験の状況

図-4.26 荷重計設置時 (SEEE工法)

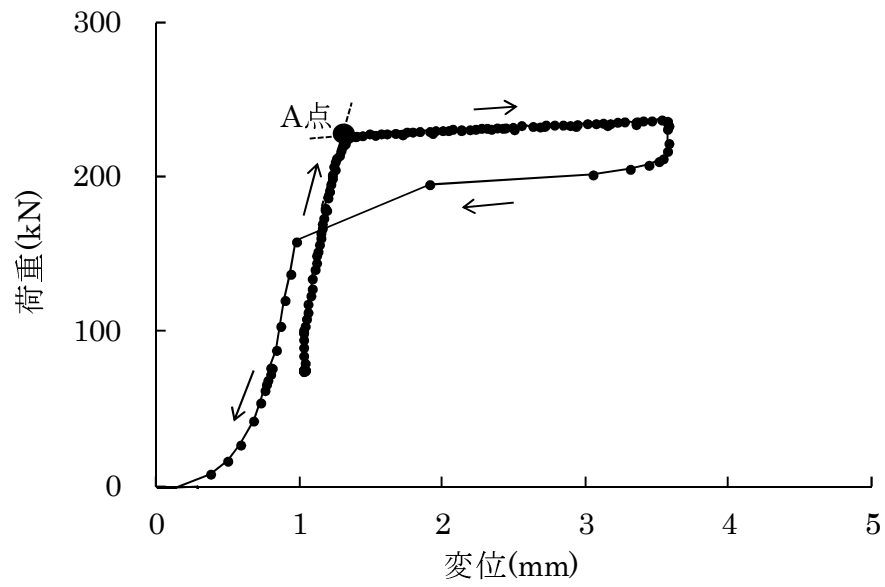


(a) 荷重 - 変位曲線

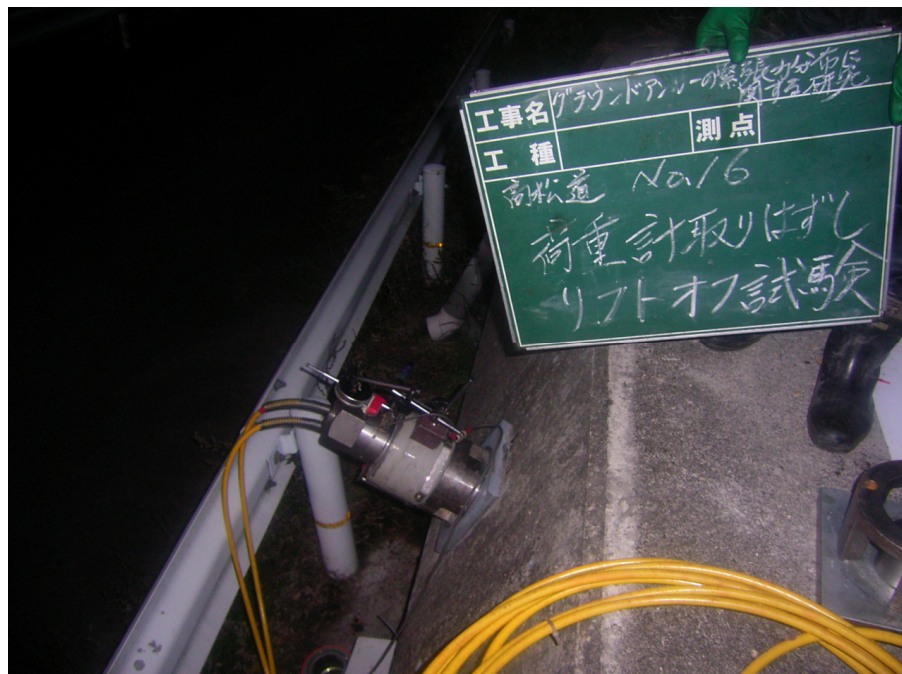


(b) リフトオフ試験の状況

図-4.27 荷重計撤去時 (SEEE工法)



(a) 荷重 - 変位曲線



(b) リフトオフ試験の状況

図-4.28 荷重計撤去後 (SEEE工法)



図-4.29 Mリングの設置状況（ナット定着タイプ）

りされたマンションで圧着加工されていることからPC鋼より線毎張力のばらつきが小さく、変曲点が比較的明瞭に現れるため両者の計測値の差は小さいと考えられる。本アンカーでは荷重計を設置して約1ヶ月間計測値のモニタリングを行った。その後、設置時より若干高い緊張力を導入して、新設の止めナットを緩め、既設の止めナットで定着させて荷重計の撤去を行った。荷重計撤去時のリフトオフ試験により得られた荷重－変位曲線、および試験状況について図-4.27に示す。接線法により求まる計測値は226kN（C点）、荷重計の計測値は212kN（A'点）であった。荷重計設置後および荷重計撤去前において、SAAMジャッキの載荷荷重と荷重計の計測値に大きな差は認められず、モニタリング期間中荷重計は正常に機能していたと考えられる。荷重計撤去後のリフトオフ試験により得られた荷重－変位曲線、および試験状況を図-4.28に示す。接線法により求まる計測値は230kN（A点）で、荷重計設置前とほぼ等しい値で定着されている。

次に、歪ゲージ式荷重計以外の荷重計への適用性について検証するため、長期耐久性に優れたMリングの設置について検討を行った。既設アンカーへのMリングの設置は、歪ゲージ式荷重計と同様

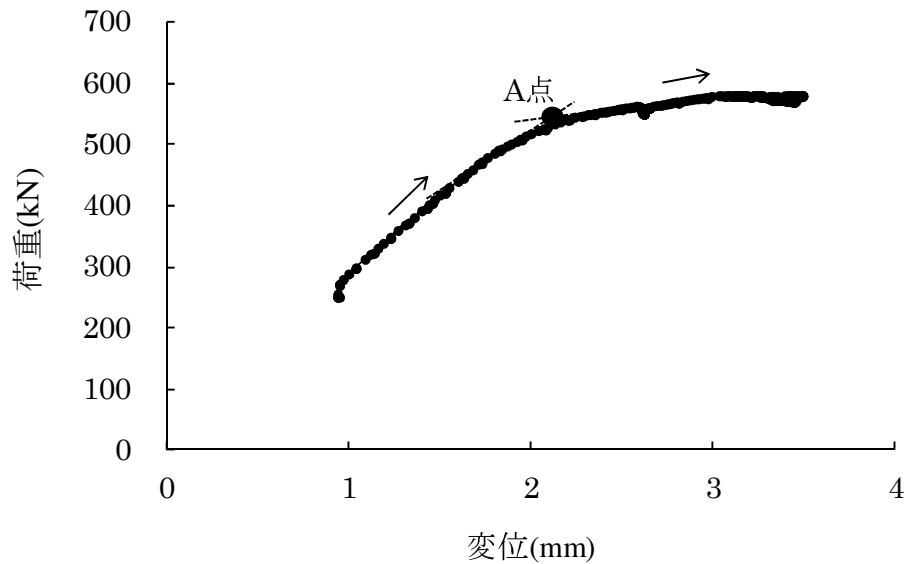
に以下の手順に従い実施した。

- ① 頭部キャップを取り外す。
- ② アジャスターを設置する。
- ③ 台座を設置しその上にMリングを設置する。
- ④ SAAMジャッキにより現状の残存引張り力よりも高い緊張力を導入し、新設ナットで定着させる。
- ⑤ 既設ナットを緩める。
- ⑥ 頭部キャップを設置する。

Mリングは、外周の歪を計測しその平均値を残存引張り力として評価するため、支圧板の形状などにより計測値が変化し、アンカーが実際に保持している緊張力との間に荷重差が発生することが考えられる。これに対し、Mリングの設置時に、図-4.29に示すようにSAAMジャッキ荷重とMリングによる荷重計測を同時に行うことにより、両計測値の荷重差から支圧板の形状などが荷重値に与え



図-4.30 荷重計の計測値のモニタリング（VSL工法）



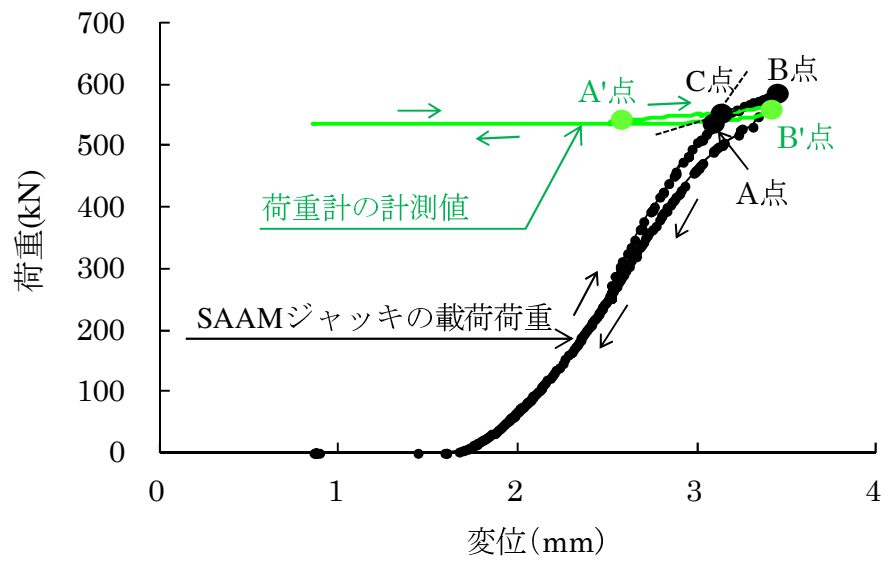
※除荷時のデータは記録されていない。

図-4.31 荷重計設置前 (VSL工法)

る影響などについて確認することが可能である。

b) くさび定着タイプ

頭部がくさび定着タイプのVSL工法の既設アンカーを対象として共和電業製の歪ゲージ式荷重計(BLW-A-1MN)を設置し、図-4.30に示すように東京測器研究所製のデータロガー(TC-32K)により荷重計の計測値のモニタリングを行った。対象とした既設アンカーは、E5-4で、設計アンカー力406kN、アンカー長さ33.4m、定着長4.6mである。荷重計設置前のリフトオフ試験により得られた荷重-変位曲線、および試験状況を図-4.31に示す。接線法により求まる残存引張り力は538kN(A点)であった。その後、着脱手法により荷重計を設置した。荷重計設置にあたり、くさび定着タイプのアンカーの場合、定着具を緩めることが困難なため、現在の定着荷重より30kN程度高い緊張力を導入し既設アンカー頭部を浮かせ隙間を設けて定着させた。荷重計設置時のリフトオフ試験により得ら



(a) 荷重 - 変位曲線



(b) リフトオフ試験の状況

図-4.32 荷重計設置時 (VSL工法)

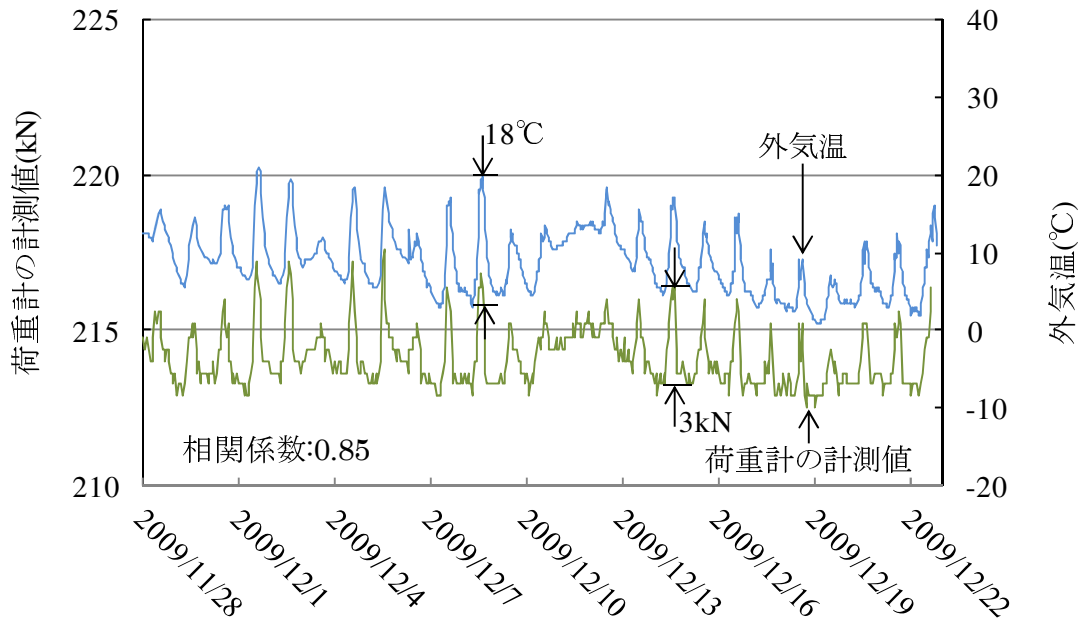


図-4.33 荷重計の計測値と外気温の変化（SEEE工法）³⁰⁾

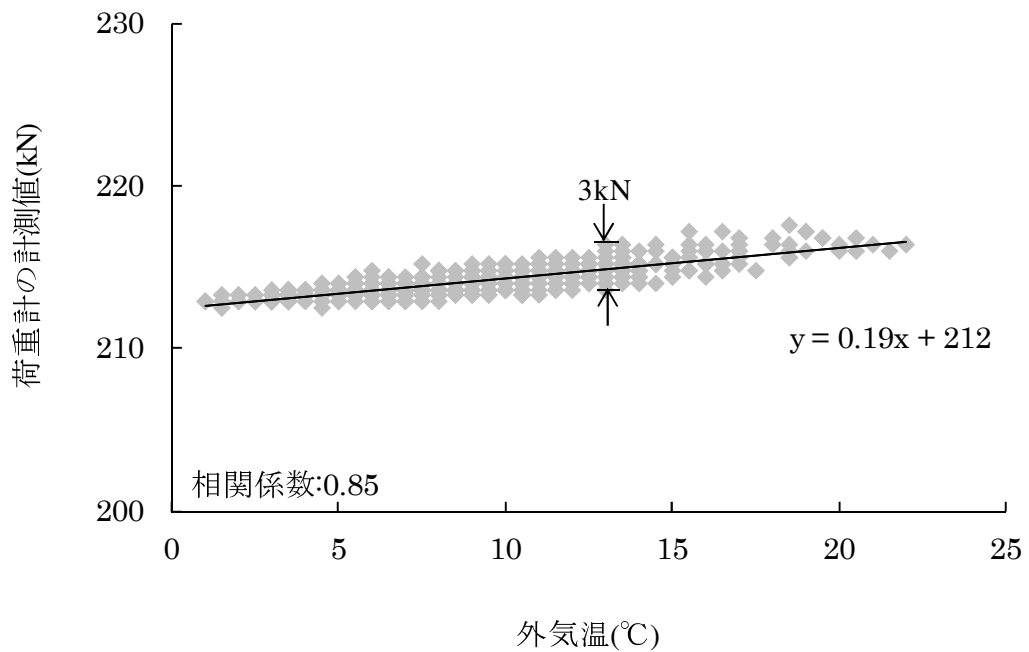


図-4.34 荷重計の計測値と外気温の相関関係（SEEE工法）

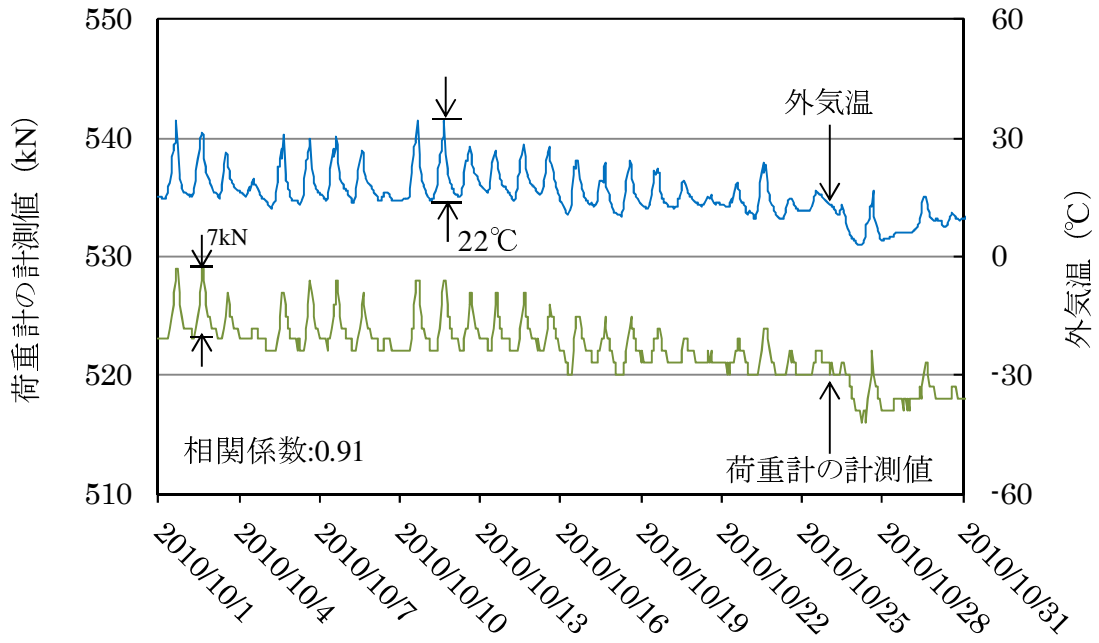


図-4.35 荷重計の計測値と外気温の変化（VSL工法）³³⁾

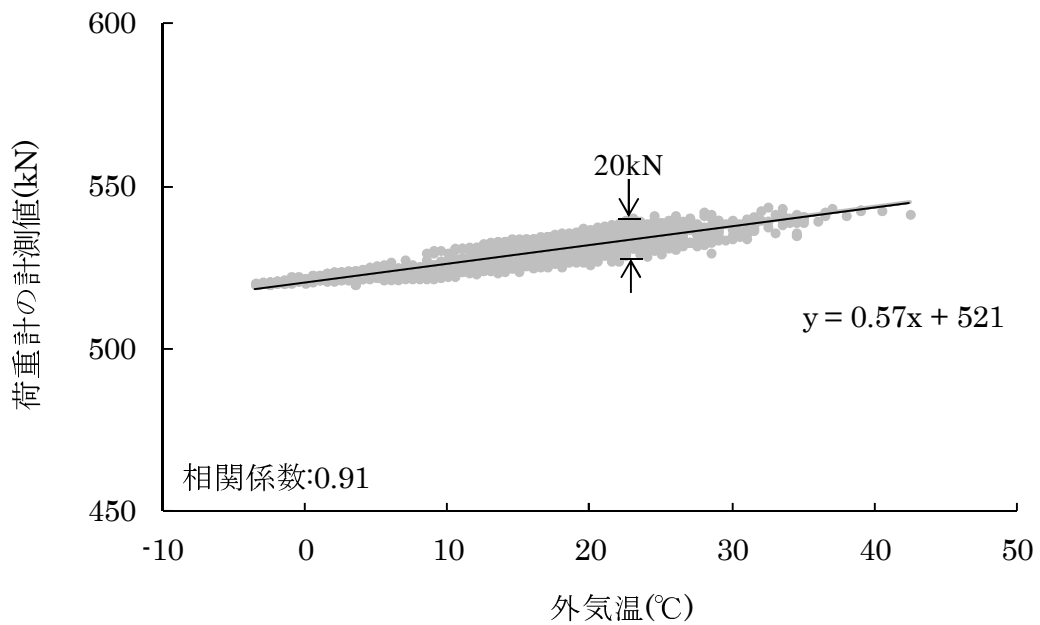


図-4.36 荷重計の計測値と外気温の相関関係（VSL工法）

れた荷重－変位曲線、および試験状況を図-4.32に示す。接線法により求まる計測値は537kN(C点)、荷重計の計測値は564kN(A'点)であり、両者の計測値の差は27kNであった。くさび定着タイプのアンカーの場合、複数のPC鋼より線をアンカー頭部のくさびにより定着させる構造であるため、PC鋼より線毎で作用する緊張力の大きさが異なるといった荷重の偏心などの影響により荷重－変位曲線の変曲点がナット定着タイプに比べ曲率をもった形状を示すことがある。このため、両者の計測値の差は、変曲点が比較的明瞭に現れるナット定着タイプよりも大きくなることが考えられる。

4.5 荷重計の計測値と外気温の関係

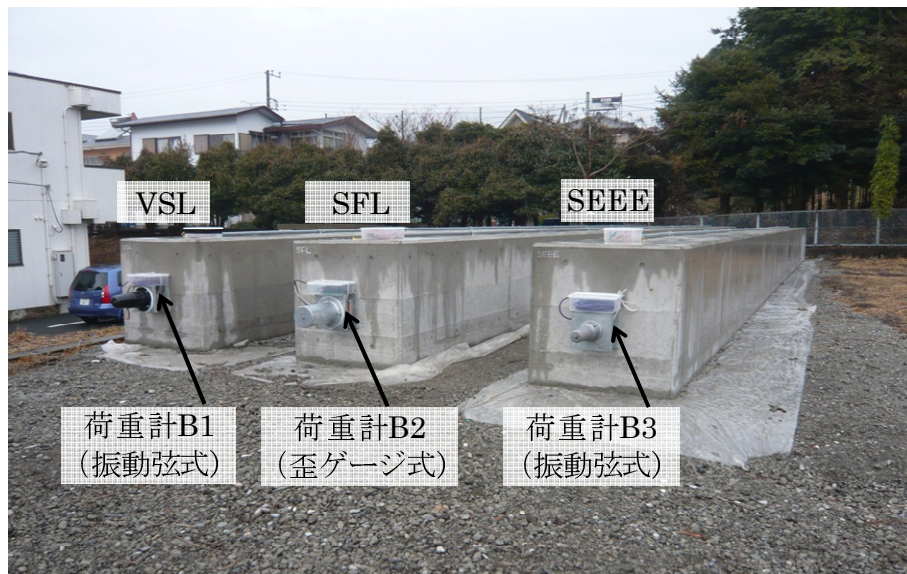
4.5.1 現地アンカーにおけるモニタリング結果

荷重計の計測値は、安定した地盤であっても外気温など地盤の安定性に寄与しないような環境変化に対しても反応して変化することが考えられる。このため、SEEE工法、VSL工法のアンカーに荷重計を設置した後、KNラボラトリーズ製のボタン式温度センサー（ハイグロクロン）を設置し、荷重計の計測値と外気温との関係について検討を行った。

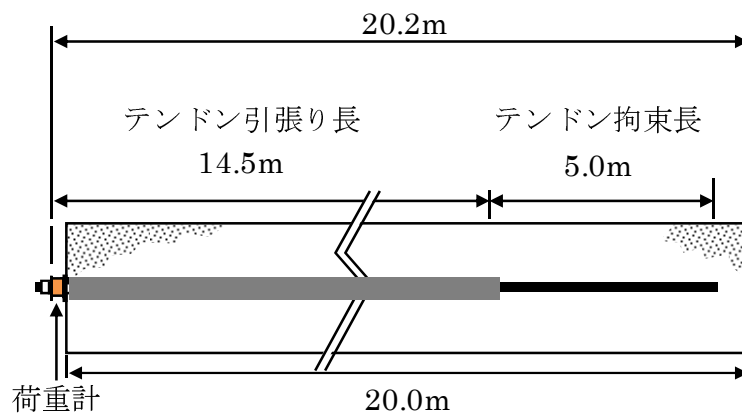
図-4.33は、着脱手法によりSEEE工法のアンカーに荷重計を設置して撤去するまでの1ヶ月間の荷重計の計測値と外気温の変化を示したものであり、荷重計の計測値の増減幅の最大は3kNであった。図-4.34は、荷重計の計測値と外気温の関係を示したものであり、両者の相関係数は0.85と高い相関を示した。図-4.35は、着脱手法によりVSL工法のアンカーに設置した荷重計の約1ヶ月間の計測値と外気温の変化を示したものであり、荷重計の計測値の増減幅の最大は7kNであった。図-4.36は、荷重計の計測値と外気温の関係を示したものであり、両者の相関係数は0.91と高い相関を示した。

4.5.2 アンカー供試体におけるモニタリング結果

既設アンカーに設置した荷重計の計測値と外気温に高い相関が見られたことから、荷重計の計測値が変化する要因の一つとして外気温による影響が考えられる。そこで、この影響を確認するために、図-4.37に示すような、全長20.2m、テンドン引張り長14.5m、テンドン拘束長5.0mのVSL工法、SEEE工法、SFL工法の実物アンカー



(a) 実物アンカー供試体の設置状況



(b) 実物アンカー供試体の設計

図-4.37 実物アンカーの供試体

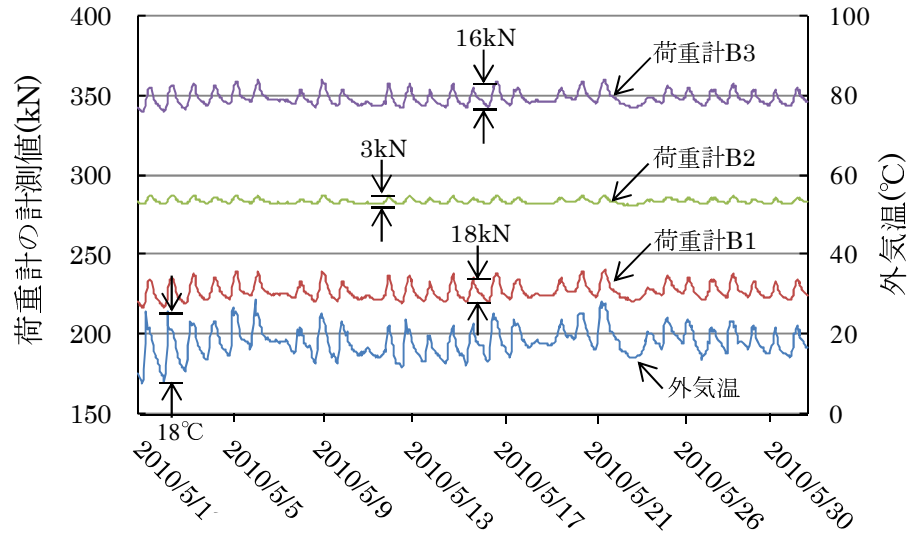


図-4.38 荷重計の計測値と外気温の変化（荷重計B1～荷重計B3）

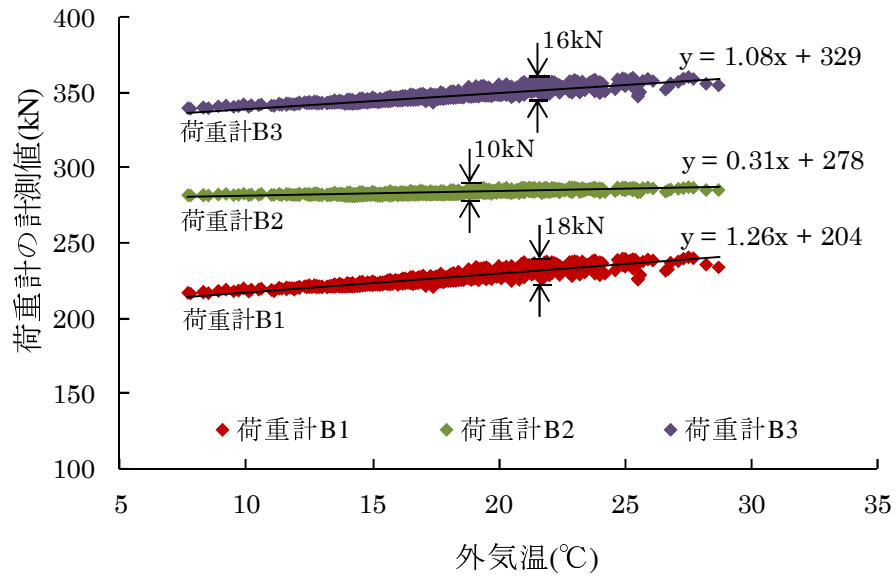


図-4.39 荷重計の計測値と外気温の相関関係（荷重計B1～荷重計B3）

表-4.2 荷重計3箇所の計測値と外気温の相関係数

荷重計	B1	B2	B3
荷重計の計測値と外気温の相関係数	0.91	0.80	0.91

の供試体を作製し、荷重計の計測値と外気温との関係について検討を行った。VSL工法のアンカーは、220kNで定着させGeoKon製（M4900-500kN-105mm）の振動弦式の荷重計B1を設置した。SFL工法のアンカーは296kNで定着させ東京測器製（KCE-500KNA）の歪ゲージ式の荷重計B2を設置した。SEEE工法のアンカーは、414kNで定着させGeoKon製（M4900-500kN-105mm）の振動弦式の荷重計B3を設置した。また、荷重計B2付近にT型熱電対（T-GS-0.65）の温度センサーを設置した。荷重計の計測は東京測器研究所製のデータロガー（TC-32K）により行い各計測値は1時間間隔で記録した。

計測開始後緊張力が安定し約1年が経過した時点の、2010年5月の1ヶ月間における各荷重計の計測値と外気温の変化を図-4.38に示す。各荷重計の計測値は、外気温の変化に伴い増減しており、増減幅の最大は、歪ゲージ式が3kNであるのに対し、振動弦式の荷重計は、B1が18kN、B3が16kNと大きかった。図-4.39は、各荷重計の計測値と外気温の関係を示している。いずれも温度上昇に伴い計測値が増加する傾向が認められ、ばらつき幅の最大は、歪ゲージ式の荷重計B2が10kNであるのに対し、振動弦式の荷重計はB1が18kN、B3は16kNと大きい。各荷重計の計測値と外気温の相関係数は、表-4.2に示すように歪ゲージ式荷重計では0.9以上、振動弦式荷重計では0.8以上と高い相関を示した。

4.5.3 新設アンカーにおけるモニタリング結果

新設アンカーに設置された荷重計の計測値が示す特性を検討す

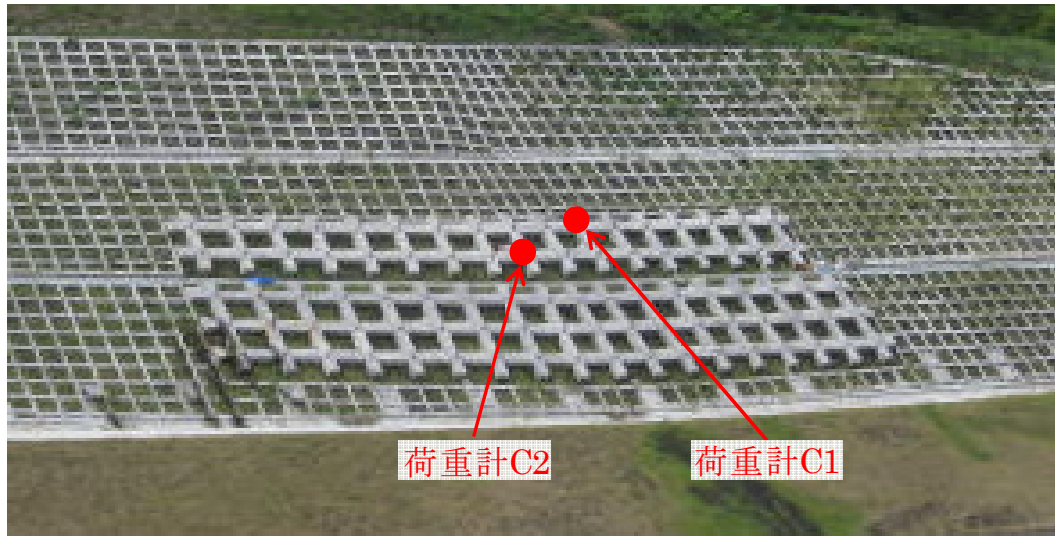


図-4.40 法面1

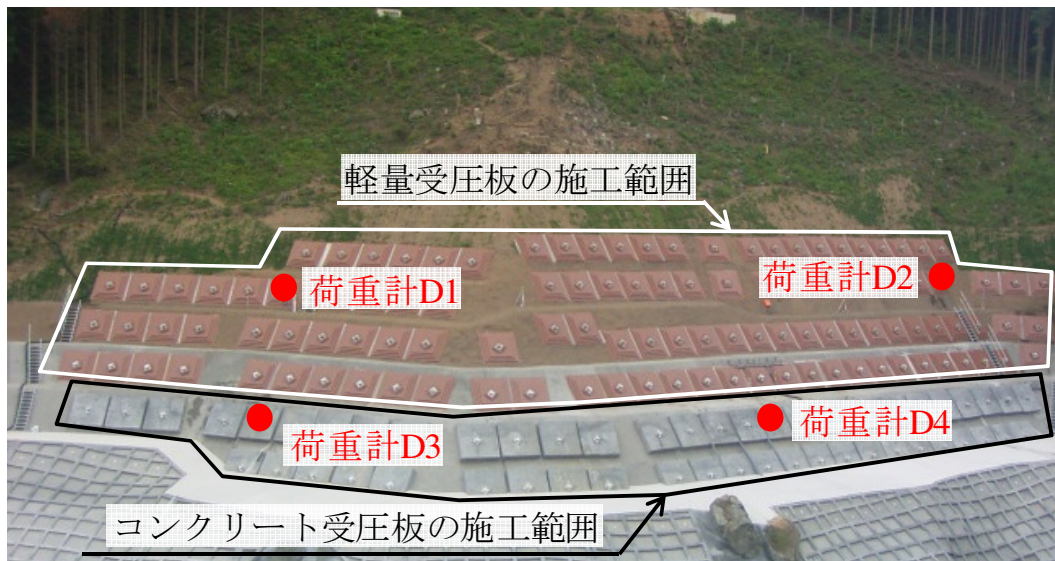


図-4.41 法面2

るため、アンカーが施工されてからの経過期間が異なる法面1、法面2を対象として、荷重計の計測値の変化と外気温との関係を求めた。法面1は、図-4.40に示す高速道路建設時の切土法面であり、比較的固結した礫岩が主体でその中に泥岩が介在する地質構造からなる。法面変状の発生によりEHD工法のアンカーが法枠工に施工

されている。このうち2本のアンカーに東京測器研究所製（KCE-1.5MNA）の歪ゲージ式の荷重計C1、荷重計C2を設置し、荷重計C2付近にKNラボラトリーズ製のボタン式温度センサー（ハイグロクロン）を設置した。本地点では、アンカーが定着され荷重計の計測値が一定の状態に収束するまでの約3ヶ月間について、各荷重計と外気温の計測値を1時間間隔で記録した。

図-4.41に示す法面2は、ダム工事建設時の切土法面である。本地点は、三波川変成岩類に属する緑色片岩や黒色片岩が分布する脆弱な地質構造からなる。法面変状の発生によりくさびナット併用定着タイプのEHD工法のアンカーがガラス長繊維を素材とする軽量受圧板およびコンクリート受圧板に施工されている³⁴⁾。このうち、軽量受圧板に東京測器研究所製（KCE-2MNA）の歪ゲージ式の荷重計D1、荷重計D2を、コンクリート受圧板に同じ種類の歪ゲージ式の荷重計D3、荷重計D4を設置し、荷重計D1付近にKNラボラトリ

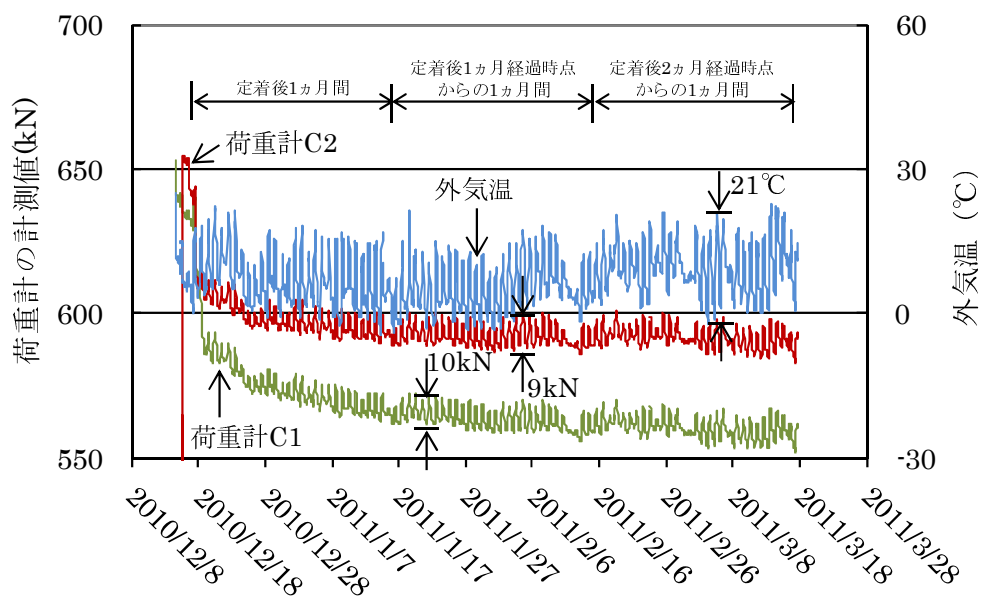


図-4.42 荷重計の計測値と外気温の変化（荷重計C1，荷重計C2）

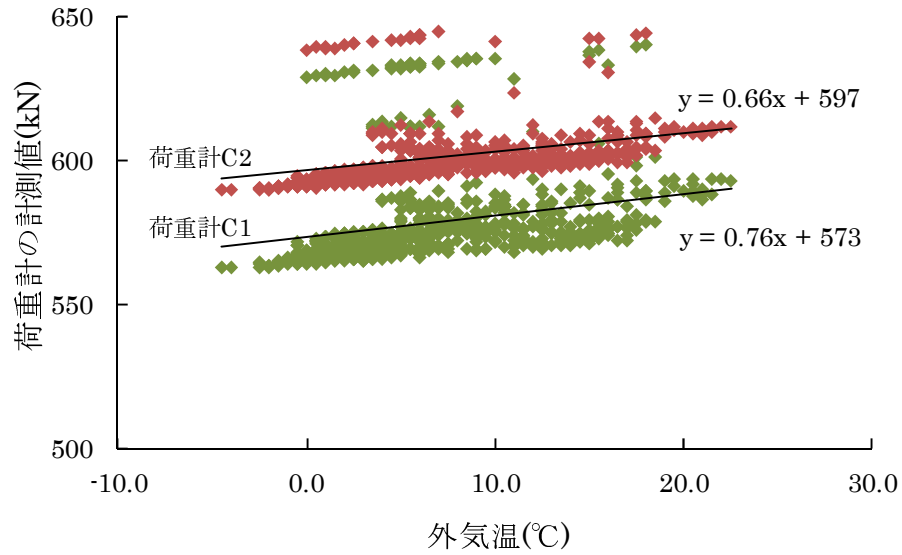


図-4.43 荷重計の計測値と外気温の相関関係
(定着後1ヵ月間)

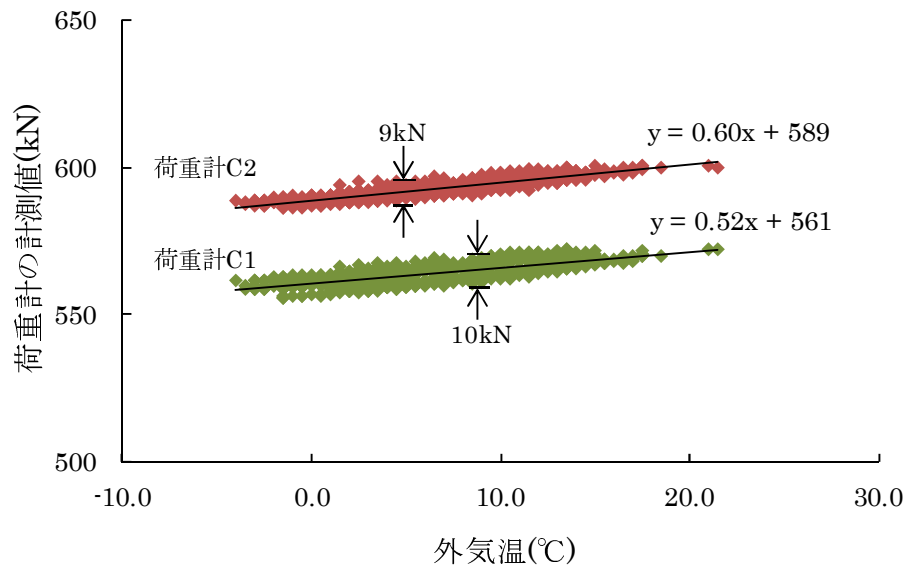


図-4.44 荷重計の計測値と外気温の相関関係
(定着後1ヵ月経過時点からの1ヵ月間)

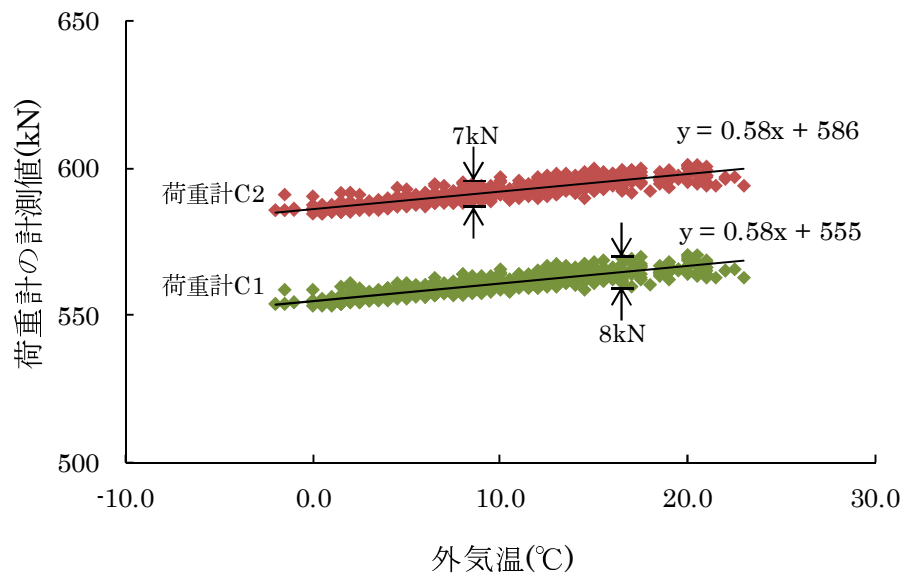


図-4.45 荷重計の計測値と外気温の相関関係
(定着後2カ月経過時点からの1カ月間)

ーズ製のボタン式温度センサー（ハイグロクロン）を設置した。本地点では、荷重計の計測は、施工後6ヶ月以上経過し一定の状態に収束してから約1ヶ月間、各荷重計と外気温の計測値を1時間間隔で記録した。

図-4.42は、法面1においてアンカーを定着させてから約3カ月間の荷重計C1、荷重計C2の計測値と外気温の変化を示したものである。荷重計の計測値は、定着後徐々に低下し一定の状態に収束する傾向を示し、増減幅の最大は荷重計C1で10kN、荷重計C2で9kNであった。図-4.43～図-4.45は定着後1カ月間毎の荷重計C1、荷重計C2の計測値と外気温の関係を示したものである。定着後1ヶ月間の期間においては、荷重計C1、荷重計C2ともばらつき幅が大きく、定着後1ヶ月経過時点からのばらつきは小さくなり、定着後1ヶ月経過時点から1ヶ月間においてのばらつき幅の最大は、荷重計C1が10kN、荷重計C2が9kN、定着後2ヶ月経過時点からの1ヶ月間にお

表-4.3 荷重計2箇所の計測値と外気温の相関係数

荷重計	C1	C2
荷重計の計測値と外気温の相関係数 (定着後1ヵ月間)	0.25	0.30
荷重計の計測値と外気温の相関係数 (定着後1ヵ月経過時点からの1ヵ月間)	0.73	0.89
荷重計の計測値と外気温の相関係数 (定着後2ヵ月経過時点からの1ヵ月間)	0.87	0.88

いてのばらつき幅の最大は、荷重計C1が8kN、荷重計C2が7kNである。表-4.3は荷重計C1、荷重計C2の計測値と外気温の相関係数を示している。定着後1ヶ月間の各荷重計の相関係数は0.30程度と低いものの、定着後1ヶ月経過時点からの1ヶ月間、定着後2ヶ月経過時点からの1ヶ月間の各荷重計の相関係数は0.70以上と高い値を示す。緊張力変化が収束していると考えられるアンカ一定着後1ヶ月が経過した時点以降において、荷重計の計測値と外気温との関係はアンカーの実物大供試体に設置された歪ゲージ式の荷重計B2と同様の傾向を示す。これらの結果から、荷重計の計測値は、定着後はアンカー毎で背面土圧や地盤クリープ、鋼材のリラクセーションなど様々な影響により異なる変化を示すものの、施工後一定期間が経過しそれらの影響が明瞭でなくなると、荷重計の計測値が変化する要因は外気温が支配的になると考えられる。

図-4.46は、法面2において荷重計D1～荷重計D4の計測値と外気温の約1ヶ月間の変化を示したものである。4箇所の定着時緊張力は全て647kNであるものの、各荷重計の計測値は定着時緊張力に対して25%以上低下している荷重計D4から、5%程度低下している荷重計D1までばらつきが見られる。荷重計の計測値の増減幅の最大

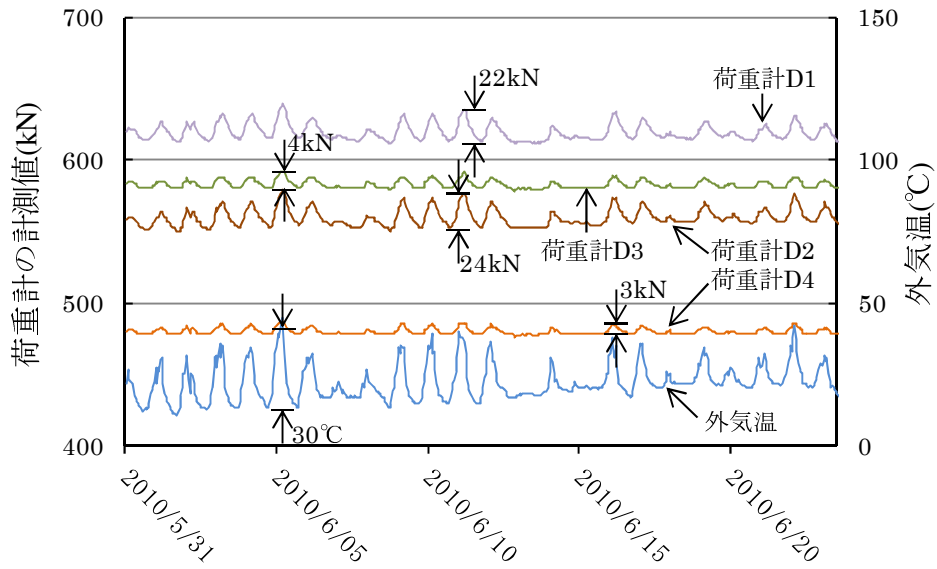


図-4.46 荷重計の計測値と外気温の変化（荷重計D1～荷重計D5）

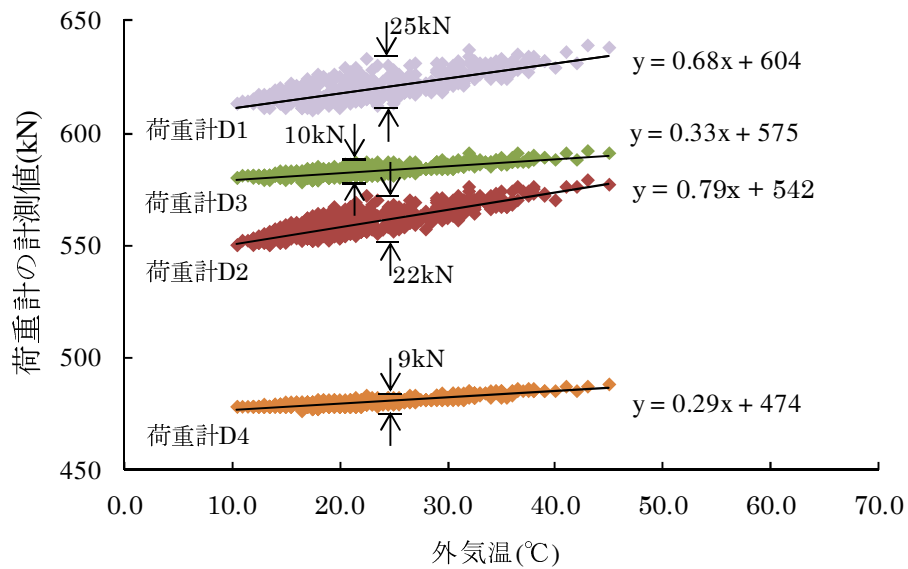


図-4.47 荷重計の計測値と外気温の相関関係（荷重計D1～荷重計D4）

表-4.4 荷重計4箇所の計測値と外気温の相関係数

荷重計	D1	D2	D3	D4
荷重計の計測値と外気温の相関係数	0.76	0.84	0.82	0.87

は、軽量受圧板の荷重計D1、荷重計D2が22kN、24kN、コンクリート受圧板の荷重計D3、荷重計D4が4kN、3kNである。図-4.47は荷重計D1～荷重計D4の計測値と外気温の関係を示している。ばらつき幅の最大は、軽量受圧板で22kN～25kN、コンクリート受圧板で9kN～10kNであり、軽量受圧板の方がコンクリート受圧板よりも大きいばらつきを示している。また、各荷重計について最小2乗法により求めた近似式の傾きを比較すると、軽量受圧板の荷重計D1、荷重計D2の直線勾配が0.68、0.79、コンクリート受圧板の荷重計D3、荷重計D4の直線勾配が0.33、0.29と、軽量受圧板の方がコンクリート受圧板よりも大きくなっている。このことから、受圧板の種別により荷重計が示す温度変化の割合が異なることが考えられる。表-4.4は荷重計D1～荷重計D4の計測値と外気温の相関係数を示しており、各荷重計とも相関係数は0.76以上と高い。これらの結果から、アンカーに設置された荷重計の計測値は、荷重計自体の持つ温度特性に加え、受圧板が持つ温度特性なども影響して変化している可能性が考えられる。

4.6 適切な緊張力のモニタリング手法

荷重計はアンカーの緊張力を継続的に計測できる利点があるものの、現在まで既設アンカーへの後付けや交換が極めて困難であったため、計測は施工時に設置された荷重計が正常に機能する期間に限定されてきた。法面は、施工後も不安定化することがあり定期的

な緊張力のモニタリングが重要なことから、本論で示した荷重計の着脱手法を活用することで効率的な緊張力管理を行うことが可能になると考えられる。また、荷重計の計測値は、予め管理基準を定め評価するのが一般的であるものの、外気温の影響により計測値が変化することも考えられる。これに対して、凍上等の影響を受けるような特殊な環境下にはない法面においては、荷重計の計測値と外気温の相関を基に、気温変化による影響評価を取り入れることにより適切な緊張力管理を行うことが可能と考えられる。

新設アンカーを対象に、施工後1ヶ月毎の荷重計の計測値と外気温の相関係数を検討した結果、施工後の1ヶ月間において相関係数は0.3程度と低いものの、施工後2ヶ月目以降においては0.9程度の高い値を示した。この結果より、荷重計の計測値は、施工直後はクランプ、リラクセーション等や外力、背面地山など様々な影響が卓越するものの、施工後一定期間が経過しそれらの影響が小さくなると、荷重計の計測値が変化する要因は外気温が支配的になると考えられる。このため、施工後荷重計の計測値と外気温との相関が高くなると、法面は安定した状態に移行したと考えられる。このような特性を踏まえると、一定期間における荷重計の計測値と外気温の相関性は、法面の安定性を評価するための判断材料の一つになると考えられる。なお、実際の緊張力管理において、データロガー等による自動計測が困難な場合には、両者の相関係数を捉えるのに十分な計測頻度を設定するよう留意する必要があると考える。

また、アンカー施工時に設置された荷重計は、長期にわたり正常に機能しているか不明確なこともあり、主に施工後法面が安定するまでの期間に限定されて用いられてきた。これに対して、点検などにおいてリフトオフ試験を実施する際に³⁵⁾、本論で示した荷重計計測を同時に行い、油圧ジャッキ荷重と比較することで荷重計の機能を確認することができる。この荷重計の機能検定により正常に機能

していることを確認できれば、以後の点検作業において荷重計を利用した緊張力管理行うことが可能と考えられる。

4.7 まとめ

本章において、既設アンカーに設置されている荷重計の機能検定方法や、既設および新設アンカーについて荷重計を用いたモニタリング手法の検討を行った。その結果、下記の事項を明らかにすることができた。

- (1) 荷重計の機能検定を行う場合、接線法により評価される残存引張り力と、荷重計が捉える実際のリフトオフ荷重とは一致しないことが考えられ、この点を理解した上で荷重－変位曲線の追従性に基づいた評価を行う必要がある。特に、変曲点の曲率が大きいくさび定着タイプのアンカーの場合、ナット定着タイプのアンカーに比べ、両者の計測差は大きくなる傾向がある。
- (2) SAAMジャッキを用いて既設アンカーのリフトオフ試験を実施する際、SAAMジャッキの載荷荷重と荷重計の計測値とを比較することにより、比較的容易に荷重計の機能検定を行うことが可能である。
- (3) SAAM ジャッキを活用した既設アンカーへの荷重計の着脱手法を開発し、各種荷重計に対し現地への適用性を検証した。その結果、荷重計を容易に着脱できるととともに、荷重計の設置前後のリフトオフ試験結果と荷重計の計測値との間に大きな差は見られず利用可能であることが確認された。
- (4) 安定した状態にある法面の既設アンカー、およびアンカーの実物供試体における荷重計の計測値は外気温と高い相関を示した。また、歪ゲージ式および振動弦式の荷重計の計測値を比較した結果、荷重計の計測値と外気温のばらつき幅の最大は、歪ゲー

ジ式の荷重計が約 3kN であるのに対し、振動弦式の荷重計は約 16kN～18kN と大きい値を示した。

- (5) アンカーが新設された法面において、施工初期ではクリープ、リラクセーション等の外力、背面地山の影響により緊張力低下が継続するため、この期間において荷重計の計測値と外気温の相関は低くなるものの、これらの影響が無くなった段階において両者の相関は高くなる傾向を示した。この結果から、荷重計の計測値と外気温の相関は、法面の安定性を評価するための判断材料の一つになるものと考えられる。

第 5 章 アンカーの面的調査とその評価

5.1 はじめに

現在、「維持管理マニュアル」⁸⁾などに、表-5.1 に示すようなアンカー1 本当りの残存引張り力や健全性を評価する基準は定められているものの、複数のアンカーを調査する場合の適切な調査数量や評価手法は示されていない。近年、SAAM ジャッキを用いて短時間で複数のアンカーに対してリフトオフ試験を実施することが可能となっており、この調査結果を基にアンカーが施工された法面における残存引張り力の面的分布を求めることが可能となっている。

本章では、まずアンカー全数に対する残存引張り力の面的分布調査の結果を基に、調査数量を減らした分散調査の結果と比較する方法により、複数のアンカーを調査する場合の適切な調査数量について検討を行った。次に、このことを踏まえ、変状の程度が異なる複数の法面の残存引張り力の面的分布調査の結果を基に、背面地質分布との関係性やリフトオフ試験の結果が示す特性について検討を

表-5.1 アンカーの残存引張り力評価の目安⁸⁾

残存引張り力の範囲	健全性	状態	対処例
$0.9T_{ys}$	E	破断の恐れあり	緊急対策を実施
$1.1T_a$	D	危険な状態になる恐れあり	対策を実施
許容アンカー力(T_a)	C	許容値を超えている	
設計アンカー力(T_d)	B		経過観察により対策の必要性を検討
定着時緊張力(P_t)	A	健全	
$0.8P_t$	A	健全	
$0.5P_t$	B		経過観察により対策の必要性を検討
$0.1P_t$	C	機能が大きく低下している	対策を実施
	D	機能していない	

行った。最後に、法面変状の程度を考慮に入れ、アンカーの健全性のばらつきとアンカーの過緊張等の不具合の発生率を指標とした新しいアンカー法面の健全性評価手法について提案を行った。

5.2 残存引張り力の面的分布評価のための調査数量

アンカーは、一般的に法面に複数本施工され法面の安定性を維持していることから、維持管理を行う上で、荷重計の計測値やリフトオフ試験により得られる残存引張り力の調査数量が多いほど、法面の健全性に対し信頼性の高い評価を行うことが可能となる。しかし、法面に施工されたアンカーに対し全数の調査を実施するには時間と手間を要するため、一般的にアンカー全数の $1/20$ 程度～ $1/10$ 程度に対する調査が行われている。高速道路法面の場合、アンカー全数の $1/20$ 以上かつ 5 本以上のアンカーに対して残存引張り力の管

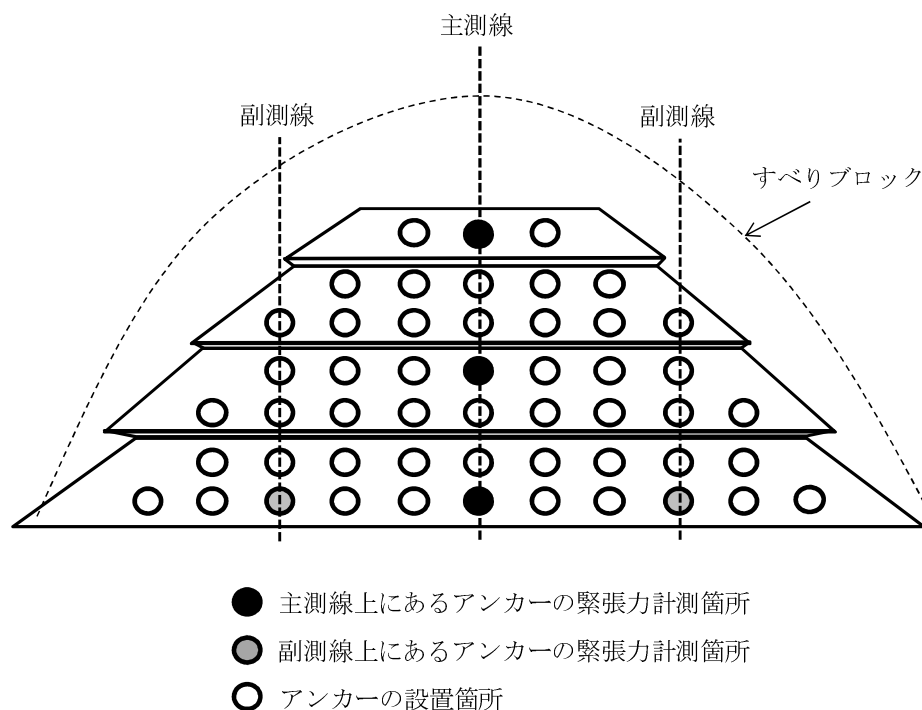


図-5.1 高速道路におけるアンカー法面の緊張力計測 ¹²⁾

理を行う基準となっている。この基準において、法面全体の緊張状態を捉えることができるよう、図-5.1に示すように、すべりブロックの主測線上のアンカーを基準に副測線上のアンカーなどを選定した緊張力計測が行われている。

酒井ら³⁶⁾は、法面に施工されたアンカーの全数程度、1/2程度、1/3程度、1/4程度の調査を実施した場合の設計アンカー力に対する残存引張り力の百分率である引張り力残存率の面的分布を示し、

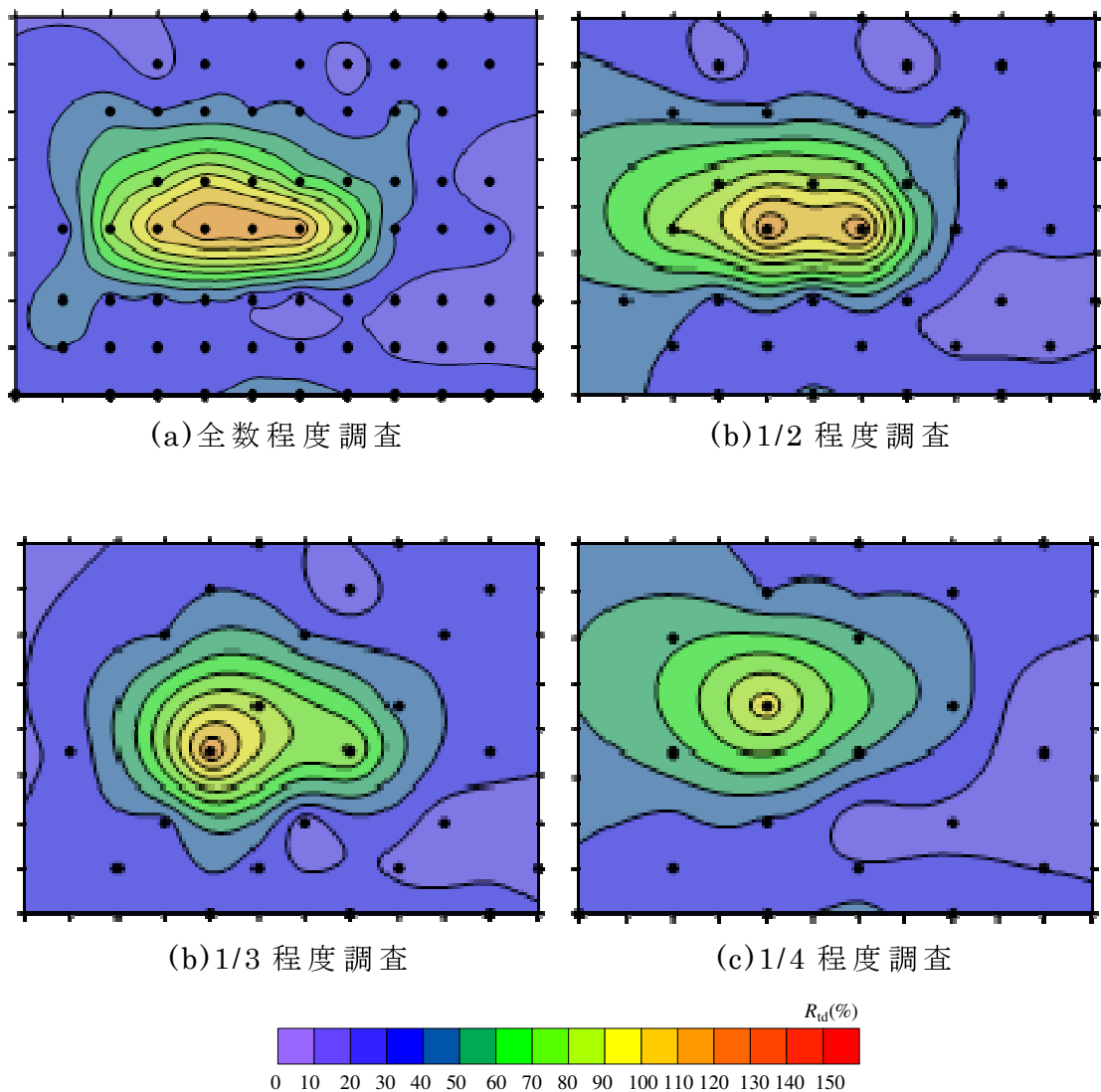
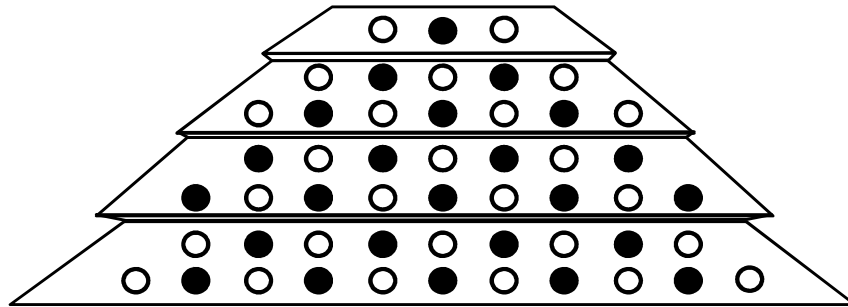
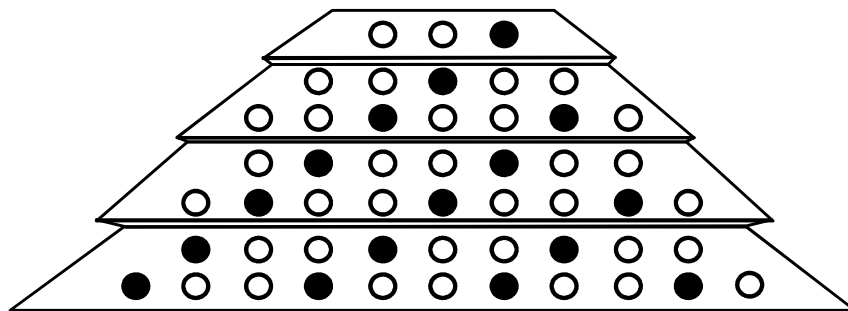


図-5.2 酒井ら³³⁾の検討した調査数量毎の R_{td} の分布



(a) 千鳥配置



(b) 斜め配列

図-5.3 計測箇所の配列例³⁷⁾

アンカー調査本数が分布形状に及ぼす影響について検討を行った。図-5.2は、調査数量毎の引張り力残存率 R_{td} の分布を示したものである。なお、ここで引張り力残存率 R_{td} は、下記の式により求めている。

$$R_{td} = \frac{P_e}{T_d} \quad (1)$$

ここに、
 P_e : 残存引張り力 (kN)
 T_d : 設計アンカー力 (kN)
 R_{td} : 引張り力残存率 (%)

検討の結果、アンカー法面のアンカーの R_{td} の分布を求める場合、図-5.3に示すアンカー全数の1/3程度～1/4程度のアンカーを対象として千鳥配置あるいは斜め方向の調査地点を選定して調査を行

うことが必要であることを述べている。しかしながら、この評価は過緊張のアンカーが局所的に発生した 1 法面を対象として検討されたものであり、過緊張の領域が混在し複雑な R_{td} の分布を示すような法面に対する評価は行われていない。

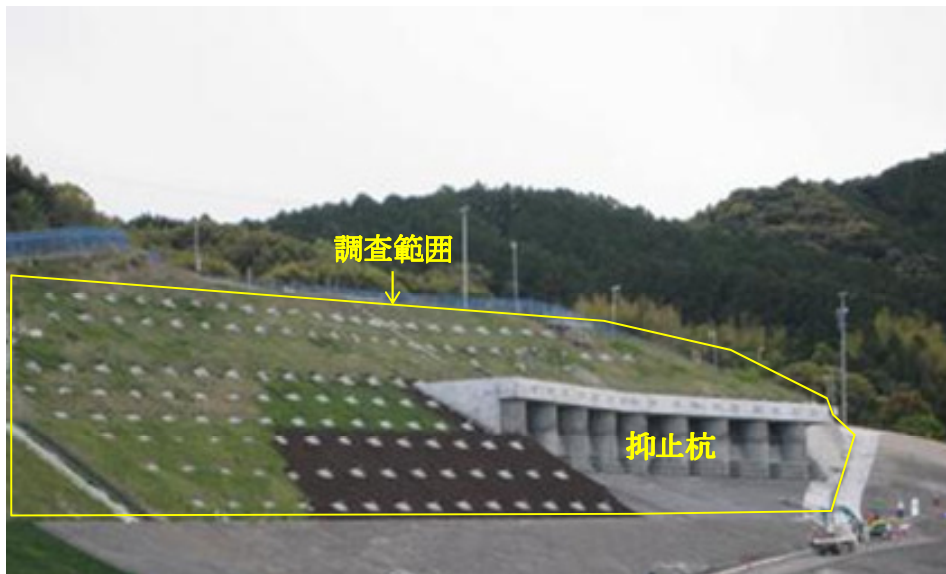
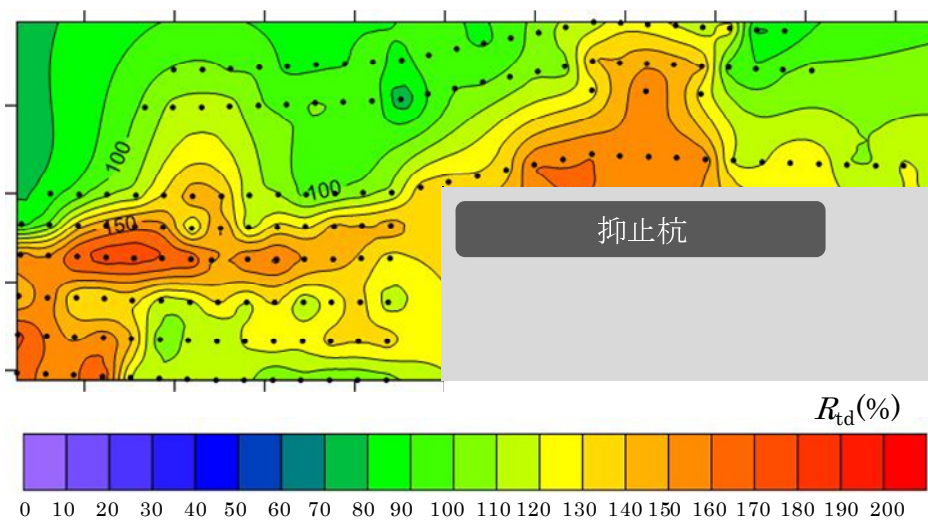
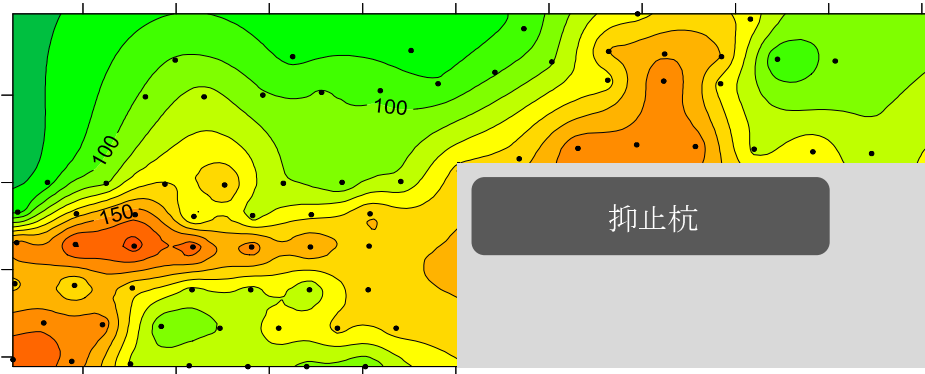


図-5.4 調査法面の状況

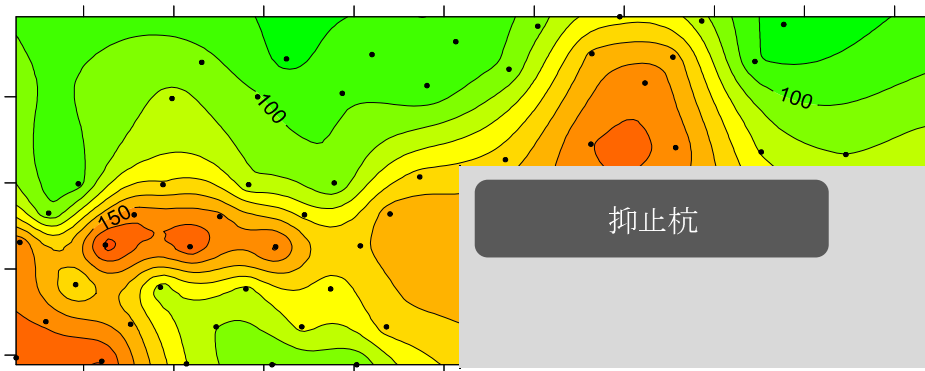


(図中の数字は R_{td} ，黒丸は調査個所を示している)

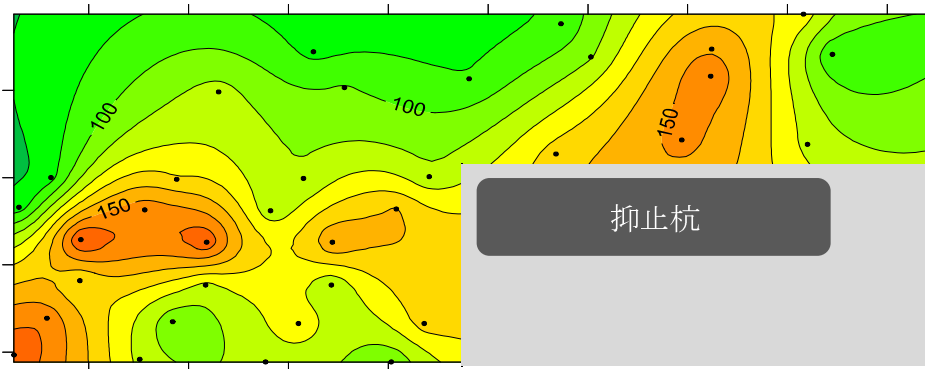
図-5.5 全数 153 本の R_{td} の分布結果



(a) 1/2 程度調査，73 本



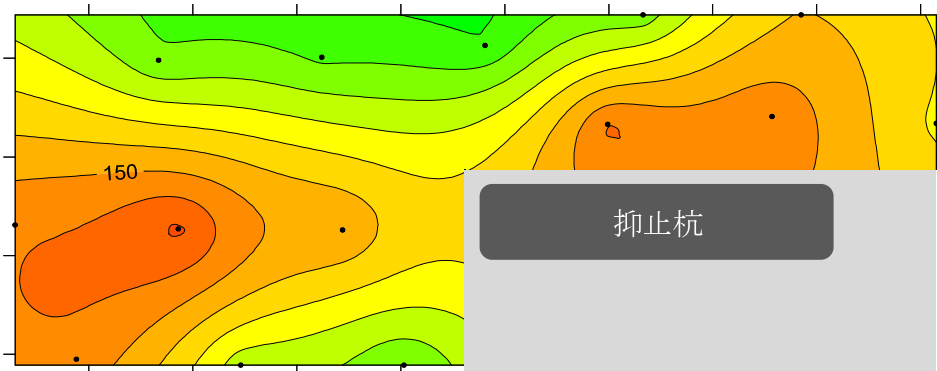
(b) 1/3 程度調査，52 本



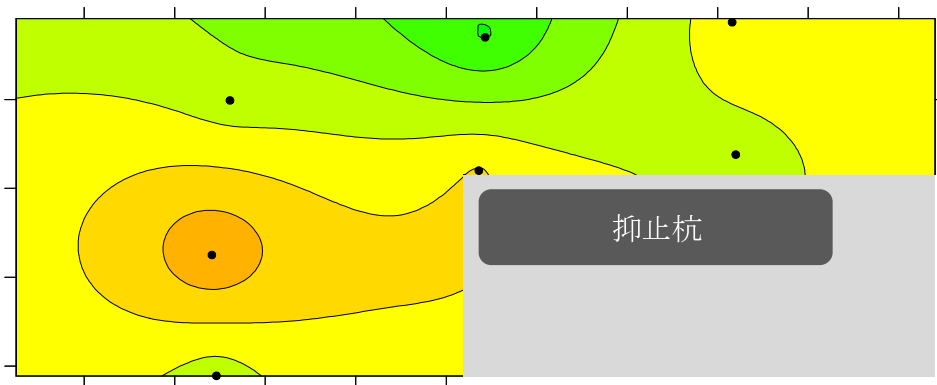
(c) 1/4 程度調査，36 本

(図中の数字は R_{td} ，黒丸は調査個所を示している)

図-5.6 調査数量毎の R_{td} の分布結果



(d)1/10 調査程度, 14 本



(e)1/20 調査程度, 7 本

(図中の数字は R_{td} , 黒丸は調査個所を示している)

図-5.7 調査数量毎の R_{td} の分布結果

そこで、泥岩を主体とする脆弱な地質構造からなり、過緊張の領域が複数存在し、アンカー施工後も緩慢な法面変状が継続している高速道路建設中の法面を対象として³⁸⁾、 R_{td} の分布を評価するために必要とされる調査数量についての検討を行った。図-5.4は調査対象とした法面を示す。リフトオフ試験は、施工されているSEEE工法のアンカー全数の153本に対し第2章で決定した「高速道路試験法」に従い実施した³⁹⁾。図-5.5は、アンカー全数153本の R_{td} の分布を示したものである。本調査法面では、120%~170%の過緊張のアンカーが多数存在する一様でない分布が確認された。この結

果を基に、全数調査と数量を減らした分散調査との比較を行い、面的調査に必要とされる調査数量を求めた。分散調査は全数に対し千鳥配置や斜め飛ばしを基本に、1/2 程度、1/3 程度、1/4 程度、1/10 程度、1/20 程度の 5 種類を対象とした。

図-5.6 は、酒井らが述べた局所的な分布を捉えることが可能な 1/2 程度、1/3 程度、1/4 程度とした場合の R_{td} の分布を、図-5.7 は調査数量をさらに減じた 1/10 程度、1/20 程度の R_{td} の分布を示したものである。調査数量を 1/2 程度とした場合の R_{td} の分布は、全数調査した場合とほぼ等しく、過緊張の領域を捉えている。また、1/3 程度、1/4 程度と調査数量が少なくなるに従い過緊張の領域を正確に特定する精度は低下するものの、これらの数量でも全数調査で捉えられた過緊張領域を特定できると考えられる。これに対し、1/10 程度、1/20 程度では、明確な過緊張領域の特定までは困難ではあるものの、アンカー法面における過緊張領域の存在を認識することは可能と考えられる。

以上の結果、実際の面的調査においては、まず過緊張領域の存在を確認する目的で法面の 1/10 程度～1/20 程度の調査を基に、 R_{td} の分布傾向を捉える一次フィルターとしての調査を実施し、過緊張領域の傾向が確認された場合には、1/3 程度～1/4 程度以上の調査により詳細な R_{td} の分布を求めることで効率的な管理を行うことが可能と考えられる⁴⁰⁾。

5.3 アンカーの残存引張り力の面的分布の特性

アンカーの残存引張り力の面的分布特性について、表-5.2 に示す 14 箇所法面を対象として検討を行ってみる。

図-5.8 に示す法面 1 は、農道建設中の法面であり、御荷錐帯の緑色岩類が分布し法面上部には表土が薄く残るが、その下位は比較

表-5.2 調査法面

法面 No	法面 面積 (m ²)	設置 間隔 (m)	工法 種類	施工 本数 (本)	調査 数量 (本)	破断 本数 (本)	調査 割合 (%)	道路 種別	備考
1	750	4.0	KTB	47	47	0	100%	農道	変状無し
2	2,500	3.0	SEEE	169	89	0	53%	高速	変状無し
3	200	3.0	SFL	18	18	0	100%	高速	変状無し
4	1,200	3.5	SEEE	71	21	0	30%	町道	変状無し
5	500	5.0	SFL	19	9	0	47%	高速	変状無し
6	800	2.5	EHD	85	30	0	35%	高速	変状無し
7	3,200	2.0	SMC VSL	158	56	0	35%	高速	変状無し
8	1,450	3.0	SMC	68	28	1	41%	高速	変状無し
9	900	2.0	SEEE	53	53	0	100%	高速	クラック有り
10	900	2.0	SEEE	171	71	0	42%	高速	クラック有り
11	900	1.0 ～ 1.5	SEEE	158	58	1	37%	高速	クラック有り
12	800	2.5	VSL	217	84	7	39%	高速	法尻変状
13	2,800	1.5	VSL SFL NM	434	270	86	62%	高速	道路変状
14	4,500	2.5	VSL	356	275	246	77%	県道	法面崩壊

※VSL工法はくさび定着タイプ、SEEE工法はナット定着タイプ、KTB、SFL、EHD、SMC、NM工法のアンカーはくさびナット併用定着タイプのアンカーを示す。

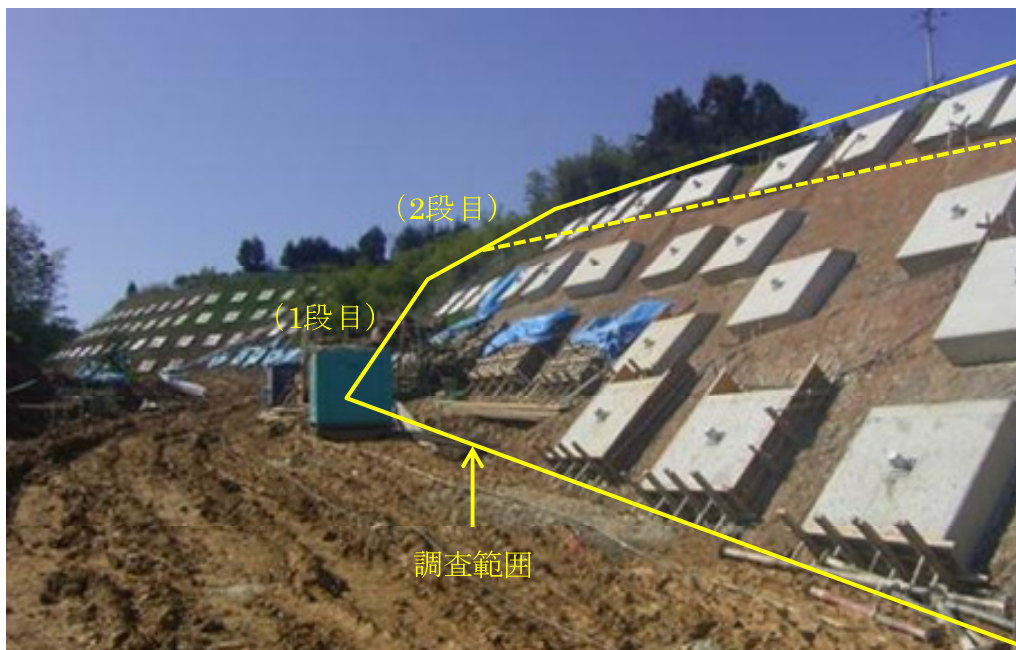


図-5.8 法面 1



図-5.9 法面 2

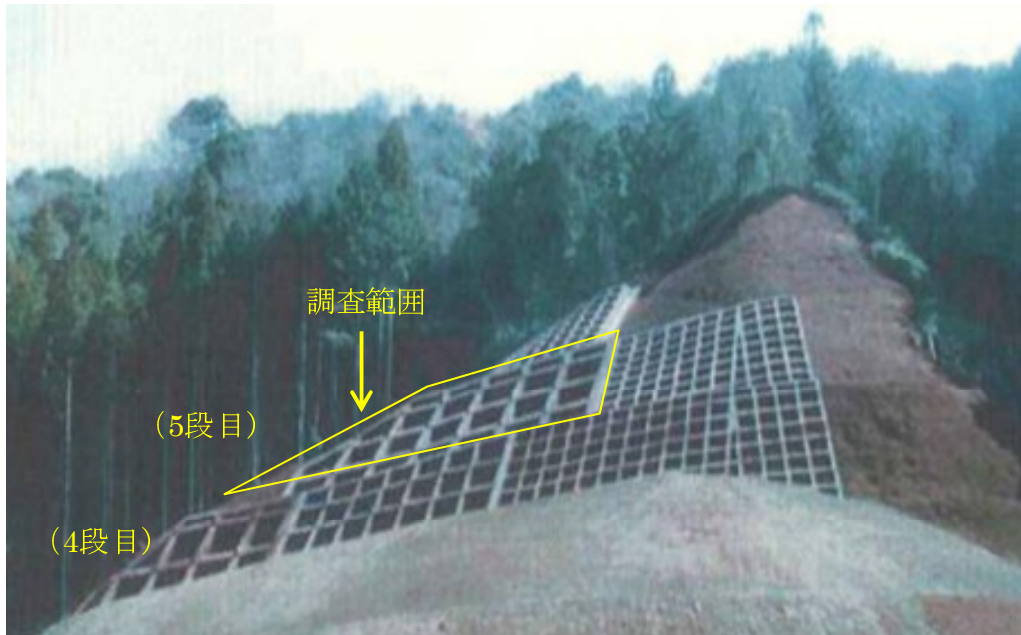


図-5.10 法面 3

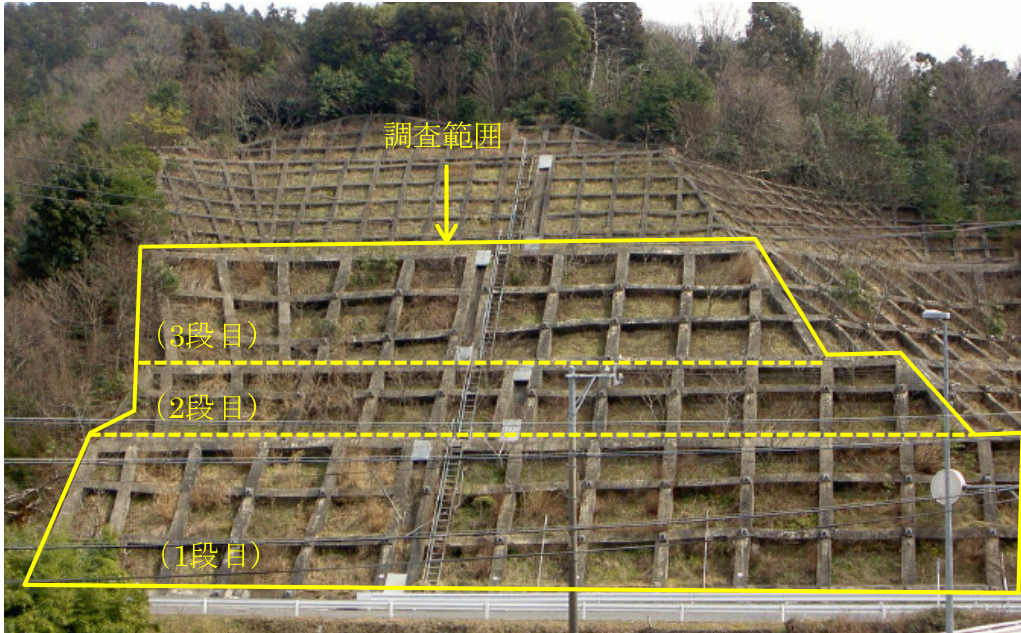


図-5.11 法面 4

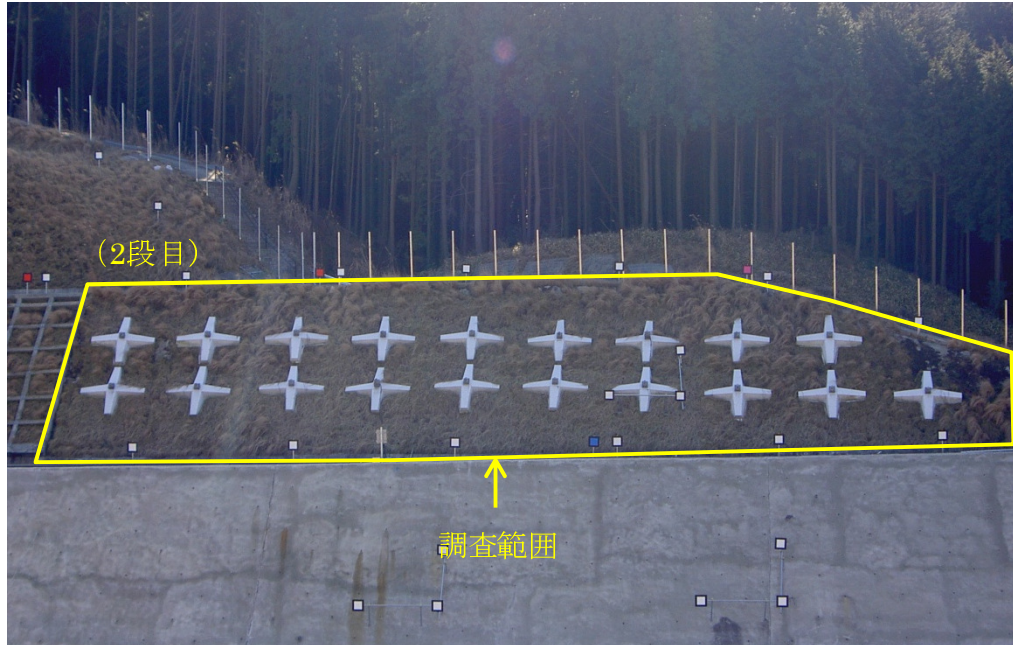


図-5.12 法面 5

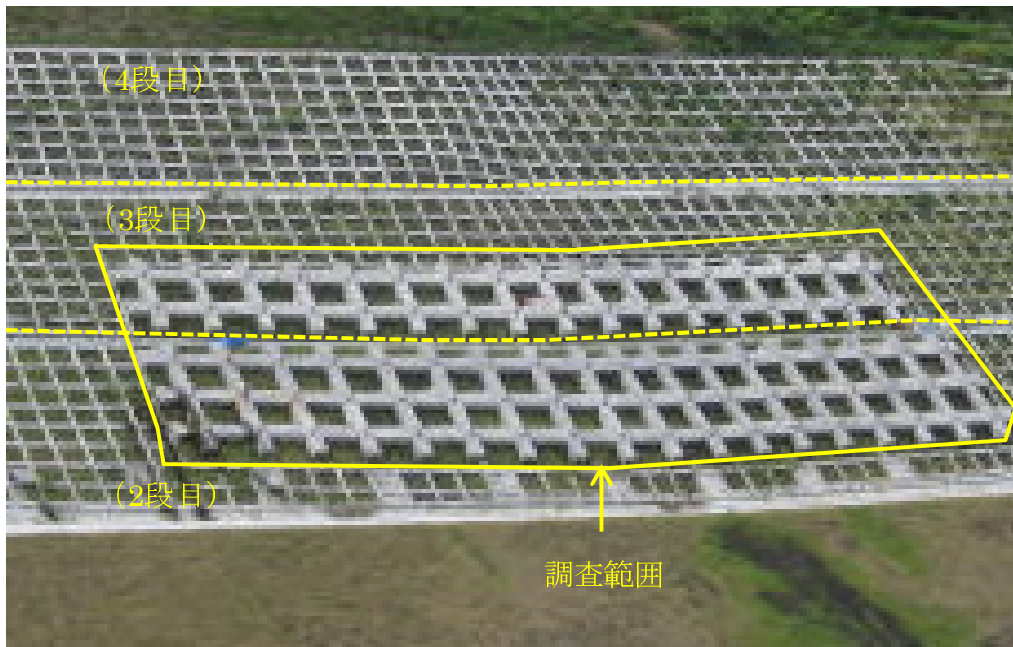


図-5.13 法面 6

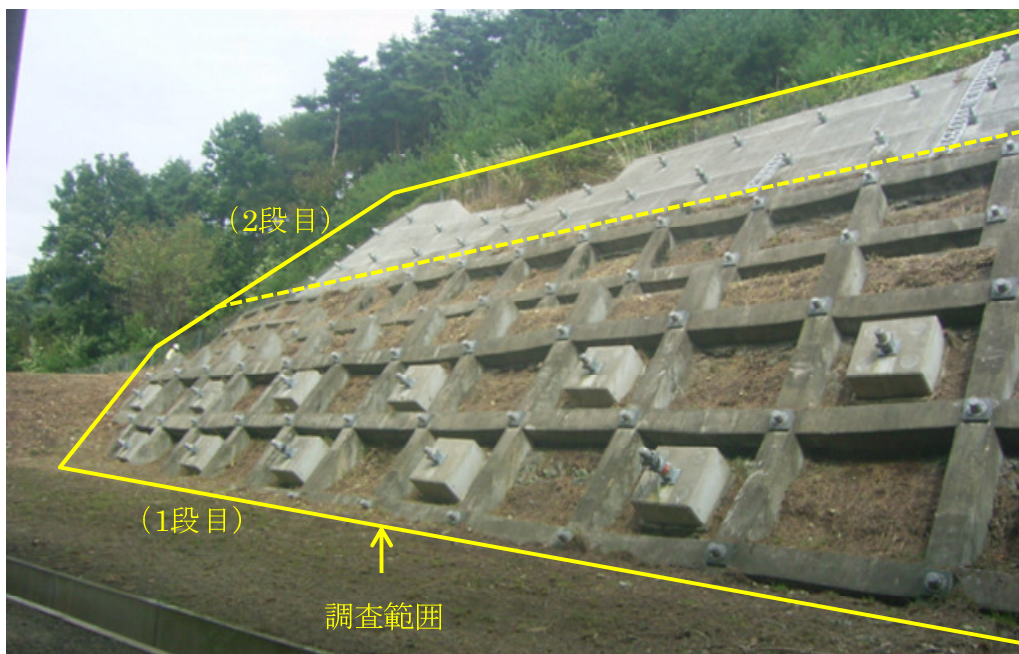


図-5.14 法面 7



図-5.15 法面 8



図-5.16 法面 9

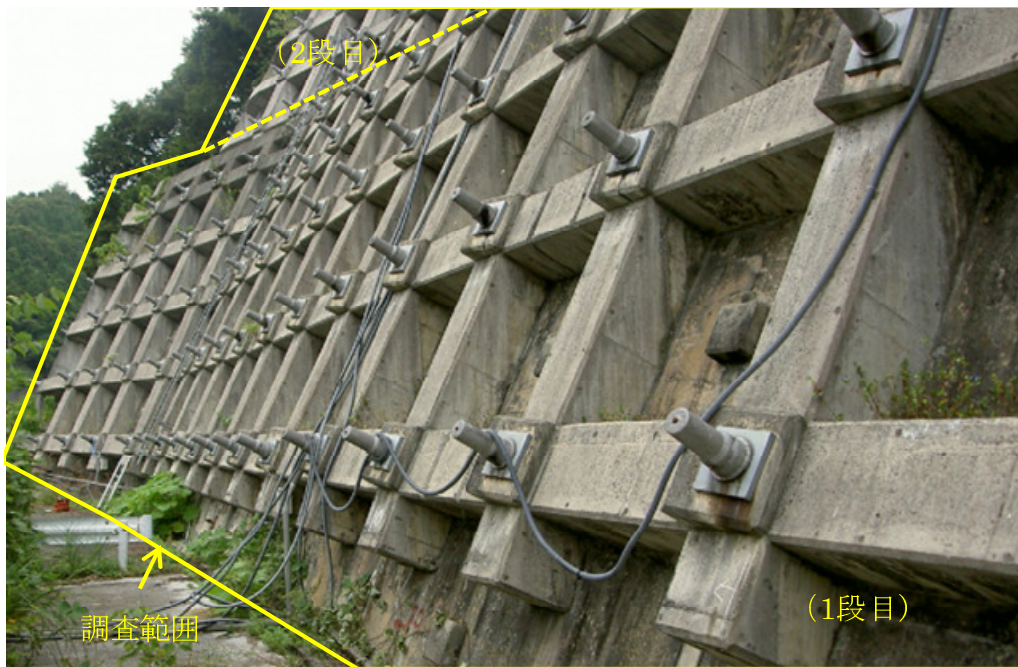


図-5.17 法面 10



図-5.18 法面 11

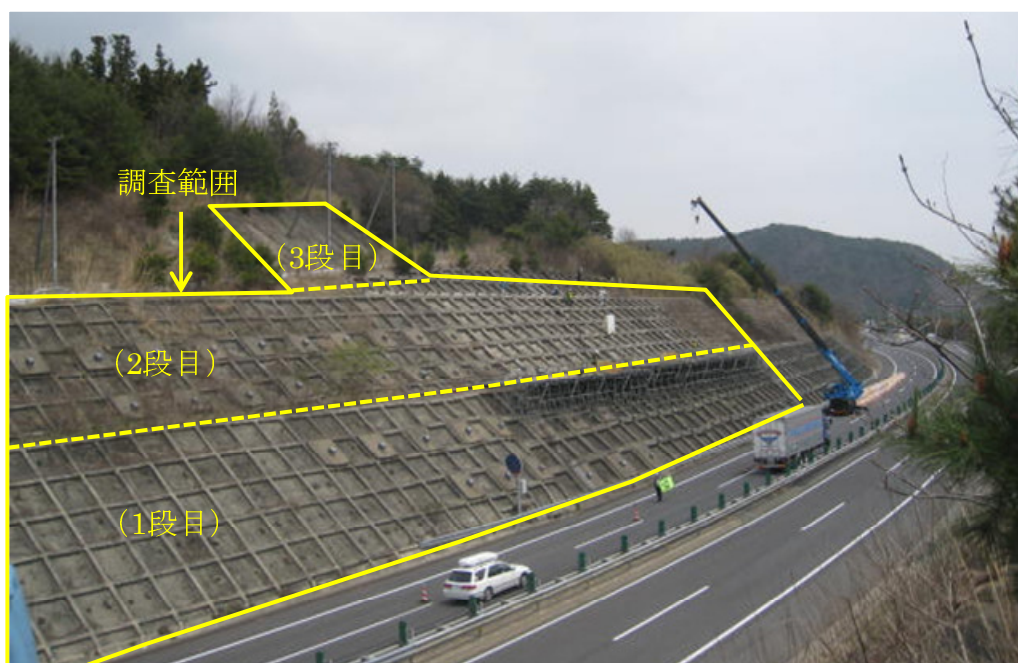
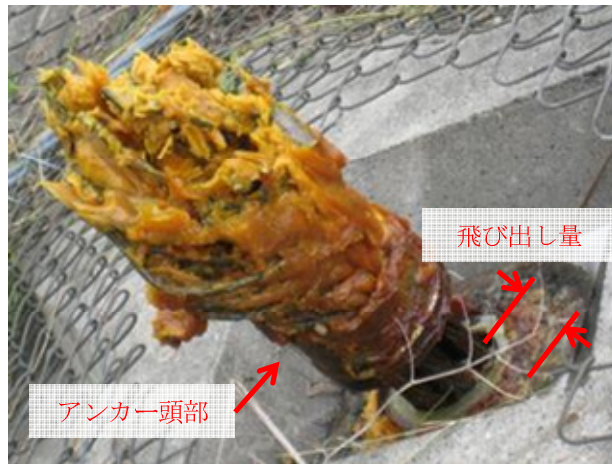


図-5.19 法面 12



図-5.20 法面 13



(a) アンカーの破断による飛び出し



(b) より線の変形したアンカー

図-5.21 変状の発生したアンカー（法面 13）



図-5.22 法面 14

的硬質な岩盤を呈している。法面では目立った変状は認められず、図-5.8 に示す調査範囲に KTB 工法のアンカー47本が施工され、47本（100%）について調査を実施している。なお、法面には施工時の背面地質の記録が残っている。

図-5.9 に示す法面 2 は、高速道路供用中の法面であり、和泉層群の砂岩頁岩互層からなり、中央構造線の断層活動の影響を受けて風化・劣化が顕著で、N 値 20 以下の風化岩および崖錘堆積物が分布している。法面では目立った変状は認められず、図-5.9 に示す SEEE 工法のアンカー169本が施工され、89本（53%）について調査を実施している。なお、本法面には施工時の背面地質の記録が残っている。

図-5.10 に示す法面 3 は、三波川結晶変岩類に属する泥質～砂質片岩で、切土法面の中央付近では硬質かつ新鮮な岩が露頭しているものの、切土法面左側では強風化し土砂状あるいは礫状を呈してい

る。法面では目立った変状は認められず、図-5.10 に示す調査範囲には SFL 工法のアンカー18 本が施工され、18 本（100%）について調査を実施している。なお、本法面には施工時の背面地質の記録が残っている。

図-5.11 に示す法面 4 は、町道供用中の法面であり、新生代新第三紀中新世の鈴鹿層群の含礫砂岩・シルト岩からなる。本法面では目立った変状は認められず、図-5.11 に示す調査範囲には SEEE 工法のアンカー71 本が施工され、21 本（30%）について調査を実施している。

図-5.12 に示す法面 5 は、高速道路供用中の法面であり、野洲川層群の岩礫砂岩を主体とする地質構造からなる。本法面では目立った変状は認められず、図-5.12 に示す調査範囲には SFL 工法のアンカー19 本が施工され、9 本（47%）について調査を実施している。

図-5.13 に示す法面 6 は、高速道路建設中の法面であり、大井川層群の比較的固結した礫岩が主体でその中に泥岩が介在する地質構造からなる。本法面では目立った変状は認められず、図-5.13 に示す調査範囲に EHD 工法のアンカー85 本が施工され、30 本（35%）について調査を実施している。

図-5.14 に示す法面 7 は、高速道路供用中の法面であり、第三紀横尾部層の緑色凝灰岩、頁岩、砂岩からなる。本法面では目立った変状は認められず、図-5.14 に示す調査範囲には SMC 工法、VSL 工法のアンカー158 本が施工され、56 本（35%）について調査を実施している。

図-5.15 に示す法面 8 は、高速道路供用中の法面であり、未固結な風化した安山岩屑片の混合した粘土でおおわれ、以深は風化した安山岩に部分的に風化をまぬがれた比較的新鮮な岩質を有し、所々に粘土層を挟んでいる状況となっている。本法面では、アンカーが施工されてから約 30 年が経過しており、幾つかのアンカーにくさ

びの破損が見られる。図-5.15 に示す調査範囲には SMC 工法のアンカー68本が施工され、28本（41%）について調査を実施しており、1本のアンカーに破断が確認されている。

図-5.16 に示す法面9は、高速道路供用中の法面である。本法面では、法面小段のコンクリートシールにクラックの発生がみられる。図-5.16 に示す調査範囲に SEEE 工法のアンカー53本が施工され、53本（100%）について調査を実施している。

図-5.17 に示す法面10は、高速道路供用中の法面である。本法面では、法面小段のコンクリートシールにクラックの発生がみられる。図-5.17 に示す調査範囲に SEEE 工法のアンカー171本が施工され、71本（42%）について調査を実施している。

図-5.18 に示す法面11は、高速道路供用中の法面であり、中世代三畳紀～白亜紀の砂岩、頁岩からなる。本法面では、施工時にトップリング対策としてアンカーが施工され、その後降雨に伴う法面変状の発生などにより増し打ちアンカーが施工され、現在約10年が経過している。図-5.18 に示す調査範囲に SEEE 工法のアンカー158本が施工され、58本（37%）について調査を実施しており、1本のアンカーに破断が確認されている。

図-5.19 に示す法面12は、新第三紀中新世の地層である白石層に相当する凝灰岩類を基盤として、それを覆う崖錐堆積物が分布している。本法面では、地震により法尻水路が閉塞する変状が見られ、複数のアンカーに破断等を原因とする飛び出しが確認されている。図-5.19 に示す調査範囲に SEEE 工法のアンカー217本が施工され、84本（39%）について調査を実施しており、7本のアンカーに破断が確認されている。

図-5.20 に示す法面13は、第四紀の地層である上長和層からなり火山灰質細砂～粗粒砂が分布している。本法面では、地すべりの活動による受圧板の変状が見られるとともに、図-5.21 に示すよう

な引張り材の破断によるアンカー頭部の飛び出しや、より線が変形したアンカーが複数本確認されている。また、アンカー破断箇所の法尻付近では 8cm 程度の路面の隆起も確認されている。図-5.20 に示す調査範囲に VSL 工法, SFL 工法, SEEE 工法のアンカー434本が施工され、270本(62%)について調査を実施しており、86本のアンカーに破断が確認されている。

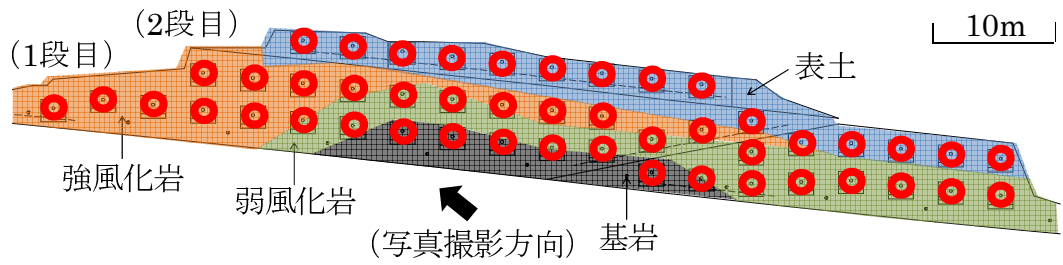
図-5.22 に示す法面 14 は、県道供用中の法面であり、中新世中山層群のシルト岩、砂岩互層の地質構造からなる。本法面では、地震の発生により法面の一部が崩壊し複数のアンカーの破断が確認されている。図-5.22 に示す調査範囲に VSL 工法のアンカー356本が施工され、275本(77%)について調査を実施しており、246本のアンカーに破断が確認されている。

各法面におけるリフトオフ試験は、SAAM ジャッキを使用し「高速道路試験法」に従い実施されている。なお、法面 3、法面 4 については、「高速道路試験法」がとりまとまる前に試験が実施されており、1 サイクル目の載荷における残存引張り力の評価となっている。

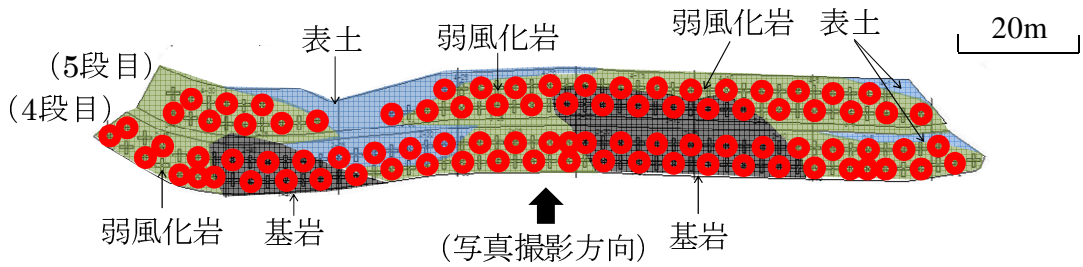
5.3.1 アンカーの残存引張り力と背面地質との関係

法面の変状が認められず、施工時の背面地質の記録が残っている法面 1、法面 2、法面 3 を対象として、アンカーの残存引張り力の面的分布と背面地質との関係について検討を行った。各法面の調査は、法面 1 では施工後 3 か月、法面 2、法面 3 では施工後約 10 年が経過した時点での調査となっている。なお、各法面に施工されたアンカーの設計アンカー力は、法面 1 では 398.7kN、法面 2 では 325.5kN、法面 3 では 286.0kN である。

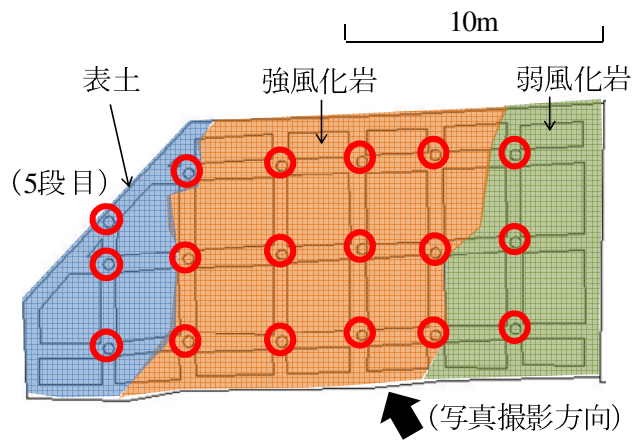
図-5.23 は、法面 1、法面 2、法面 3 の切土施工時における背面地質の記録を基に、地質を大きく表土、強風化、弱風化、基岩に分類して示したものである⁴¹⁾。また、図-5.24 は、各法面の R_{td} の分



(a)法面 1



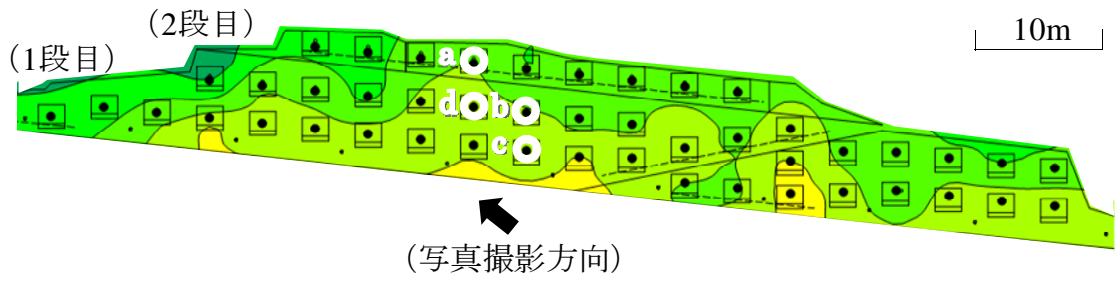
(b)法面 2



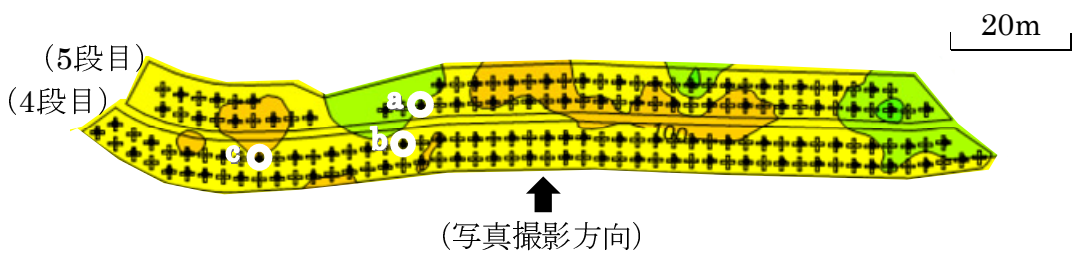
(c)法面 3

(○ : 調査個所)

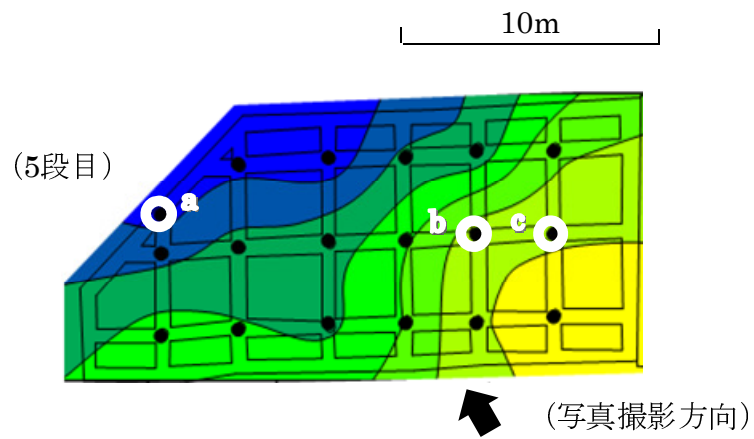
図-5.23 背面地質の分布 (法面 3)



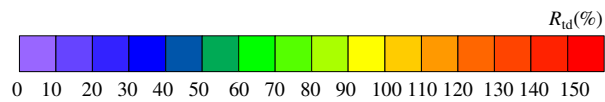
(a) 法面 1



(b) 法面 2



(c) 法面 3



(アンカーa～アンカーd：地質毎の比較対象としたアンカー)

図-5.24 R_{td} の分布

布を示したものである。法面 1 における R_{td} は 70%以上 100%以下となっており、過緊張のアンカーは見られなかった。リフトオフ試験を実施したアンカーについて、地質区分毎に求めた R_{td} の平均値は、表土では 81.7%、強風化岩では 86.2%、弱風化岩では 88.1%、基岩では 92.6%となり、岩質が硬質になるほど R_{td} の平均値が大きくなる傾向が認められた。次に、法面 2 について見てみると、 R_{td} は 70%以上 110%以下となっており、一部 R_{td} が 100%を若干越える分布を示した。地質区分毎の R_{td} の平均値は、表土では 92.0%、弱風化岩では 95.0%、基岩では 98.8%となり、法面 1 と同様、岩質が硬質になるほど R_{td} の平均値が大きくなる傾向が認められた。法面 3 では、 R_{td} は 80%から一部 30%程度まで大きく低下した分布を示し、地質区分毎の R_{td} の平均値は、表土では 49.4%、強風化岩では 55.5%、弱風化岩では 76.7%となった。

以上の結果から、変状の無い法面においては、背面地質の風化程度が進行するほど残存引張り力の低下が大きくなる傾向が認めら

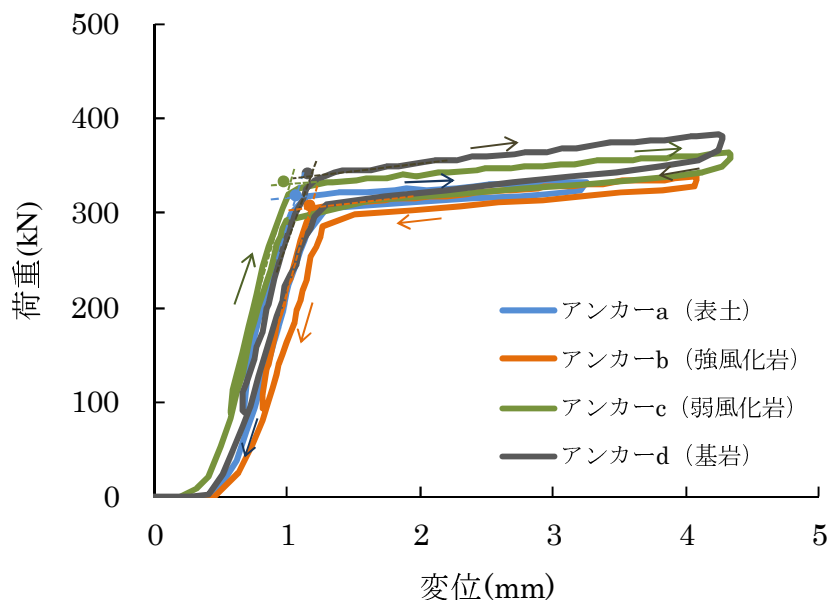


図-5.25 背面地質毎の荷重－変位曲線（法面 1）

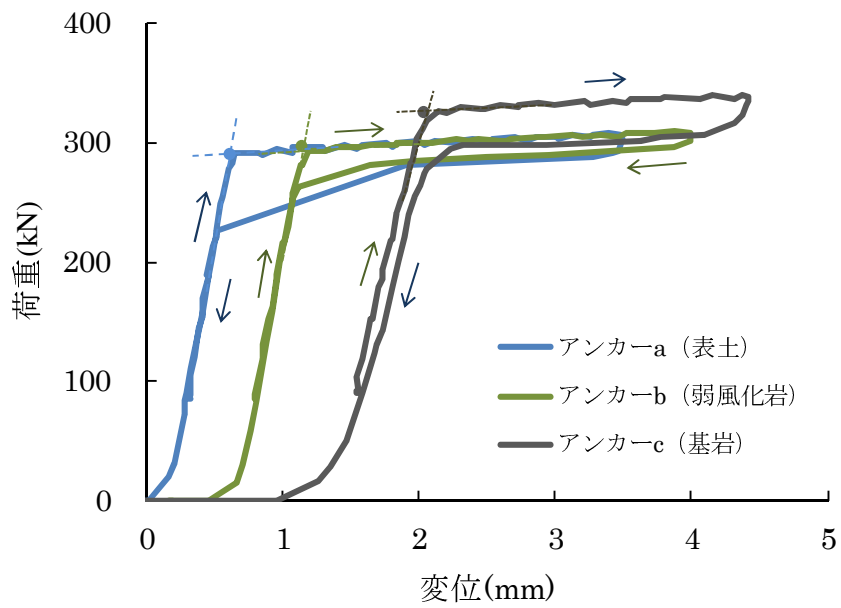


図-5.26 背面地質毎の荷重－変位曲線（法面 2）

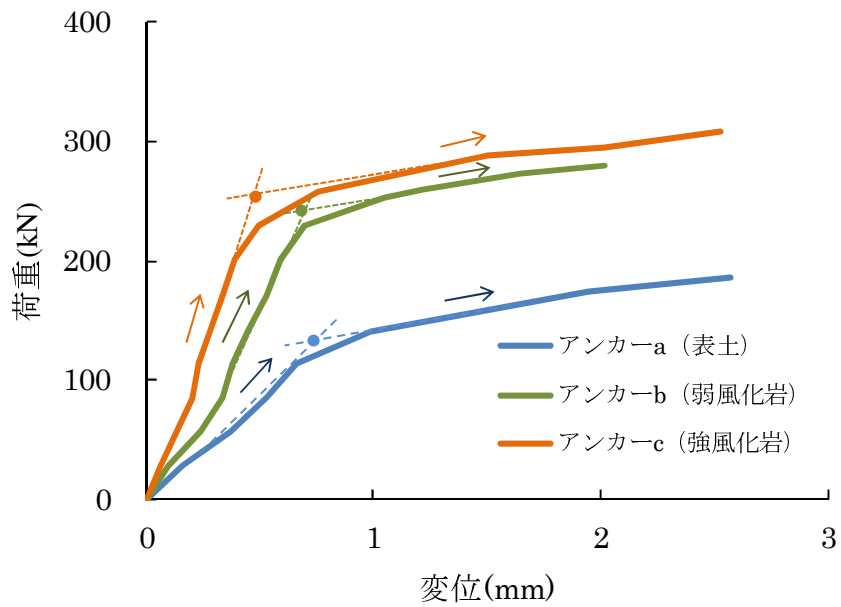


図-5.27 背面地質毎の荷重－変位曲線（法面 3）

れ、アンカーの R_{td} の分布と背面地質とに関係が見られると考えられる。

5.3.2 $\tan\theta$ と背面地質との関係

現在アンカーの健全性評価の目安として用いられる第 3 章で示した $\tan\theta$ と背面地質との関係について検討を行ってみる。なお、ここでの $\tan\theta$ は、アンカーの機能低下の影響を捉えると考えられるリフトオフ直後の直線勾配により評価を行った。図-5.25、図-5.26、図-5.27 は、目立った法面変状が認められない法面 1、法面 2、法面 3 において、図-5.24 に示す同一の法面内の背面地質状況が異なる地点（a 点～d 点）でのリフトオフ試験により得られた荷重－変位曲線を示したものである。各法面において、設計を基準に得られる $\tan\theta_0$ とリフトオフ後の直線勾配 $\tan\theta$ の比である設計 $\tan\theta$ 比を以下の式により求め、背面地質毎で比較を行った。

$$R_{\tan\theta} = \frac{\tan\theta}{\tan\theta_0} \quad (2)$$

ここに、 $\tan\theta$: リフトオフ試験の荷重－変位曲線において変曲点を超える載荷により得られる荷重－変位曲線の直線勾配 (kN/mm)

$\tan\theta_0$: 設計を基準に得られるアンカー自由長の伸び率 (kN/mm)

$R_{\tan\theta}$: 設計 $\tan\theta$ 比

法面 1 では、表土(a 点)で $R_{\tan\theta}=1.3$ 、強風化岩(b 点)で $R_{\tan\theta}=1.3$ 、弱風化岩(c 点)で $R_{\tan\theta}=1.5$ 、基岩(d 点)で $R_{\tan\theta}=1.4$ であった。法面 2 では、表土(a 点)で $R_{\tan\theta}=1.1$ 、弱風化岩(b 点)で $R_{\tan\theta}=1.1$ 、基岩(c 点)で $R_{\tan\theta}=1.3$ であった。また、法面 3 では、表土(a 点)で $R_{\tan\theta}=1.5$ 、強風化岩(b 点)で $R_{\tan\theta}=1.4$ 、弱風化岩(c 点)で $R_{\tan\theta}=1.4$ であった。以上の結果より、変状の無い法面において同一法面での $R_{\tan\theta}$ の値に大きな差は見られず、背面地質による影

表-5.3 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ (法面 1)

アンカーNo	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$	アンカーNo	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$
1-1	84.3	1.2	1-25	86.5	1.3
1-2	82.5	1.3	1-26	69.0	1.3
1-3	89.8	1.2	1-27	71.0	1.3
1-4	99.6	1.2	1-28	75.2	1.4
1-5	85.8	1.3	1-29	75.0	1.4
1-6	85.3	1.2	1-30	90.5	1.4
1-7	67.7	1.2	1-31	87.8	1.3
1-8	76.2	1.5	1-32	77.5	1.3
1-9	65.0	1.3	1-33	94.3	1.2
1-10	86.0	1.3	1-34	76.5	1.5
1-11	86.8	1.5	1-35	84.8	1.5
1-12	94.8	1.4	1-36	67.5	1.4
1-13	78.0	1.4	1-37	75.2	1.6
1-14	62.7	1.3	1-38	82.5	1.6
1-15	79.8	1.7	1-39	83.5	1.5
1-16	76.2	1.3	1-40	85.3	1.5
1-17	91.0	1.4	1-41	72.7	1.9
1-18	85.8	1.3	1-42	74.7	1.6
1-19	89.3	1.4	1-43	76.0	2.0
1-20	85.5	1.4	1-44	77.8	1.4
1-21	104.1	1.3	1-45	79.0	3.1
1-22	51.4	1.5	1-46	69.0	1.9
1-23	72.5	0.6	1-47	80.5	1.3
1-24	88.5	1.4			

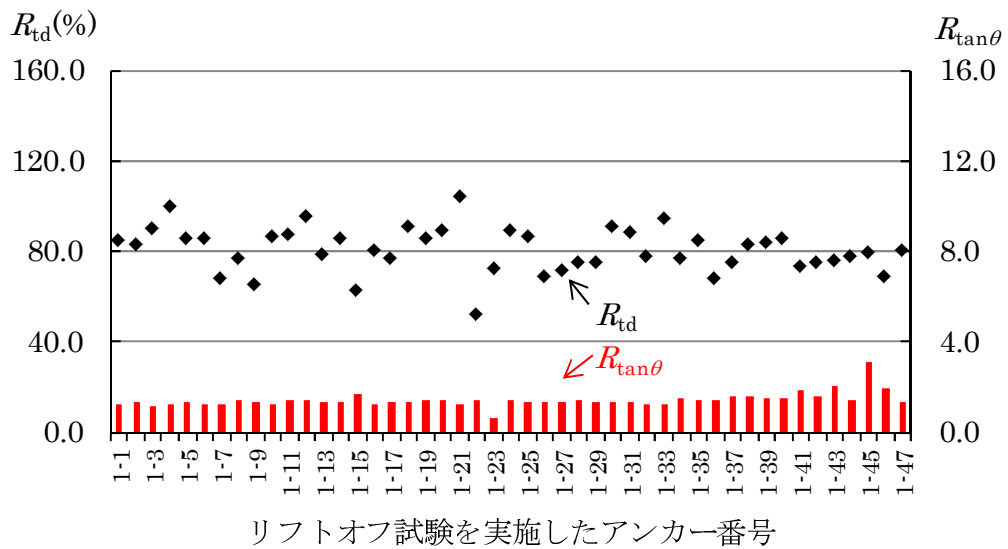


図-5.28 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ の関係 (法面 1)

表-5.4 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ (法面 2)

アンカー No	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$	アンカー No	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$	アンカー No	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$
2-1	90.6	1.1	2-31	97.7	1.1	2-62	102.3	2.0
2-2	97.1	1.5	2-32	95.5	1.0	2-63	102.9	1.1
2-3	88.2	1.1	2-33	95.2	1.3	2-64	97.4	2.0
2-4	90.3	1.1	2-34	99.8	1.3	2-65	102.0	1.3
2-5	99.5	1.3	2-35	100.2	1.0	2-66	98.0	1.0
2-6	95.9	1.0	2-36	97.4	1.0	2-67	90.6	1.1
2-7	95.5	1.1	2-37	98.3	1.2	2-68	79.9	1.1
2-8	96.5	1.1	2-38	99.2	1.9	2-69	93.1	1.1
2-9	96.2	1.2	2-39	94.9	3.5	2-70	107.8	1.2
2-10	92.8	0.8	2-40	94.6	1.0	2-71	103.8	1.2
2-11	98.6	1.5	2-41	89.7	1.3	2-72	98.3	1.1
2-12	95.2	1.1	2-42	95.2	0.8	2-73	99.2	1.3
2-13	90.0	1.0	2-43	102.0	1.0	2-74	89.4	1.3
2-14	100.5	1.3	2-44	94.3	1.1	2-75	96.5	1.3
2-15	91.6	1.3	2-45	92.8	1.3	2-76	92.2	1.3
2-16	90.9	1.1	2-46	95.2	1.5	2-77	92.2	1.3
2-17	101.7	0.9	2-47	93.1	1.4	2-78	98.0	1.5
2-18	95.2	1.1	2-48	100.2	1.3	2-79	73.1	1.3
2-19	100.2	1.2	2-49	94.0	1.0	2-80	102.0	2.2
2-20	100.8	1.0	2-50	102.9	1.0	2-81	92.5	1.4
2-21	97.7	1.1	2-51	96.2	1.1	2-82	95.9	1.8
2-22	100.2	1.2	2-52	96.8	1.0	2-83	109.7	1.6
2-23	100.2	1.1	2-53	86.9	1.4	2-84	103.8	2.4
2-24	86.9	1.3	2-54	74.7	1.2	2-85	101.7	1.5
2-25	92.8	1.2	2-55	78.0	1.5	2-86	87.6	1.0
2-26	100.2	1.9	2-56	98.3	1.5	2-87	98.9	2.0
2-27	95.9	1.0	2-58	100.5	1.2	2-88	98.6	1.2
2-28	82.6	1.2	2-59	100.8	1.3	2-89	96.2	1.5
2-29	86.3	1.4	2-60	104.5	1.1			
2-30	94.9	1.0	2-61	100.5	2.1			

※ $\tan\theta$ を計測できていない数量 : 1 本

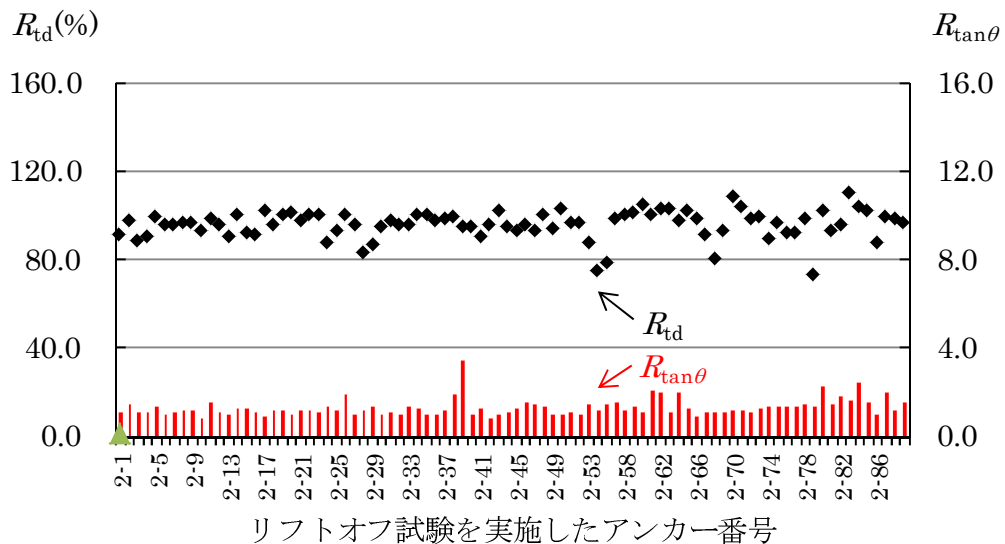


図-5.29 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ の関係 (法面 2)

表-5.5 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ (法面 3)

アンカーNo	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$
3-1	92.7	0.9
3-2	88.5	1.4
3-3	88.8	1.0
3-4	85.7	1.4
3-5	70.3	1.2
3-6	68.9	0.9
3-7	57.7	0.9
3-8	56.3	1.0
3-9	60.8	1.0
3-10	54.5	1.0
3-11	65.0	0.8
3-12	46.9	1.5
3-13	77.3	1.5
3-14	52.8	1.1
3-15	52.8	1.1
3-16	32.5	1.2
3-17	38.1	1.7
3-18	36.4	0.9

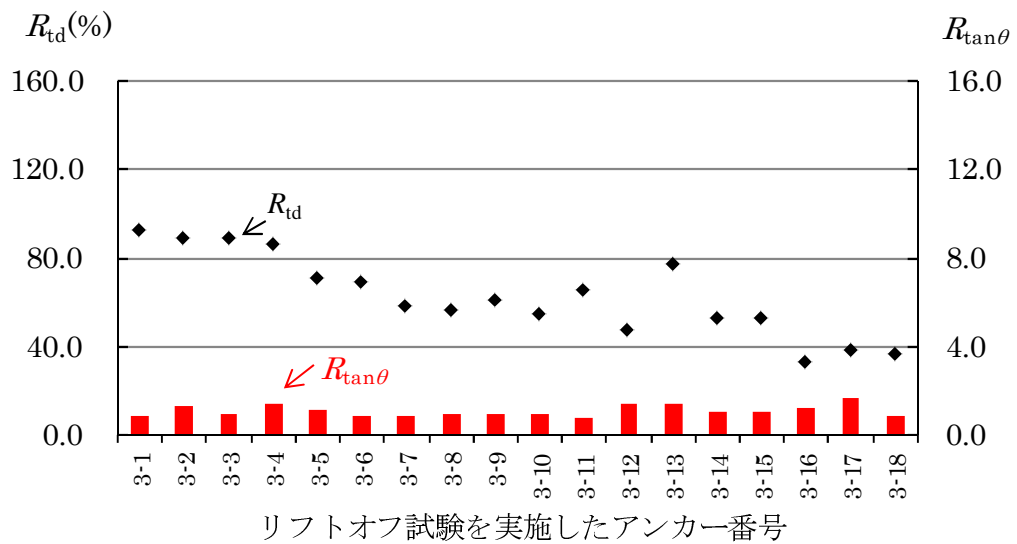


図-5.30 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ の関係 (法面 3)

響は認められないと考えられる。

表-5.3・図-5.28、表-5.4・図-5.29、表-5.5・図-5.30は、それぞれ法面1、法面2、法面3について、リフトオフ試験により R_{td} と $\tan\theta$ が確認できたアンカーを対象として R_{td} と R_t の関係を示したものである。変状が認められない法面1、法面2、法面3では、 R_{td} にばらつきが見られるものの $R_{\tan\theta}$ の差は小さい。 $\tan\theta$ は、引張り材の伸び率でありアンカー機能が健全な場合、残存引張り力の増減に対し一定の値を示す性質を持っていることから、これら法面では、アンカーの多くが健全な状態を維持しながら背面地質の影響により残存引張り力が変化しているものと考えられる。

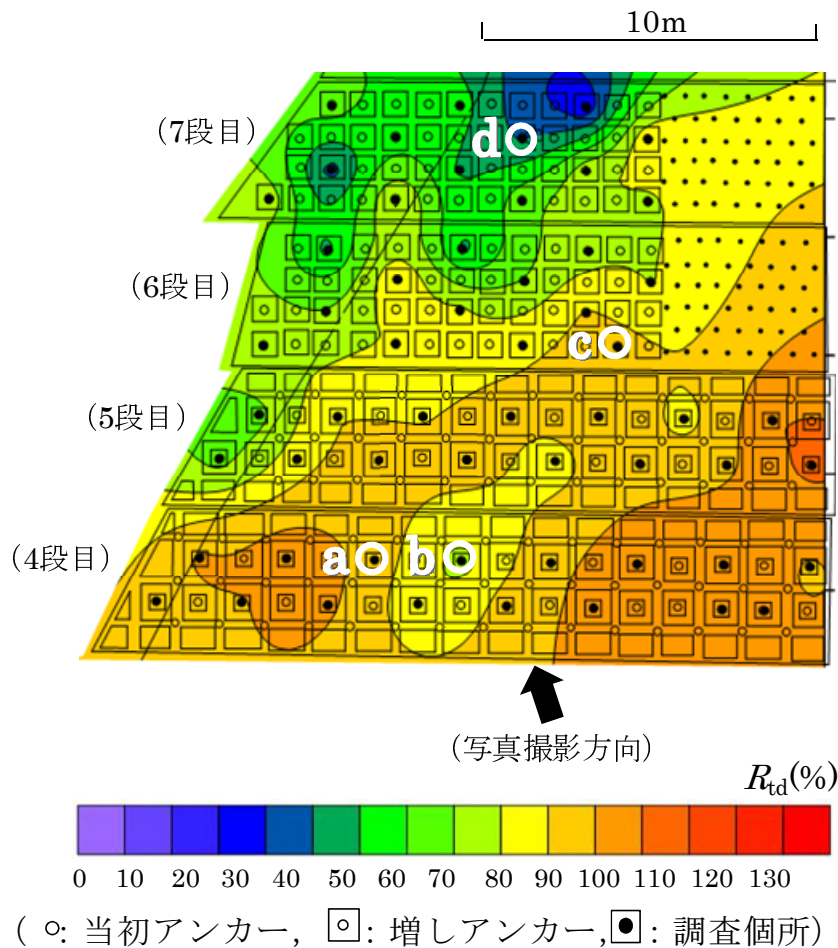
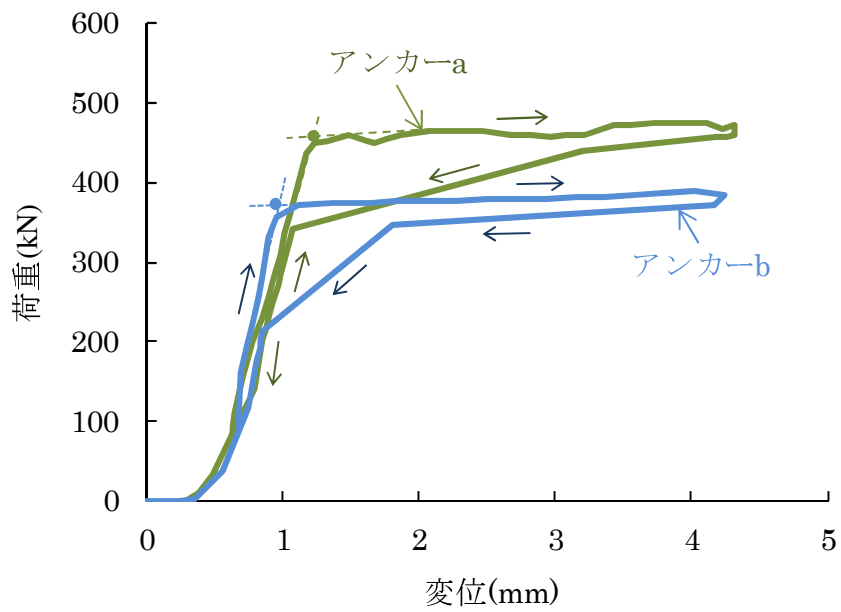
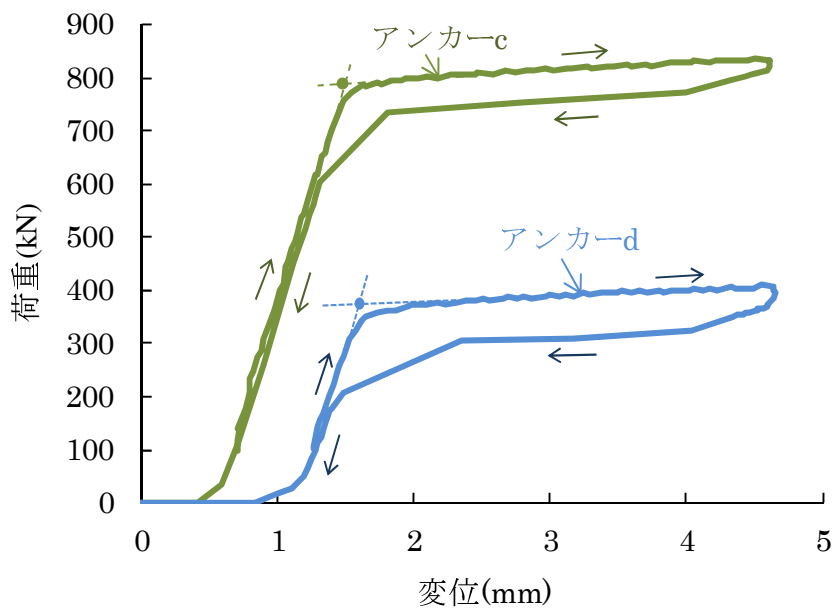


図-5.31 R_{td} の分布 (法面11)



(a) 荷重－変位曲線（アンカーa、アンカーb）



(b) 荷重－変位曲線（アンカーc、アンカーd）

図-5.32 R_{td} の異なる荷重－変位曲線（法面 11）

5.3.3 設計 $\tan\theta$ 比と残存引張り力の関係

設置 $\tan\theta$ 比と残存引張り力の関係について、法面に変状が発生した法面 11、法面 13 を対象として検討を行った。法面 11 は、SEEE(F70TA)を 31 本、SEEE(F130TA)を 26 本リフトオフ試験を実施しており、図-5.31 は、法面 11 について R_{td} の分布を求めたものである。調査結果より、本法面では 120%を越える過緊張の領域と一部 50%以下まで残存引張り力が低下している領域が混在する分布を認めることができる。図-5.32 は、図-5.31 に示す過緊張および緊張力が低下した図中 a 点～d 点のアンカーにおける荷重－変位曲線を示したものである。4 段目の SEEE(F70TA)のアンカー a、アンカー b について R_{td} および $R_{\tan\theta}$ を見てみると、過緊張のアンカー a が $R_{td}=106.4\%$ 、緊張力低下のアンカー b が $R_{td}=86.8\%$ であった。また、 $R_{\tan\theta}$ はアンカー a が $R_{\tan\theta}=1.6$ アンカー b が $R_{\tan\theta}=1.4$ であった。6 段目～7 段目の SEEE(F130TA)のアンカー c、アンカー d について R_{td} および $R_{\tan\theta}$ を見てみると、過緊張のアンカー c が $R_{td}=103.6\%$ 、緊張力低下のアンカー d が $R_{td}=48.7\%$ であった。また、 $R_{\tan\theta}$ は、アンカー c が $R_{\tan\theta}=2.7$ 、アンカー d が $R_{\tan\theta}=2.5$ であった。以上の結果、本法面ではアンカーの種別毎に $R_{\tan\theta}$ の値に差がみられたが、同じ種別のアンカーについては過緊張アンカー、緊張力低下アンカーに関わらず $R_{\tan\theta}$ に大きな差は認められなかった。表-5.6・図-5.33 は、法面 11 においてリフトオフ試験により R_{td} と $\tan\theta$ が確認できたアンカーを対象として、各アンカー毎の R_{td} と $R_{\tan\theta}$ の関係を示したものである。 R_{td} のばらつきに対して、 $R_{\tan\theta}$ のばらつきは 0.7～5.8 であり法面 1～法面 3 と比較してやや大きなばらつきを示した。

図-5.34 は、法面 13 について R_{td} の分布を求めたものである。図中の灰色枠部分は、アンカーの破断による飛び出しなどの損傷によりリフトオフ試験が実施できなかった範囲を示している。コンター

表-5.6 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ (法面 11)

アンカーNo	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$	アンカーNo	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$
11-1	77.2	1.3	11-30	117.2	1.4
11-2	99.4	1.4	11-31	111.8	2.1
11-3	99.2	1.6	11-32	74.4	1.7
11-4	102.5	1.7	11-33	64.6	1.5
11-5	109.5	2.3	11-34	32.5	1.6
11-6	96.8	2.3	11-35	66.8	3.6
11-7	119.3	3.5	11-36	48.7	2.5
11-8	76.5	1.5	11-37	99.6	2.2
11-9	95.4	1.3	11-38	45.4	1.8
11-10	103.9	1.4	11-39	58.6	1.7
11-11	104.3	1.3	11-40	88.0	2.5
11-12	95.7	1.5	11-41	86.5	2.4
11-13	105.7	2.6	11-42	92.5	2.2
11-14	107.8	3.4	11-43	76.6	2.3
11-16	111.3	2.9	11-44	87.6	1.6
11-17	117.4	0.7	11-45	57.3	2.5
11-18	106.4	1.6	11-46	57.3	3.2
11-19	86.8	1.4	11-47	86.9	2.4
11-20	106.9	3.2	11-48	99.4	3.0
11-21	117.9	3.0	11-49	80.6	3.0
11-22	118.3	2.4	11-50	89.7	2.0
11-23	109.0	2.5	11-51	80.6	2.8
11-24	102.9	2.3	11-52	91.9	2.0
11-25	109.2	1.9	11-53	101.0	3.8
11-26	111.6	1.4	11-54	89.9	5.8
11-27	92.4	1.8	11-55	90.0	2.9
11-28	104.8	1.8	11-56	96.8	2.5
11-29	112.7	1.3	11-57	103.6	2.7

※ $\tan\theta$ を計測できていない数量 : 1 本

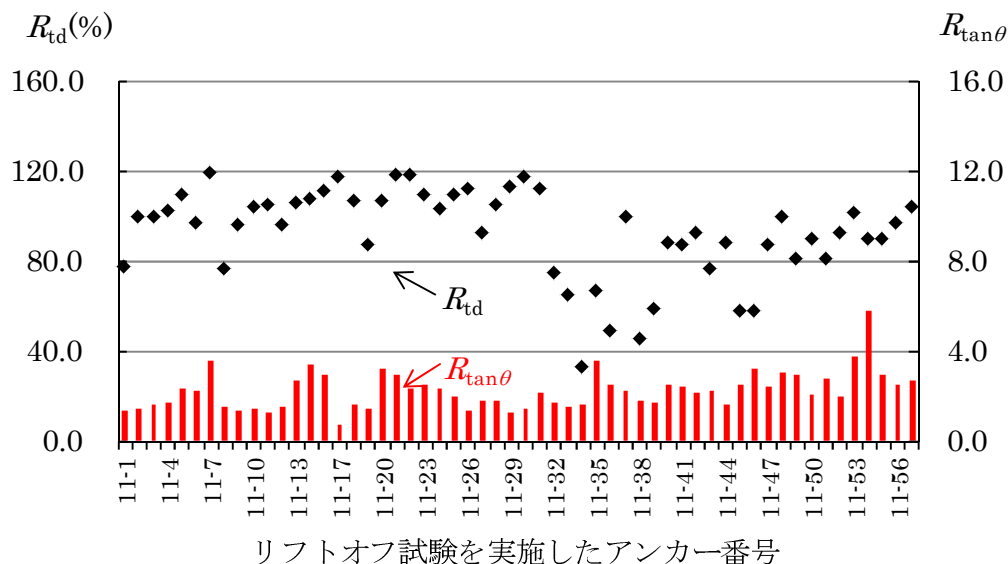
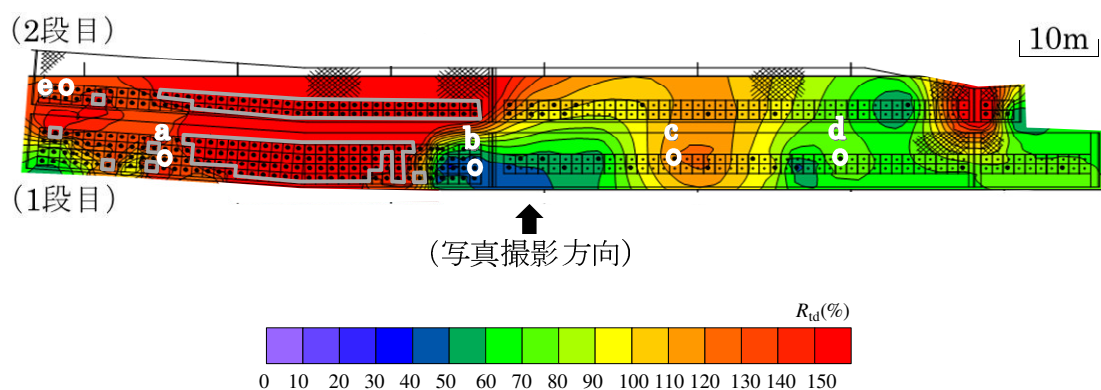


図-5.33 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ の関係 (法面 11)

グラフの凡例は、150%～160%の範囲を最大として示しており、リフトオフ試験を実施できなかった領域の R_{td} は 150%以上とみなした。 R_{td} の分布は、破断箇所の周囲を取り囲むように過緊張状態のアンカーが分布し、130%を越える過緊張の領域と 40% 程度まで残存引張りが低下している領域が混在する結果となっている。図-5.35、図-5.36、図-5.37 は、それぞれ過緊張および緊張力が低下した a 点～e 点におけるアンカーの荷重－変位曲線を示したものである。アンカーの破断箇所が多い区間において過緊張を示すアンカー a が $R_{td}=118.3\%$ 、緊張力低下を示すアンカー b が $R_{td}=45.4\%$ であった。 $R_{tan\theta}$ は、アンカー a が $R_{tan\theta}=3.8$ 、アンカー b が $R_{tan\theta}=1.5$ であった。これに対し、破断に至らない区間において、過緊張を示すアンカー c が $R_{td}=123.0\%$ 、緊張力低下を示すアンカー d が $R_{td}=80.9\%$ であった。また、 $R_{tan\theta}$ は、アンカー c が $R_{tan\theta}=3.0$ 、アンカー d が $R_{tan\theta}=1.5$ であった。なお、本法面では、過緊張やアンカーの破断が集中する区間では、図-5.37 に示す e 点のアンカーのように、荷重－変位曲線の変曲点を確認することができないものが多数確認されている。これらアンカーについては破断の危険性から降伏点荷重の 0.9 倍までしか载荷を行っていない。本法面において



※●：調査箇所、灰色枠部分：アンカーの破断など損傷が発生した範囲

図-5.34 R_{td} の分布 (法面 13)

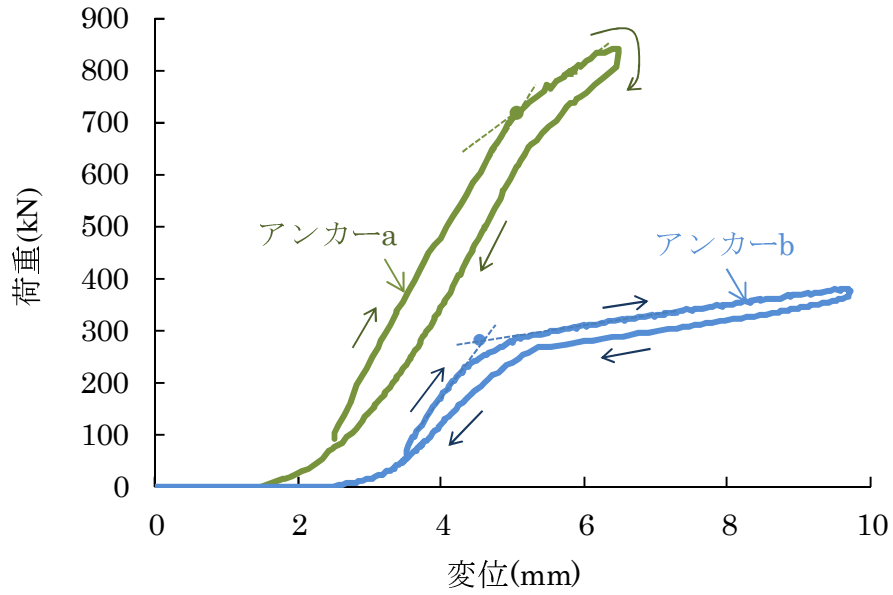


図-5.35 荷重－変位曲線（法面 13、アンカー a・アンカー b）

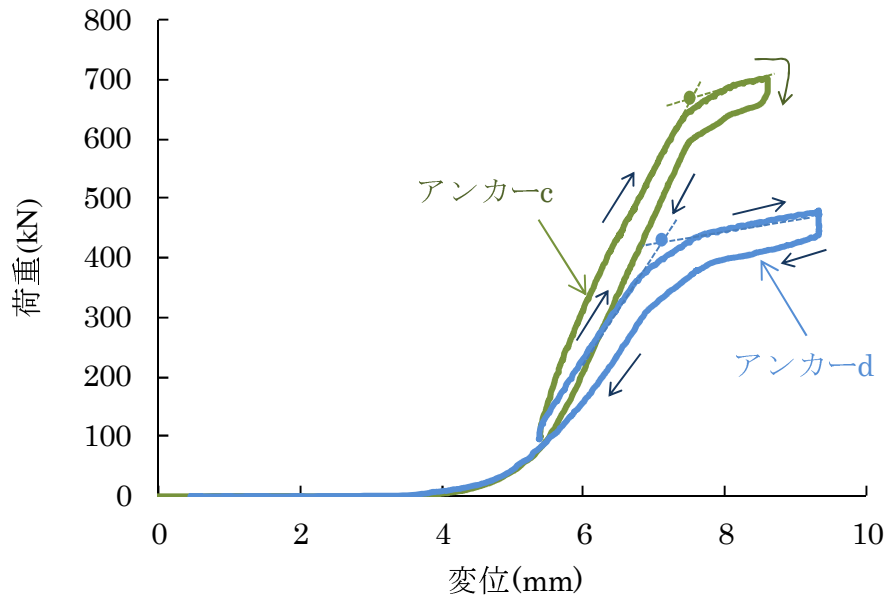


図-5.36 荷重－変位曲線（法面 13、アンカー c・アンカー d）

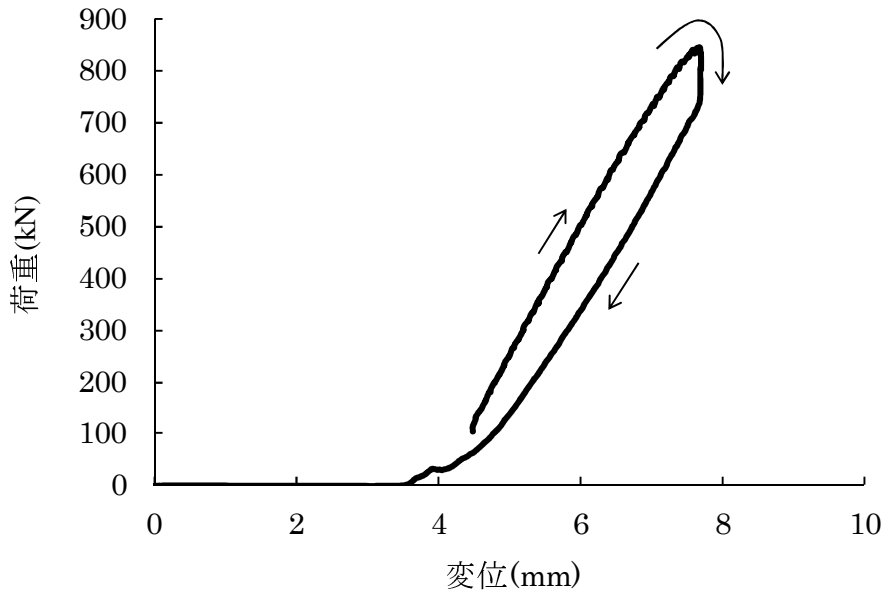


図-5.37 荷重－変位曲線（法面 13、アンカー e）

残存引張り力を確認できたアンカーを対象に $\tan\theta$ と残存引張り力の関係を見ると、周辺に変状が見られるアンカー a やアンカー e の区間では過緊張かつ $\tan\theta$ が大きく、アンカー d の周辺部の変状の無い区間では $\tan\theta$ が小さくなる傾向が認められた。表-5.7・図-5.38 は、リフトオフ試験により R_{td} と $\tan\theta$ を確認できたアンカーを対象として、各アンカー毎の R_{td} と $R_{\tan\theta}$ の関係を示したものである。本法面では各アンカーの R_{td} 、 $R_{\tan\theta}$ とともに大きなばらつきが見られる。

以上の結果から、過緊張や緊張力低下が見られるもののアンカーが破断にまで至っていない法面の場合、同じタイプのアンカーでは R_{td} のばらつきに関わらず $R_{\tan\theta}$ に大きな差は見られないのに対し、アンカーの破断が発生し、アンカーの健全性が維持できず変状が発生している法面では、同じタイプのアンカーでも R_{td} がばらつくとともに $R_{\tan\theta}$ にもばらつきが見られることが明らかとなった。

表-5.7 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ (法面 13)

アンカー No	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$	アンカー No	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$	アンカー No	$R_{td}(\%)$	$R_{\tan\theta}$
13-1	46.4	3.8	13-85	54.9	2.9	13-151	130.4	1.8
13-14	110.1	3.3	13-99	119.6	3.5	13-152	113.8	4.0
13-15	109.5	3.0	13-100	74.7	2.3	13-153	89.2	1.2
13-16	100.9	5.7	13-101	44.5	2.2	13-154	115.4	1.4
13-23	104.6	3.3	13-102	37.7	2.1	13-155	118.3	3.8
13-24	94.9	3.1	13-103	37.4	2.4	13-159	95.9	1.4
13-25	104.2	3.1	13-104	45.5	1.5	13-160	53.7	1.2
13-26	98.7	8.9	13-105	44.2	2.0	13-161	103.1	1.4
13-27	81.2	1.5	13-106	58.0	2.1	13-162	83.9	0.9
13-28	78.0	1.2	13-107	86.3	2.1	13-163	92.3	1.3
13-32	118.4	5.3	13-115	98.2	1.4	13-164	126.1	1.3
13-33	117.7	1.8	13-117	126.4	4.7	13-165	126.2	2.8
13-35	43.3	2.1	13-126	123.0	3.0	13-166	78.9	0.9
13-41	119.2	3.7	13-127	129.7	1.8	13-167	87.9	1.0
13-42	78.8	1.4	13-128	127.7	2.4	13-168	86.6	1.2
13-43	56.9	2.2	13-129	125.0	4.7	13-169	100.9	0.8
13-44	50.4	3.1	13-130	127.8	6.3	13-170	113.7	2.3
13-45	56.0	2.3	13-131	110.8	4.9	13-171	72.1	1.5
13-66	99.5	3.3	13-132	121.1	1.8	13-172	53.9	0.9
13-67	128.7	4.7	13-136	126.6	6.1	13-173	61.3	1.0
13-76	119.4	7.7	13-137	80.9	1.5	13-174	63.5	0.9
13-77	91.4	3.0	13-138	38.2	1.3	13-175	71.6	1.0
13-79	42.2	2.0	13-139	41.2	1.1	13-176	97.6	1.0
13-80	36.1	3.2	13-140	45.1	1.2	13-177	100.2	1.1
13-81	46.2	2.1	13-141	49.6	1.4	13-178	92.7	1.1
13-82	44.2	2.3	13-142	45.5	1.3	13-179	84.4	2.2
13-83	60.3	1.9	13-143	119.1	6.7	13-180	96.4	1.4
13-84	53.2	2.9	13-149	119.3	1.8	13-184	112.5	3.2

※ $\tan\theta$ を計測できていない数量 : 100 本

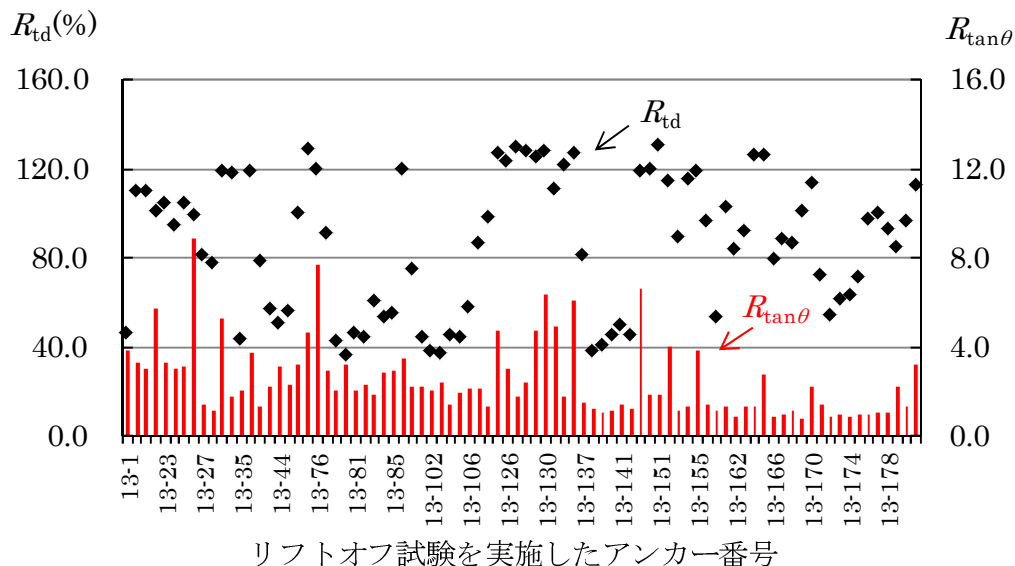


図-5.38 R_{td} と $R_{\tan\theta}$ の関係 (法面 13)

5.3.4 設計 $\tan\theta$ 比のばらつきを考慮した法面の健全性評価

アンカーは、施工時に導入された緊張力が時間の経過に伴い変化しながら、法面を面的に安定化させる抑止工法と考えることができる。また、アンカーの残存引張り力は、点検では確認できないような地表面の沈み込みや、わずかな押し出しに対しても変化することから、アンカーは、法面に生じる変位を残存引張り力の変化として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。このため、地すべりの活動などによりアンカーに対する負荷が増加した場合や、自由長部の拘束や材料の劣化により抑止工法としての機能が低下した場合など、法面に施工された各アンカーへの負荷が一様でなくなることで、各アンカーで機能低下の程度が異なることが考えられる。この結果、アンカー機能の健全性評価の指標であるリフトオフ後の荷重－変位曲線における $\tan\theta$ がアンカー毎に異なることが考えられる。

著者ら⁴⁰⁾は、法面 1～法面 14 を対象として、 $\tan\theta$ のばらつきとアンカー全数における不具合の発生率を指標とし、これらと法面変状の程度との組み合わせにより、法面変状とリフトオフ試験結果が示す特性を踏まえた法面の健全性評価手法について検討を行ってきた。ここでの $\tan\theta$ のばらつきの指標については、法面毎に同じタイプのアンカーにおける標準偏差を算出し、それらを加重平均することで法面全体の $\sigma_{\tan\theta}$ を求めた。なお、標準偏差 $\sigma_{\tan\theta}$ は下記の式により求めた。

$$\sigma_{\tan\theta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tan\theta_i - \overline{\tan\theta})^2} \quad (3)$$

- ここに、
- n : データ数 (個)
 - $\tan\theta$: 残存引張り力を超える载荷により得られる荷重－変位曲線の直線勾配 (kN/mm)
 - $\sigma_{\tan\theta}$: $\tan\theta$ の標準偏差

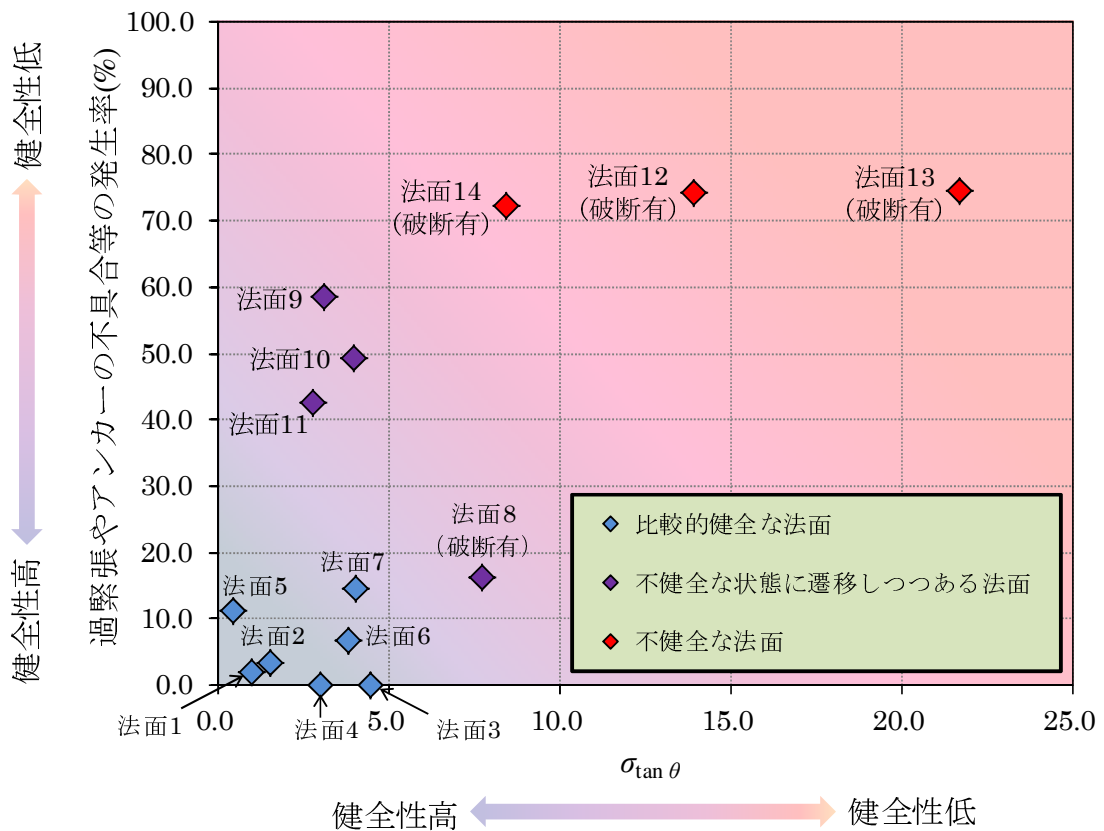


図-5.39 $\sigma_{\tan \theta}$ 、過緊張やアンカーの不具合の発生率を指標としたアンカー法面の健全性評価区分図⁴⁰⁾

アンカー全数における不具合の発生率については、アンカーの破断等が発生していない法面においては、アンカー全数の 1/4 程度以上の調査数量に対する過緊張等の発生率をアンカー全数における不具合の発生率とみなした。これに対し、複数のアンカーに破断等が確認された法面では、以下の手順によりアンカー全数における不具合の発生率を算出した。

- ① アンカー全数の 1/4 程度以上の破断等が発生していないアンカーを対象として調査を実施し、過緊張などの不具合のあるアンカーの数量を求める。また、この数量から調査数量に対するアンカーの不具合の発生率を求める。

- ② 調査を実施していない破断等が発生していないアンカーにおいても、①で求めたアンカーの不具合の発生率と同程度の不具合が発生しているものとみなし、アンカーに不具合があるものの数量を求める。
- ③ 破断等の発生が確認されたアンカーの数量と①、②で求めたアンカーに不具合があるものの数量の合計を求め、アンカー全数に対するアンカーの不具合の発生数量とする。
- ④ アンカー全数に対するアンカーの不具合の発生数量から、アンカー全数における不具合の発生率を求める。

この結果、図-5.39に示すように、 $\sigma_{\tan\theta}$ とアンカーの不具合の発生率が大きくなるに従い法面の健全性が低下する傾向を明らかにした。ここで、 $\sigma_{\tan\theta}$ は、既存資料や現地調査結果を基に同じ構造のアンカーを想定し、それらの集合毎に $\tan\theta$ の標準偏差 $\sigma_{\tan\theta}$ を算出し加重平均する方法により法面全体の $\sigma_{\tan\theta}$ を求めている。しかしながら、この方法だと同じ構造のアンカーの数量が少ない場合、 $\sigma_{\tan\theta}$ の算定対象とできるデータの数が少なくなり $\sigma_{\tan\theta}$ の計算精度が低下するなど、調査により得られたデータを有効に活用できないといった課題があった。本論ではこの手法を発展させ、法面 1～法面 14 について工事図書を確認することでアンカーの構造諸元を再整理するとともに、アンカー機能の健全性のばらつきを $\sigma_{\tan\theta}$ ではなく $R_{\tan\theta}$ のばらつきを指標とすることで、調査データを有効に活用し法面の健全性評価の精度向上に繋げることができると考えた。そこで、 $R_{\tan\theta}$ のばらつきと、法面に施工されたアンカーの過緊張などの不具合の発生率を指標とし、法面変状の程度との組み合わせた法面の健全性評価手法についての検討を行った。

ここでの $R_{\tan\theta}$ のばらつきの指標は、法面毎の $R_{\tan\theta}$ の変動係数 $CV_{r\tan\theta}$ とした。なお、 $CV_{r\tan\theta}$ については、下記の式により求めた。

$$CV_{rtan\theta} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_{tan\theta i} - \overline{R_{tan\theta}})^2}}{\overline{R_{tan\theta}}} \quad (4)$$

ここに、
 n : データ数 (個)
 $R_{tan\theta}$: 設計 $\tan\theta$ 比
 $CV_{rtan\theta}$: 設計 $\tan\theta$ 比の変動係数

アンカー全数における不具合の発生率については、工事図書により再確認した設計アンカー力を基に過緊張などのアンカーの数量を求め、①～④の手順に従い算出した。

表-5.8 は、調査を行った 14 法面における R_{td} の範囲と $CV_{rtan\theta}$ 、アンカーの不具合の発生率を示したものである。法面に変状が認められず R_{td} の分布と背面地質に関係が見られる法面 1、法面 2、法面 3 では、アンカーの不具合の発生率は 30%以下、 $CV_{rtan\theta}$ は 0.30 以下であった。法面に変状の発生していない法面 4～法面 7 については、アンカーの不具合の発生率は 30%以下、 $CV_{rtan\theta}$ は 0.40 以下であった。これら法面 1～法面 7 については、一部のアンカーに過緊張などの不具合が発生したため R_{td} にばらつきは見られるものの、 $R_{tan\theta}$ のばらつきは小さくなっており、アンカーは健全な状態で機能し法面の安定性を維持していると評価できる。これに対し、法面 8 では、不具合の発生率は 14.7%であったが、 $CV_{rtan\theta}$ が 0.45 と法面 1～法面 7 に比べて大きかった。法面 8 では、一部のアンカーでくさびの破損やアンカーの破断等が確認されたものの、残りの多数のアンカーの残存引張り力は設計アンカー力以下の範囲であり、法面や近接する道路路面にも変状は発生していなかった。このため、本法面は、一部のアンカーにおいて腐食による機能低下が見られるが、残りの多くのアンカーが正常に機能しこれにより法面の安定を維持できていると考えられる。法面 9、法面 10、法面 11 では、不具合の発生率が 40%以上、 $CV_{rtan\theta}$ はそれぞれ 0.53、0.42、

表-5.8 各法面の $CV_{rtan\theta}$ と不具合率

法面 No.	R_{td} の範囲	$CV_{rtan\theta}$	過緊張やアンカーの不具合の発生率(%)
法面 1	51% ~ 104%	0.22	2.1
法面 2	73% ~ 110%	0.30	28.1
法面 3	33% ~ 93%	0.22	0.0
法面 4	23% ~ 54%	0.40	4.8
法面 5	89% ~ 102%	0.15	11.1
法面 6	84% ~ 103%	0.25	6.7
法面 7	36% ~ 117%	0.26	16.1
法面 8	10% ~ 101%	0.45	14.7
法面 9	27% ~ 203%	0.53	60.4
法面 10	33% ~ 137%	0.42	50.7
法面 11	33% ~ 120%	0.37	42.5
法面 12	3% ~ 155%	0.58	79.9
法面 13	36% ~ 130%	0.65	77.8
法面 14	7% ~ 115%	0.46	72.3

0.37 であった。これら法面については、破断には至らない過緊張のアンカーが多数存在し、今後緊張力の増加によりアンカーに損傷が発生した場合、法面の健全性の低下につながることを考えられる。法面 12、法面 13、法面 14 については、不具合の発生率が 70%以上、 $CV_{rtan\theta}$ はそれぞれ 0.58、0.65、0.46 と大きな値を示すことから、アンカーの健全性のばらつきが大きく、法面自体の健全性が低下していると考えられる。

図-5.40 は、 $CV_{rtan\theta}$ とアンカーの不具合の発生率の関係をプロットするとともに、あわせて法面変状の状況を考慮に入れて作成した

法面の健全性評価区分図である。この法面の健全性評価区分図は、法面変状の程度を、 $R_{\tan\theta}$ のばらつきである $CV_{rtan\theta}$ とアンカーの不具合の発生率の2つの指標で捉えるもので、1/4程度以上の分散調査によるリフトオフ試験から得られた R_{td} や $R_{\tan\theta}$ のばらつきなどから法面の健全性の評価を行うものである。本調査では、過緊張やアンカーの不具合の発生率が40%を超える法面において何らかの変状が発生し、さらに $CV_{rtan\theta}$ が0.40を超える法面において法面変状やアンカーに破断などの不具合が発生していた。このことから、この領域付近を境に健全な状態から不健全な状態に移行する遷移領域が存在すると考えられる。しかしながら、現在までの調査デー

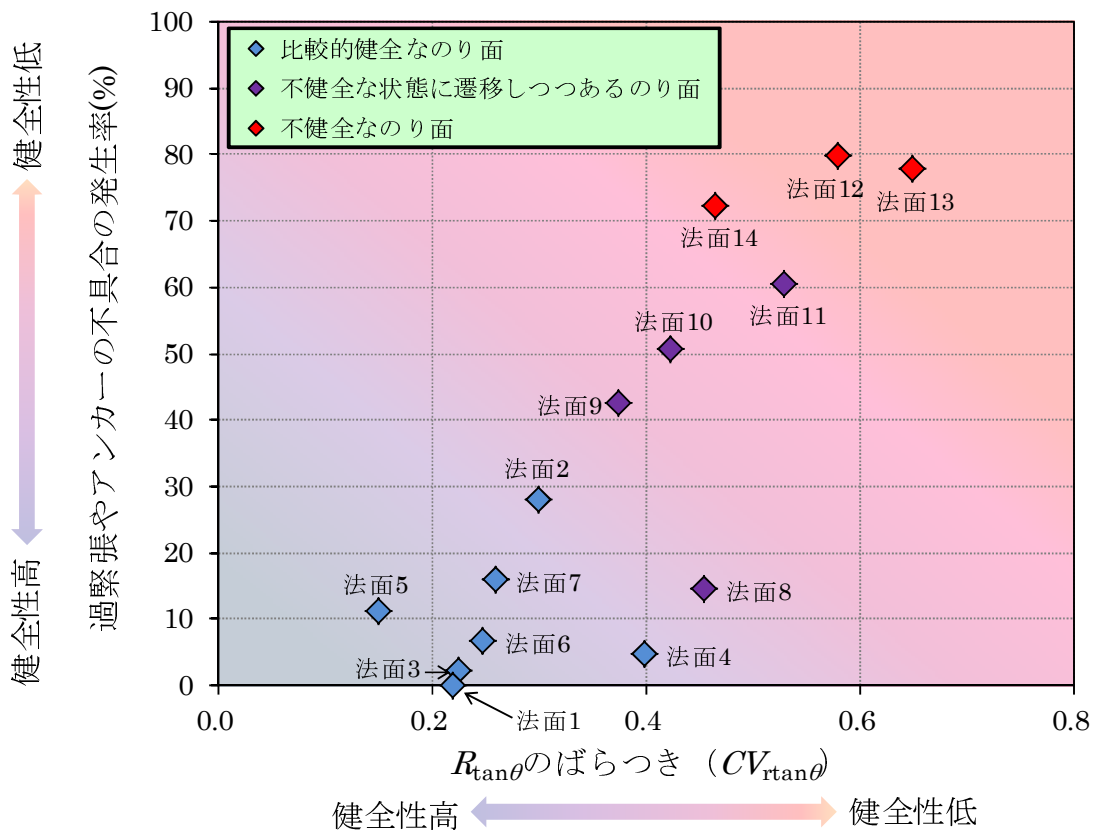


図-5.40 $CV_{rtan\theta}$ 、過緊張やアンカーの不具合の発生率を指標としたアンカー法面の健全性評価区分図

タ数は十分でなく今後、更なるデータの蓄積により詳細に検証していく必要があると考える。また、変状等が見られる法面 12、法面 14 におけるアンカーの不具合の発生率は、リフトオフ試験が実施できない破断したアンカーの数を加えて算出しているため、法面 12 で 79.9%、法面 14 で 72.3%と高い値を示している。しかしながら、 $CV_{R_{\tan\theta}}$ は、リフトオフ試験を実施することができた比較的健全なアンカーの $R_{\tan\theta}$ のみから算出しており、アンカーが破断に至る過程において、 $CV_{R_{\tan\theta}}$ はプロットされた位置よりも健全性が低下する範囲に存在する可能性が考えられる。このため、破断が多く発生しているアンカー法面の評価を適切に行うためにも、 $CV_{R_{\tan\theta}}$ の算出方法などについて今後検討する必要がある。

本論文により新たに提案したアンカー法面の健全性評価区分図は、破断等によりリフトオフ試験が実施できないアンカーに対する評価をどのように取り入れるかといった課題は残るものの、アンカーの面的調査において法面の健全性を判断するための有力な指標になると考えられる。また、現在定期的なリフトオフ試験による残存引張り力の確認が困難な現状を踏まえると、点検時にアンカーの飛び出しや破断等の状況に着目し、不具合や周辺に変状が確認された法面を対象として優先的に残存引張り力を確認し、本手法により健全性を評価することで効率的な維持管理を行うことができるものと考えられる。

なお、本調査では、アンカー機能の評価に用いるリフトオフ後の直線勾配が一定になった段階の $\tan\theta$ ではなく、リフトオフ直後の直線勾配から $\tan\theta$ を求めたものがあるが、法面の健全性低下に伴い $\tan\theta$ がばらつく傾向を捉えることができている。このため、法面の健全性評価において、 $\tan\theta$ のばらつきの傾向についてはリフトオフ直後の直線勾配から求めた $\tan\theta$ を用いてもその傾向を捉えることは可能と考えられる。

5.4 まとめ

リフトオフ試験による面的調査から R_{td} の分布を把握するための適切な調査数量について検討し、その結果を基にアンカー機能の健全性を評価する $R_{\tan\theta}$ のばらつきと法面変状の関係などについて分析した結果、下記の事項を明らかにすることができた。

- (1) アンカーの面的調査においては、まず法面の残存引張り力の面的分布の傾向を捉える一次フィルターとして 1/10 程度～1/20 程度の調査を実施し、過緊張領域の傾向などが確認された場合には、1/3 程度～1/4 程度以上の調査により詳細な面的分布を求めることで効率的な荷重管理を行うことが可能と考えられる。
- (2) 変状が認められない法面では、背面地質の影響により法面全体の安定性を面的に維持できるよう残存引張り力が変化し一様な面的分布を示さないことが明らかとなった。
- (3) 健全な法面だけでなく変状の発生により一部のアンカーに過緊張のものが見られる法面においても、アンカーが健全な状態を維持できていれば $R_{\tan\theta}$ のばらつきは小さいと考えられる。これに対し、変状の発生により複数のアンカーに破断等の現象が見られる法面においては、引張り材への負担や材料の劣化等の影響から $R_{\tan\theta}$ のばらつきが大きくなると考えられる。
- (4) 地すべりの活動などによりアンカーに対する負担が増大した場合や、自由長部の拘束や材料の劣化により抑止工法としての機能が低下した場合など、法面に施工された各アンカーへの負荷が一様でなくなることで、 $R_{\tan\theta}$ が変化することが考えられる。
- (5) アンカーの面的調査の結果を基に法面の健全性を評価する場合、アンカーの不具合の発生率と $R_{\tan\theta}$ のばらつきである $CV_{r\tan\theta}$ に加え、アンカーの変状調査の結果とを組み合わせた検討を行い、本論で提案した法面の健全性評価区分図により、法面の安定可否の判断や対策の優先順位を決定することが可能になると考え

られる。

第 6 章 総括

6.1 本研究で得られた成果

アンカーは、高速道路に限定しても現在まで 120,000 本以上施工されおり、今後も施工量が増加していくことが予想される。これらアンカーの機能を長期にわたり持続させるためには、アンカーの維持管理を適切に行うことが重要となる。アンカーの維持管理については、「地盤工学会基準」⁷⁾や「維持管理マニュアル」⁸⁾などに点検項目や残存引張り力の評価基準などが示されているものの、リフトオフ試験により得られる荷重－変位曲線および残存引張り力の特性などについては未解明な部分が多く、また、法面における複数本のアンカーを調査し緊張力の面的な評価を適切に行う方法は全く示されていなかった。このため、現地でのリフトオフ試験や荷重計など種々な計測データを基に、法面に施工された複数のアンカーを「点」ではなく「面」として捉え、法面の健全性を定量的に評価する手法が確立できれば、効率的・効果的なアンカーの維持管理を行えると考えられる。

本論では、現在のアンカーの維持管理における様々な課題を解決するため、複数の法面において種類の異なる数多くのアンカーを調査し、これら調査データに基づいた適切なアンカーの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 章において現在まで定められていなかった適切なリフトオフ試験方法について検討を行い「高速道路試験法」として提案した。次に、第 3 章において腐食の発生したアンカーについてリフトオフ試験や掘り起こし調査などを実施し、現在のアンカー機能の健全性評価における問題点などを示した。第 4 章においては、現在の荷重計を用いたモニタリングの問題点を示し、これを解決するために荷重計の計測値が示

す特性の分析や荷重計の機能検定、既設アンカーへの荷重計の着脱手法について検討を行った。そして、最後に第 5 章においてアンカーの面的調査と法面の健全性評価について検討を行い、アンカーの残存引張り力特性に着目した新たな法面の維持管理方法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

6.1.1 リフトオフ試験方法の検討

リフトオフ試験は、アンカーの残存引張り力や健全性などを確認する上で重要な試験であるにも関わらず、「地盤工学会基準」⁷⁾などにおいて具体的な試験方法や残存引張り力の評価方法が明確にされていない。このため、試験結果が技術者毎で異なり残存引張り力の適切な管理が行われていないことが考えられる。これらに対し、施工実績の多いくさび定着タイプおよびナット定着タイプ、くさびナット併用定着タイプのアンカーを対象としてリフトオフ試験における適切なサイクル数や残存引張り力の評価方法について検討を行った。また、リフトオフ試験における変位計測位置や試験機器の差異などの試験条件の違いがアンカーの残存引張り力に与える影響についての検討も行った。その結果、多サイクルでリフトオフ試験を実施する場合、1 サイクル目の残留変位は大きいものの、2 サイクル目以降の残留変位は 1mm 以下と小さくなり、また荷重－変位曲線もほぼ一致する傾向を示すことが明らかとなった。この結果より、リフトオフ試験の実施にあたり、1 サイクル目は予備載荷とし、2 サイクル目以降で残留変位が収束したのを確認した上で、本載荷としての試験を実施することが適切であることを提案した。また、リフトオフ試験により求める残存引張り力の評価については、判定結果のばらつきが小さい、リフトオフ前後の直線勾配の交点から得られる接線法を採用することが適切であることも明らかにした。

次に、試験機器の違いが判定結果に及ぼす影響について検証した結果、センターホールジャッキでは、テンションバーの伸びの影響により、リフトオフするまでの荷重－変位曲線の変位量が変位計測位置の違いにより異なることが明らかとなった。さらに、特殊ジャッキや SAAM ジャッキなどの維持管理用の油圧ジャッキは、アンカー頭部に直接引張り荷重を与える方法で载荷を行うため、荷重－変位曲線においてテンションバーの伸びの影響が小さいことが明らかとなった。これらのことから、アンカーの緊張力の管理を継続的に行う場合、リフトオフ試験の実施にあたり、使用した油圧ジャッキの種類や変位計測位置等の試験条件を試験結果とともに記録しておくことが重要であることを指摘した。また、リフトオフ試験において、载荷速度や载荷保持時間が試験結果に与える影響は認められないことを明らかにし、リフトオフ試験により、残存引張り力を確認する場合、アンカーに負担が掛からない範囲で载荷速度およびデータの記録間隔を設定すればよいことを提案した。

6.1.2 腐食の発生したアンカーの健全性評価

アンカー機能の健全性は、「維持管理マニュアル」⁸⁾などに従い、リフトオフ試験の荷重－変位曲線におけるリフトオフ後の直線勾配を用いて評価されることがある。ところで、防食機能が十分でないアンカーについては、鋼材の腐食などもアンカー機能が低下する要因の一つとして考えられる。これらに対し、防食機能が改善される前のアンカーを対象としてリフトオフ試験や引抜き試験、掘り起こし調査を実施し、腐食の発生したアンカーの健全性評価について検討を行った。その結果、リフトオフ試験において、リフトオフ直後の直線勾配は軽微な機能低下の影響を捉えやすい性質を持っているとみられ、载荷荷重が増大するほどアンカー材料全体としての健全性を示す直線勾配に近づく傾向にあることを指摘した。また、アンカーが設計上必要とされる抑止力を維持できているかの確認

においては、少なくとも設計アンカー力を越えるまで載荷する必要があることを示した。

また、本調査におけるリフトオフ試験や引抜き試験の結果において、腐食により健全性が低下しているアンカーほど $\tan\theta$ は小さくなる傾向が認められたことから、今後腐食がアンカーの健全性におよぼす影響について検証していく必要がある。そして、腐食の発生したアンカーの健全性について「維持管理マニュアル」⁸⁾に基づく $\tan\theta$ を用いた評価の結果、断面欠損などの影響により実際の健全性と異なる評価結果となることが明らかとなった。

6.1.3 荷重計計測の問題点と改善策

現在アンカーに設置された既設の荷重計は機能低下した場合の機能検定や交換が困難といった課題が存在する。また、荷重計の値は法面の安定性に寄与しないような外気温の変化などにも反応し、計測値が変化する可能性が考えられる。これらに対し、荷重計の簡便な機能検定方法の検討、および既設アンカーに荷重計を着脱する手法の検討を行うとともに、荷重計を用いたモニタリングの問題点とその解決策についての検討を行った。その結果、リフトオフ時の SAAM ジャッキ荷重と荷重計の荷重値との比較から、リフトオフ荷重値は載荷時に荷重－変位曲線が変曲し始める点であることを明らかにした。この結果、実際のリフトオフ荷重と接線法により求まる残存引張り力の値とは異なり、残存引張り力を評価する場合この点を理解しておく必要があることを指摘した。特に、変曲点の曲率が大きいくさび定着タイプのアンカーは、ナット定着タイプのアンカーに比べ、両者の計測差は大きくなる傾向があることを指摘した。また、荷重計の設置されているアンカーに対し SAAM ジャッキを用いてリフトオフ試験を実施することで、SAAM ジャッキと荷重計の荷重－変位曲線を比較し両者の追従性を確認する方法により、比較的容易に荷重計の機能検定を行うことが可能であること

を提案した。荷重計の機能検定において、両者の荷重－変位曲線に追従性が見られるものの値い差異が認められる場合には、荷重計の校正係数を調整することにより、その後適切な荷重計計測が実施できることを提案した。次に、SAAM ジャッキを活用した既設アンカーへの荷重計の着脱手法を開発し、歪ゲージ式荷重計や M リングに対する現地への適用性を検証した。荷重計の着脱は、ナット定着タイプ、くさび定着タイプの既設アンカーを対象として、アンカー頭部の引張り材余長を継ぎ足すアジャスターを用い、SAAM ジャッキにより緊張力を導入することで新設の定着具により定着させる方法により行った。荷重計設置後と荷重計撤去後の荷重計の機能検定において、リフトオフ試験結果と荷重計の計測値を比較して両者に差が見られないことを示し、着脱手法が現地の既設アンカーに対し適用できることを実証した。

安定した状態にある法面の既設アンカー、およびアンカーの実物供試体における荷重計の外気温との相関について検討を行った結果、荷重計の計測値は外気温と高い相関を示すことを明らかにした。また、振動弦式の荷重計の計測値も外気温と高い相関を示すものの、荷重計の計測値と外気温のばらつき幅の最大は、歪ゲージ式の荷重計では約 3kN であるのに対し、振動弦式の荷重計では 16kN～18kN と大きい値を示すことも明らかとなった。アンカー施工後の荷重計の荷重値と外気温との関係について検討を行った結果、施工してからクリープ、リラクセーション等の外力、背面地山の影響により緊張力低下が継続する施工後初期の期間において相関は低くなるものの、これらの緊張力変化が収束した段階において相関は高くなる傾向を示すことが判明した。この結果から、継続的な緊張力管理において、荷重計の計測値と外気温の相関係数が低い状態が継続するような場合には、法面の不安定化の進行や、荷重計自体の機能の低下の可能性のあることを考慮する必要があることを指摘し

た。

6.1.4 アンカーの面的調査とその評価

現在、「維持管理マニュアル」⁸⁾などに、アンカー1本当たりの残存引張り力や健全性を評価する基準は定められているものの、複数のアンカーを調査する場合の適切な調査数量や評価手法は示されていない。これに対し、従来の「点」としての評価から「面」としての評価を行うために、アンカーの残存引張り力の面的調査を実施する上での適切な調査数量について検討した。まず、アンカーの面的調査においては、法面における過緊張領域の存在を捉える一次フィルターとして 1/10 程度～1/20 程度の調査を実施し、これにより過緊張領域の傾向などが確認された場合には、1/3 程度～1/4 程度以上の調査により詳細な面的分布を求めることで、効率的な管理を行うことが可能であることを示した。次に、変状程度が異なる複数の法面について、アンカー全数の 1/3 程度～1/4 程度以上のリフトオフ試験による残存引張り力の面的分布調査の結果を基に、法面の健全性評価手法についての検討を行った。この結果、変状が認められない法面では、風化程度が進んでいる法面ほど R_{td} が小さくなることが明らかとなった。また、法面毎で各アンカーの $R_{tan\theta}$ のばらつきを比較したところ、アンカーが健全な状態を維持できていれば $R_{tan\theta}$ のばらつきは小さいことが明らかとなった。これに対し、変状の発生により複数のアンカーに過緊張や破断等の現象が見られる場合には、引張り材への負担や材料の劣化等の影響により R_t のばらつきが大きくなることが明らかとなった。この結果を踏まえ、地すべりの活動などによりアンカーに対する負担が増大した場合や、アンカー材料の劣化により抑止工法としての機能が低下した場合には、法面に施工された各アンカーへの負荷が一様でなくなるため $R_{tan\theta}$ の値は変化すると考えた。そこで、 $R_{tan\theta}$ のばらつきを表す $CV_{rtan\theta}$ とアンカーの不具合の発生率を求め、法面変状の程度を組

み合わせた新たな法面の健全性評価区分図を提案した。この法面の健全性評価区分図は、アンカーの残存引張り力の面的調査の実施にあたり、法面の健全性を評価する場合の判断手法として活用できる可能性を示した。

6.1.5 本検討の知見を踏まえた維持管理

本検討の知見を踏まえたアンカーの維持管理の流れを図-6.1 に示す。アンカーは、施工後法面の安定性を維持するよう残存引張り力が個々で変化する性質を持っており、法面変状やアンカーの飛び出し、受圧板の変形といった不具合が見られなければ、直ちに法面が不安定化する可能性は低いと考えられる。これに対し、残存引張り力の増加によるアンカー機能の低下により、法面の健全性が低下していくと、破断などに至るアンカーの数量が増加していくことが考えられる。このため、日常点検や定期点検などにおいて、法面変状やアンカーの飛び出しなどの発生状況を確認した上で詳細調査の必要性を判定することが重要である。このとき、アンカーおよび法面変状の程度により面的調査の必要性を判定する。面的調査の必要性が無い場合は、アンカー全数の 1/20 程度以上について「高速道路試験法」に従いリフトオフ試験を実施して法面の全体的な緊張状態を評価し更なる詳細調査の必要性を判定する。面的調査の必要性が有る場合は、アンカー全数の 1/4 程度以上について同様に「高速道路試験法」に従いリフトオフ試験を実施し、本論で提案した過緊張やアンカーの不具合の発生率、 $R_{\tan\theta}$ のばらつきなどから法面の健全性を評価し、法面としての対策工⁴¹⁾の必要性について判定する。法面对策の必要が無い場合でも、個別アンカーについて、着脱手法を用いた荷重計による緊張力のモニタリングや、リフトオフ試験の実施による健全性などの評価を行い対策工の必要性を判定する。

こうした流れを基本として、法面の管理者毎で現地条件に対応し

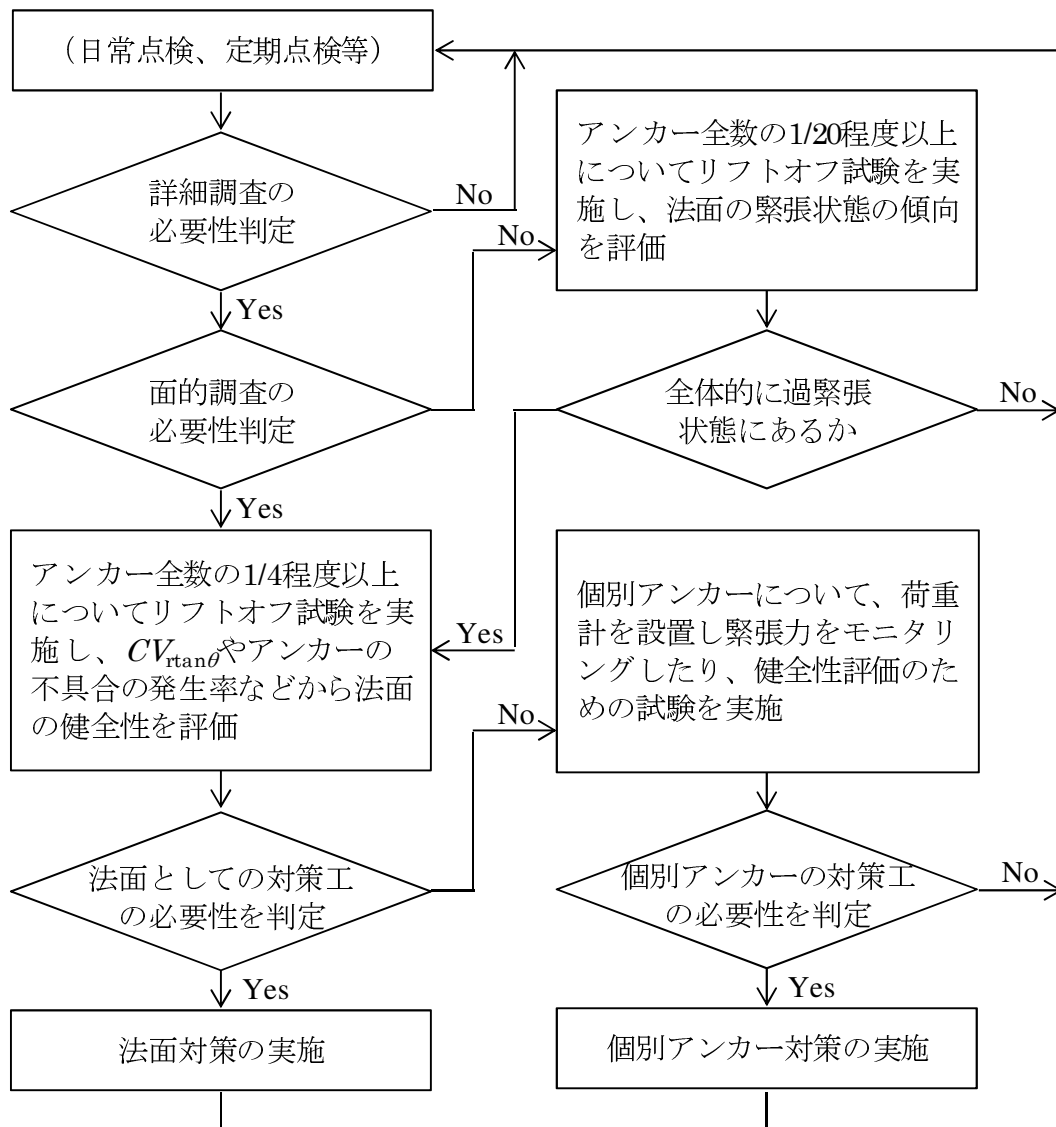


図-6.1 アンカーの維持管理の流れ（案）

た具体的な点検・調査内容を定めることにより、アンカーの効率的・効果的な維持管理を行うことができると考えられる。

6.2 本研究における今後の課題

本論では、施工実績の多いくさび定着タイプ、ナット定着タイプ、

くさびナット併用定着タイプのアンカーを対象として検討を行った。高速道路には、リフトオフ試験時にアンカーの飛び出しなどが懸念される鋼棒タイプのアンカーも一定量存在するものの⁴²⁾、リフトオフ試験データが現在まで十分に蓄積されていない。鋼棒タイプのアンカーは複数の継手材を用いて接合されている場合があり⁴³⁾、荷重－変位曲線の変曲点が、PC鋼より線などの一般的なアンカーと比較して明瞭に現れないことがある。今後はこうしたアンカーの試験結果に対する評価方法などについて検討する必要があると考える。また、本論で提案したアンカー法面の健全性評価区分図については、今後調査データを蓄積・分析することによりさらに精度を向上させることで、健全な状態から不健全な状態に遷移する範囲をより明確にすることができるものと考えられる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始親切なるご指導、ご鞭撻を賜った三重大学生物資源学研究科酒井俊典教授に深甚なる感謝の意を表します。また、三重大学生物資源学研究科加治佐隆光教授、石黒覚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。

LLP アンカーアセットマネジメント研究会に所属される方々には、調査された貴重なデータを提供頂き心より感謝を申し上げます。特に現地検討会などにおいて、アンカーの緊張力や法面変状の状況などを確認し意見交換できたことは、本論文をまとめるにあたり重要な知見となりました。

本論文は、筆者がこれまで取り組んできたアンカー法面の維持管理に関する研究成果をとりまとめたものです。研究を始めたころは、アンカーの持つ特性には未解明な部分が多かったですが、リフトオフ試験の結果や荷重計の計測値などのデータを地道に分析することで、アンカーの残存引張り力とアンカー法面の健全性などの関係性が次第に明確になってきました。そして、蓄積された膨大な調査記録の整理に取り組むことで、アンカー法面の評価を含めたアンカーの維持管理方法について提案することができました。この研究を進めるにあたっては、研究所の数多くの上司、先輩および同僚の御指導と御協力によるところが大きかったです。また、本論文をまとめるにあたっては、吉村雅宏研究総括主幹および田山聡土工研究部長、藤岡一頼土工研究室長、横田聖哉秋田管理事務所長、関茂和主任には暖かい御理解と御支援を賜り、深く感謝の意を表する次第です。特に吉村雅弘研究総括主幹においては、多忙な中論文などを見て頂き、適切な御指導を頂くことができました。

現地での試験やデータ整理には、㈱相愛の常川善弘現場主任、福田氏、日特建設㈱の菅氏、三上氏に御協力を頂きました。㈱相愛の方には、SAAM ジャッキを利用して数多くのリフトオフ試験を実施して頂き、これまでにない試験データの分析を行うことができました。また、日特建設㈱の方には、リフトオフ試験方法を確立するにあたっての試験や、前例のないアンカーの掘り起し調査といった作業に協力して頂きました。こうした成果を基にして本論文をまとめることができ、心より感謝を申し上げます。

2013年2月吉日

藤原 優

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) 社団法人日本アンカー協会：<http://www.japan-anchor.or.jp/>
- 3) 大窪克己，藤岡一頼，竹本将：高速道路における土構造物の維持管理，土と基礎，Vol56，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) 土質工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，pp.13-15，1988.
- 6) 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.
- 7) 地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，2000.
- 8) 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の維持管理マニュアル，2008.
- 9) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーのリフトオフ試験方法に関する研究，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol. 67，No. 4，pp.558-568，2011.
- 10) 日本道路公団：グラウンドアンカー工設計指針，1992.
- 11) 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.
- 12) 中日本高速道路(株)：土工施工管理要領，pp.132-140，2011.
- 13) 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の維持管理への取組み，基礎工，Vol.38，No.9，pp.32-36，2010.
- 14) 福田雄治，酒井俊典，中村和弘：新型メンテナンスジャッキを用いたグラウンドアンカーリフトオフ試験，第 62 回土木学会

- 年次学術講演会講演概要集, pp.139-140, 2007.
- 15) 竹本将, 藤原優, 横田聖哉: くさび定着方式グラウンドアンカーのリフトオフ試験法について, 第64回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.707-708, 2009.
 - 16) 佐藤亜樹男, 松山裕幸, 緒方健治: グラウンドアンカーの腐食による機能低下の実態, 第25回日本道路協会論文集, 2003.
 - 17) FIP: Design and construction of prestressed ground anchorages, 1996.
 - 18) 酒井俊典, 常川義弘, 福田雄治, 永野正展: SAAM ジャッキを用いたアンカー残存引張り力の調査方法, 地盤工学会誌, Vol.56, No.12, pp.42-45, 2008.
 - 19) 酒井俊典, 常川善弘, 小野誠, 山崎尚明: SAAM ジャッキを用いたリフトオフ試験の有効性, 地盤工学会誌, Vol.57, No.10, pp.46-47, 2009.
 - 20) 酒井俊典, 常川善弘, 藤原優, 竹本将, 横田聖哉, 福田雄治: 既設グラウンドアンカー緊張力と残存引張り力の関係について, 第64回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.711-712, 2009.
 - 21) 高野辰雄, 緒方健治, 田山聡: グラウンドアンカーの追跡調査, グラウンドアンカー設計・施工に関するシンポジウム, pp.83-84, 1998.
 - 22) 日本道路公団: グラウンドアンカー工設計指針, 1992.
 - 23) 酒井俊典, 常川善弘, 藤原優, 竹本将, 横田聖哉: SAAM ジャッキを用いたグラウンドアンカーにおける既設ロードセルの検定, 第64回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.713-714, 2009.
 - 24) 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最適なリフトオフ値について, 第64回土木学会

- 年次学術講演会講演概要集, pp.709-710, 2009.
- 25) 酒井俊典, 福田雄治, 中村和弘, 竹家宏治: 小型・軽量新型アンカーメンテナンスジャッキの開発, 地盤工学会誌, Vol.55, No.4, pp.39-41, 2007.
- 26) 酒井俊典, 關泰史, 常川善弘, 横田聖哉, 竹本将, 藤原優: アンカーのリフトオフ試験におけるリフトオフ前勾配と残存引張り力の関係について, 第64回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.1881-1882, 2009.
- 27) 酒井俊典, 中村和弘, 福田雄治, 山崎尚明, 柳川享史, 常川善弘: アンカーリフトオフ試験における載荷速度の影響, 第42回地盤工学研究会年次学術講演会講演概要集, pp.1389-1390, 2007.
- 28) 竹本将, 藤原優, 横田聖哉: グラウンドアンカーの健全度評価とリフトオフ試験の適用性についてーグラウンドアンカーの掘り起こし調査ー, 第45回地盤工学研究会年次学術講演会講演概要集, pp.1879-1880, 2010.
- 29) 東日本高速道路(株)長野管理事務所: 上信越自動車道蓬平地区アンカー健全度調査報告書, 2007.
- 30) 藤原優, 竹本将, 横田聖哉, 酒井俊典, 常川義弘: SAAM ジャッキを用いた既設グラウンドアンカーへの荷重計の設置方法について, 第45回地盤工学研究会年次学術講演会講演概要集, pp.1229-1230, 2010.
- 31) 明石達雄, 内田純二, 小島秀範: Mリングを用いたグラウンドアンカー緊張力の長期計測の検証, 第64回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.109-110, 2010.
- 32) 酒井俊典, 常川善弘, 藤原優, 竹本将, 横田聖哉: SAAM ジャッキを用いたグラウンドアンカーにおける既設ロードセルの検定, 第64回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.713-714,

2009.

- 33) 藤原優, 横田聖哉, 酒井俊典, 常川善弘: クサビ定着タイプの既設グラウンドアンカーへの荷重計の設置方法について, 第66回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.657-658, 2011.
- 34) 財団法人 土木研究センター: グラウンドアンカーの受圧板設計・施工マニュアル, pp.65-83, 2004.
- 35) 藤原優, 竹本将, 横田聖哉: 高速道路におけるグラウンドアンカーの健全度評価, 地盤工学会誌, Vol.57, No.6, pp.42-43, 2009.
- 36) 酒井俊典, 常川善弘, 後藤大輔, 福田雄治: 既設グラウンドアンカーに対する面的調査方法の検討, 第44回地盤工学会年次学術講演会講演概要集, pp.1101-1102, 2009.
- 37) 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), pp.19, 2010.
- 38) 吉田幸一, 岡本茂, 大川了, 秋山大輔: 第二東名長大切土のり面のグラウンドアンカーによるトップリング対策, 第66回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.661-662, 2011.
- 39) 岡本茂, 大川了, 秋山大輔, 近江健吾, 藤田宗寛: 第二東名長大切土のり面の泥岩破碎地山における地すべり対策, 第66回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.663-664, 2011.
- 40) 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.
- 41) 地盤工学会: 切土法面の調査・設計から施工まで, pp.175-176, 1998.
- 42) 日本道路公団: 旧タイプ鋼棒アンカーの応急復旧の手引き, pp.1-7, 2000.
- 43) 財団法人ダム技術センター: ダム技術研究所報告書第 201001

号 アンカー工法によるダム堤体の補強方法に関する研究,
pp.9-15, 2010.