

平成 22 年度

修士論文

トルシア形高力ボルト摩擦接合継手の肌すきの種類が
すべり耐力に及ぼす影響に関する研究
～食い違いによる肌すきと板厚差による肌すきの違いについて～

指導教員 川口 淳 准教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

藤田 早耶佳

目次

第1章 序論

1.1 背景・目的	2
1.2 既往の研究	5
1.3 研究のアプローチ	8

第2章 実大実験概要

2.1 実験目的	10
2.2 実験計画	10
2.2.1 試験体形状	
2.2.2 载荷装置	
2.3 施工試験	17
2.3.1 締め付け方法	
2.3.2 計測計画	
2.4 すべり試験	19
2.4.1 载荷方法	
2.4.2 計測計画	

第3章 実大実験結果

3.1 施工試験結果	24
3.1.1 初期導入張力の計測結果	
3.1.2 ナット回転量の計測結果	
3.2 すべり試験結果	38
3.2.1 载荷荷重－すべり変位関係	
3.2.2 载荷荷重－鉛直変位関係	
3.2.3 すべり耐力	

第4章 考察

4.1 標準試験体実験	47
4.1.1 実験概要	
4.1.2 実験結果	
4.2 载荷荷重－すべり変位関係	62

[illegible]

第 1 章 序論

1.1 背景・目的	.....2
1.2 既往の研究	.....5
1.3 研究のアプローチ	.....8

第 1 章 序論

1.1 背景・目的

構造物の骨組みは，柱，梁及び筋交いなどの部材と接合部で構成されている．建物の強度や変形性能は部材だけでなく，接合部の性能に大きく依存する．現在，接合法として，溶接接合，ボルト接合が用いられている．ボルト接合には，普通ボルトや高力ボルトが用いられ，高力ボルトの種類として，高力六角ボルト，トルシア形高力ボルトがある．現在，建設現場では，高力ボルトとしては，施工管理のしやすさからトルシア形高力ボルトが最も多く利用されている．また，高力ボルトの継手には，高力ボルト摩擦接合継手と高力ボルト引張接合継手がある．本研究はトルシア形高力ボルト摩擦接合継手を研究対象とする．

トルシア形高力ボルト摩擦接合継手は，継手のすべり耐力を確保するため，すなわち所定の摩擦力を担保するためのボルト導入張力の確保を施工現場で行っている．そのための検査は，一般的にナット回転法により行われ，ボルト導入張力を間接的に管理している．ナット回転法とは，トルシア形高力ボルトの締め付けを「1 次締め→マーキング→本締め」の手順で行い，その後一群の全ボルトの一次締め後のナット回転量の平均回転量から $\pm 30^{\circ}$ 以上の回転量を示したボルトを不合格としてそのボルトを取り替える^{1), 2)}ものである．1つの建物に用いられる全ボルト本数の約 10%が不合格となったケースもある．ナット回転量のばらつく要因は，建方精度，板厚の許容差，梁せい許容差に起因する．母材と添板の間の肌すきの影響や，ねじ部の打痕などの影響，ボルトの錆による影響，及び水漏れによる影響などがある．本研究では，この内の肌すきについて検討する．

肌すきとは，図 1-1 のように中板とスプライズプレートの上に隙間が生じることである．肌すきは，トルシア形高力ボルト摩擦接合継手において，使用鋼材や板厚許容差や梁せい許容差，建て方制度などに起因して生じる．JASS6 では，肌すきが 1[mm]以上生じた場合はフィラープレートを挿入するように規定されているが，上記の理由によって，肌すきが生じた場合は作業工程上フィラープレートを挿入するのは困難である．また，肌すきの有り無しの確認は，部材のフランジ部では確認できるが，ウェブ部では確認できないのが現状である．

しかし，肌すきと一概に言っても，図 1-2 のように標準試験体における肌すきと，実際の継手で発生する肌すきとは，相違点がある．すなわち前者は，板厚差による肌すきで，後者は食い違いによる肌すきである．現在，この肌すきに着目し，その力学性能を明らかにしようと進められている研究のほとんどが，板厚差による肌すきに着目したもので，板厚差に着目した研究は極々わずかである．その理由として挙げられるのは，板厚差による肌すきと食い違いによる肌すきでは，引張軸芯が異なり(図 1-3 参照)，板厚差の方が実験が容易にできるからである．板厚差による肌すきは，すべり試験時に中板に引張力を与えた時，引張軸芯が左右で一致するが，食い違いによる肌すきはこれが一致しない．(図 1-3 参照)

しかしながら、実際の現場で発生する肌すきの種類は、板厚差によるものよりも食い違いによるものの方が多いように考えられる。その理由は、表 1-4、表 1-5 に示す通り、日本工業規格で定められている鋼材の寸法の許容差は、熱間圧延 H 形鋼の梁せいで、最大 $\pm 3[\text{mm}]$ であるのに対し、建築工事標準仕様書は、肌すき量 $1[\text{mm}]$ 以下でないと、継手性能を担保しないと定めており、そこに矛盾が生じているからである。つまり、実際問題、鋼材の寸法許容差を $\pm 3[\text{mm}]$ まで認めているという事は、最悪の場合、同じ 2 本の H 型鋼を想定した時、上フランジを水平に揃えると最大 $[6\text{mm}]$ の梁せい差によって、下フランジに食い違いによる肌すきが現場で初めて発生することになる。

そこで本研究では、この食い違いによる肌すきに着目し、その力学性能やメカニズムの違い、すべり耐力に及ぼす影響について検討するため、研究を行った。

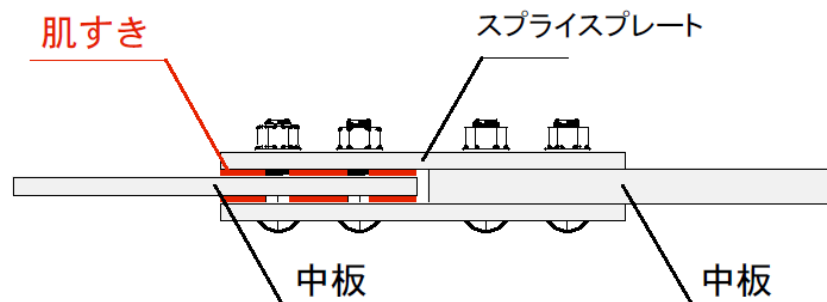


図 1-1 肌すき

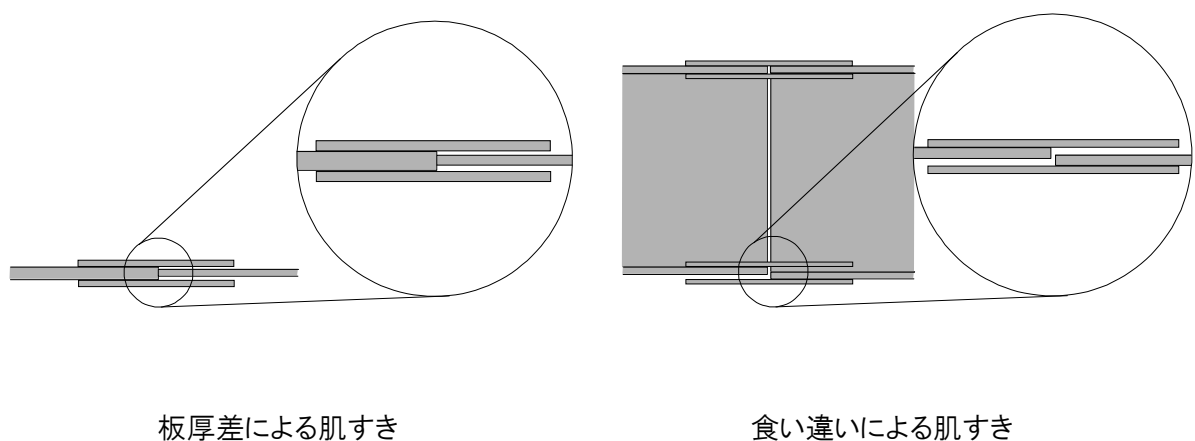
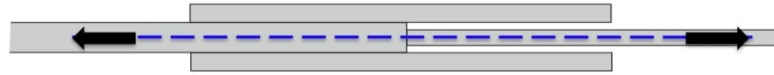


図 1-2 2 種類の肌すき

■板厚差によってできる肌すき：引張り軸芯が揃う



■食い違いによってできる肌すき：引張り軸芯が揃わない

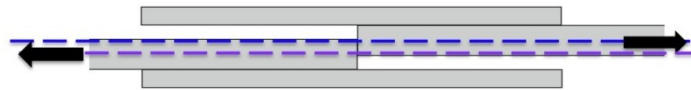


図 1-3 2 種類の肌すきの違い

表 1-4 H 形鋼の形状及び寸法の許容差

区分			許容差
高さ(H)	800未満	辺Bが400以下	± 2.0
		辺Bが400を超えるもの	± 3.0
	800以上		± 3.0

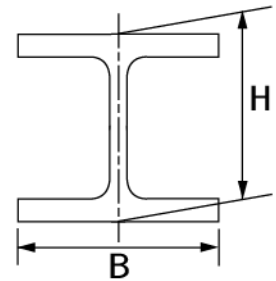


表 1-5 建築工事標準仕様書 JASS6 の肌すき量と処理方法

肌すき量	処理方法
1mm 以下	処理不要
1mm を超えるもの	フィラープレートを入れる

1.2 既往の研究

1)すべり耐力に及ぼす添板厚・添板の曲げ剛性の影響

文献 3)による実験では、添板厚が薄く、曲げ剛性が小さいほどすべり耐力低下に与える影響が少ないと示している。この文献は、肌すきを有する高力ボルト摩擦接合重ね継手のすべり耐力低下を定量的に評価するための力学モデルを提案し、そのモデルに基づいたすべり耐力低下の評価式を誘導している。この中のモデルの妥当性を確認するために添板厚を実験変数とし、高力ボルト重ね継手のすべり耐力試験を行っている。データとしては添板厚・添板の曲げ剛性によるすべり耐力に及ぼす影響を定量的に示してしる。実験結果の中には個々のボルト張力実測値や添板の機械的性質などすべり耐力低下率に与える因子も記載されている。

2)高力ボルト本数がすべり耐力に与える影響

文献 4), 5)では、高力ボルト本数が多いほど、すべり耐力低下率が小さいことが示されている。肌すき量の増大によってすべり係数も低下しているが、ボルト本数が多いほど、その低下率は減少している。

3)端あき距離とすべり耐力の関係

文献 4), 5)では、内側ボルトの端あき距離を長くした効果について示している。ボルト本数 $n=3$ について実施されており、内側ボルトの端あき距離とすべり耐力の関係が示されている。内側ボルトの端あき距離を長くすることによって、同一肌すき量におけるすべり耐力にかなりの増加が認められる。この実験では、肌すき量 $G=3[\text{mm}]$ の場合、肌すき $0[\text{mm}]$ のものと比較して端あき距離 $LE=40[\text{mm}]$ では、約 70%、 $LE=60[\text{mm}]$ では約 80%、 $LE=80[\text{mm}]$ では約 95%のすべり耐力が得られた。

文献 6)では、肌すき量を端あき距離で割ったものを肌すき角度と定義し、肌すき角度がすべり耐力に及ぼす影響について示してしる。肌すき角度が大きくなるとそれに伴って、すべり荷重も増加すると言える。また、同じ肌すき角度であっても、端あき距離が大きい方がすべり耐力が大きくなる。これは、端あき距離が長くなることにより、添板の曲げ剛性が小さくなるためだと言える。

以上の文献から、端あき距離が大きくなると、添板の曲げ剛性が小さくなり、板が密着する方向に移行し、すべり耐力の向上に繋がるとわかった。

4)締め付け方法とすべり耐力の関係

文献 7), 8), 9) では、肌すきがある場合、1次締めトルクを大きくした方が、すべり耐力が若干大きくなることを示している。この実験では、片側継手に $2.3[\text{mm}]$ のフィラープレートを設け、肌すきを作り出している。トルシア形高力ボルトでは、1次締めトルクを大きくした方が、すべり耐力は 10[%]程度上昇することがわかった。

5)締め付け順序とすべり耐力の関係

分献 10) では、ボルトの締め付け順序によりすべり耐力に大きな違いが現れることが示されている。実験は母材厚 32～40[mm]、添板厚 25[mm]と比較的厚い試験体を用いて高い力ボルト摩擦接合部の引張り試験を行っており、肌すきは 0, 1, 2, 4[mm]において実験を行っている。ボルトの締め付け順序は、①内側から外側に向けて左右交互に締め付けていくもの②ボルト群ごとに内側から締め付けていくもの③ボルト群ごとに外側から締め付けていくものの計 3 パターンの締め付け方法を試している。実験結果では、締め付けパターンが①内側から外側に向けて左右交互に締め付けていくものが最もすべり耐力が大きく、次いで②ボルト群ごとに内側から締め付けていくものがすべり耐力が大きかった。ボルトの締め付け順序は内側から外側に向けて交互に締め付けていくものが最もすべり耐力が高いことが分かった。

6)ナット回転量とボルト導入軸力について

文献 11)～14)は、JIS 形六角高力ボルトの本締め後のナット回転量と導入軸力の関係を示している。文献 11), 12)は F10T・M20 の JIS 形六角高力ボルトの 1 次締めトルクを 150[Nm]とし、マーキング、本締め後、ナット回転量を 120[°]誤差-30～0[°]としている。120[°]は、標準ボルト張力より大きく、かつ弾性範囲の張力を導入することを考慮して出された値であり、誤差-30～0[°]はナット回転量が 90[°]で標準ボルト張力が確保されていることを確認していること、かつ締め付け後の検査が誤りなく容易にできること、及び締め付け器具の特性を考慮したためである。ナット回転量の制御精度はかなり良好であるといえるが、継手部に肌すきがある場合はボルト導入軸力が過小となることが分かった。

文献 13), 14)では、F10T・M20 の JIS 形六角高力ボルトを肌すき 0, 3[mm]のそれぞれの試験体のナット回転量とボルト導入軸力の関係を示している。ナット回転量 90～120[°]で管理した場合、肌すきがある試験体の場合、肌すき側の継手の内側のボルト導入軸直は 0 に等しくなる。

7)ナット回転量のばらつきの原因

文献 15)は、ナット回転量にばらつきが生じる原因として打痕等ボルトに生じた傷、ネジ部に付着したごみの影響、1 次締めのばらつき等があると挙げられている。

8)標準試験体実験による肌すきとすべり耐力の関係

文献 16)は、肌すき量、ボルトの締め付け順序、一次締めトルクの大小、ボルトの取り替えの有無を実験変数とした標準試験体の施工試験及びすべり試験を行っており、これらの変数が、ボルト導入張力及びすべり耐力に及ぼす影響を研究している。

ボルト導入張力は、肌すき有りの試験体は締め付け対象外のボルト導入張力に変動が見られるが、肌すき無しの試験体は締め付け対象外のボルト導入張力に変動は見られなかった。

肌すき量が大きいほど、締め付け対象外のボルト張力変動も大きい。一次締めトルクが大きいほど、締め付け対象外のボルト張力変動は小さい。ボルトの取替えの影響は、取替え時に各ボルトの張力が平均 5[kN]程度低下したが、本締め時の最終張力はボルトを取り替えない試験体の張力と同じ程度であった。

ナット回転量は、肌すき有りの試験体はばらつきが大きかったが、肌すき無しの試験体はばらつきが小さかった。

すべり耐力は、肌すき無しの試験体のみ設計すべり耐力に達しているが、それ以外の肌すき有りの試験体はボルトを取り替えてもフィラープレートを挿入しても、設計すべり耐力にすべり耐力が達しなかった。肌すき 1[mm]のすべり試験の結果は図 1-6 に示す通りで、肌すき有りの場合、ボルトの締め付け順序が交互であるものが最も設計すべり耐力に近いすべり耐力を発揮した。それ以外の実験変数(ボルト群ごとに締め付け、一次締めトルクを大きくする、ボルトを取り替える)は設計すべり耐力の 50～65[%]程度のすべり耐力しか発揮しなかった。

また、文献 16)においては、本研究の比較対象となる実験である為、その詳細を 4 章の 4.1 にまとめている。

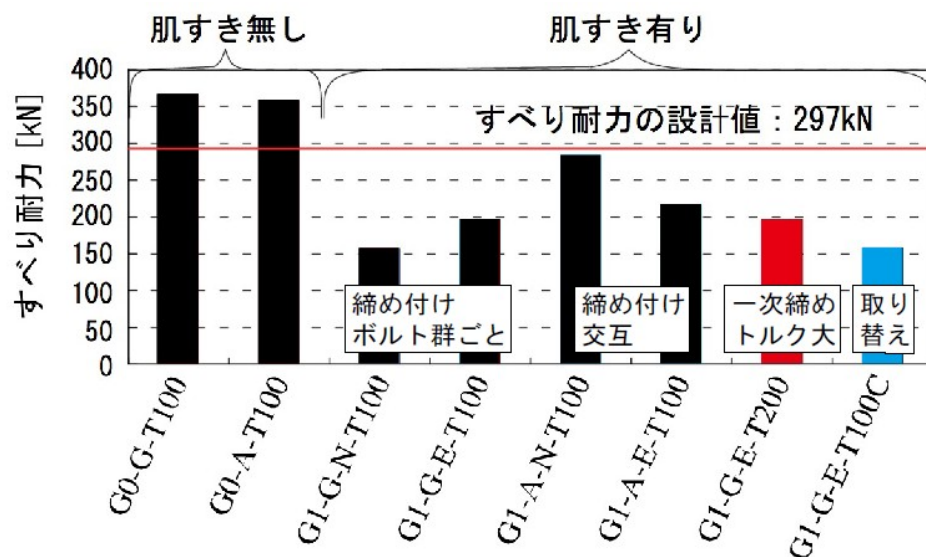


図 1-6 標準試験体実験 肌すき 1[mm]シリーズ

1.3 研究のアプローチ

本研究は、既往の研究¹⁶⁾を基本に、次段階の研究として進めた。図1-7にこれまでの研究アプローチを示す。また、誰がどの論文でまとめているのかも示した。また、本研究の前研究者が、文献16)の筆者である安形さんである。

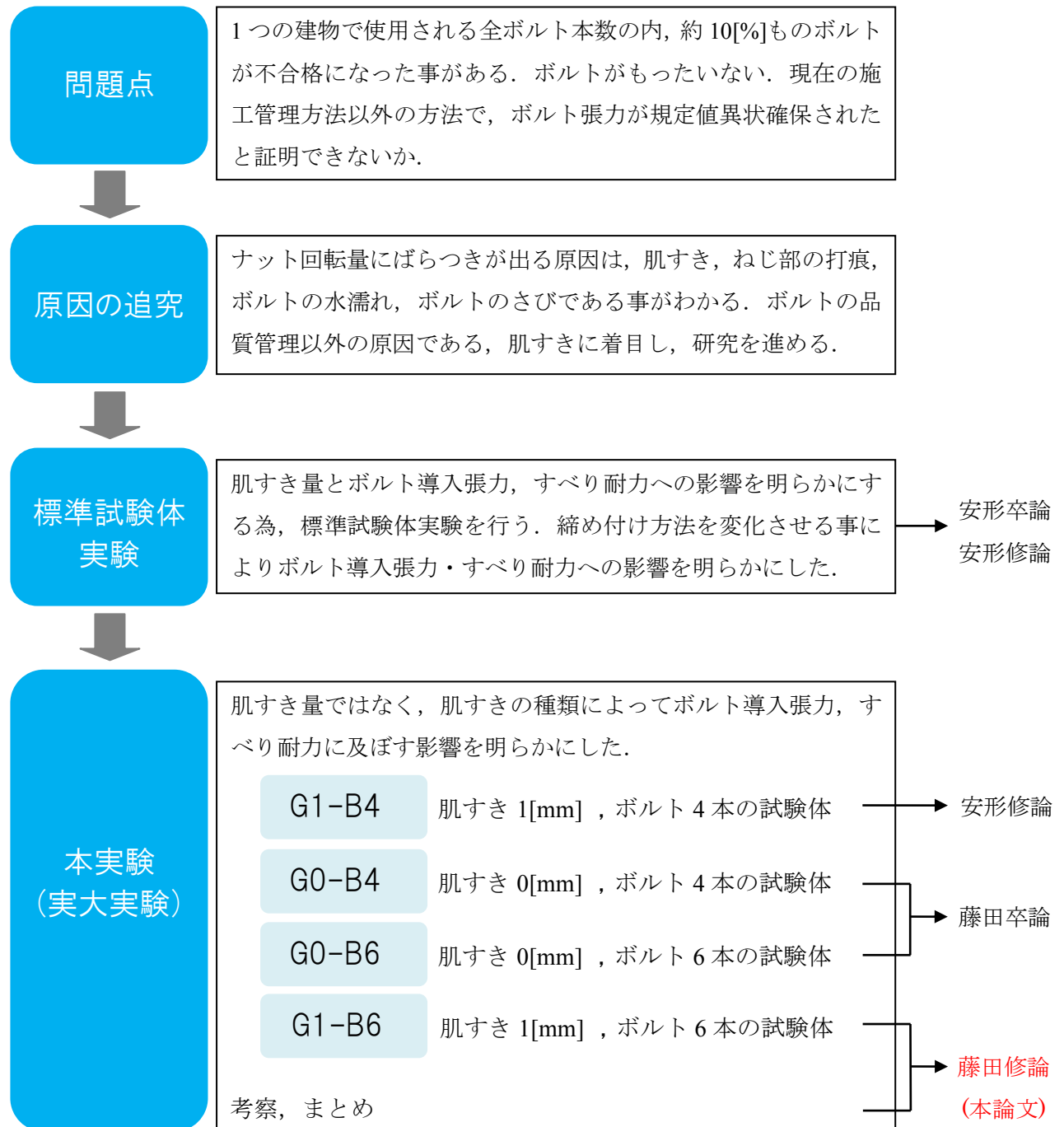


図 1-7 研究のアプローチ

第 2 章 実大実験概要

2.1 実験目的	.....10
2.2 実験計画	.....10
2.2.1 試験体形状	
2.2.2 載荷装置	
2.3 施工試験	.....17
2.3.1 締め付け方法	
2.3.2 計測計画	
2.4 すべり試験	.....19
2.4.1 載荷方法	
2.4.2 計測計画	

第 2 章 実大実験概要

2.1 実験目的

図 1-2, 図 1-3 に示した食い違いによる肌すきが, ボルト導入張力, すべり耐力, 継手性能に与える影響を明確にする. ここで示す継手性能とは, 設計時の指標となる層間変形角の制限(通常 $1/200[\text{rad}]$)より, 層間変形角と関係するたわみ, 及び剛性を示すこととする.

食い違いによる肌すきと板厚差による肌すき, それぞれが与えるすべり耐力への影響を比較し, 肌すきの種類による影響の違いを明確にする.

2.2 実験計画

食い違いによる肌すきを有する試験体を製作し, すべり試験を行うことによりすべり耐力を求め, その影響を明確にする.

本来すべり試験とは, 既往の研究 7), 8)のように継手の部分試験体(通常, 標準試験体)を用意し, 単純引張試験を行いすべり耐力を求める. しかしながら, 本論文で実験対象としている食い違いによる肌すきは, 標準試験体では再現することが不可能である.

したがって, 2 本の H 形鋼を用いて梁継手を製作し, 左右の梁の梁せいを $1[\text{mm}]$ 変えることで $1[\text{mm}]$ の食い違いによる肌すきを再現し, 実験を行った(図 2-1 参照). すべり耐力のみに着目するためには本来は引張試験を行うべきであるが, 今回は高力ボルト摩擦接合部分である実験対象部分に図 2-1 のように曲げモーメントを与えることで高力ボルト摩擦接合部分に引張力を導入し, すべり耐力及び継手性能を検証した.

本試験は施工試験, すべり試験の 2 段階で行った.

実験変数は, 表 2-2 に示すように, 肌すき $0[\text{mm}]$ と肌すき $1[\text{mm}]$, 片側ボルト本数が 4 本と 6 本である. 各実験変数に対し, 試験体は 1 体とし, 合計 4 体の実験を行った. なお, 第 1 章 1.3 にも示したが, 本論文で行った実験自体は G1-B6 のみであるが, 全試験体において実験結果, 考察, まとめを行う.

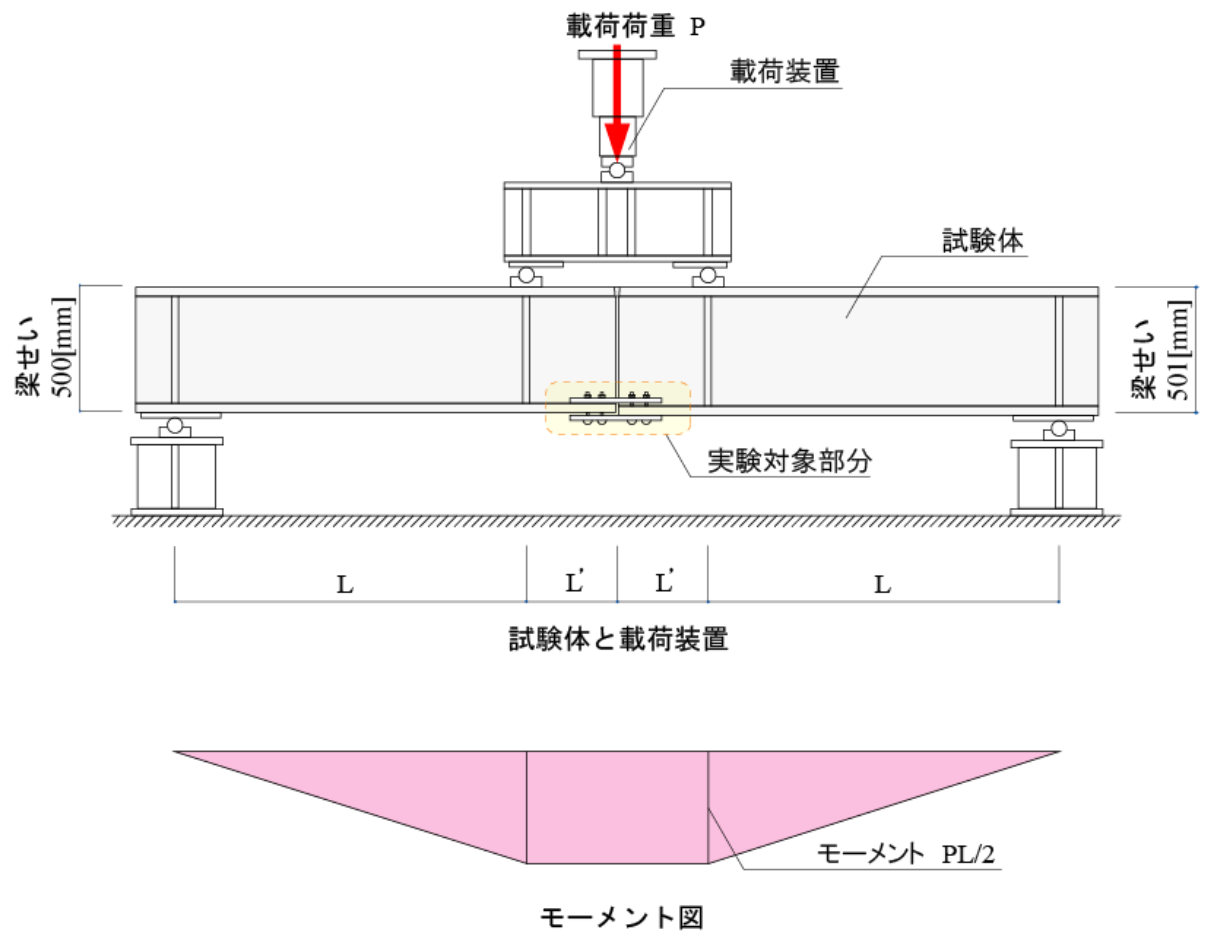


図 2-1 実験概要図(例:G1-B4)

表 2-2 実験変数

試験体名	肌すき量 [mm]	ボルト本数 [本]
G0-B4	0	4
G1-B4	1	4
G0-B6	0	6
G1-B6	1	6

2.2.1 試験体形状

試験体形状は、肌すき 0[mm]の試験体(G0-B4,G0-B6)は BH-500×200×16×28 の H 形鋼を 2 本突き合わせて 1 体の梁継手を 1 つの試験体とした。肌すき 1[mm]の試験体(G1-B4,G1-B6)は BH-500×200×16×28 と BH-501×200×16×28 の H 形鋼 2 本で 1 つの試験体を製作した(図 2-3, 及び写真 2-4 参照)。H 形鋼 1 本の全長は全て 1950[mm]で、材料の鋼種は SM490A である。試験体の、突合わせ間隔は 10[mm]で、肌すきは試験体の上端フランジを水平に突き合わせ、下端フランジに食い違いができるように製作し、実験対象部分を梁継手の下端フランジとした(図 2-1 参照)。肌すきを作り出すために、板厚 1.2[mm]のフィラープレートを含み下端フランジを添板で固定した状態で溶接した。試験部分の下フランジに主に引張力のみが作用するように、上端フランジはレ形開先を用いた完全溶け込み溶接により接合し、ウェブ部は接合しない試験体とした。下端フランジの梁継手は主に曲げにより耐力が決定すること、ウェブが接合されていないことから、載荷方法は妥当であると考えられる。また、便宜、図 2-5 の様に試験体に方向をつけた。図 2-1 を北側から見た試験体とし、向かって右側に位置する H 形鋼を西側とし、左側に位置する H 形鋼を東側とする。図 2-5 から見えていない面は南とする。すなわち、肌すき 1[mm]の試験体であれば、西側の梁せいが 501[mm]である為、試験体の東西を示せばどちらの梁であるのかすぐに区別できる。

また、曲げモーメントが完全に下端フランジの実験対象部分として作用した場合、式(2.1)、式(2.2)のような論理に基づき、下端フランジに作用した継手引張力を算出することができる。標準試験体実験を用いたすべり試験の場合、すべり耐力は母材の引張載荷荷重より求められる^{15),18)}。これは、式(2.2)で言う下端フランジ継手引張力に相当するので、本実験では、下端フランジ継手引張力からすべり耐力を求める事とした。式内の記号は、図 2-1 に示し、 j については図 2-7 に示す。

$$M = \frac{PL}{2} \quad \dots \dots \dots \text{式(2.1)}$$

$$N_F = \frac{M}{j} \quad \dots \dots \dots \text{式(2.2)}$$

M : モーメント[kN・mm]

P : 載荷荷重[kN]

L : 載荷点から支点までの距離 1430[mm]

N_F : 下端フランジ継手引張力[kN]

j : 重心間距離 472[mm]

添板は PL-16 の鋼板であり，材料の鋼種は SM490A である．添板と下端フランジの摩擦面にはショットブラスト処理を施し，一般的な赤錆面とした．

ボルトは S10T，ボルト径 M20 のトルシア形高力ボルトを用いている．ボルト孔は $\phi 22$ ，ボルト孔クリアランスは 2[mm]，ピッチは 70[mm]，端あき距離は 50[mm]である．

H 形鋼のフランジ，及びウェブ，添板，トルシア形高力ボルトの素材の機械的性質を表 2-6 に示す．また，試験体の計測位置，及び実測寸法を図 2-7，表 2-8 に示す．

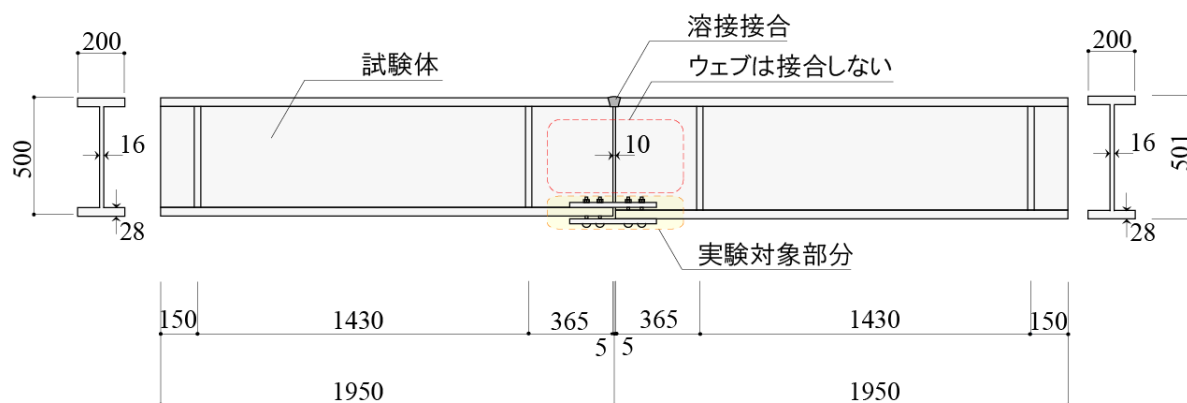


図 2-3 試験体形状



写真 2-4 実験風景

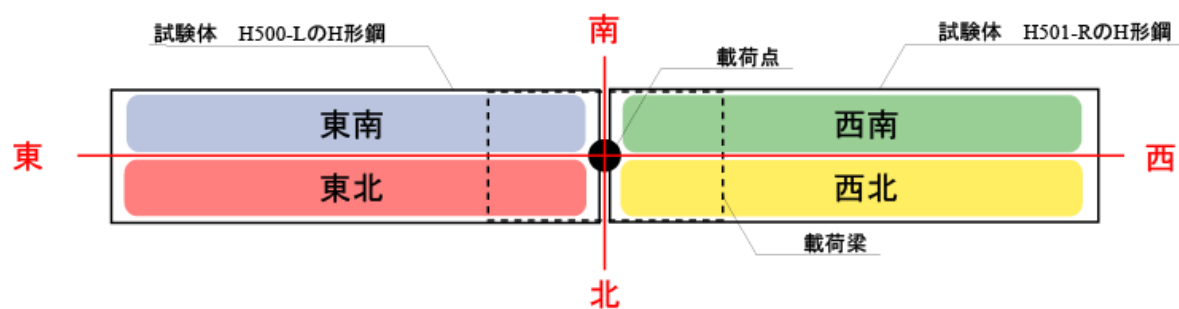
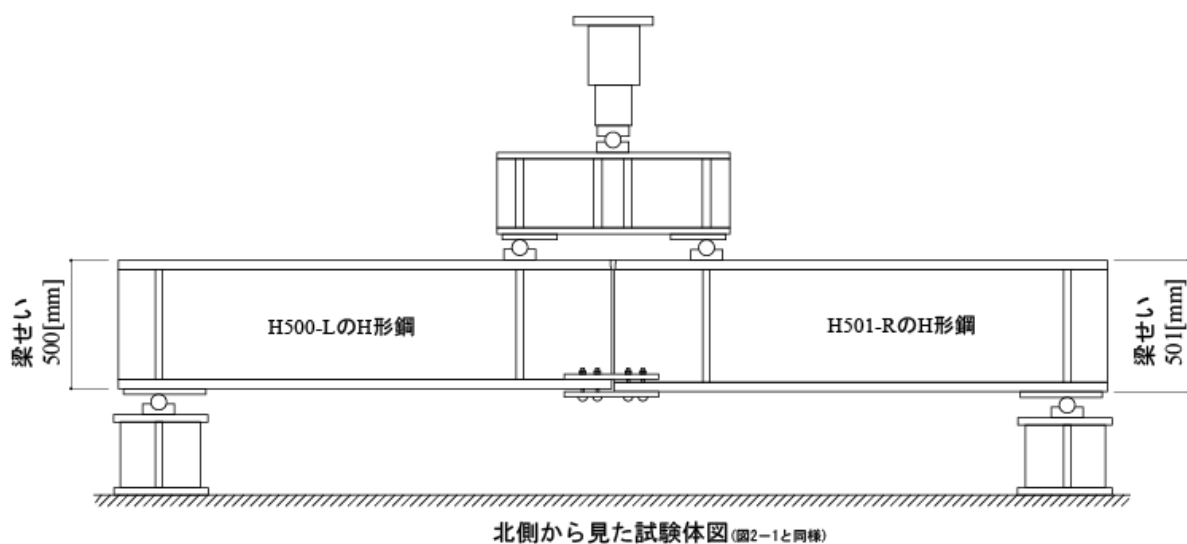


図 2-5 試験体と方向

表 2-6 素材試験の機械的性質

部材名	材料名	降伏点 σ_y [N/mm ²]	引張耐力 [N/mm ²]	破断伸び [%]	降伏比 Y.R.	ヤング係数 [$\times 10^5$ N/mm ²]
ボルト	S10T	1031*	1088	20.7	0.95	2.1876
H型鋼フランジ	SM490	346	514	29.9	0.67	2.2865
H型鋼ウェブ		370	524	27.5	0.71	2.2246
スプライスプレート		398	525	25.2	0.76	2.3779

*は 0.2%オフセット値

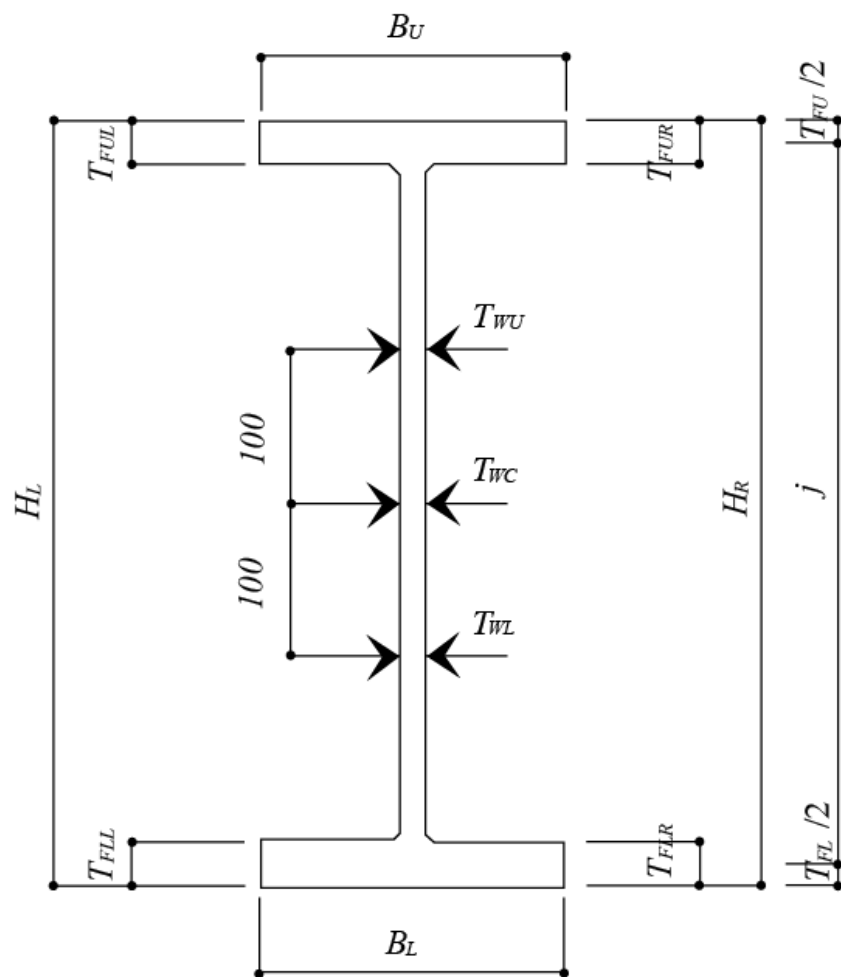


図 2-7 計測位置

表 2-8 実測寸法

試験体名	部材名	梁せい		上端フランジ	下端フランジ	上端フランジ厚		下端フランジ厚		ウェブ厚		
		H_L	H_R	B_U	B_L	T_{FUL}	T_{FUR}	T_{FLL}	T_{FLR}	T_{WU}	T_{WC}	T_{WL}
G0-B4	H500-L	497.5	497.5	200.44	200.88	27.74	27.84	27.85	27.83	16.35	16.17	16.35
	H500-R	497.5	497.5	200.41	200.62	27.85	27.70	27.94	27.83	16.15	16.15	16.25
G1-B4	H500-L	498.0	497.5	200.71	201.10	27.75	27.79	27.91	27.78	16.22	16.39	16.68
	H501-R	498.0	499.5	200.83	201.87	27.66	27.65	27.69	27.77	16.16	16.39	16.13
G0-B6	H500-L	499.0	498.5	200.66	200.36	27.53	27.60	27.53	27.56	16.18	16.27	16.15
	H500-R	498.0	498.0	200.53	200.41	27.90	27.82	27.88	27.90	16.23	16.21	16.30
G1-B6	H500-L	498.5	499.0	200.00	200.05	27.66	27.91	27.96	27.69	16.24	16.20	16.20
	H501-R	500.0	499.5	200.05	200.00	27.75	27.72	27.92	28.00	16.26	16.37	16.59

2.2.2 載荷装置

載荷装置は、図 2-9 に示す通り、単純支持した試験体に 1000[kN]級の油圧ジャッキを用い、載荷梁を介して 2 点載荷し実験対象部分に曲げモーメントを与えた。載荷装置であるロードセル、載荷梁、試験体、それぞれはピンローラーを介して設置した。

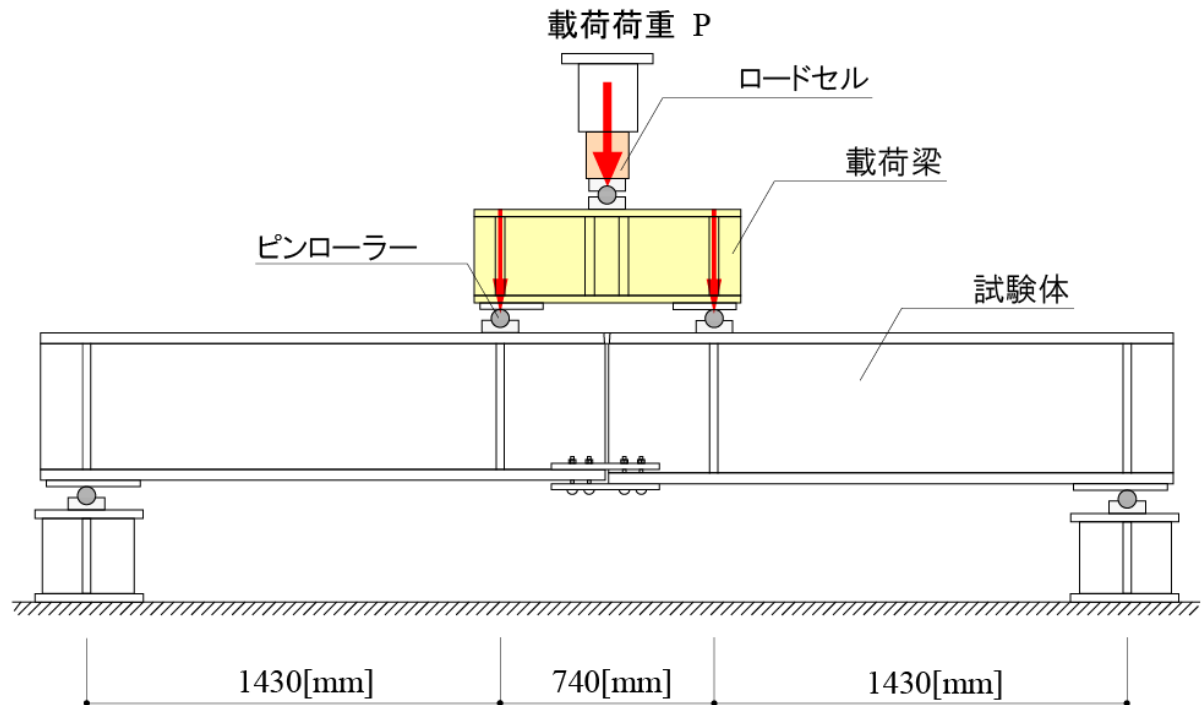
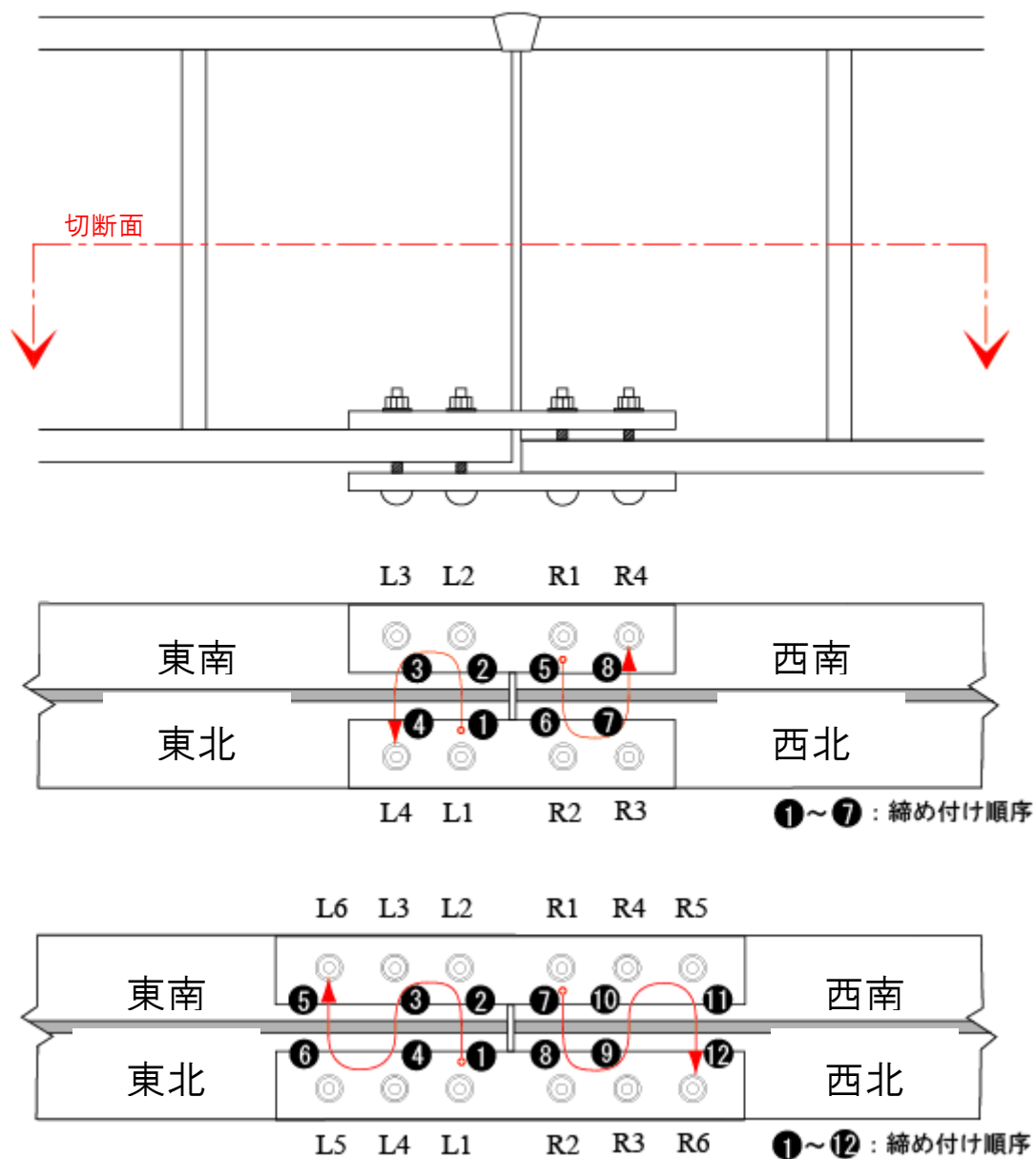


図 2-9 載荷装置

2.3 施工試験

2.3.1 締め付け方法

施工はトルシア形高力ボルトを用いて、現場の施工方法と同様、継手の内側から外側に向かってボルト群ごとに締め付けを行った。一次締めはトルクレンチを用いて $150[\text{N}\cdot\text{m}]$ まで、本締めは $400[\text{N}\cdot\text{m}]$ までトルクレンチを用いて締め付け、その後はシャーレンチでピンテールが破断するまで締め付けた。ボルト本数毎の締め付け順序は、図 2-10 に示す。



切断面から見た図(ボルト 4 本, 6 本)

図 2-10 締め付け順序

2.3.2 計測計画

肌すきの影響を受けてボルト締め付け時にボルト導入張力，ナット回転量，それぞれに変化が現れるか調べる為に下記の計測計画を立てた．

■ボルト導入張力の計測

指針付きのトルクレンチで $50[\text{N} \cdot \text{m}]$ ずつトルクを導入し，その都度，図 2-11 に示すボルト軸部に貼付したひずみゲージにより，ひずみを計測した．ボルト張力 $N[\text{kN}]$ は，ボルトに貼付した 2 枚のひずみゲージの平均値 $\varepsilon[\times 10^{-6}]$ より，式(2.3)から算出した値である．

$$N = \varepsilon E A_b \quad \dots \dots \dots \text{式(2.3)}$$

N ：ボルト導入張力[kN]

ε ：ひずみ $[\times 10^{-6}]$

E ：ヤング係数 $[\text{N}/\text{mm}^2]$

A_b ：ボルト軸部の断面積 $[\text{mm}^2]$

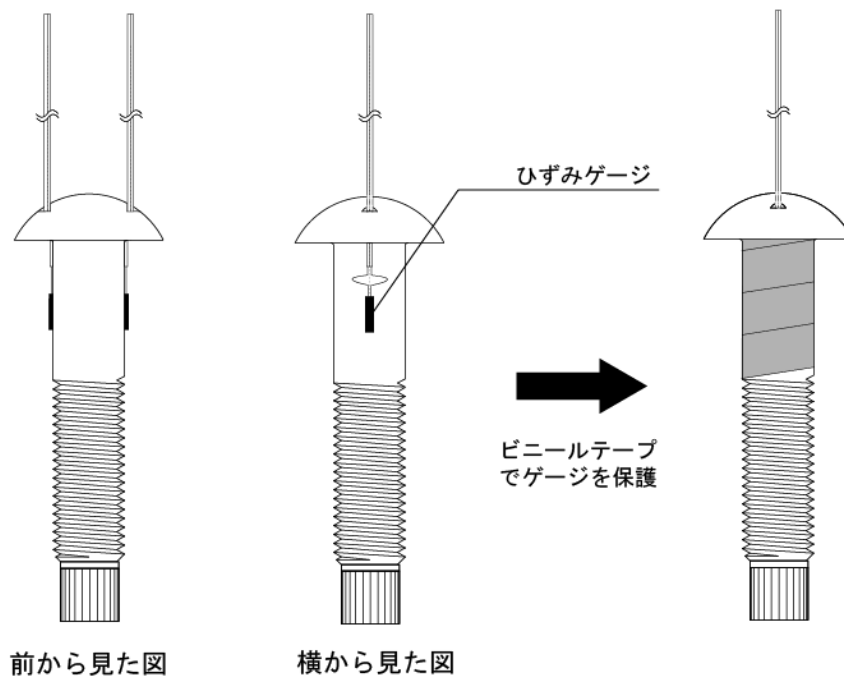


図 2-11 ボルトのひずみゲージ貼付位置

■ナット回転量の計測

一次締め後に行ったマーキングの印を用いて，施工後，全ボルトのナット回転量の計測を行った．

2.4 すべり試験

2.4.1 載荷方法

リラクゼーションを考慮し、ボルトの締め付けから 48 時間以上経て、ボルト張力が安定した後、載荷試験を行った。載荷試験は 1000[kN]級の油圧ジャッキで載荷梁を介して 2 点載荷し、継手に等曲げモーメントを与えた。載荷の制御は、すべり変位の平均が 0.15[mm]に達し、すべりが起こるまでは荷重制御(25[kN]毎)で、その後は鉛直変位 18[mm](1/100[rad])まで鉛直変位制御(1[mm]毎)で行った。

また、試験体と載荷装置の設置の方法は、載荷芯(ロードセル芯)が試験体のウェブ芯を通るように試験体を設置した。

2.4.2 計測計画

すべり試験は次の 4 つを明確に計測する為に、図 2-12 のように高感度変位計を設置した。

■試験体の鉛直変位量を計測する為の鉛直変位計

■すべり変位量を計測する為のすべり変位計

■継手全体変位量を計測する為の継手全体変位計

■載荷点直下に設けたサイドの鉛直変位量を計測する為の両端鉛直変位計

更に、それぞれ各々の目的の為に、図 2-13、図 2-14 のようにひずみゲージを貼付した。

■試験体内に入力されたモーメントを計測する為に、試験体にひずみゲージを貼付した。

■添板内の力を確認し、標準試験体との力学の違いを明らかにする為に、添板にひずみゲージを貼付した。

試験体に貼付したひずみゲージは試験体 1 体当たり 2 断面(図 2-13、図 2-14 の a-a'断面)とし、計 28 箇所貼付した。継手の影響を受けにくくかつ載荷点に近い場所に貼付した為、載荷梁と試験体のローラーに遮られ、上端フランジの上面に貼付すべきゲージは、フランジの側面に貼付した。添板に貼付したゲージは、添板長手方向のボルト軸芯上に 7 箇所、それと直角に添板の側面に対応して 7 箇所、かつ添板の上下左右に貼付しているので、1 体当たり計 56 箇所に貼付している。また、添板長手方向のちょうど真ん中は、2 本の H 形鋼の 10[mm]の隙間となっており、添板の裏面に貼付できるので、ここのみ 1[mm]ゲージを貼付している。それ以外は、すべて 5[mm]ゲージを貼付している。

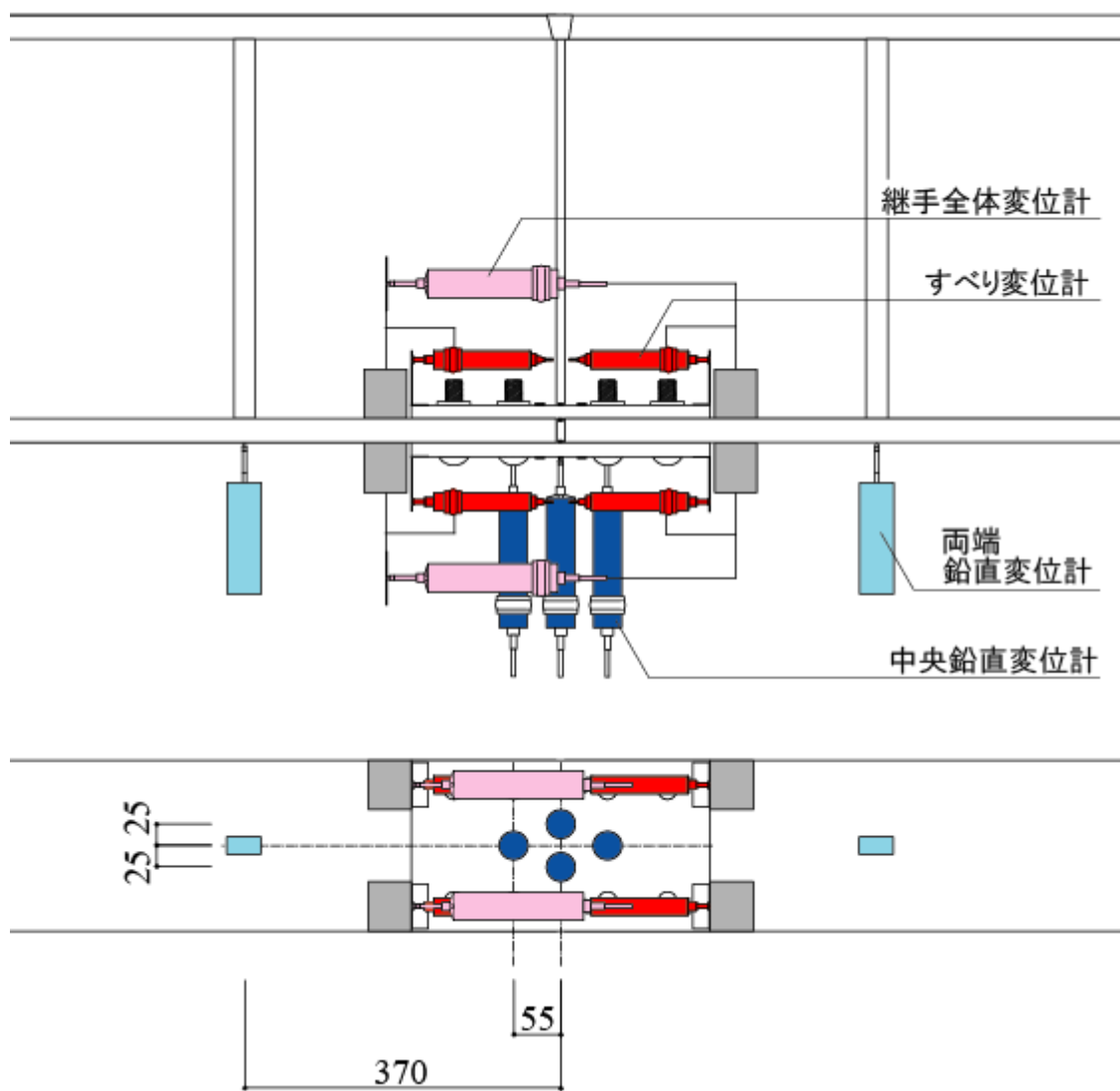


図 2-12 変位計設置位置とゲージ貼付位置

4.5.4

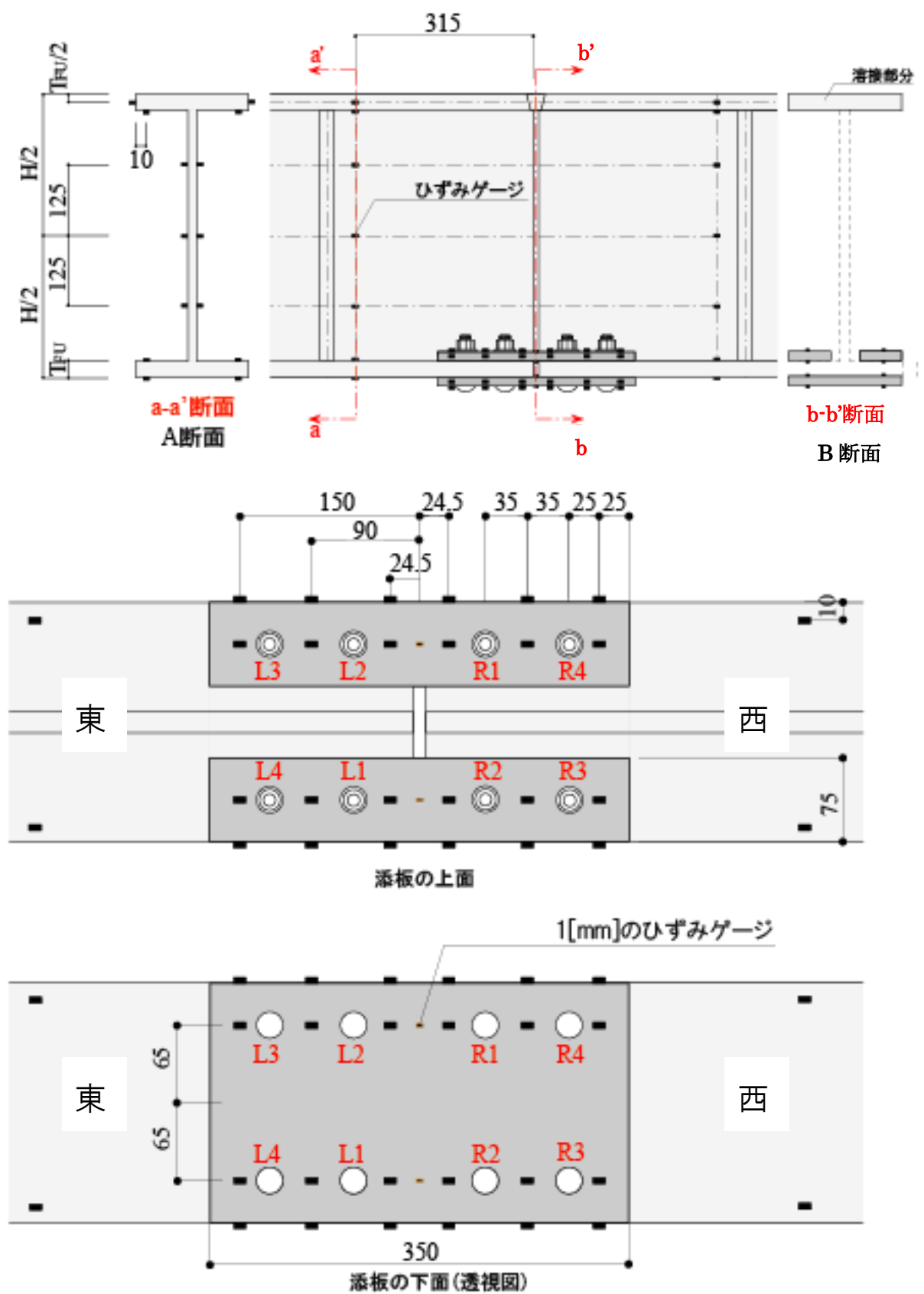


図 2-13 ひずみゲージ貼付位置(ボルト 4 本もの)

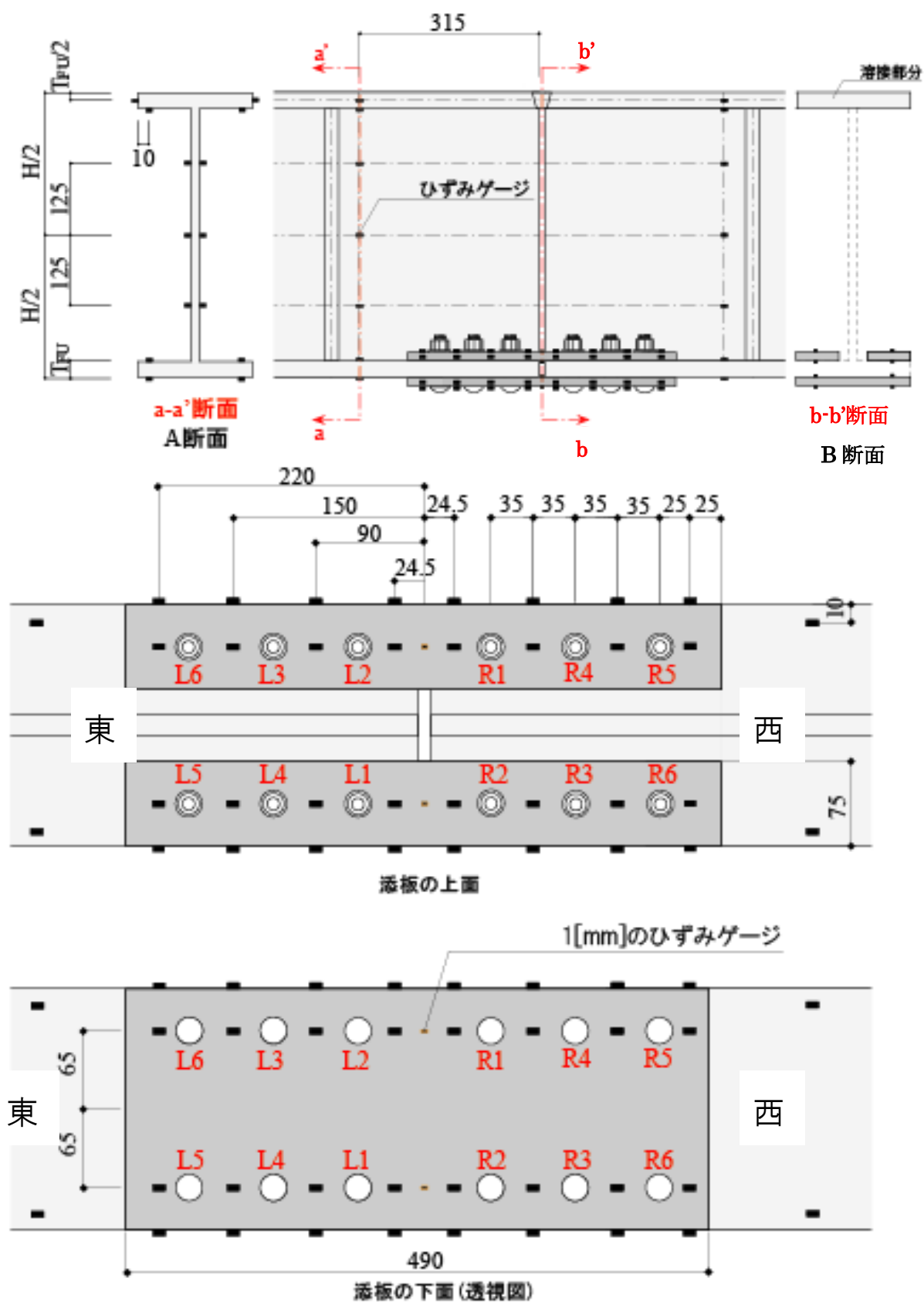


図 2-14 ひずみゲージ貼付位置(ボルト 6 本もの)

第 3 章 実大実験結果

3.1 施工試験結果	.....24
3.1.1 ボルト導入張力の計測結果	
3.1.2 ナット回転量の計測結果	
3.2 すべり試験結果	.....38
3.2.1 載荷荷重－鉛直変位関係	
3.2.2 載荷荷重－すべり変位関係	
3.2.3 すべり耐力	

第 3 章 実大実験結果

3.1 施工試験結果

3.1.1 ボルト導入張力の計測結果

図 3-1～図 3-3 に，G0-B4，G1-B4 および G1-B6 のボルト導入張力－step 数関係を示す．縦軸はボルト導入張力 N [kN] で，ボルト軸部に貼付したひずみゲージの値 $\varepsilon [\times 10^{-6}]$ より，(3.1) 式を用いて算出した値である．

$$N = \varepsilon EA \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(3.1)}$$

N : ボルト導入張力 [kN]

ε : ひずみ [$\times 10^{-6}$]

E : ヤング係数 [N/mm²]

A : ボルト導入張力 [mm²]

横軸は，50[Nm] を 1step とした 1 次締めから本締めまでの通算 step 数である．

更に，図 3-1～図 3-3 を基に，ボルト導入張力の変動とボルト位置の関係を示したものを図 3-4～図 3-6 に示す．なお，各試験体毎の変動結果を図 3-1～図 3-3 と共に述べる．

G0-B4

■一次締め時

- L1 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- L2 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- L3 を締め付けると、L2 が 8[kN]減少する。
- L4 を締め付けると、L1 が 6[kN]減少する。
- R1 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R2 を締め付けると、R1 が 5[kN]減少する。
- R3 を締め付けると、R2 が 9[kN]減少する。
- R4 を締め付けると、R1 が 6[kN]減少する。

■本締め時

- L1 を締め付けると、L4 が 5[kN]減少する。
- L2 を締め付けると、L3 が 4[kN]減少する。
- L3 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- L4 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R1 を締め付けると、R4 が 6[kN]減少する。
- R2 を締め付けると、R3 が 4[kN]減少する。
- R3 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R4 を締め付けると、ほぼ影響は無い。

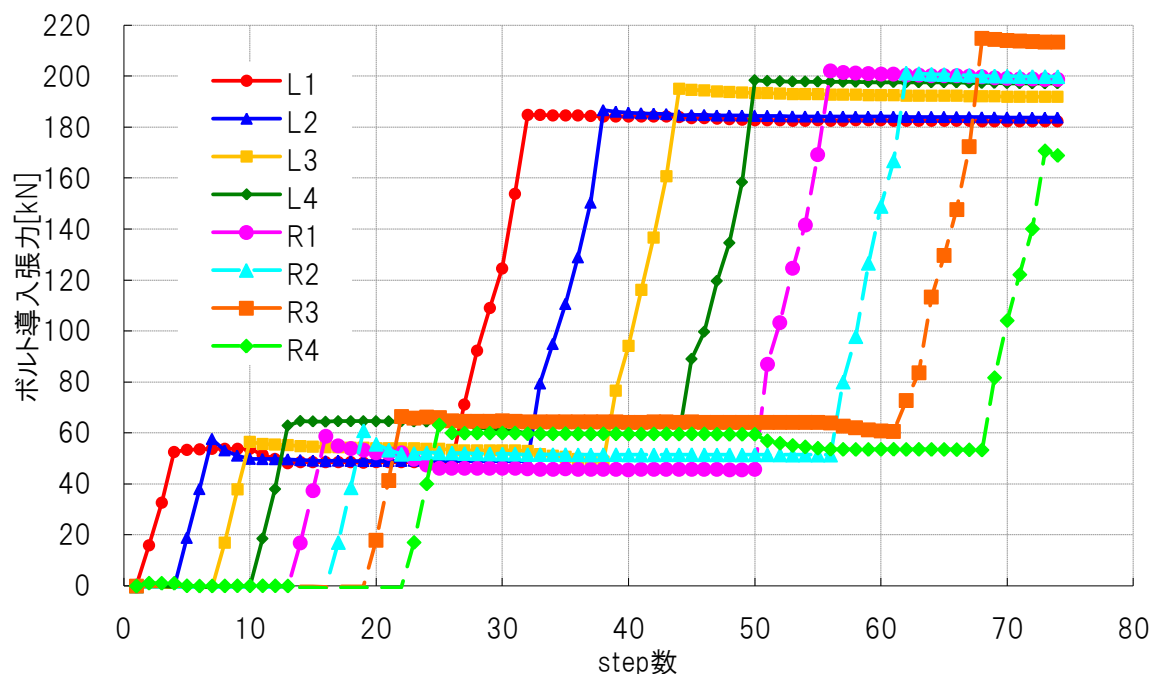


図 3-1 ボルト導入張力—STEP 数(G0-B4)

G1-B4

■一次締め時

- L1 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- L2 を締め付けると、L1 が 9[kN]減少する。
- L3 を締め付けると、L2 が 8[kN]減少する。
- L4 を締め付けると、L1 が 8[kN]減少する。
- R1 を締め付けると、L2 が 9[kN], R4 が 5[kN]減少する。
- R2 を締め付けると、L1 が 8[kN], R1 が 8[kN]減少する。
- R3 を締め付けると、R2 が 8[kN]減少する。
- R4 を締め付けると、R1 が 5[kN]減少する。

■本締め時

- L1 を締め付けると、L2 が 4[kN], L4 が 13[kN], R2 が 8[kN]減少する。
- L2 を締め付けると、L3 が 10[kN], R1 が 6[kN]減少する。
- L3 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- L4 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R1 を締め付けると、L2 が 5[kN], R4 が 5[kN]減少する。
- R2 を締め付けると、R3 が 8[kN]減少する。
- R3 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R4 を締め付けると、ほぼ影響は無い。

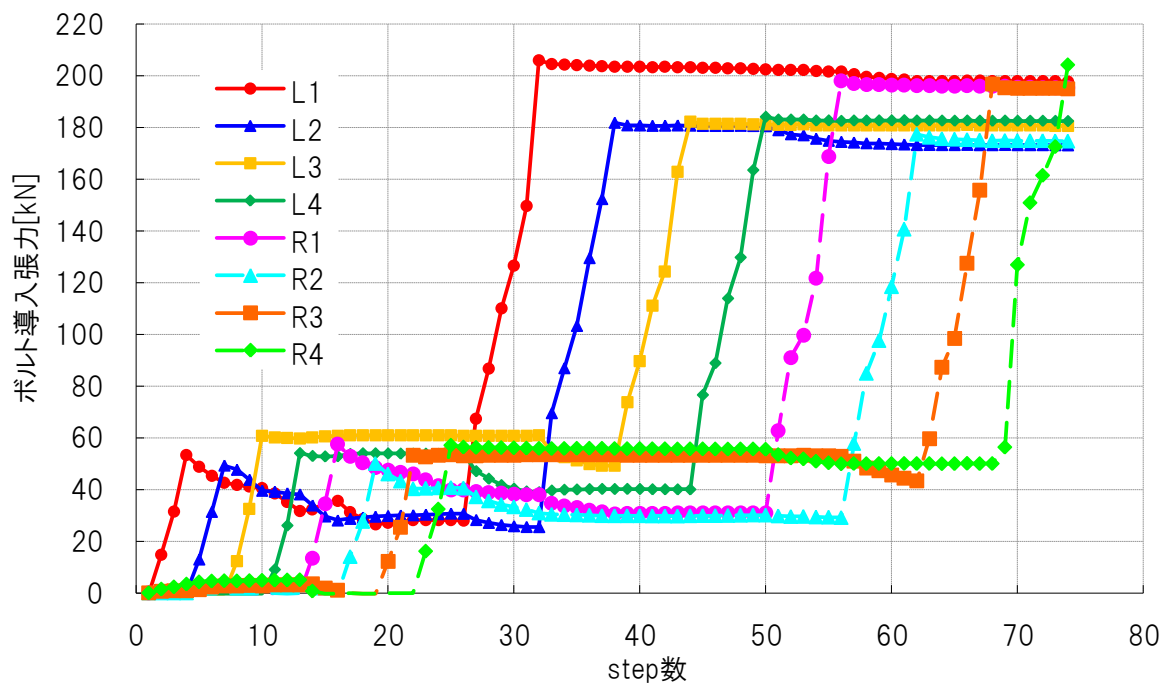


図 3-2 ボルト導入張力—STEP 数(G1-B4)

G1-B6

■一次締め時

- L1 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- L2 を締め付けると、L1 が 6[kN]減少する。
- L3 を締め付けると、L2 が 4[kN]減少する。
- L4 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- L5 を締め付けると、L4 が 7[kN]減少する。
- L6 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R1 を締め付けると、L2 が 9[kN]減少する。
- R2 を締め付けると、L1 が 12[kN], R1 が 6[kN]減少する。
- R3 を締め付けると、R2 が 4[kN]減少する。
- R4 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R5 を締め付けると、R4 が 4[kN]減少する。
- R6 を締め付けると、R3 が 4[kN]減少する。

■本締め時

- L1 を締め付けると、L4 が 6[kN], R2 が 6[kN]減少する。
- L2 を締め付けると、R1 が 4[kN]減少する。
- L3 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- L4 を締め付けると、L3 が 5[kN], L5 が 7[kN]減少する。
- L5 を締め付けると、L4 が 4[kN]減少する。
- L6 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R1 を締め付けると、R4 が 6[kN]減少する。
- R2 を締め付けると、ほぼ影響は無い。
- R3 を締め付けると、R2 が 8[kN], R6 が 5[kN]減少する。
- R4 を締め付けると、R5 が 5[kN]減少する。
- R5 を締め付けると、R4 が 6[kN]減少する。
- R6 を締め付けると、ほぼ影響は無い。

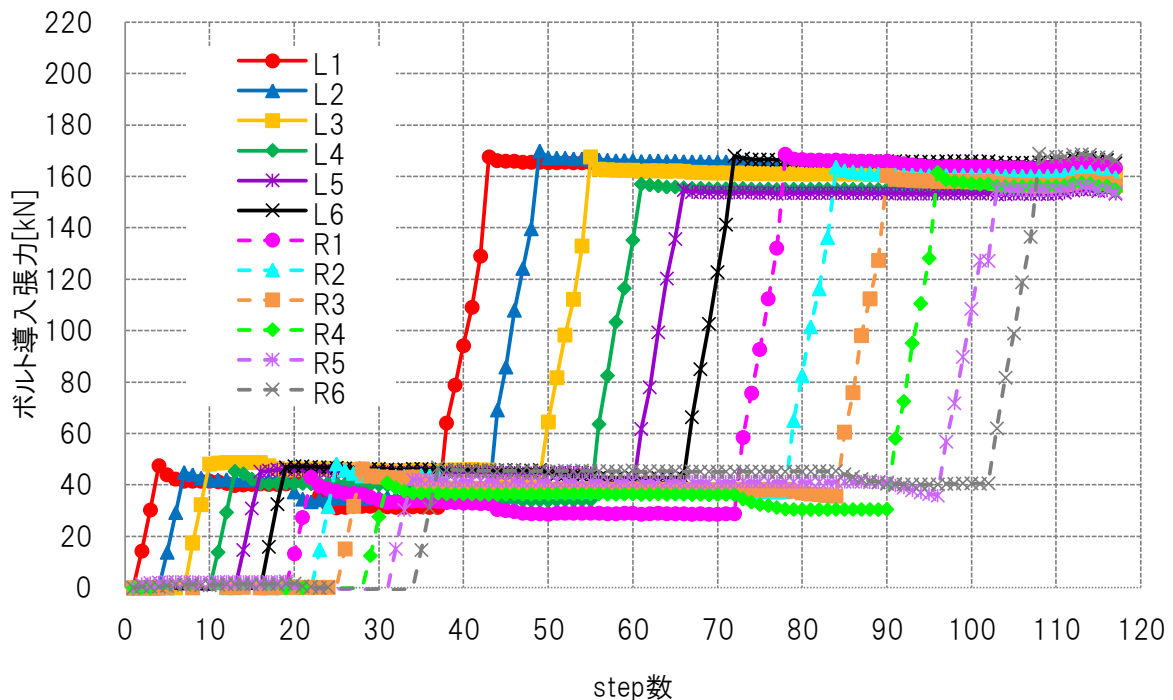


図 3-3 ボルト導入張力—STEP 数(G1-B6)

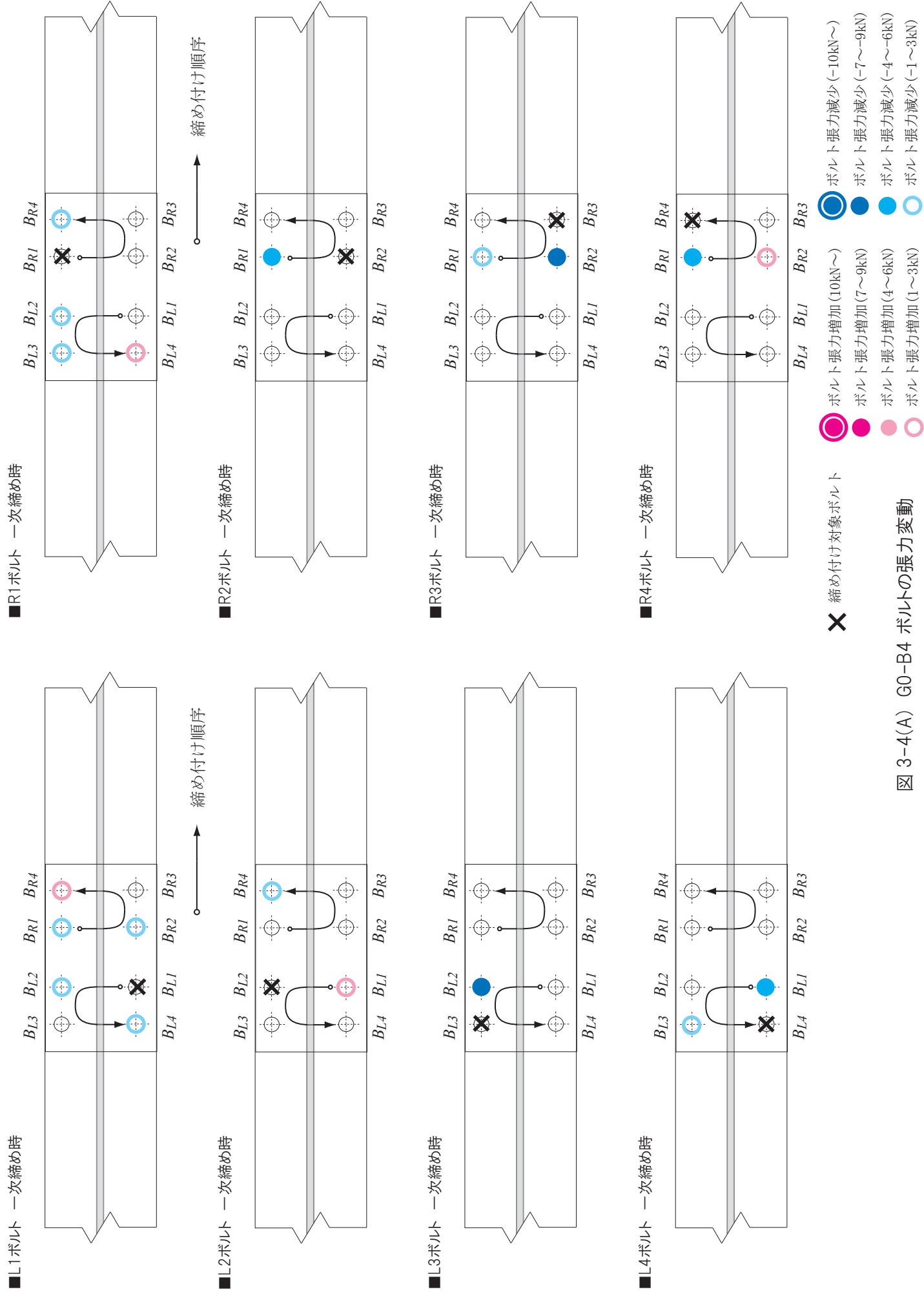


図 3-4(A) G0-B4 ボルトの張力変動

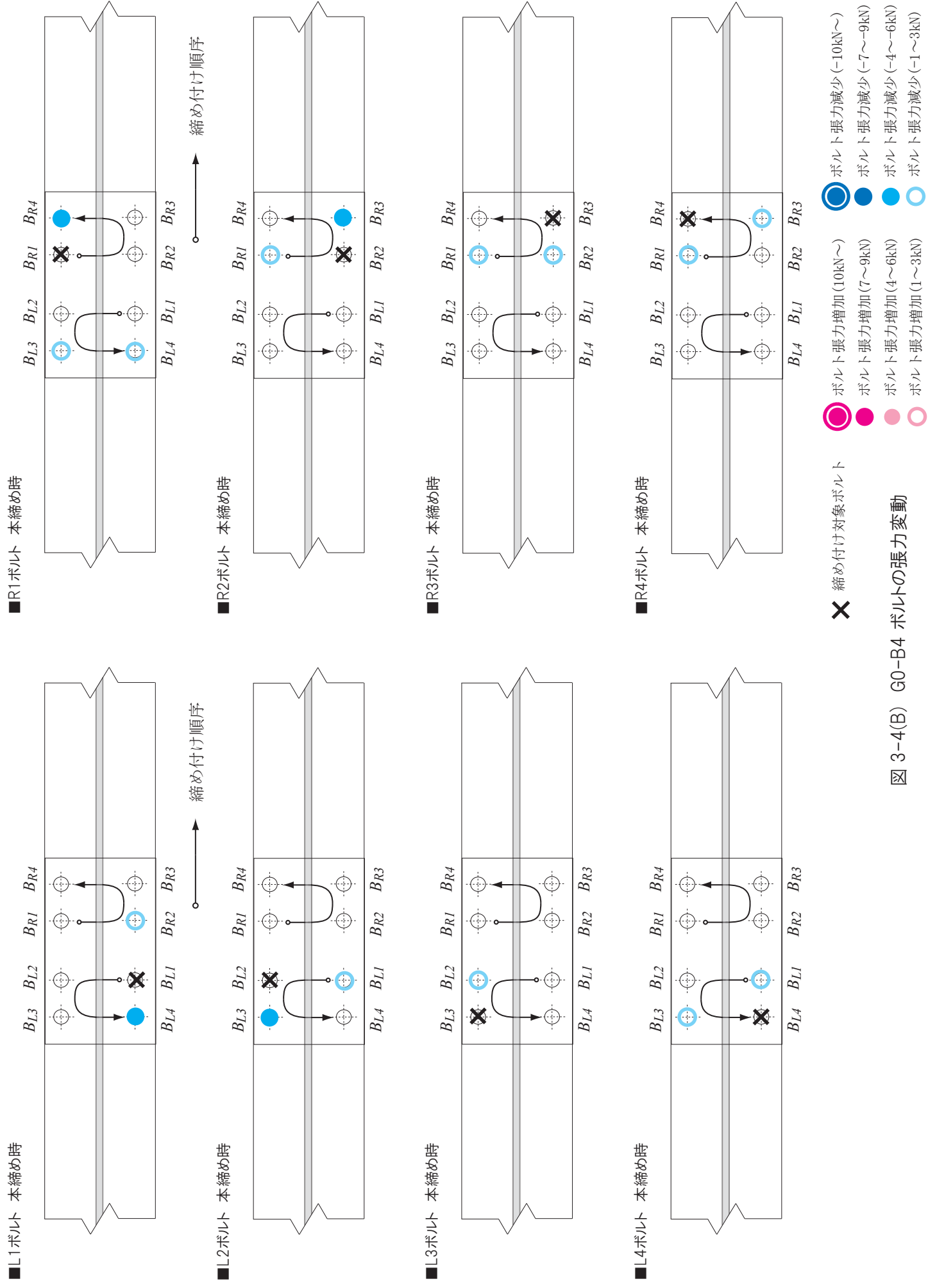


図 3-4(B) G0-B4 ボルトの張力変動

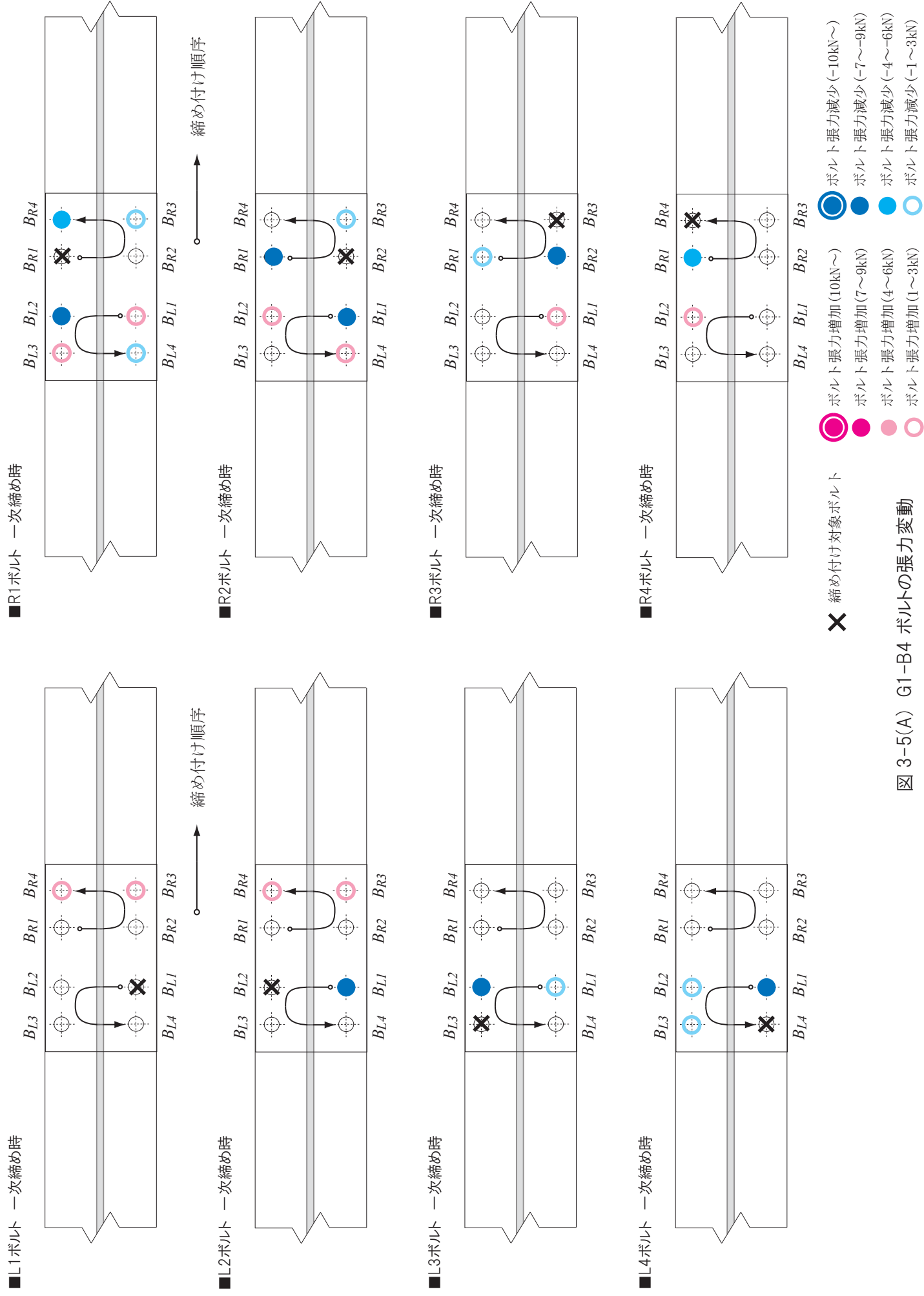


図 3-5(A) G1-B4 ボルトの張力変動

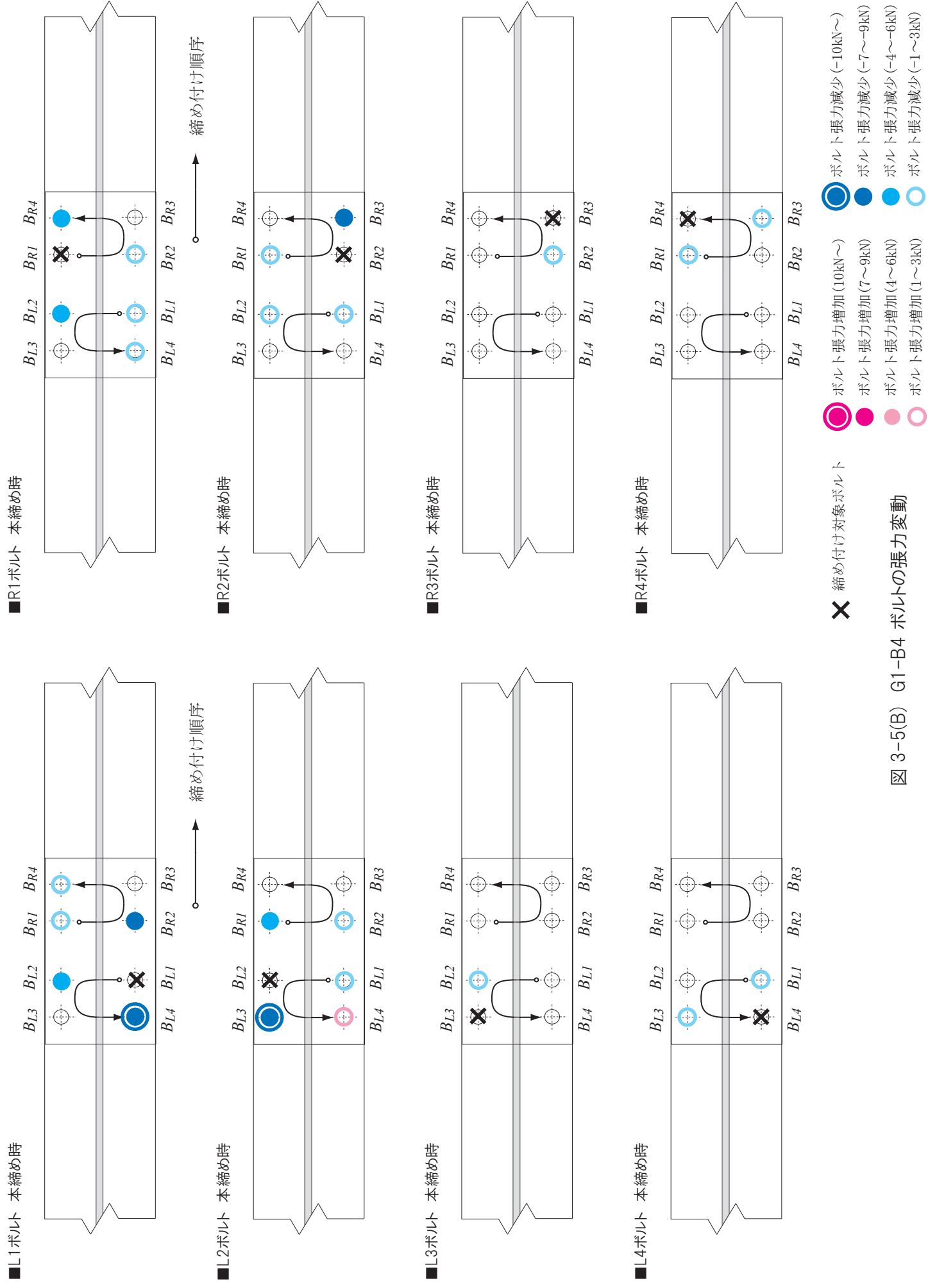
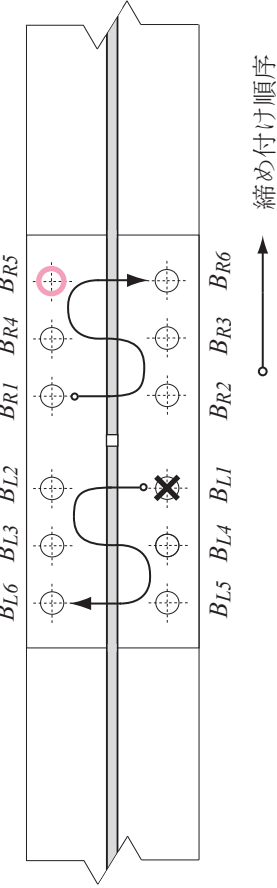
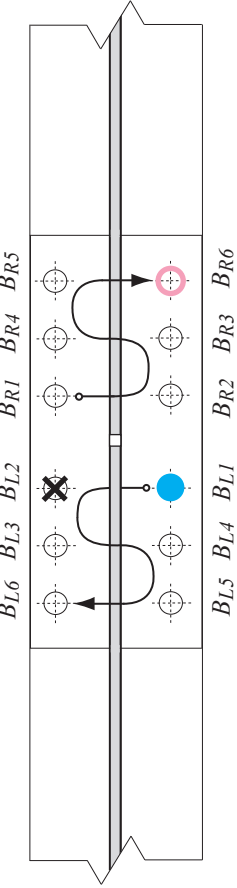


図 3-5(B) G1-B4 ボルトの張力変動

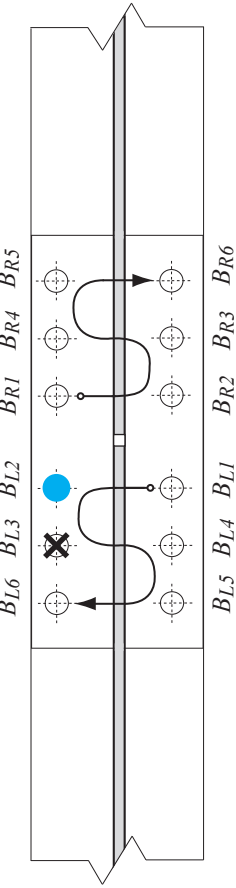
■L1ボルト 一次締め時



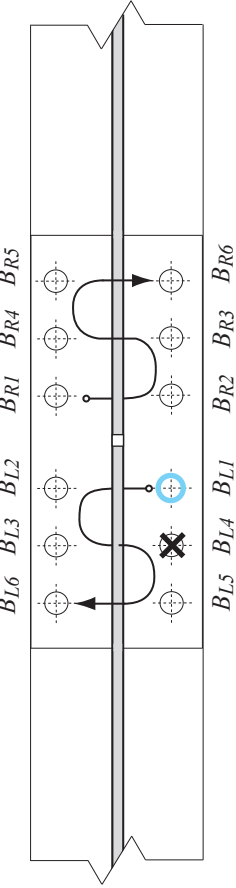
■L2ボルト 一次締め時



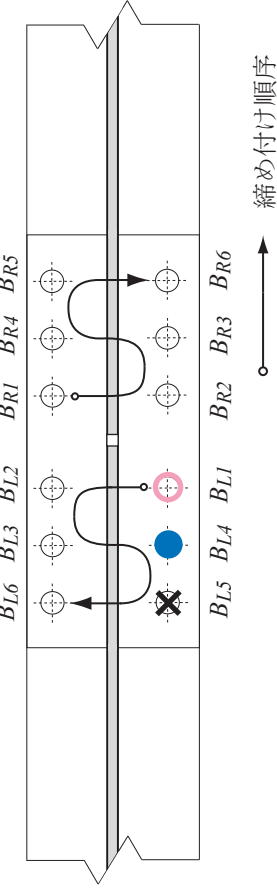
■L3ボルト 一次締め時



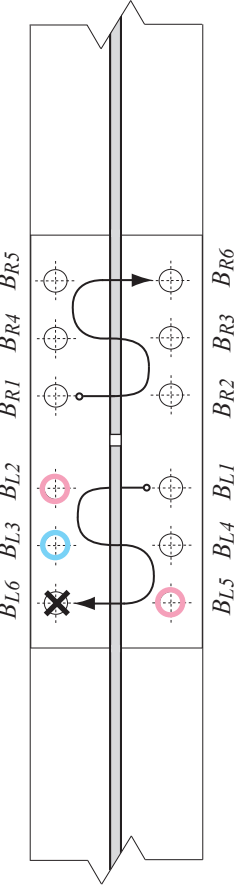
■L4ボルト 一次締め時



■L5ボルト 一次締め時



■L6ボルト 一次締め時



× 締め付け対象ボルト

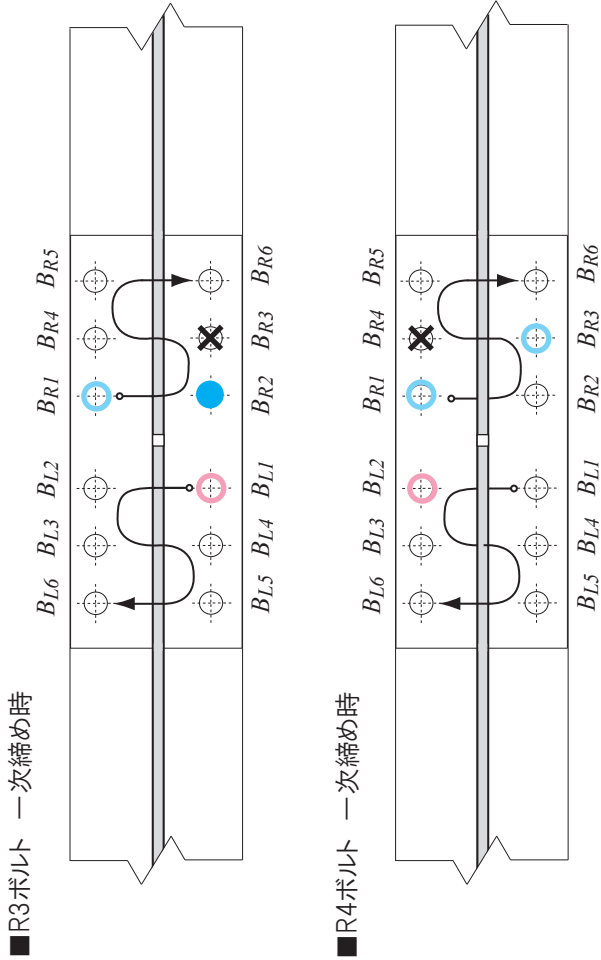
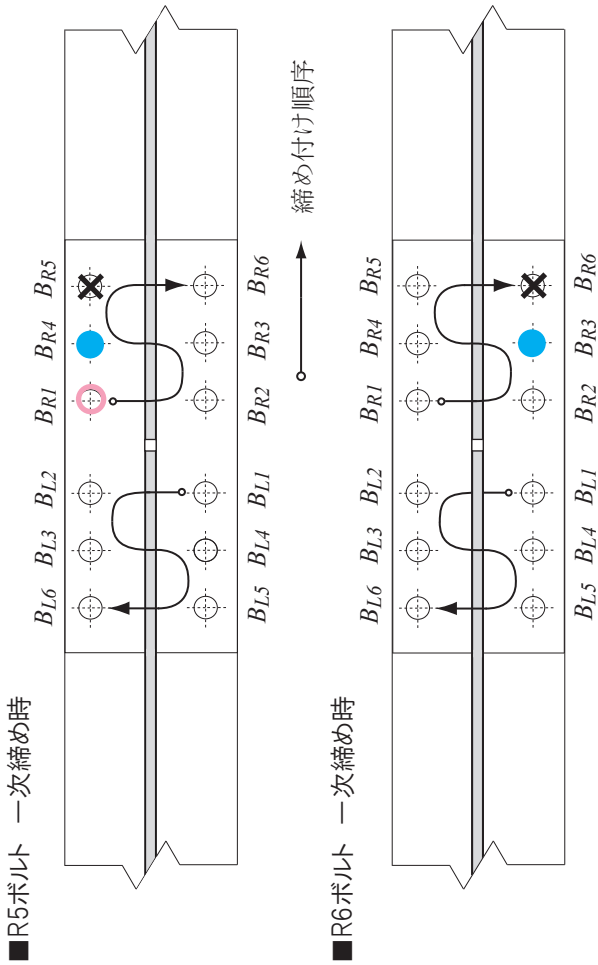
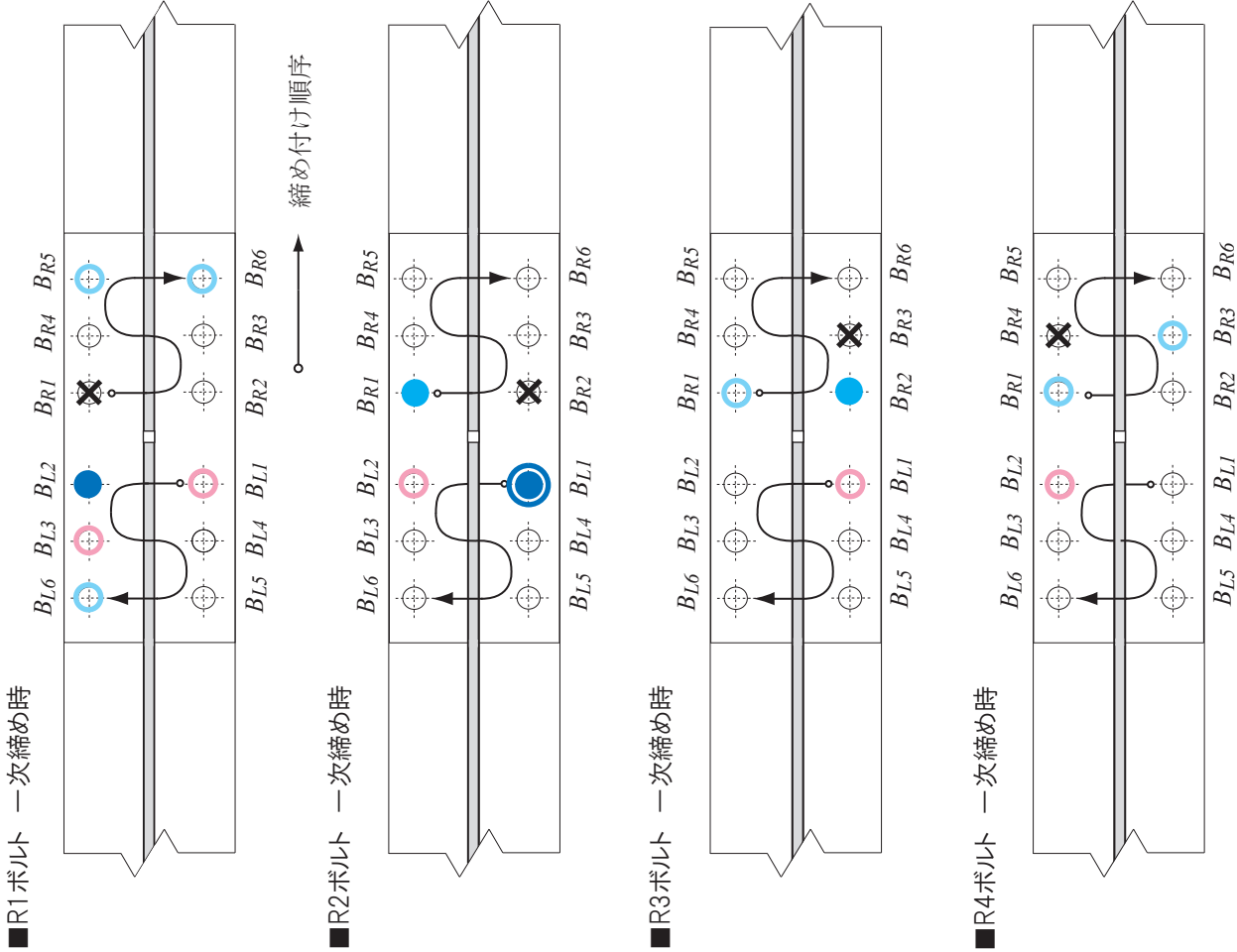
● ボルト張力増加 (10kN～)
● ボルト張力増加 (7～9kN)
● ボルト張力増加 (4～6kN)
● ボルト張力増加 (1～3kN)

● ボルト張力減少 (-10kN～)
● ボルト張力減少 (-7～-9kN)
● ボルト張力減少 (-4～-6kN)
● ボルト張力減少 (-1～-3kN)

× 締め付け対象ボルト

● ボルト張力増加 (10kN～)
● ボルト張力増加 (7～9kN)
● ボルト張力増加 (4～6kN)
● ボルト張力増加 (1～3kN)
● ボルト張力減少 (-10kN～)
● ボルト張力減少 (-7～-9kN)
● ボルト張力減少 (-4～-6kN)
● ボルト張力減少 (-1～-3kN)

図 3-6(A) G1-B6 ボルトの張力変動



×

締め付け対象ボルト

◯

ボルト 張力増加 (10kN〜)

●

ボルト 張力増加 (7〜9kN)

●

ボルト 張力増加 (4〜6kN)

◯

ボルト 張力増加 (1〜3kN)

◯

ボルト 張力減少 (10kN〜)

●

ボルト 張力減少 (7〜9kN)

●

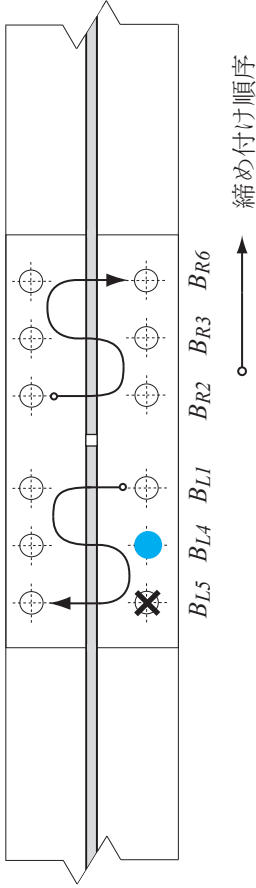
ボルト 張力減少 (4〜6kN)

◯

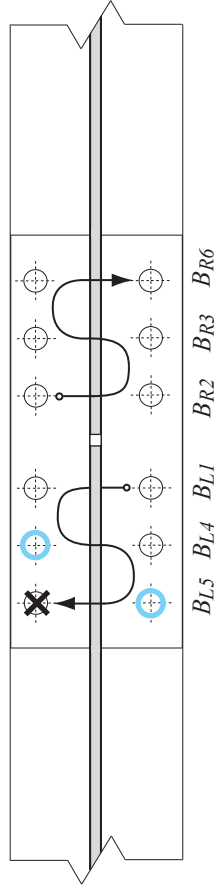
ボルト 張力減少 (1〜3kN)

図 3-6(B) G1-B6 ボルトの張力変動

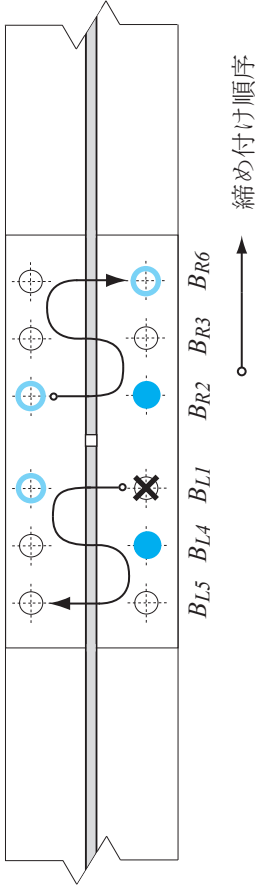
■L5ボルト 本締め時



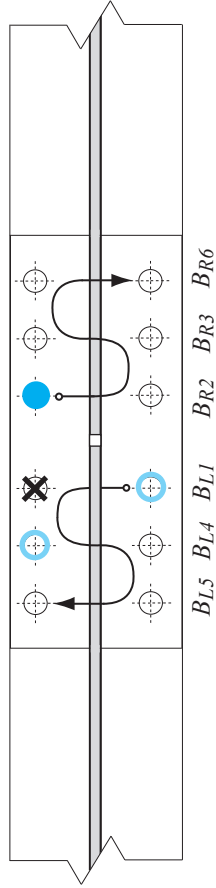
■L6ボルト 本締め時



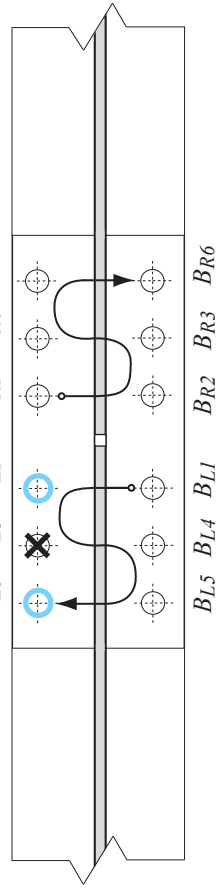
■L1ボルト 本締め時



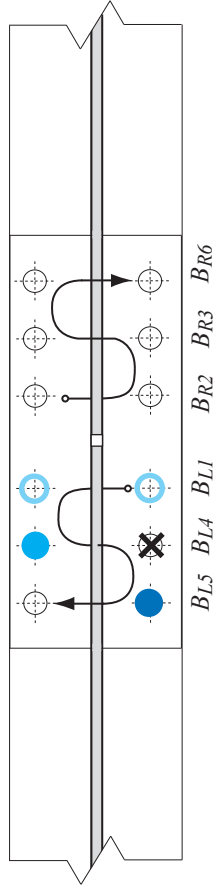
■L2ボルト 本締め時



■L3ボルト 本締め時



■L4ボルト 本締め時



✕ 締め付け対象ボルト

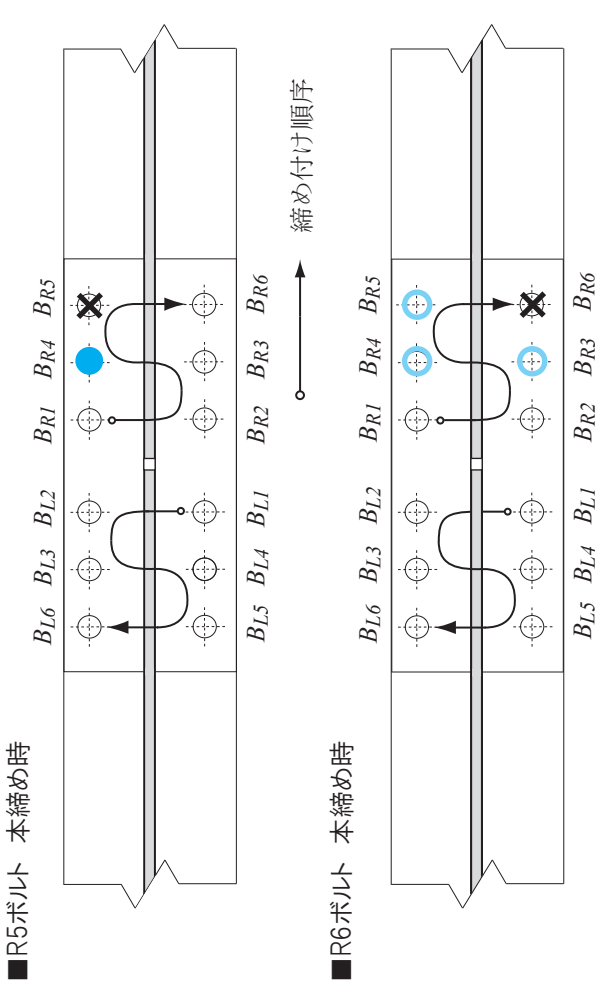
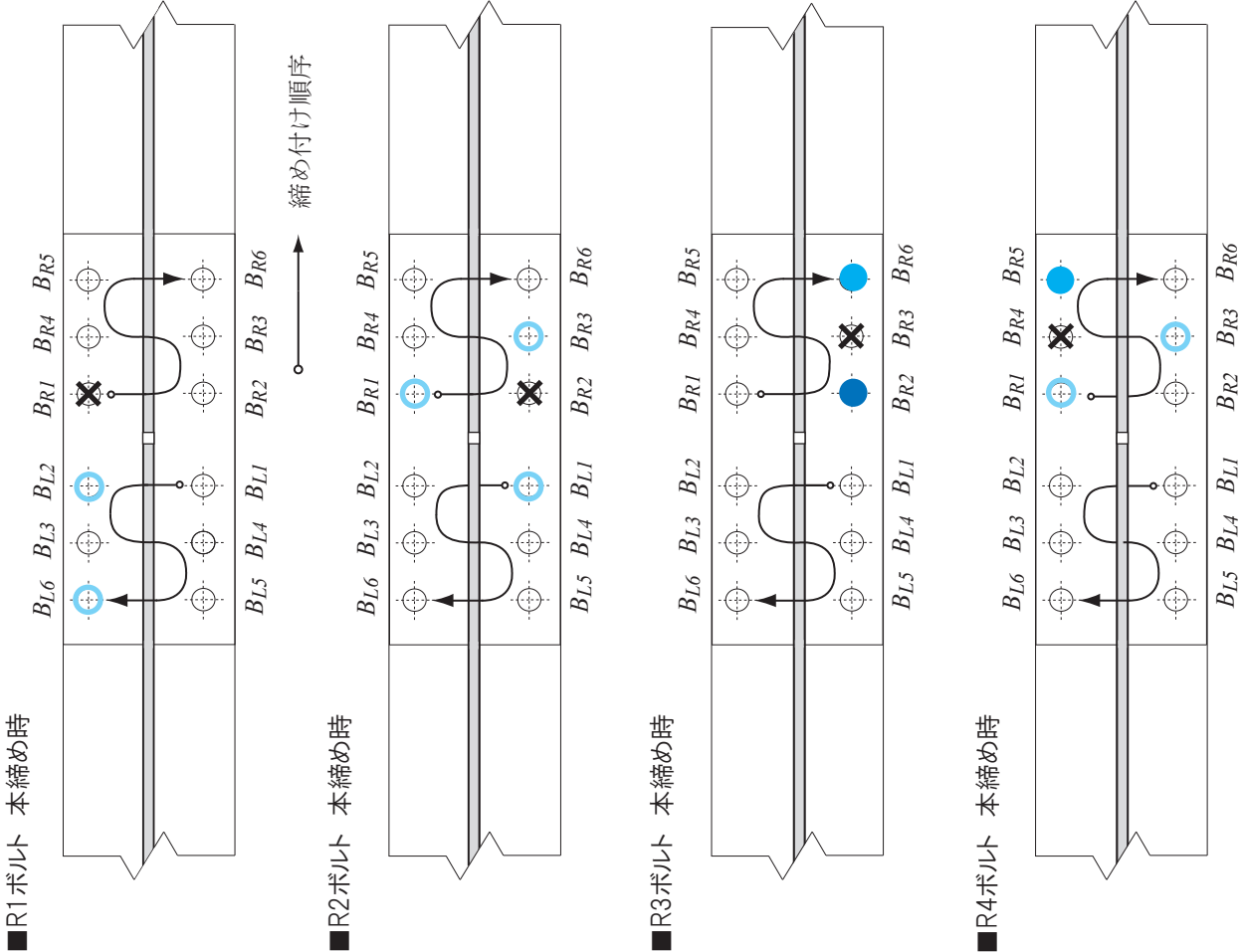
● ボルト 張力増加 (10kN～)
● ボルト 張力増加 (7～9kN)
● ボルト 張力増加 (4～6kN)
● ボルト 張力増加 (1～3kN)

● ボルト 張力減少 (-10kN～)
● ボルト 張力減少 (-7～-9kN)
● ボルト 張力減少 (-4～-6kN)
● ボルト 張力減少 (-1～-3kN)

✕ 締め付け対象ボルト

● ボルト 張力増加 (10kN～)
● ボルト 張力増加 (7～9kN)
● ボルト 張力増加 (4～6kN)
● ボルト 張力増加 (1～3kN)
● ボルト 張力減少 (-10kN～)
● ボルト 張力減少 (-7～-9kN)
● ボルト 張力減少 (-4～-6kN)
● ボルト 張力減少 (-1～-3kN)

図 3-6(C) G1-B6 ボルトの張力変動



- ✕ 締め付け対象ボルト
- ボルト 張力増加 (10kN～)
 - ボルト 張力増加 (7～9kN)
 - ボルト 張力増加 (4～6kN)
 - ボルト 張力増加 (1～3kN)
 - ボルト 張力減少 (-10kN～)
 - ボルト 張力減少 (-7～-9kN)
 - ボルト 張力減少 (-4～-6kN)
 - ボルト 張力減少 (-1～-3kN)

- ✕ 締め付け対象ボルト
- ボルト 張力増加 (10kN～)
 - ボルト 張力増加 (7～9kN)
 - ボルト 張力増加 (4～6kN)
 - ボルト 張力増加 (1～3kN)
 - ボルト 張力減少 (-10kN～)
 - ボルト 張力減少 (-7～-9kN)
 - ボルト 張力減少 (-4～-6kN)
 - ボルト 張力減少 (-1～-3kN)

図 3-6(D) G1-B6 ボルトの張力変動

表 3-7 にリラクゼーション後の最終ボルト導入張力を示す。設計ボルト張力は 165[kN] である。表 3-7 の塗りつぶし部分は、設計ボルト張力に達しなかったボルトである。

G0-B4 は、全て設計ボルト張力を上回った。

G1-B4 は、L1, R1, R3, R4 以外のボルトが設計ボルト張力を下回った。最もボルト導入張力が低かったのは、L2 のボルトである。

G1-B6 は、L6, R6 以外のボルトが設計ボルト張力を下回った。最もボルト導入張力が低かったのは、L5 のボルトである。

表 3-7 ボルト導入張力

試験体名	最終ボルト導入張力[kN]						平均張力[kN]
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L
G0-B4	180.4	181.4	187.7	195.0			186.1
G1-B4	169.2	148.3	154.7	155.9			157.0
G1-B6	161.9	163.9	161.4	154.8	153.9	165.6	160.3

試験体名	最終ボルト導入張力[kN]						平均張力[kN]
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R
G0-B4	193.5	197.6	205.4	199.3			198.9
G1-B4	166.4	149.4	165.5	172.5			163.5
G1-B6	163.9	160.1	156.9	155.4	154.2	166.7	159.5

3.1.2 ナット回転量の計測結果

表 3-8 に施工後のナット回転量の計測結果を示す。

高力ボルト接合設計施工ガイドブックによれば、ナット回転量については、あらかじめ規定値があるのではなく、ボルト群毎の回転量を計測し、その平均回転角度 $\pm 30^\circ$ の範囲のものを合格とする。また、不合格となったボルトは新しいものに取り替えると示されている。今回、合格の範囲を越えたボルトは、G1-B4 の L1 ボルト、G1-B6 の L1 ボルトである。また、本実験では、ボルトの取り替えは行なっていない。

表 3-8 より、継手の内側のボルトは、食い違いによる肌すきの影響を受けてナット回転量が大きくなる事が分かった。

表 3-8 ナット回転量

	G0-B4		G1-B4		G0-B6		G1-B6	
	ナット回転量[°]	平均値	ナット回転量[°]	平均値	ナット回転量[°]	平均値	ナット回転量[°]	平均値
L1	71	73	120	87	69	67	117.5	77
L2	73		93		71.5		74	
L3	71		63		65		63	
L4	77		70		76		71.5	
L5					57.5		63	
L6					61.5		72	
R1	89	88	115	88	65.5	68	80	74
R2	82		90		68		87	
R3	109		77		60		71	
R4	72		70		60		63	
R5					73.5		74	
R6					80.5		70	

3.2 すべり試験結果

3.2.1 載荷荷重－鉛直変位関係

図 3-9 に載荷荷重－鉛直変位関係を示す。縦軸は、載荷荷重[kN]で、横軸は鉛直変位量[mm]を示す。鉛直変位は、図 2-12 に示した中央変位計 4 機の平均で評価している。G0-B4 においては、中央変位計全 4 機中 1 機に問題があった為、3 機の平均で評価している。理論値は、H 形鋼の変断面(添板)を考慮した値を示している。

図 3-10 は、梁の剛性勾配－載荷荷重関係を示す。縦軸は、載荷荷重[kN]を平均鉛直変位量[mm]で除した値、すなわち図 3-9 の各試験体の勾配変化[kN/mm]を示したものである。横軸は、載荷荷重[kN]である。

図 3-9、3-10 の図中の●印は各試験体のすべり耐力を算出した点、すなわち、すべったと判断した点を示す。また、すべった時の判断の仕方は、第 3 章 3.2.2 に示す。

図 3-9 から、どの試験体も、理論値の半分程度の剛性しかなかった事がわかった。

図 3-10 から、載荷荷重が 100 [kN]程度までは、どれも勾配にばらつきがみられる。100[kN]後からすべりまでの勾配変化と、すべり後の勾配変化を比較すると、ボルト 6 本ものでは明確に勾配が低くなった。ボルト 4 本ものは、第 3 章 3.2.2 で示す主すべりが発生しなかった為、明確ではないが、勾配が徐々に低くなっていくのがわかった。

図 3-9、図 3-10 から、ボルト本数が同じ試験体同士で比較すると、ボルト 4 本ものでは、すべりの前後に関わらず、G0-B4の方が G1-B4 よりも剛性が高い。しかしながら、ボルト 6 本ものでは、すべり前では G1-B6の方が G0-B6 よりも高く、すべり後もわずかであるが G1-B6の方が G0-B6 よりも高い事がわかった。

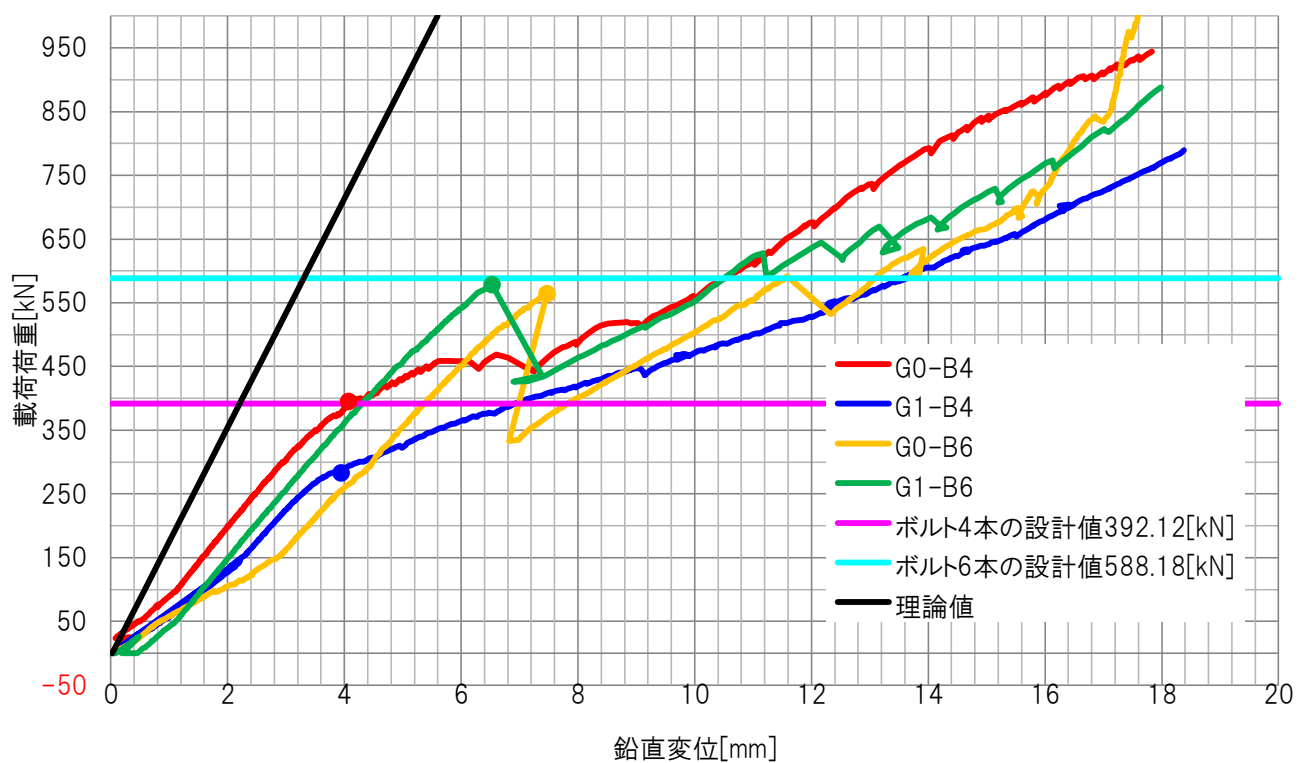


図 3-9 載荷荷重－鉛直変位関係

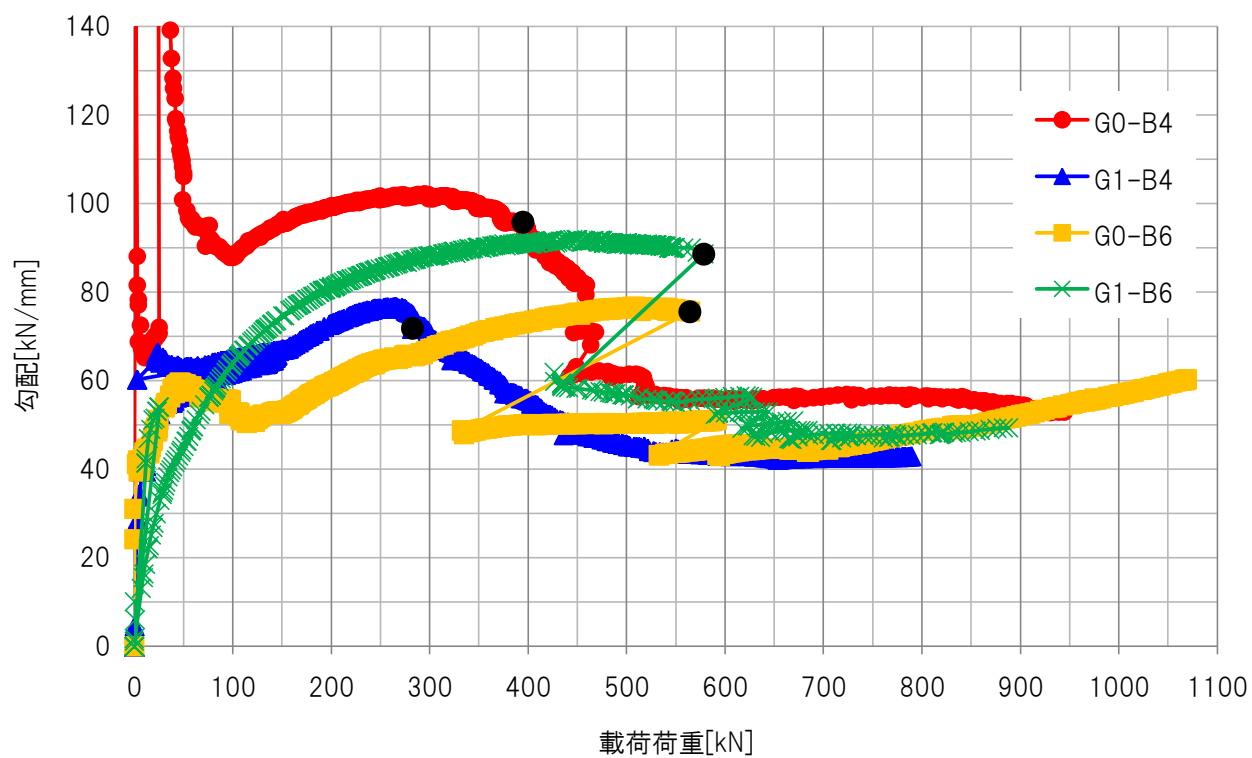


図 3-10 梁の剛性勾配－載荷荷重関係

3.2.2 載荷荷重—すべり変位関係

図 3-11～図 3-14 は、各試験体毎の載荷荷重—すべり変位関係である。縦軸は、載荷荷重[kN]，横軸は、すべり変位[mm]である。

すべり変位とは、第 2 章 2.4.2 で示したすべり変位計で計測した値を指す。すべり変位は、母材(すなわち、下端フランジ)と添板間の相対変位量を示す。図 2-12 に示す通り、計 8 機ですべり変位計を設置した。継手全体としてのすべり量を評価する為、梁の中央(図 2-13, 図 2-14 で示す所の c-c'断面)で分けた左右 4 機を平均してすべり変位量とした。

すべり荷重の定義は、文献 15), 18)によると、すべり試験用標準試験体を用いて単調載荷をした場合の定義が下記の様に記されている。

「通常、すべり荷重に達すると大きな音と共に接合部ですべりが生じる。これを「主すべり」(First Major Slip)と呼ぶ。すべり係数が小さい場合や特殊な表面処理を採用している場合などに主すべりを生じないで徐々にすべりが進行することがある。そのような場合は、接合部におけるすべり量が 0.15～0.2[mm]に対応する荷重をすべり荷重とする。」

本実験も上記の記述をもとに、各試験体のすべり荷重を判断し、各試験体のボルト 1 本当りのすべり耐力を算出する。

図 3-13, 図 3-14 より、ボルト 6 本ものは、明確な主すべりを確認できた。実験時も、主すべり時に発生する大きな音を確認できた。したがって、主すべりが発生した瞬間の載荷荷重をすべり荷重とした。

図 3-11, 図 3-12 より、ボルト 4 本ものは、明確な主すべりを確認できなかった。実験時も、主すべり時に発生する大きな音を確認できなかった。したがって、主すべりを確認できなかった試験体については、2 本ある平均すべり量のうち、早期に 0.15[mm]に達した瞬間の載荷荷重をすべり荷重とした。

図 3-15 は、載荷荷重—すべり変位関係の全試験体の結果をまとめた図である。各試験体のすべり荷重として判断したグラフを抜き出した図となる。図中に示す●印は、各試験体のすべり荷重点である。

図 3-11～図 3-14 より、各試験体のすべり荷重を表 3-16 に示す。

設計すべり耐力発揮時の載荷荷重は、ボルト 4 本ものは、392.12[kN]，ボルト 6 本ものは 588.18[kN]である。この値は、ボルト 1 本あたりの設計すべり耐力 148.5[kN]をもとに、式 (2.1), (2.2)より算出した。また、便宜上、設計すべり耐力と、設計すべり耐力発揮時の載荷荷重を区別するため、前者はそのまま「設計すべり耐力」、後者を「設計値」と下記に称す。設計すべり耐力はボルト 1 本当りの設計すべり耐力 148.5[kN]をボルト本数倍した値 (594[kN], 891[kN])，設計値は、その値を(2.1), (2.2)式を利用して載荷荷重に換算した値 (392.19[kN], 588.18[kN])である。

表 3-16 より、設計値に達したのは G0-B4 のみであった。肌すき 0[mm]の G0-B6 は設計値に達しなかった。 G1-B4 のすべり耐力は設計値の 72.14[%]を発揮し、G1-B6 のすべり耐力は設計値の 98.37[%]を発揮した。

つまり、ボルト本数を増せば、食い違いによる肌すきが 1[mm]あってもすべり耐力を上昇させる事がわかった。

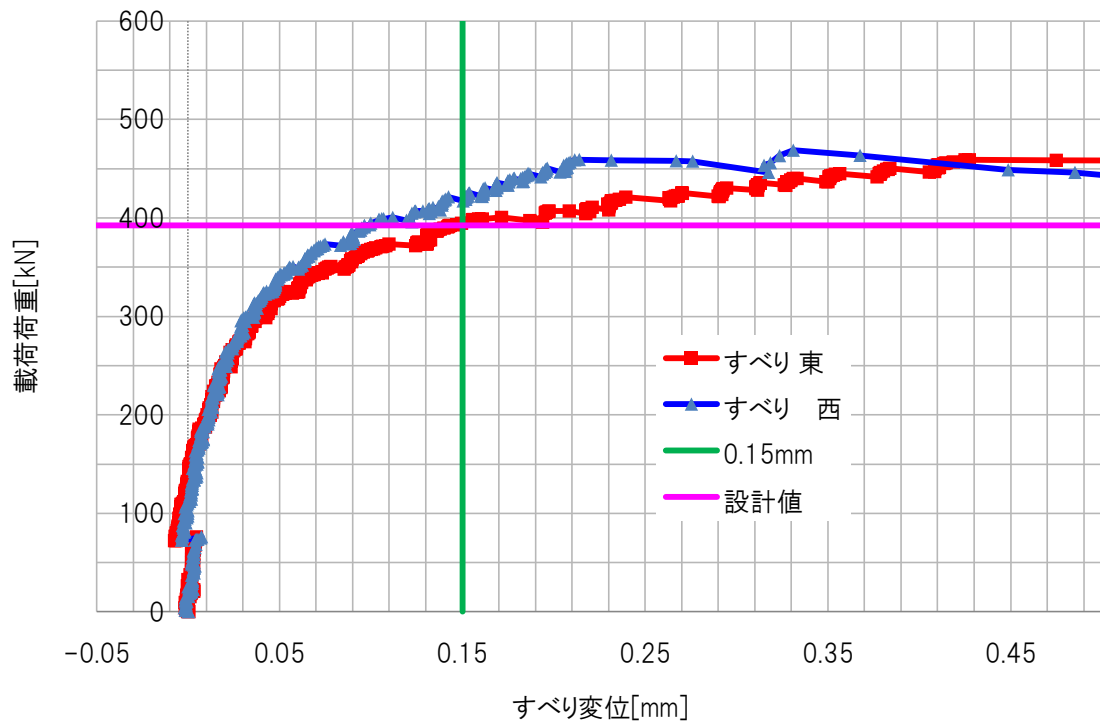


図 3-11 載荷荷重－すべり変位関係(G0-B4)

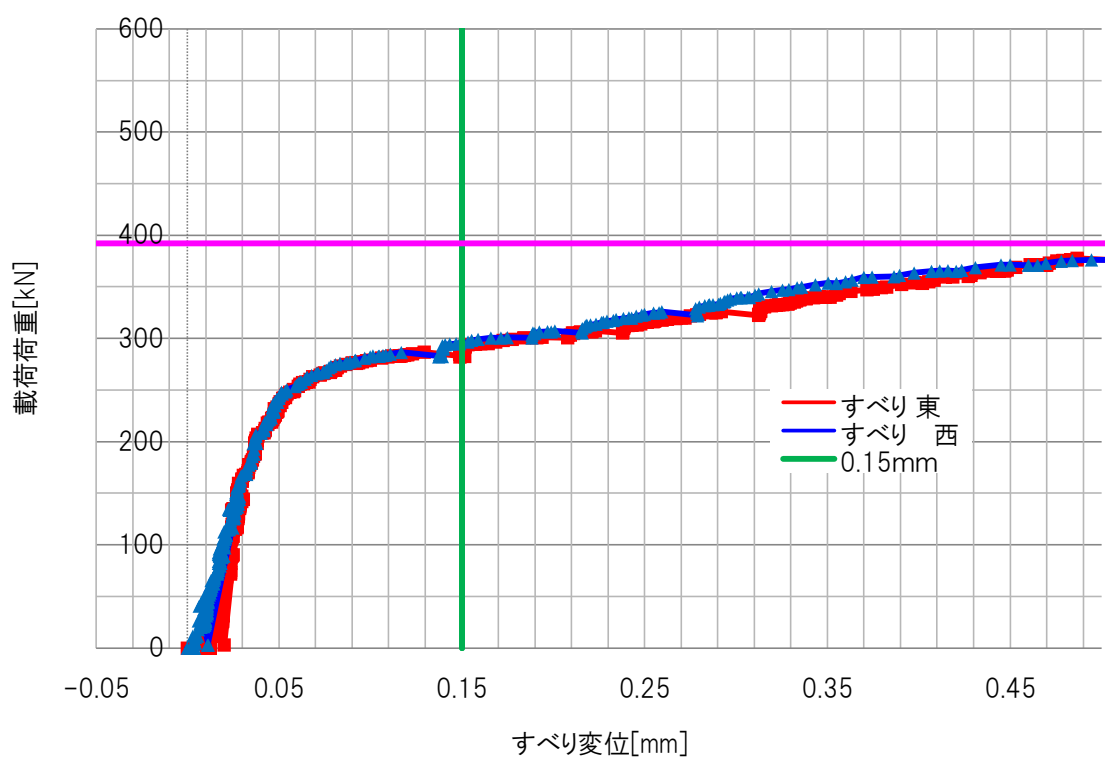


図 3-12 載荷荷重－すべり変位関係(G1-B4)

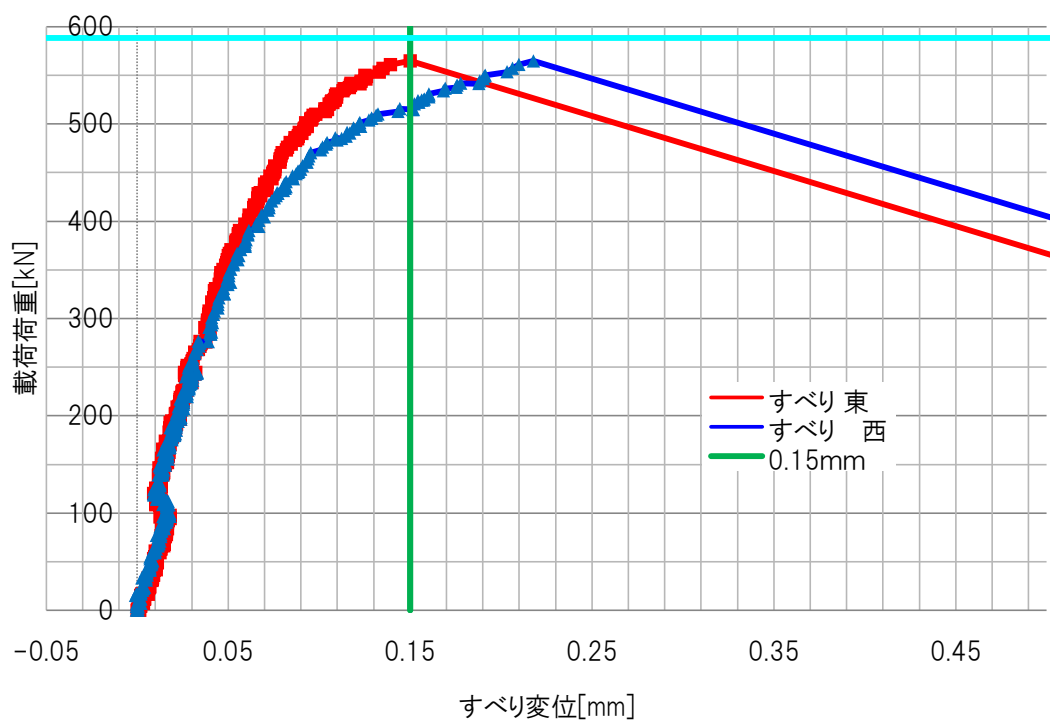


図 3-13 載荷荷重－すべり変位関係(G0-B6)

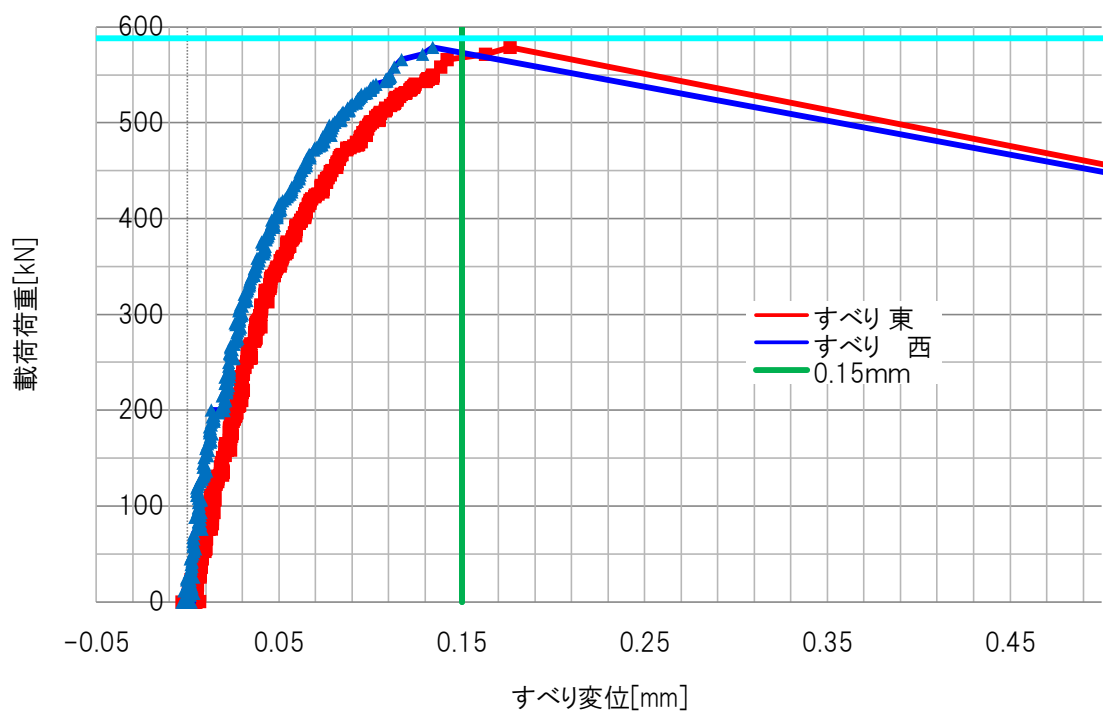


図 3-14 載荷荷重—すべり変位関係(G1-B6)

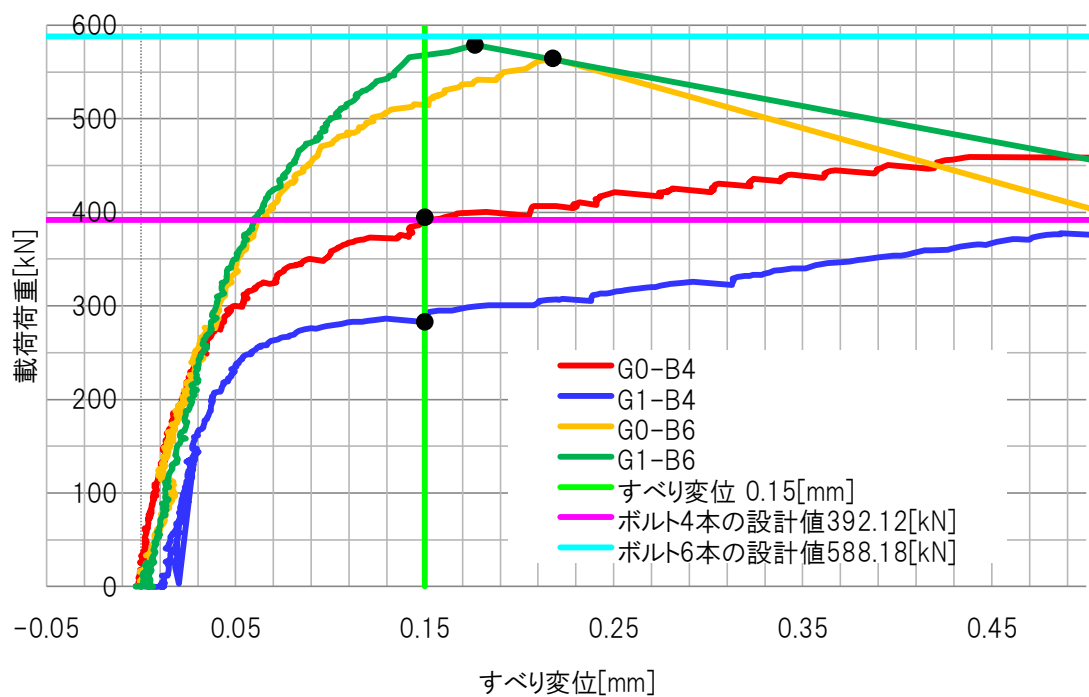


図 3-15 載荷荷重—すべり変位関係(全試験体)

表 3-16 すべり荷重

試験体名	G0-B4	G1-B4	G0-B6	G1-B6
すべり荷重[kN]	394.82	282.88	564.57	578.60
すべり荷重/設計値[%]	100.69	72.14	95.99	98.37

3.2.3 すべり耐力

各試験体毎のボルト 1 本当りのすべり耐力の比較図を表 3-17, 図 3-18 に示す.

すべり耐力の計算方法は, 表 3-16 のすべり荷重を P とし, 式(2.1), 式(2.2)を用いて下端フランジ継手引張力 N_F に換算したものをすべり耐力とした. ボルト 1 本当りの設計すべり耐力は

148.5[kN]である. 表 3-16 と比べ, すべり耐力/設計すべり耐力[%]が極わずかに異なるのは, 式(2.2)のフランジ重心間距離 j が実測値で異なる為である.

結果は, 第 3 章 3.2.2 と同様, 設計値に達したのは G0-B4 のみであった. 肌すき 0[mm]の G0-B6 は設計値に達しなかった. G1-B4 のすべり耐力は設計値の 72.4%を発揮し, G1-B6 のすべり耐力は設計値の 98.5%を発揮した. つまり, ボルト本数を増せば, 食い違いによる肌すきが 1[mm]あってもすべり耐力を上昇させる事がわかった.

表 3-17 ボルト 1 本当りのすべり耐力

試験体名	G0-B4	G1-B4	G0-B6	G1-B6
ボルト 1 本当りのすべり耐力[kN]	150.26	107.47	142.94	146.26
すべり耐力/設計すべり耐力[%]	101.19	72.37	96.26	98.49

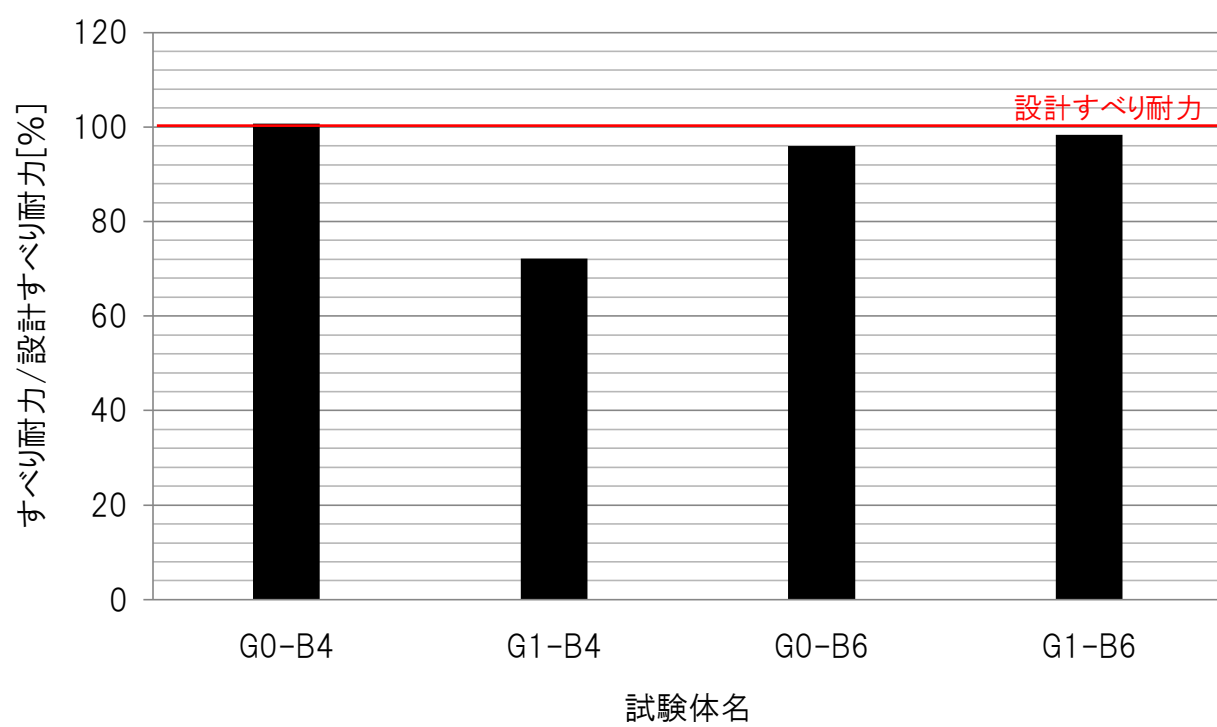


図 3-18 すべり耐力比較図

第 4 章 考察

4.1 標準試験体実験	.....47
4.1.1 実験概要	
4.1.2 実験結果	
4.2 載荷荷重－すべり変位関係	.....62
4.2.1 自重を考慮	
4.2.2 材料伸びの考慮	
4.3 載荷荷重－鉛直変位関係	.....68
4.3.1 自重の考慮	
4.3.2 すべり量を考慮	
4.3.3 載荷荷重－両端鉛直変位計関係	
4.3.4 まとめ	
4.4 添板の応力度	.....74
4.5 実験方法の妥当性とすべり耐力への影響	.....77
4.5.1 載荷荷重に自重を考慮	
4.5.2 試験体，載荷装置の設置位置がすべり耐力に与える影響	
4.5.3 試験体がすべり耐力に与える影響	
4.5.4 入力曲げモーメント	
4.5.5 軸力がすべり耐力に与える影響	
4.5.6 まとめ	
4.6 食い違いによる肌すきがすべり耐力に与える影響	.....110
4.7 肌すきの種類がボルト導入張力・すべり耐力に与える影響	.....112
4.7.2 肌すきの種類がボルト導入張力に与える影響	
4.7.2 肌すきの種類がすべり耐力に与える影響	

第4章 考察

第3章まで述べてきた中で、下記の点において、その原因を考察していく。

①肌すき 0[mm]の G0-B6 が設計すべり耐力に達しなかった事について

②G0-B6 のすべり耐力よりも G1-B6 のすべり耐力の方が上であった事について

③肌すきの種類の違いがすべり耐力に与える影響とその違いについて

まず、上記の①、②については、結果が予想と大きく異なってしまった為、試験体に異常はなかったか、また設計、実験方法が妥当であったかどうかを踏まえて考察した。試験体自身は全て同時期に作製し、目視の限り、試験体にすべり耐力に影響を及ぼすような損傷等は見受けられなかった。本章 4.2～4.4 で、G0-B6 の試験体のみに異常な現象等があったかどうかを確認し、本章 4.5 で、実験方法が結果に与える影響を示す。本章 4.6 で、それまでに述べた結果への影響を考慮し、食い違いによる肌すきがすべり耐力に与える影響を示す。

更に、本章 4.7 で本実験の目的であった、肌すきの種類の違いが、ボルト導入張力、すべり耐力に耐える影響を示す。

まず、はじめに、上記の考察をスムーズに行う為の予備知識として、板厚差による肌すきを有する標準試験体を用いたすべり試験の概要と結果を簡単に本章 4.1 に示す。4.1 は、既往の研究¹⁶⁾のうち、本実験と関係のある部分のみ抜き出して説明したものである。従って、文献の一部のみ、説明を行う。抜き出した部分は、主に肌すき量 1[mm]の試験体である。

4.1 標準試験体実験

4.1.1 実験概要

文献 16)の標準試験体実験は、板厚差による肌すきがすべり耐力に与える影響を明らかにし、適切な施工管理方法を得る事を目的として実験を行った。

試験体は、文献 15)に示されているすべり試験用標準試験体に準じたものであり、図 4-1 に試験体寸法を示す。母材および添板は、SM490 材とし、摩擦面はショットブラスト仕上げとした。ボルトは M20(S10T)のトルシア形高力ボルトを使用した。板厚差による肌すきを設ける為、図 4-1 の母材 2 を所定の厚さに加工した。ここまでは、母材の板厚差と肌すきの種類以外、本実験の実験対象部分と条件は同じである。

実験変数は、片側肌すき量(0[mm], 0.5[mm], 1[mm], 2[mm])、締め付け順序(ボルト群ごと、交互)、締め付け開始位置(肌すき 0[mm]側, 肌すき 1[mm]側)、一次締めトルクの大小(150 [N・m], 225 [N・m], 300 [N・m], 375 [N・m])、ボルトの取り替え(有り, 無し)、締め付け開始状態(A, B)である。締め付け開始状態は、図 4-2 に示す。実験変数と、試験体名の付け方を図 4-3 に示す。また、本論文では、本実験と同条件で行った試験体のみを対象とする為、実験変数は、片側肌すき量(0[mm], 0.5 [mm])、締め付け順序(ボルト群ごと)、締め付け開始位置(肌すき 0[mm]側, 肌すき 1[mm]側)、一次締めトルクの大小(150 [N・m])、ボルトの取り替え(無し)、

締め付け開始状態(A, B)とする。(表 4-4 参照)

実験方法は、本実験と同様に、施工試験とすべり試験を行った。

施工試験は、施工試験用固定治具で試験体を土台に固定し、指針付きトルクレンチを用いて一次締めは 150[N・m]、本締めは 400[N・m]までトルクレンチで締め付け、その後はシャーレンチでピンテールが破断するまで締め付けた。本実験と同様、ボルト導入張力を計測する為、ボルト軸部にひずみゲージを貼付した。施工後、ナット回転量の計測も 行っている。

すべり試験は、1MN 級アムスラー型万能試験機を用い、試験体に単純引張力を加え、継手のすべり試験を行った。すべり量の計測は、図 4-5 のようにすべり変位計 4 機を設置し、母材と添板の相対すべり変位を計測した。

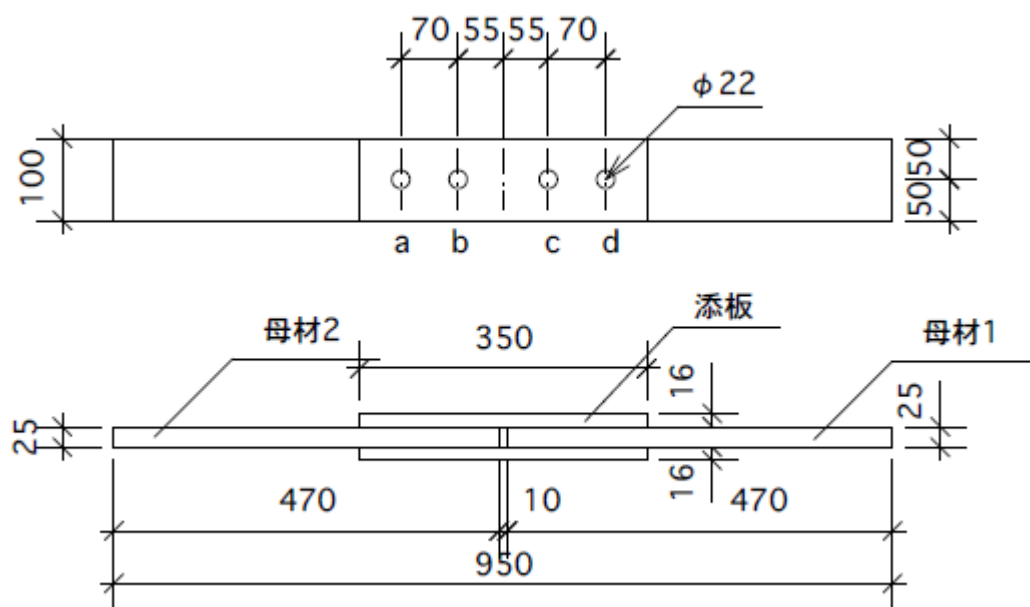


図4-1 標準試験体形状・寸法

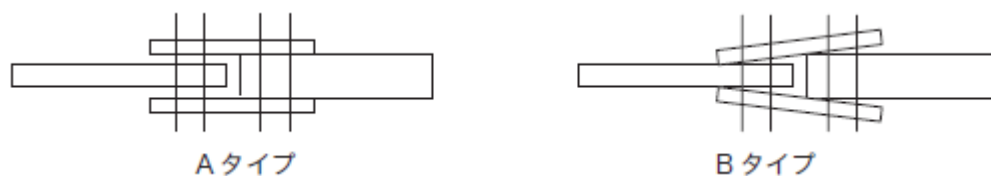


図4-2 締め付け開始状態

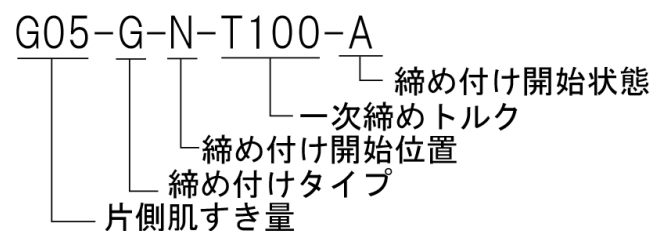


図4-3 試験体名称

表4－4 標準試験体実験変数（片側肌すき量 0[mm], 0.5[mm]）

試験体名	片側 肌すき量 [mm]	締め付け順序		一次締めトルク [%]	本締め後 のボルト の取り換え	締め付け 開始状態
		締め付けタイプ	締め付け開始位置			
G0-G-T100	0	ボルト群ごと		100 ^{※1}	無し	
G05-G-N-T100-A	0.5	ボルト群ごと	肌すき0[mm]側	100 ^{※1}	無し	A
G05-G-N-T100-B			肌すき0[mm]側			B
G05-G-E-T100-A			肌すき1[mm]側			A
G05-G-E-T100-B			肌すき1[mm]側			B

※1：基本の一次締めトルクは150[kNm]であり，150[kNm]を100[%]と既往の研究¹⁶⁾では定義している。

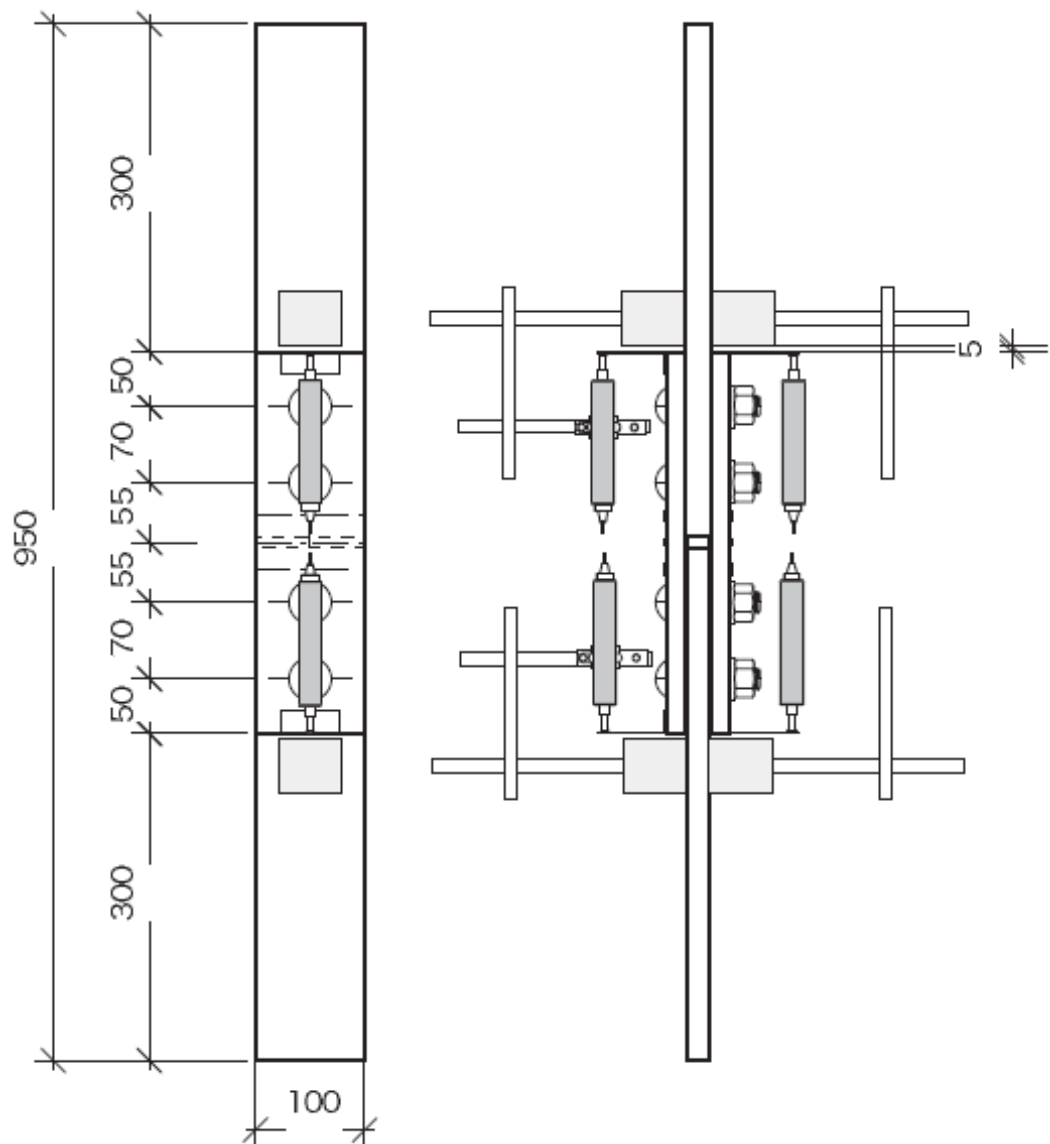


図4－5 すべり変位計設置位置

4.1.2 実験結果

1) 施工試験

図 4-6～図 4-10 に、各試験体のボルト張力-step 数関係を示す。縦軸はボルト導入張力 $N[kN]$ で、ボルト軸部に貼付した 2 枚のひずみゲージの値 $\varepsilon [\times 10^{-6}]$ の平均値より、(3.1)式を用いて算出した値である。

横軸は、 $50[N \cdot m]$ を 1step とした一次締めから本締めまでの通算 step 数である。

なお、試験体名は、表 4-4 に示す通りである。

更に、図 4-6～図 4-10 を基に、ボルト導入張力の変動とボルト位置の関係を示したものを図 4-11～図 4-15 に示す。

図 4-11 より G0-G-T100-4 は、ほぼボルト導入張力に影響は無い。

図 4-12, 図 4-13 より G0-G-N-T100-A-1, G0-G-N-T100-B-1 は、R1, R2 一次締め時に僅かな変動がある。図 4-14, 図 4-15 より G0-G-E-T100-A-1, G0-G-E-T100-B-1 は、R1 一次締め時に共に L2 の張力が大きく増加し、L1 本締め時も R1, R2 に僅かな変動が見られる。

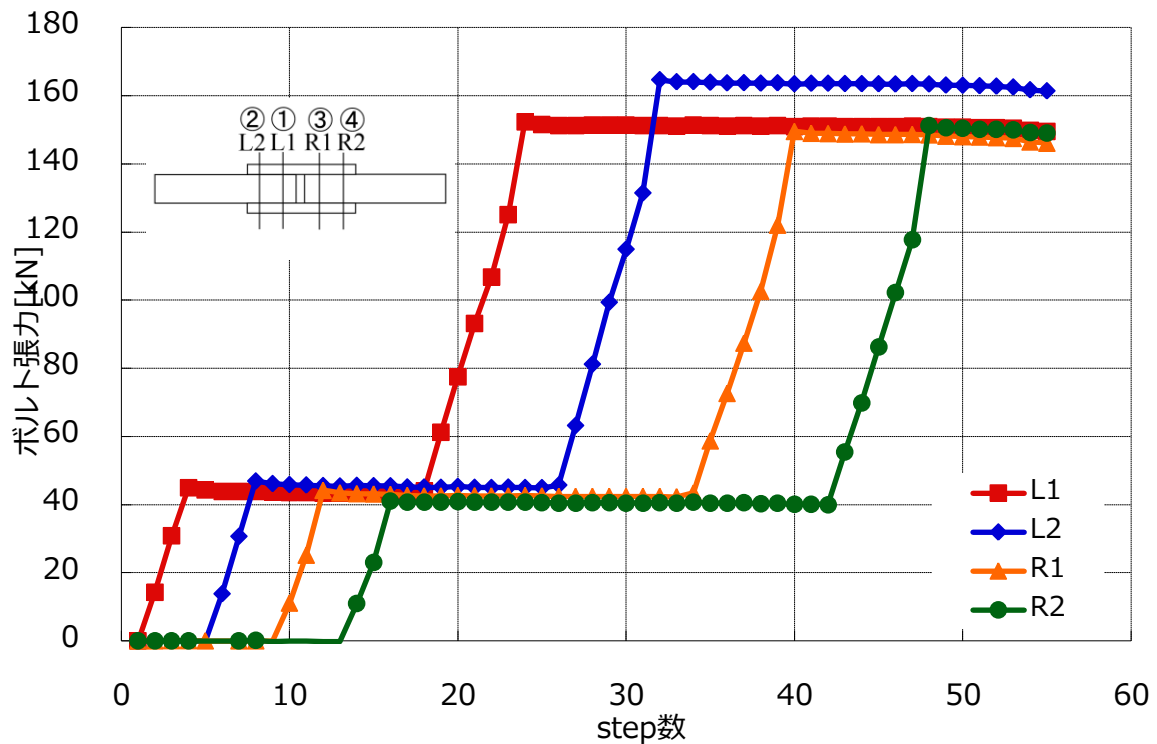


図 4-6 ボルト導入張力-step 数関係(G0-G-T100-4)

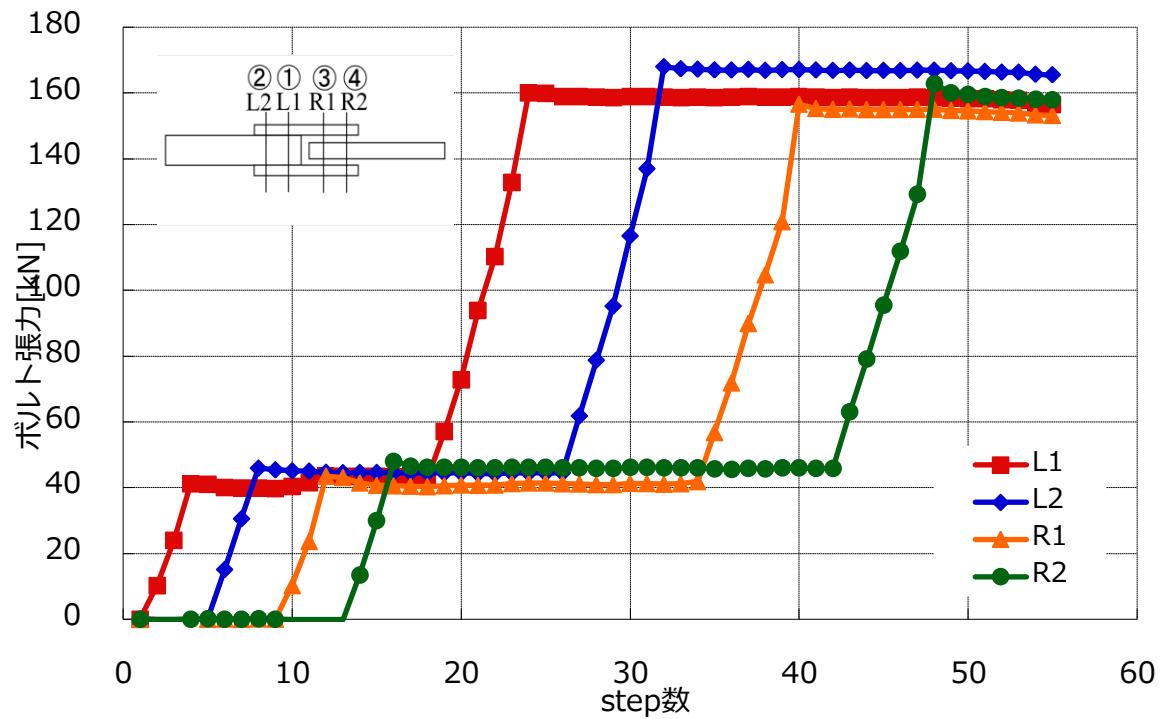


図 4-7 ボルト導入張力-step 数関係(G05-G-N-T100-A-1)

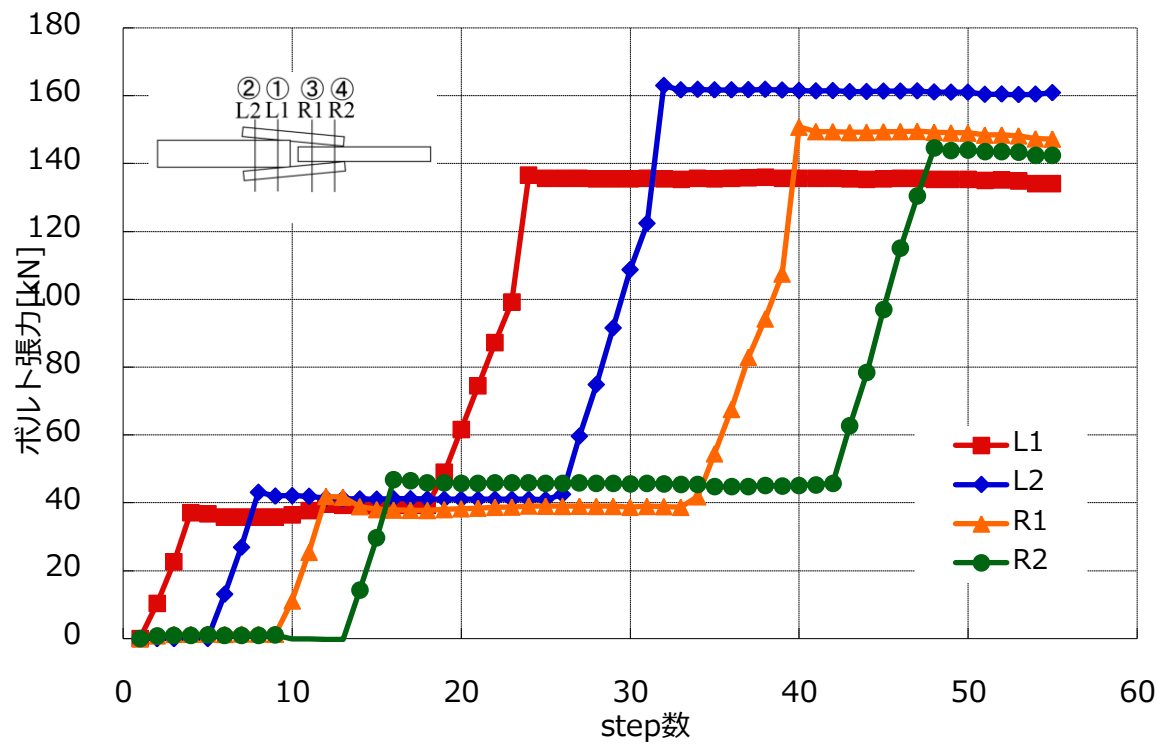


図 4-8 ボルト導入張力-step 数関係(G05-G-N-T100-B-1)

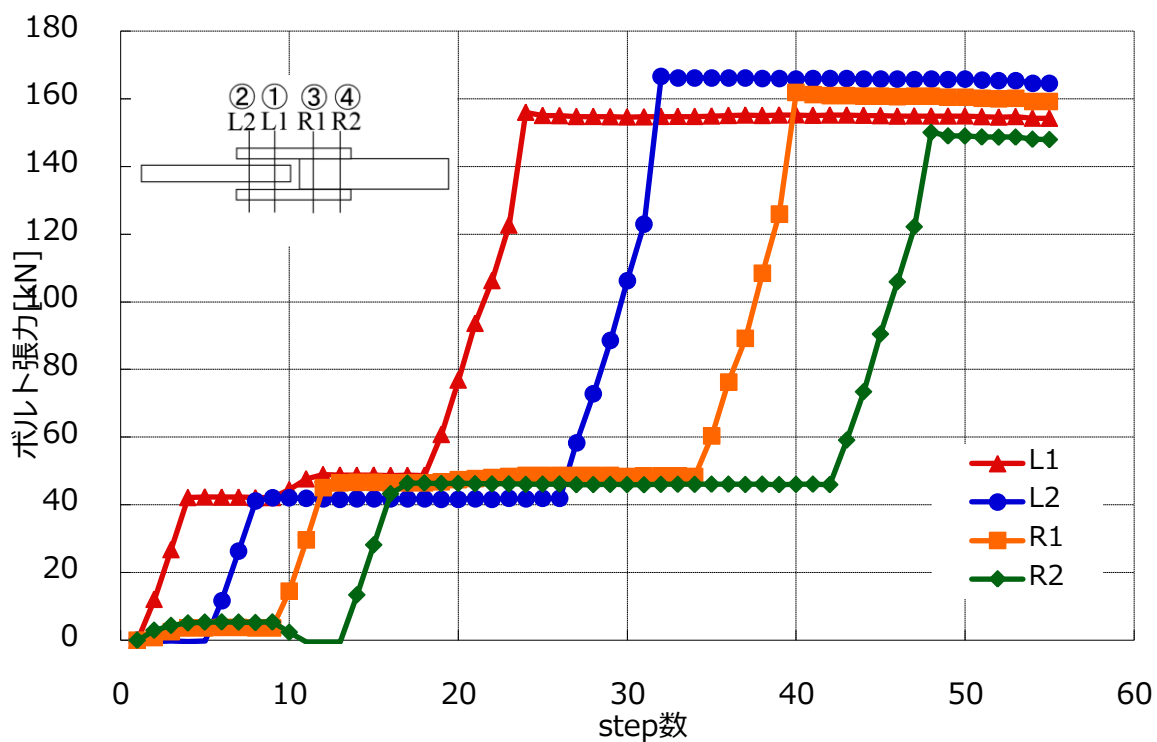


図 4-9 ボルト導入張力-step 数関係(G05-G-E-T100-A-1)

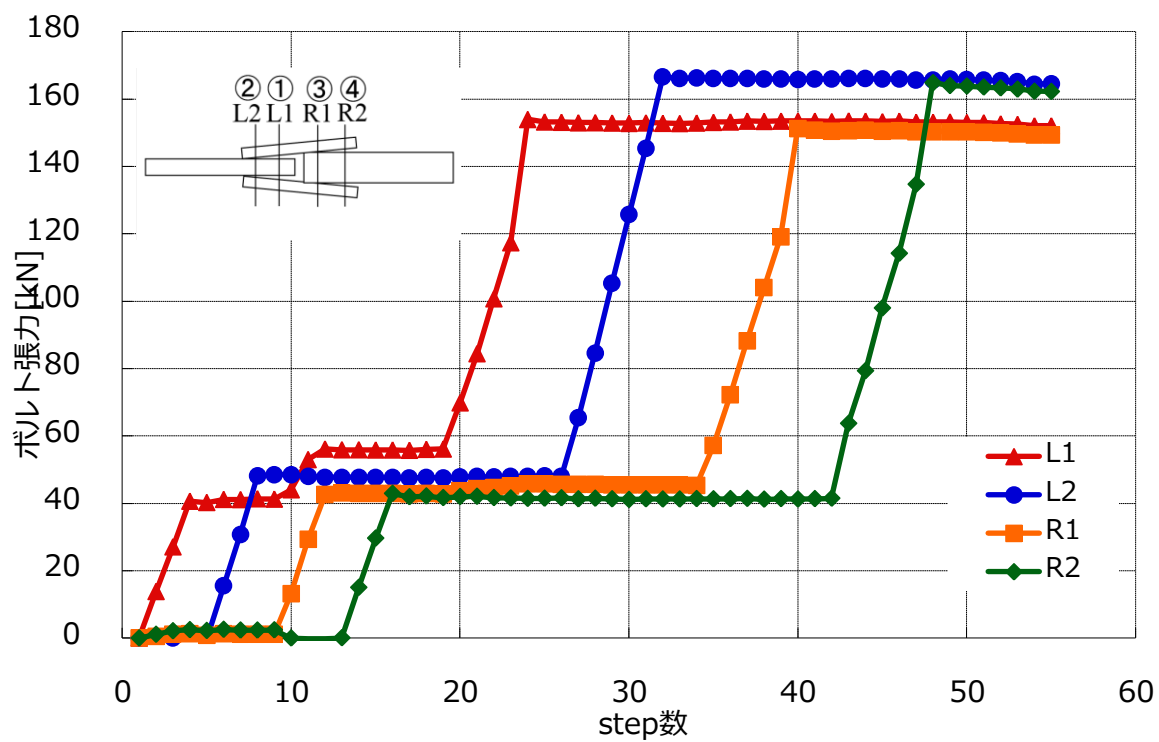
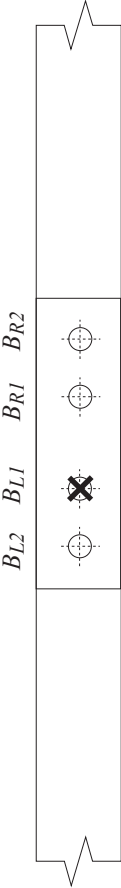
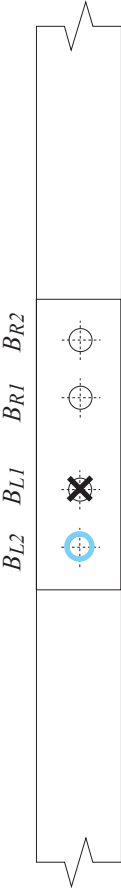


図 4-10 ボルト導入張力-step 数関係(G05-G-E-T100-B-1)

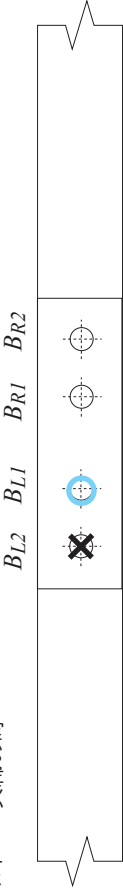
■L1ボルト 一次締め時



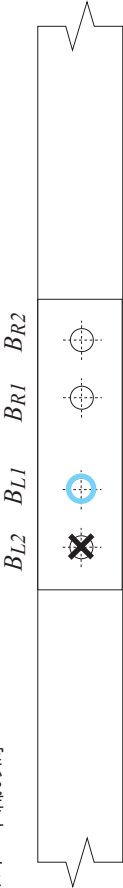
■L1ボルト 本締め時



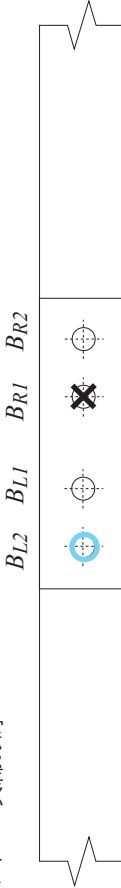
■L2ボルト 一次締め時



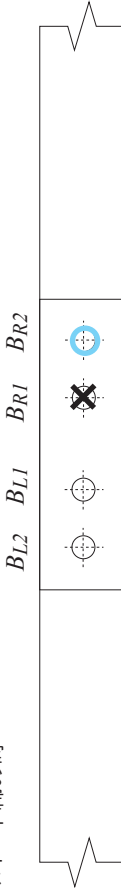
■L2ボルト 本締め時



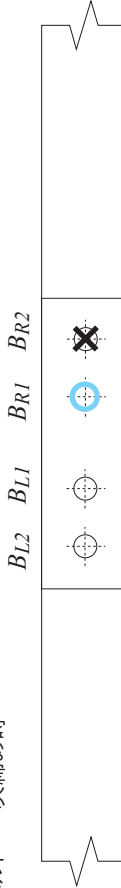
■R1ボルト 一次締め時



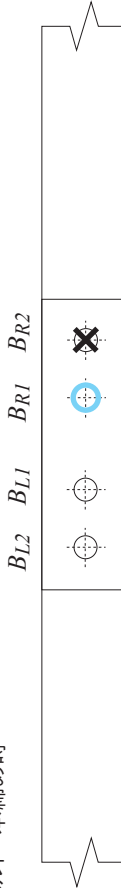
■R1ボルト 本締め時



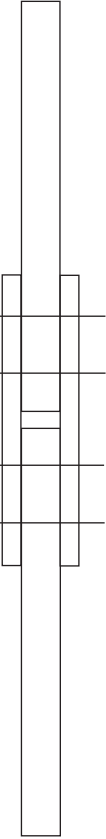
■R2ボルト 一次締め時



■R2ボルト 本締め時



- ② L2 ① L1 ③ R1 ④ R2



ボルト締め付け順序と肌すき

✕ 締め付け対象ボルト

- ボルト張力増加 (10kN～)
● ボルト張力増加 (7～9kN)
● ボルト張力増加 (4～6kN)
● ボルト張力増加 (1～3kN)

- ボルト張力減少 (-10kN～)
● ボルト張力減少 (-7～-9kN)
● ボルト張力減少 (-4～-6kN)
● ボルト張力減少 (-1～-3kN)

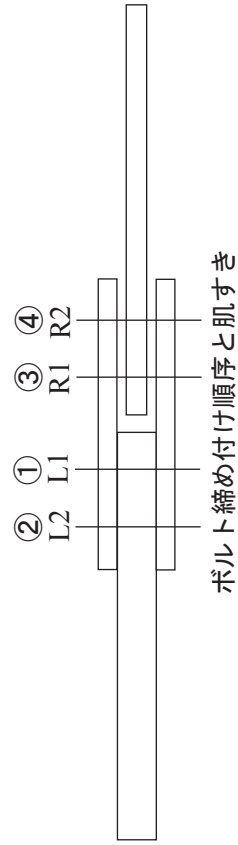
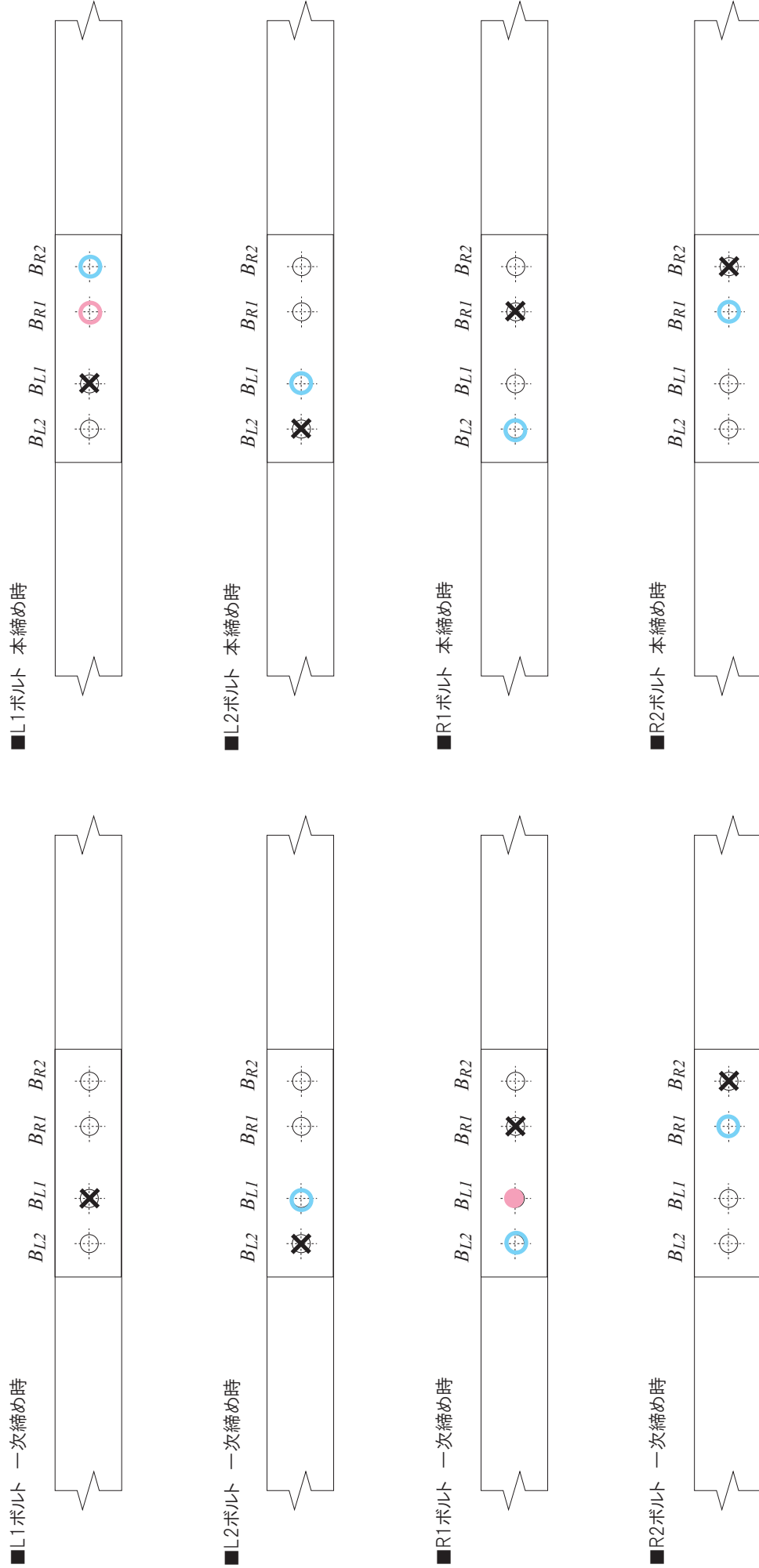


図 4-12 G05-G-N-T100-A-1 ボルトの張力変動

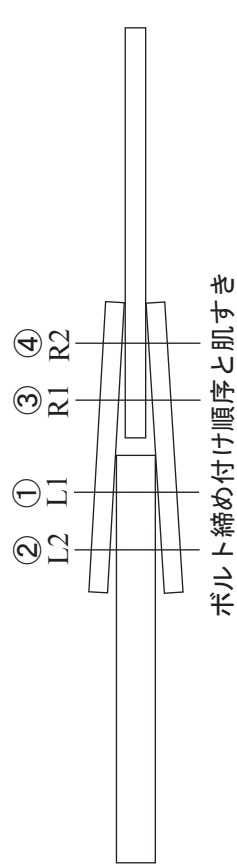
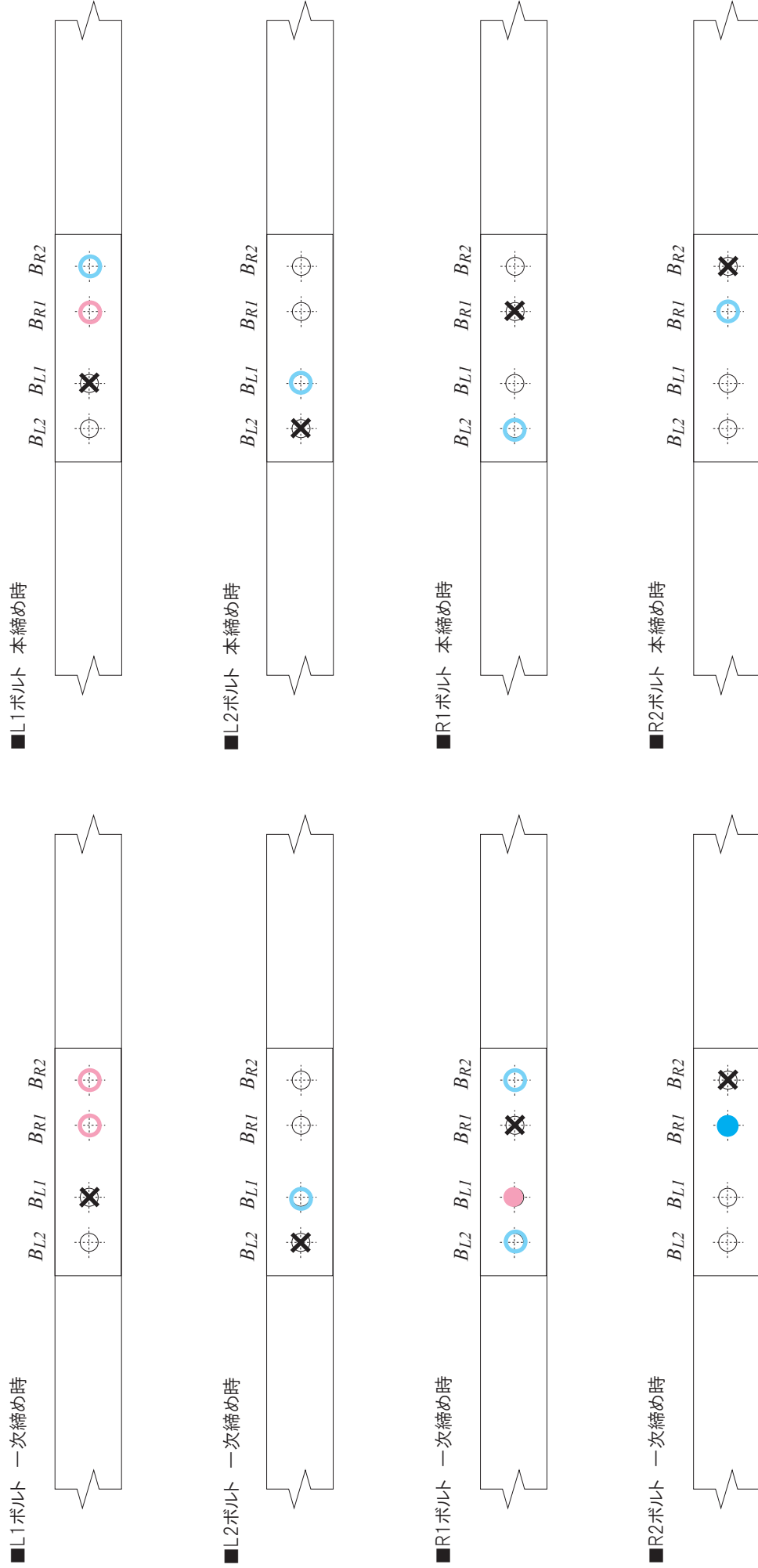


図 4-13 G05-G-N-T100-B-1 ボルトの張力変動

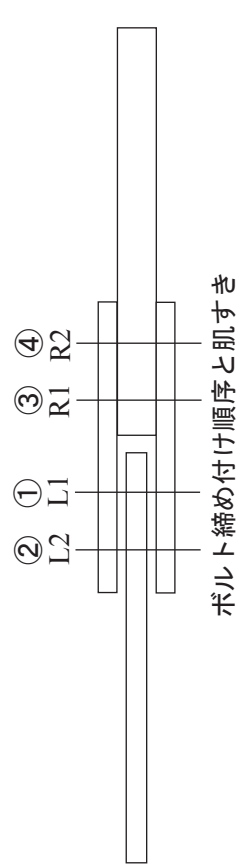
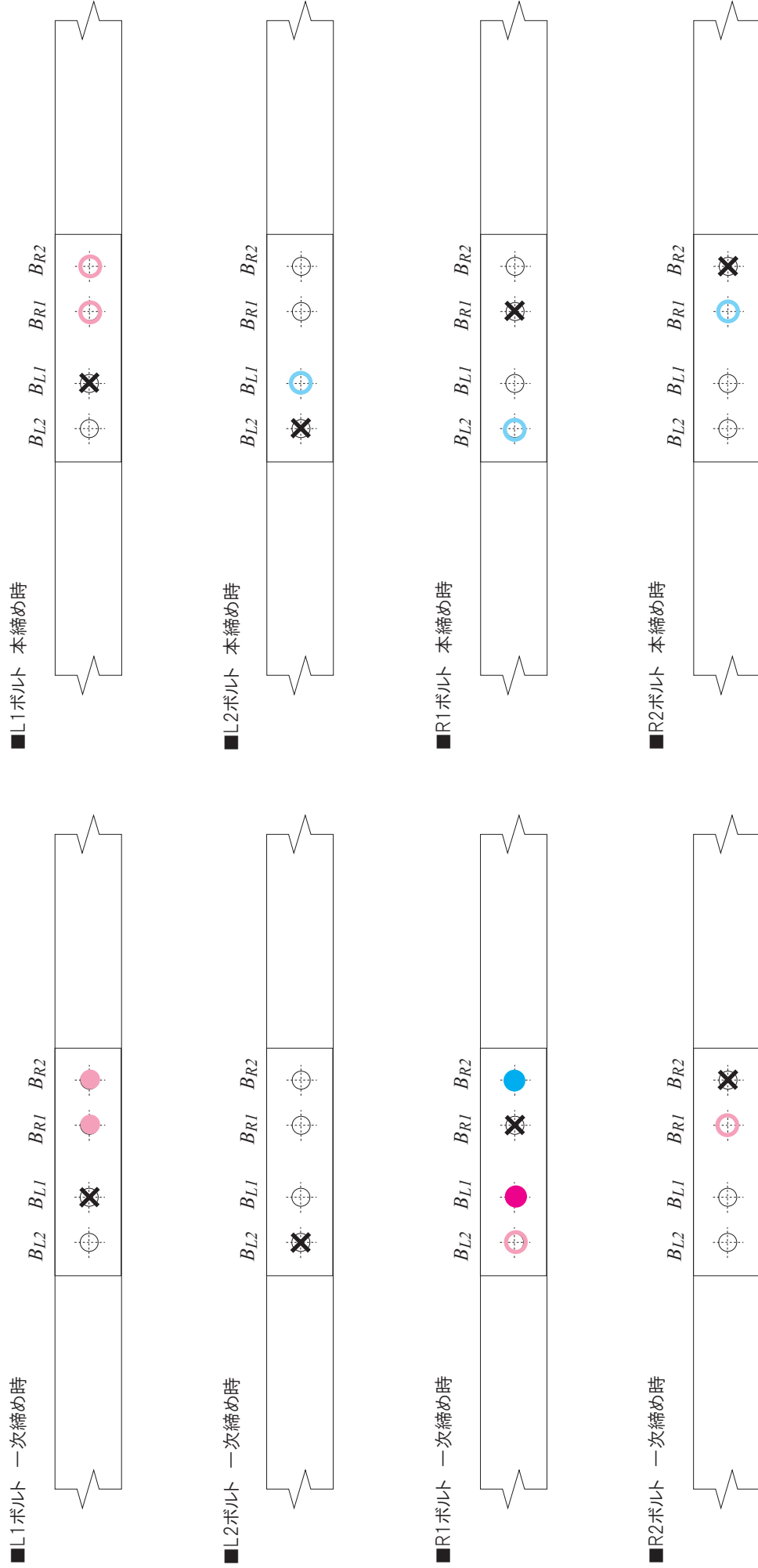


図 4-14 G05-G-E-T100-A-1 ボルトの張力変動

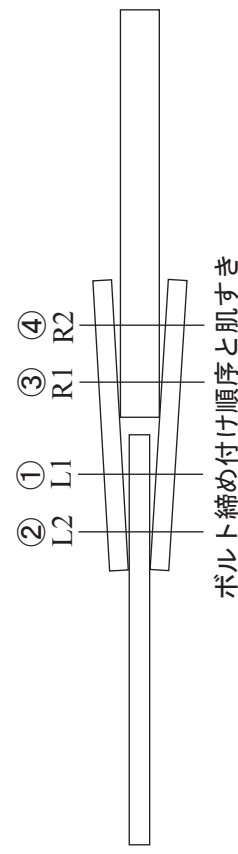
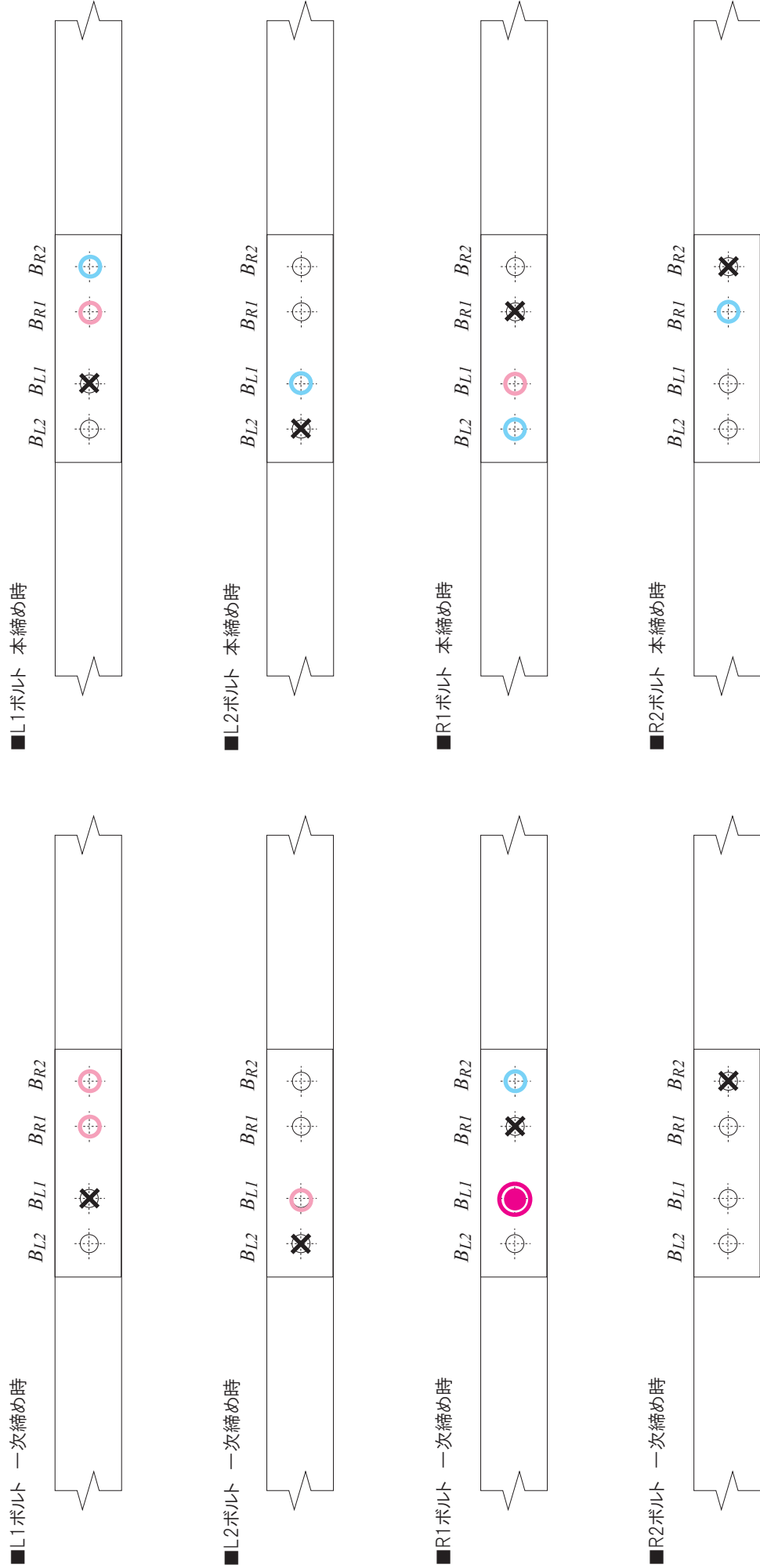


図 4-15 G05-G-E-T100-B-1 ボルトの張力変動

表 4-16 にリラクゼーション後の最終ボルト導入張力を示す。設計ボルト張力は 165[kN] である。表 4-16 の塗りつぶし部分は、設計ボルト張力に達しなかったボルトである。

G05-G-N-T100-A-1 の L2 ボルト以外、全て設計ボルト張力に達しなかった。

表 4-17 に施工後のナット回転量の計測結果を示す。ボルト群毎の平均回転角度 $\pm 30^{\circ}$ 範囲を越えたボルトはなかった。G05-G-N-T100-A の 3 体、G-05-G-E-T100-A-3 はナット回転量にばらつきがある。

表 4-16 ボルト導入張力

試験体名	最終ボルト張力[kN]				平均張力[kN]	
	L2	L1	R1	R2	L	R
G0-G-T100-4	161.4	149.6	146.1	149.0	155.5	147.6
G05-G-N-T100-A-1	165.6	156.4	153.2	158.0	161.0	155.6
G05-G-N-T100-B-1	160.9	134.2	142.3	142.4	147.6	142.4
G05-G-E-T100-A-1	164.5	154.2	159.2	148.0	159.4	153.6
G05-G-E-T100-B-1	164.6	152.1	149.3	162.3	158.4	155.8

表 4-17 ナット回転量

試験体名	ナット回転量[$^{\circ}$]				平均ナット回転量[$^{\circ}$]	
	L2	L1	R1	R2	L 側	R 側
G0-G-T100-4	45	43	55	45	44	50
G0-G-T100-5	48	48	57	54	48	56
G0-G-T100-6	46	52	45	65	49	55
G05-G-N-T100-A-1	47	56	86	65	52	76
G05-G-N-T100-A-2	60	55	83	48	58	66
G05-G-N-T100-A-3	56	51	82	47	54	65
G05-G-N-T100-B-1	40	50	68	54	45	61
G05-G-N-T100-B-2	54	51	77	53	53	65
G05-G-N-T100-B-3	68	65	54	45	67	50
G05-G-E-T100-A-1	42	49	59	87	46	73
G05-G-E-T100-A-2	60	78	65	62	69	64
G05-G-E-T100-A-3	52	96	56	55	74	56
G05-G-E-T100-B-1	53	60	42	53	57	48
G05-G-E-T100-B-2	53	57	54	53	55	54
G05-G-E-T100-B-3	60	61	63	68	61	66

2)すべり試験

すべり試験結果の一部，G0-G-T100-4 と G05-G-N-T100-1 の載荷荷重－すべり変位関係を図 4-18～図 4-19 に示す．全試験体のすべり試験より求められたすべり耐力結果を表 4-20，図 4-21 に示す．すべり耐力の算出方法は本実験と同様の定義で算出している．すべり耐力の評価は，すべり試験より得られたすべり耐力を設計すべり耐力で除した値[%]としている．ボルト 1 本当りの設計すべり耐力は，148.5[kN]であり，本実験と同様である．

図 4-18，図 4-19 より，すべりは載荷が始まった時から徐々にすべっており，急にすべっているわけではないことが分かる．表 4-20，図 4-21 より板厚差による肌すき 1[mm]が発揮するすべり耐力は，61.3～102.7[%]，平均 78.2[%]である．つまり，板厚差によるすべり耐力に及ぼす影響は，平均で 21.8[%]のすべり耐力の低下を引き起こすと分かった．

本実験は，この標準試験体実験をもとに，同じ肌すき量であれば，すべり耐力への影響は同程度，又はそれ以上の影響があるのではないかと予想し，実験を行った．肌すき量自体は同じ 1[mm]であるので，この予想は決して的外れではないと考える．

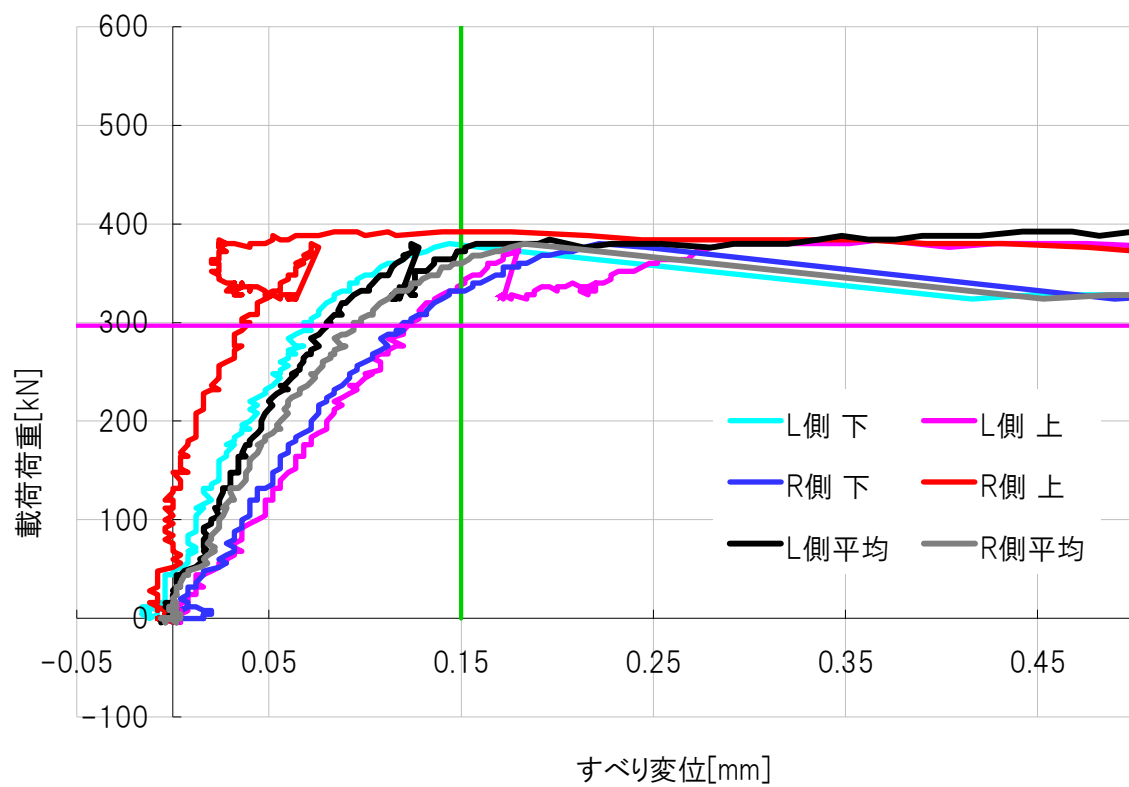


図 4-18 載荷荷重—すべり変位関係(G0-G-T100-4)

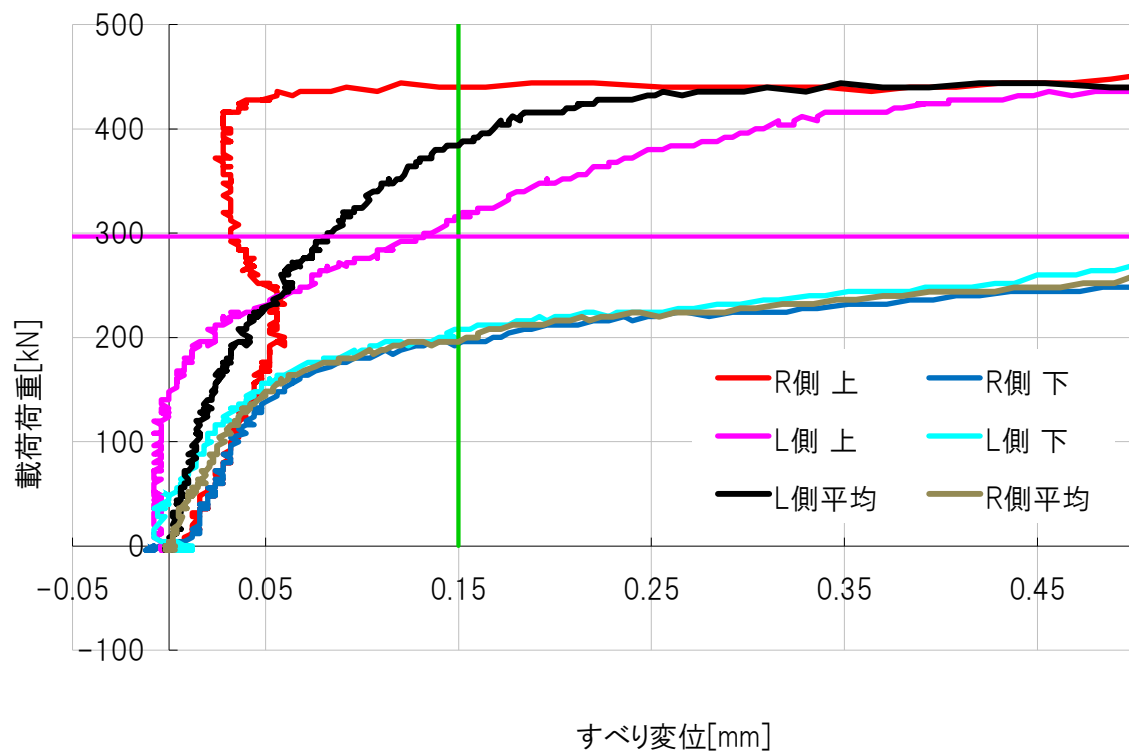


図 4-19 載荷荷重—すべり変位関係(G05-G-N-T100-1)

表 4-20 標準試験体実験のすべり耐力/設計すべり耐力

肌すき量 [mm]	試験体名	すべり耐力/設計すべり耐力 [%]	平均 すべり耐力/設計すべり耐力 [%]
0	G0-G-T100-4	121.2	131.7
	G0-G-T100-5	136.5	
	G0-G-T100-6	137.4	
1	G05-G-N-T100-A-1	63.3	78.2
	G05-G-N-T100-A-2	78.1	
	G05-G-N-T100-A-3	86.2	
	G05-G-N-T100-B-1	67.3	
	G05-G-N-T100-B-2	82.2	
	G05-G-N-T100-B-3	82.2	
	G05-G-E-T100-A-1	81.0	
	G05-G-E-T100-A-2	65.1	
	G05-G-E-T100-A-3	61.3 (min)	
	G05-G-E-T100-B-1	74.7	
	G05-G-E-T100-B-2	94.3	
	G05-G-E-T100-B-3	102.7 (max)	

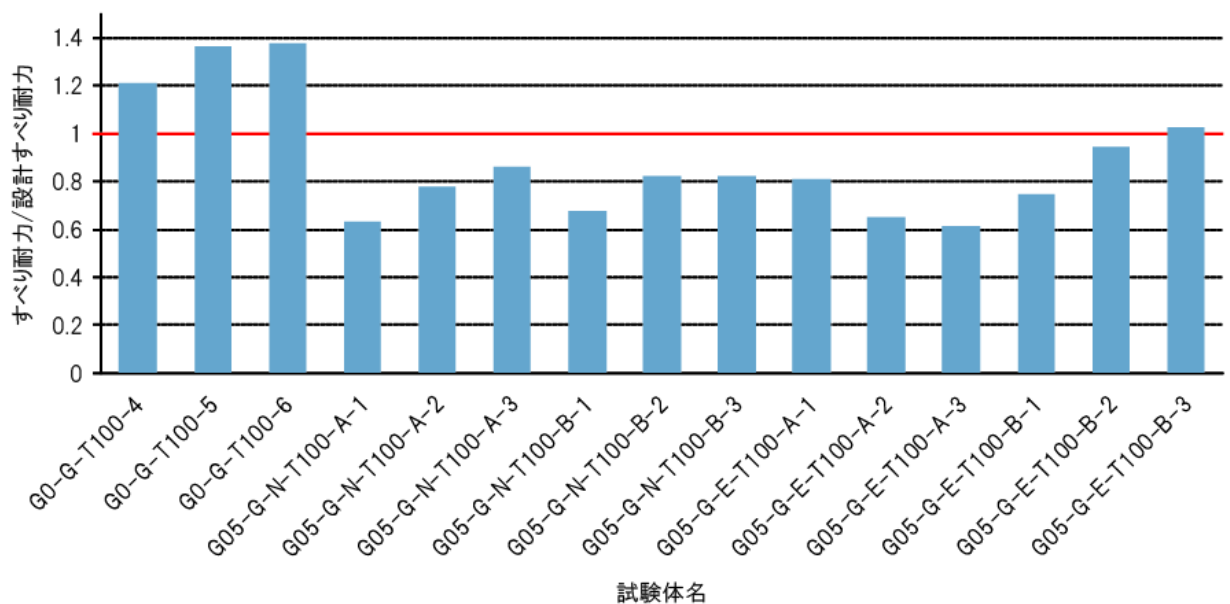


図 4-21 標準試験体実験のすべり耐力比較図

4.2 載荷荷重—すべり変位関係

図 3-15 に載荷荷重—すべり変位関係を示した。図 3-15 は自重を考慮しておらず、外力、すなわち載荷荷重に対するすべり変位よりすべり荷重を得ている。載荷荷重—すべり変位関係より試験体に異状はなかったか、更に、実験時に異変が起こっていないか確認する。

なお、添板は降伏しておらず、全験体は弾性範囲内ですべり試験が行われたと仮定して本章 4.2 では考察を進める。また、本章 4.4 では添板について考察を行った。

4.2.1 すべり変位計個々で評価

図 3-15 に示した載荷荷重—すべり変位関係は、東西毎の H 形鋼に設置された 4 機のすべり変位計を平均した値で評価している。1 機ずつに異状が起こっていない事が前提で、平均しているが、ここに、異状がなかった事を証明する考察をする。

図 4-23～図 4-26 に各試験体毎の載荷荷重—すべり変位(1 機毎の)関係を示す。縦軸は載荷荷重[kN]、横軸はすべり変位[mm]である。すべり変位計の名称は図 4-22 に示す。

図 4-23 の G0-B4、図 4-25 の G0-B6 においては、100[kN]付近ですべり変位が横滑りしているが、特に実験時に特別な事がなく、横すべりした原因は不明であるため、このままのすべり変位を真値とした。図 4-23～図 4-26 において、全体的に、試験体の下面に設置したすべり変位(図 4-22 において、「すべり ○ ○ 下」と名称がついている変位計)は、上面に設置したすべり変位(図 4-22 において、「すべり ○ ○ 上」と名称がついている変位計)よりもすべり量が多い。これは、試験体が曲がり、曲率の影響を受けた為と考えられ、予想通りである。図 4-23～図 4-26 より、特に、異状と考えられる現象が、載荷荷重—すべり変位関係には見られなかった為、個々のすべり変位計に異状はないとし、平均して評価する事は妥当であると考えられる。

また、曲率の影響をなくす為に、本実験は、下端フランジを挟んだ上下のすべり変位計 2 機を平均している。更に、図 3-15 は 継手としてのすべり量を評価する為に、下端フランジを挟んだ上下 2 機に、更に、ウェブを挟んだ反対側の上下 2 機、計 4 機を平均している為、曲率の影響をなくしている。

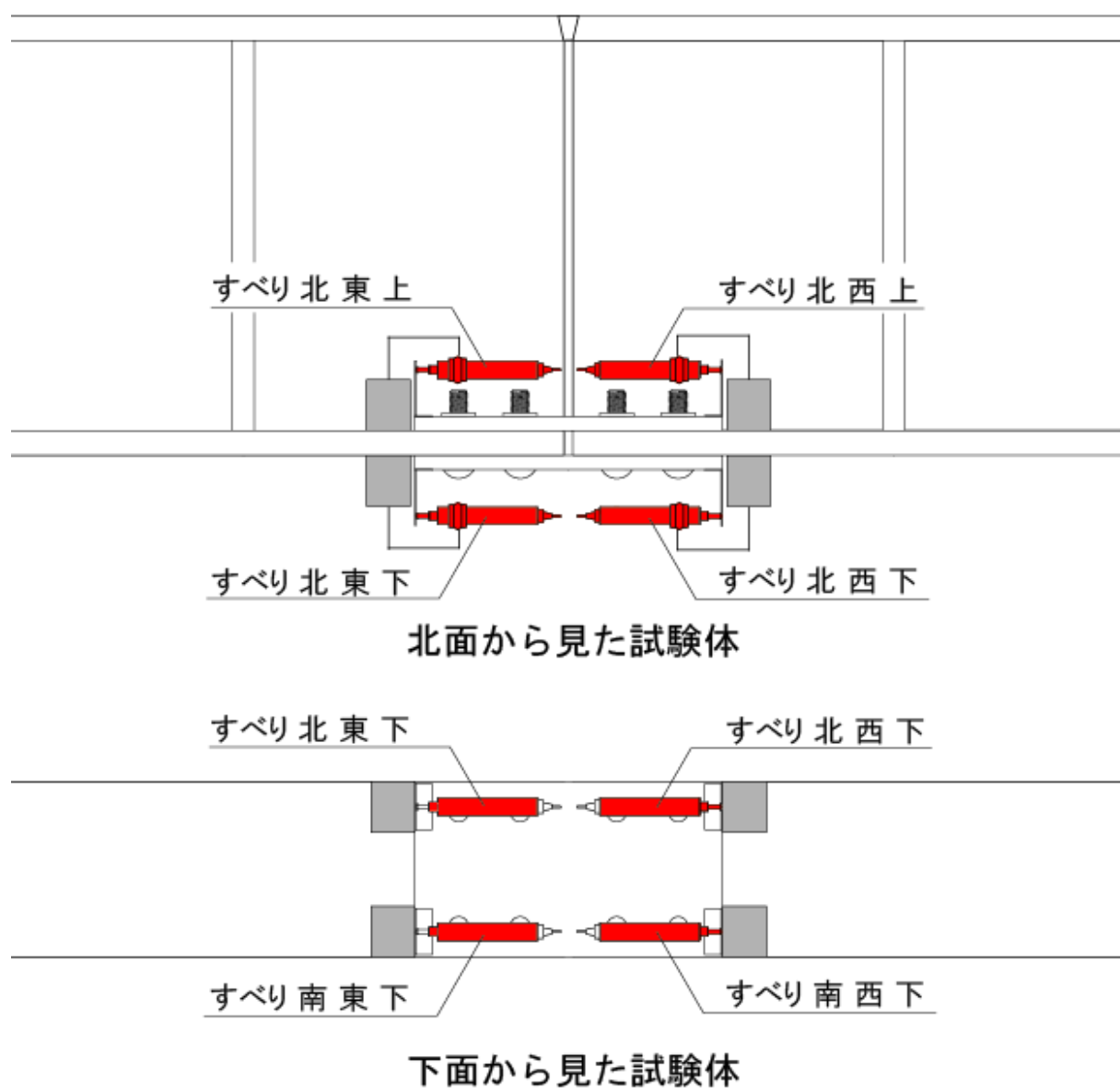


図 4-22 すべり変位計とその名称

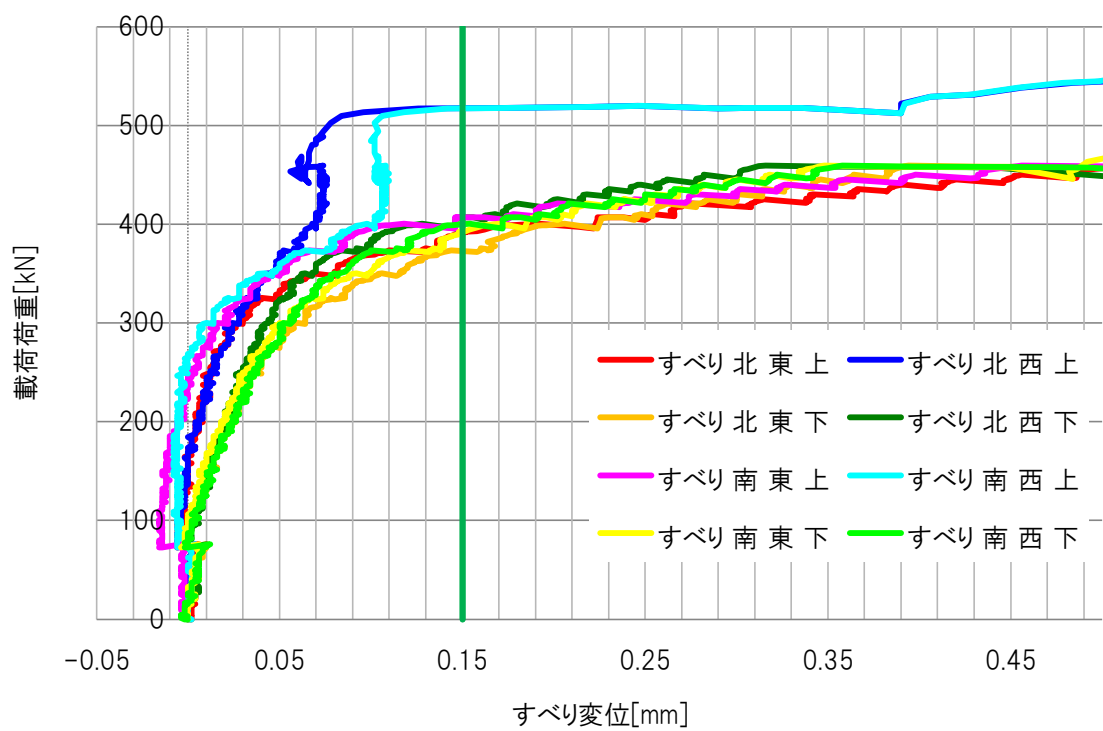


図 4-23 載荷荷重—すべり変位関係(G0-B4)

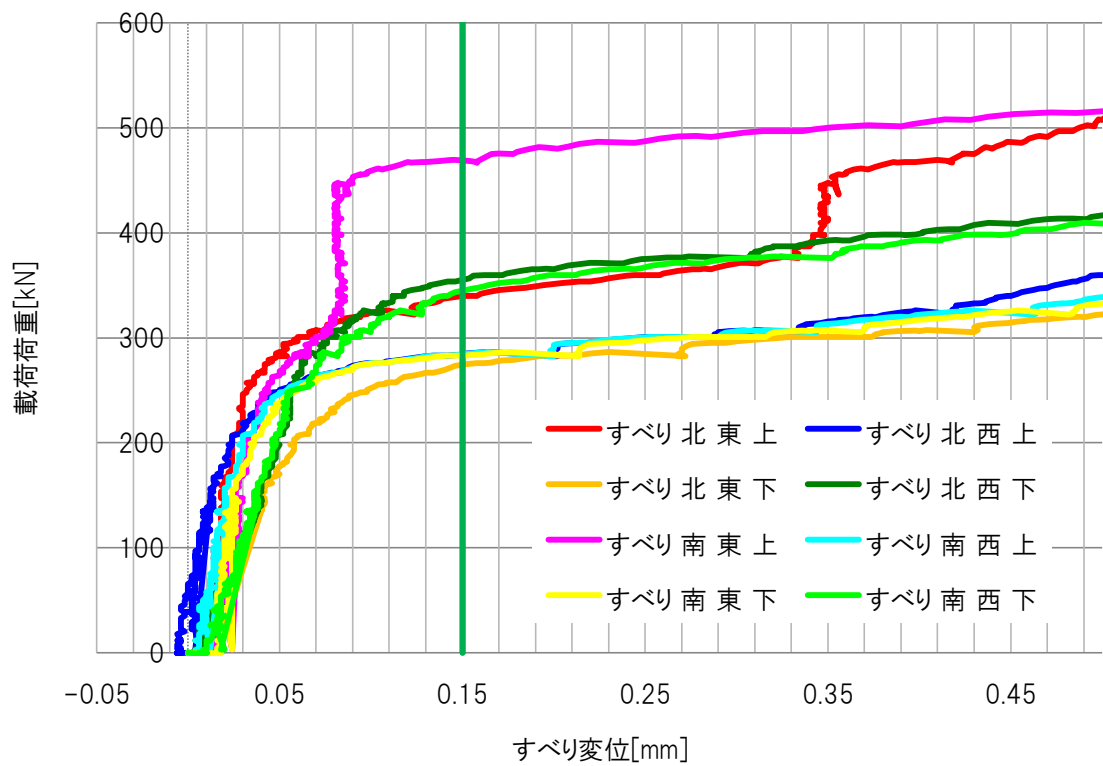


図 4-24 載荷荷重—すべり変位関係(G1-B4)

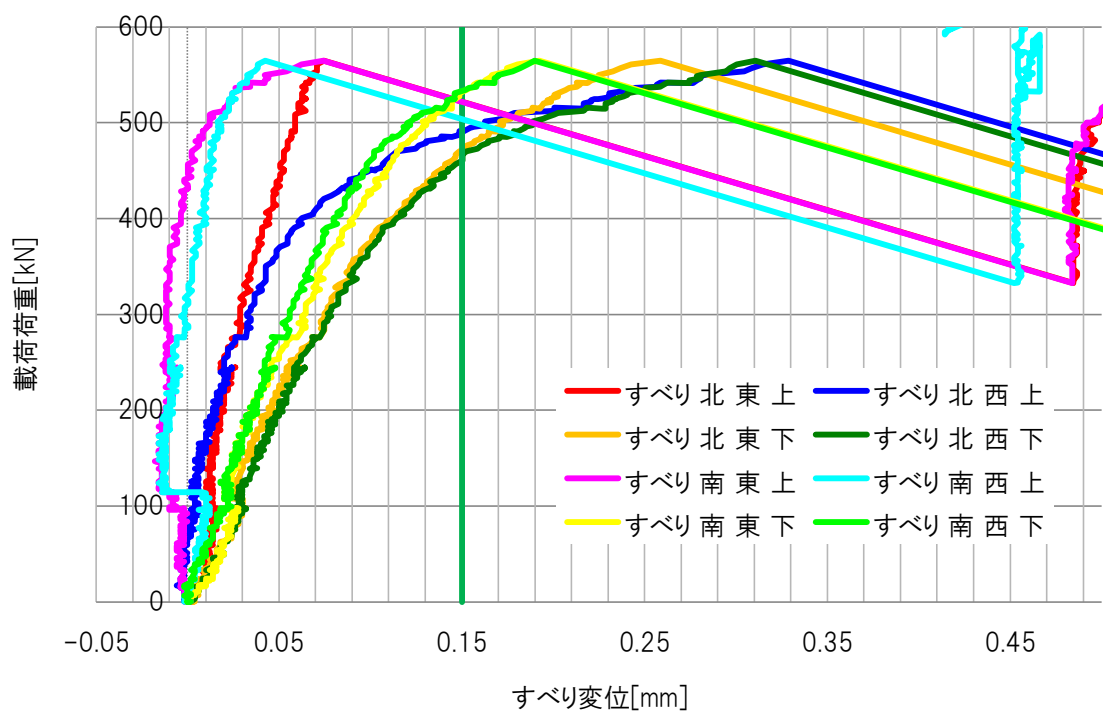


図 4-25 載荷荷重—すべり変位関係(G0-B6)

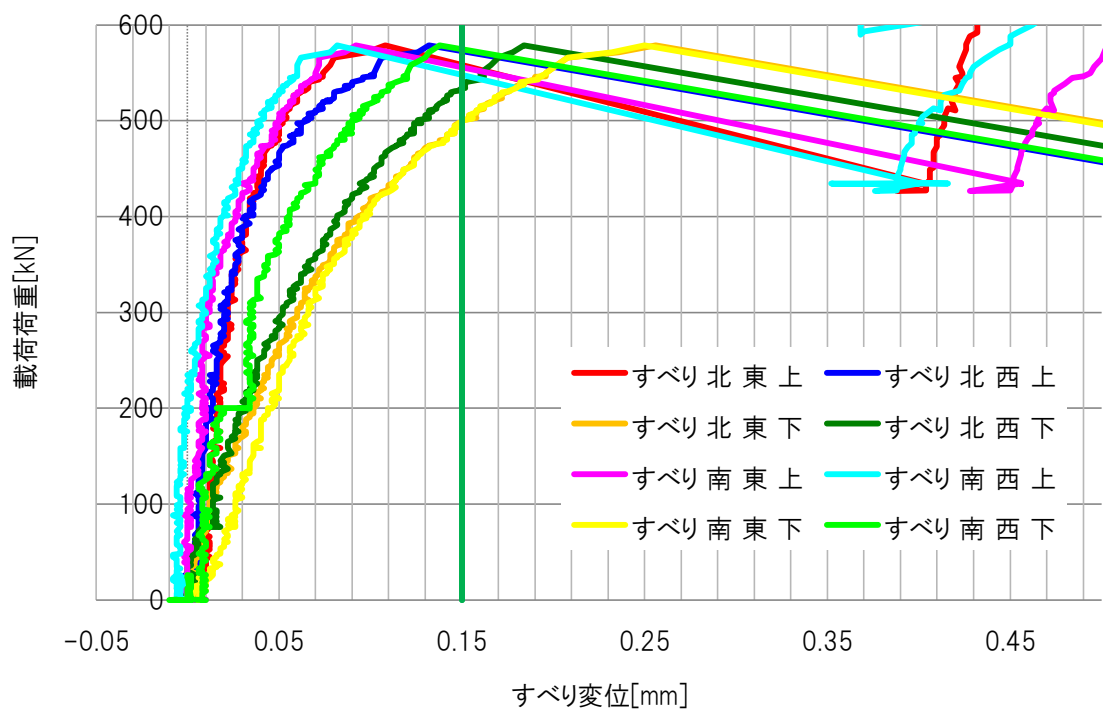


図 4-26 載荷荷重—すべり変位関係(G1-B6)

4.2.2 材料伸びを考慮

図 4-27 に示すが、本実験の計測方法では、すべり変位量に下端フランジの材料伸びが入っている可能性があるため、それを考慮する必要がある。ここでは、材料伸びを考慮した載荷荷重－すべり変位関係について考察を行う。

すべり変位とは、母材(本実験では下端フランジ)と添板の間の相対変位を指すが、実験の設置方法では、前文の相対変位量に加えて、添板とベース間の下端フランジの材料伸びもすべり変位に含まれてしまう。(図 4-27 参照。)材料伸びの変位量を考慮しなければ、真のすべり変位とは言えず、更に真のすべり荷重を算出する事はできない。従って、すべり変位量から材料伸びを減じた値ですべり荷重を求める事が必要である。

材料伸びの算出方法であるが、図 4-27 にもあるようにすべり変位計を設置したすぐ外側に、ひずみゲージを貼付していた。すべり変位計に含まれる可能性のある材料伸びは、下端フランジ 5[mm]分であり、そばに貼付したひずみゲージより算出できる。理由は、同じ下端フランジに貼付されており、等モーメント区間内で同じモーメントを受けている場所であるためである。したがって、図 4-27 の ε_{t1} 、 ε_{t2} は算出したい材料伸びとほぼ同程度の伸びが入っていると考えられるため、 ε_{t1} 、 ε_{t2} 、及びウェブを挟んだ反対側にも貼付してある 2 枚のゲージ、計 4 枚を利用して算出した。材料伸びは、4 枚の平均ひずみに、距離 5[mm]を乗算して算出した。

図 4-28 に載荷荷重－すべり変位(材料伸びを考慮)関係を示す。

図 4-28 は、図 3-15 ですべり荷重算出時に用いたすべり変位から、材料伸びを減じた値を示す。図 4-28 の実線は、材料伸びを考慮した補正值で、点線は元のすべり変位量である。

また、すべった時の材料伸び、考慮した時のすべり荷重を表 4-29 に示す。ただし、G0-B6、G1-B6 においては、大きな音がしてすべり変位が増大した時であるので、すべり変位が変化しても、載荷荷重に影響はないため、考慮した時のすべり荷重はそのままである。

図 4-28、表 4-29 より材料伸びはほぼ影響はないが、G0-B4 は 1.27[%]、G1-B4 は 0.98[%]のすべり荷重の上昇があった。

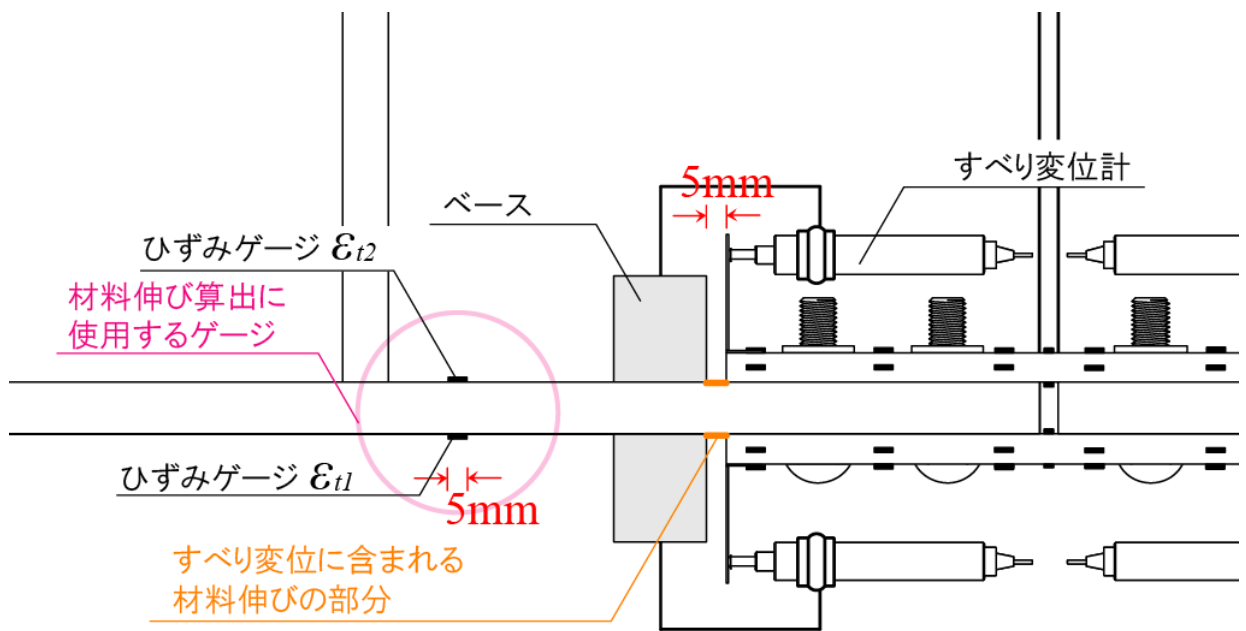


図 4-27 材料伸びに使用するひずみゲージ位置

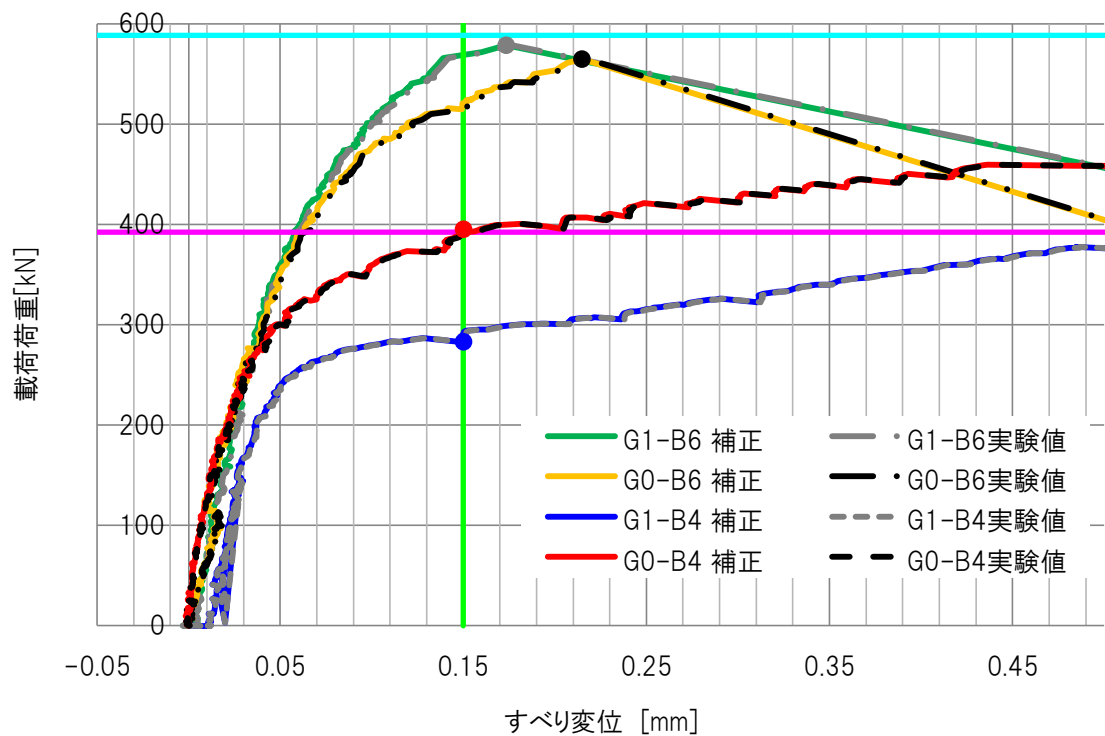


図 4-28 載荷荷重—すべり変位(材料伸びを考慮)関係

表 4-29 材料伸びを考慮したすべり荷重

試験体名	すべり荷重	材料伸び [mm]	考慮した時の すべり荷重 P_s' [kN]	影響度[%] ($P_s - P_s'$)/設計値 [%]
	P_s [kN]			
G0-B4	394.82	0.002	399.85	1.28
G1-B4	282.88	0.001	285.66	0.71
G0-B6	564.57	0.003	(564.57)	-
G1-B6	578.60	0.003	(578.60)	-

4.3 載荷荷重—鉛直変位関係

①②の考察を行うに辺り、各試験体に異状はなかったか確かめる為に、梁の性能を示した図 3-9 の載荷荷重—鉛直変位関係に着目した。図 3-9 を見ると、どの試験体も理論値の半分程度の剛性である事がわかる。肌すき 0[mm]の試験体においても、剛性が低い為、これに原因があるのではないかと考え、剛性が低下した原因について考察を行った。

4.3.1 鉛直変位個々で評価

図 3-9 に示した載荷荷重—鉛直変位関係は、ど真ん中に設置された 4 機のすべり変位計を平均した値で評価している。1 機ずつに異状が起こっていない事が前提で、平均しているが、ここに、異状がなかった事を証明する考察をする。

また、G0-B4 において、「鉛直 西 横」のグラフのみが他の 3 本のグラフと一致していない。真値なのか確認する為に、図 4-34 に 2 点載荷の支点直下に設置された両端変位計より載荷荷重—両端鉛直変位関係を示す。もし載荷点が東西方向にずれていたとしたら、両端鉛直変位計の方が中央部よりも東西で鉛直変位に差は出るはずであるが、図 4-34 を見る限り、載荷点は東西方向にずれていたとは考えられない。したがって、図 4-30 (G0-B4)の「鉛直 西 横」のグラフは変位計に問題があり、鉛直変位の真値が計測されていない為、G0-B4 においては、鉛直 西 横を除く 3 本を平均して、鉛直変位とした。

図 4-30～図 4-33 より、G0-B4 の「鉛直 西 横」以外、載荷荷重—鉛直変位関係に異状は見られなかった。

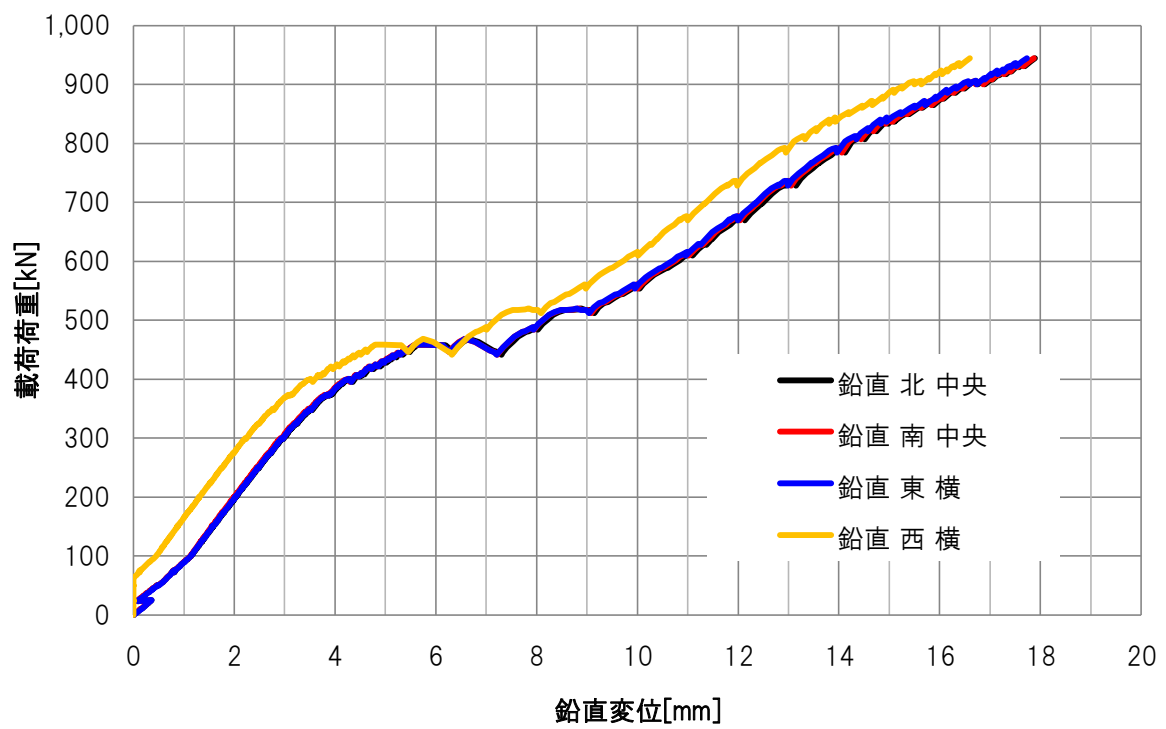


图 4—30 载荷荷重—鉛直変位関係(G0-B4)

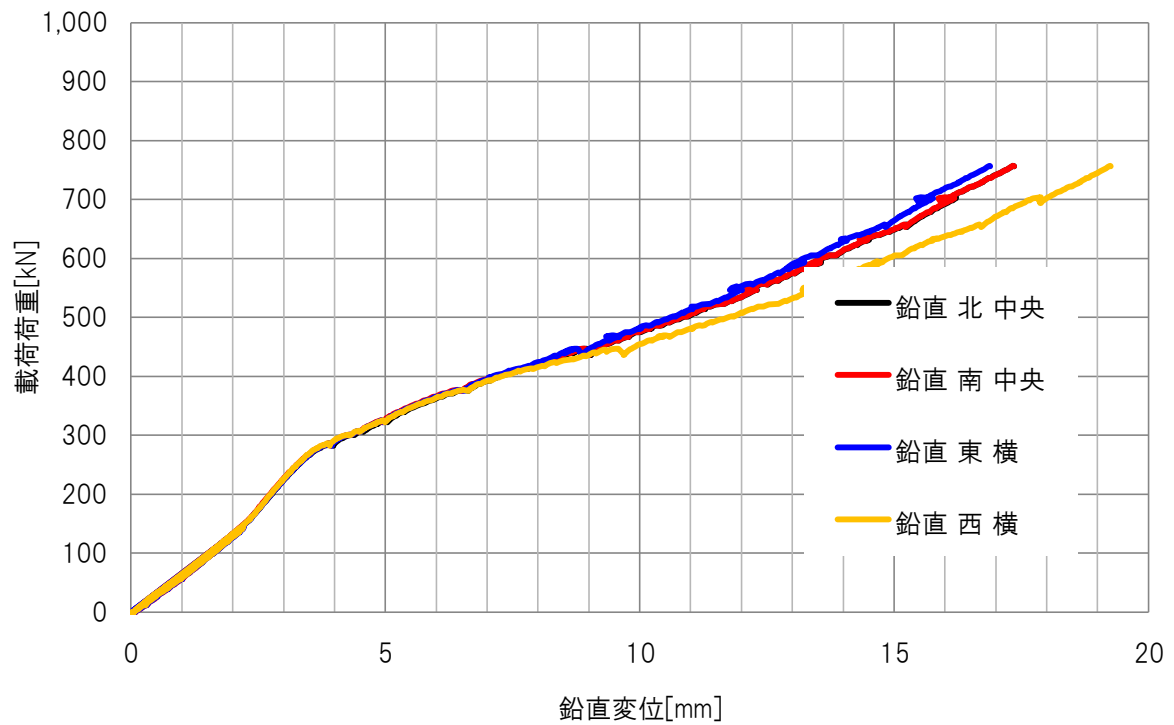


图 4—31 载荷荷重—鉛直変位関係(G1-B4)

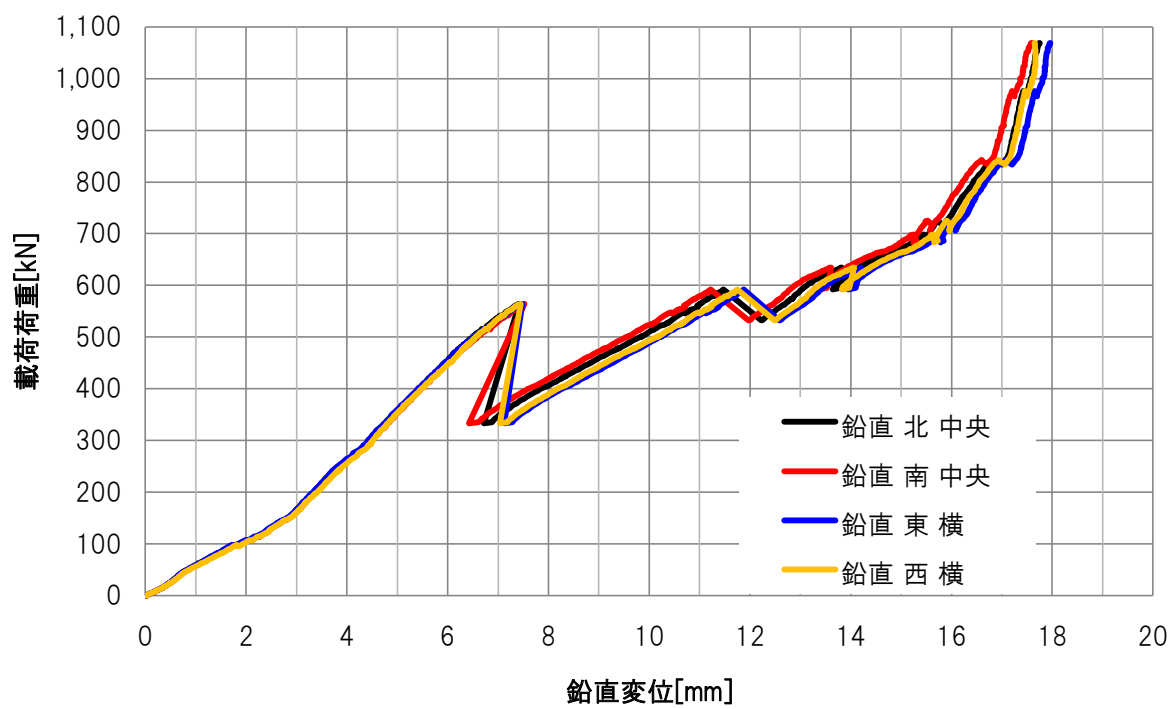


図 4—32 載荷荷重—鉛直変位関係(G0-B6)

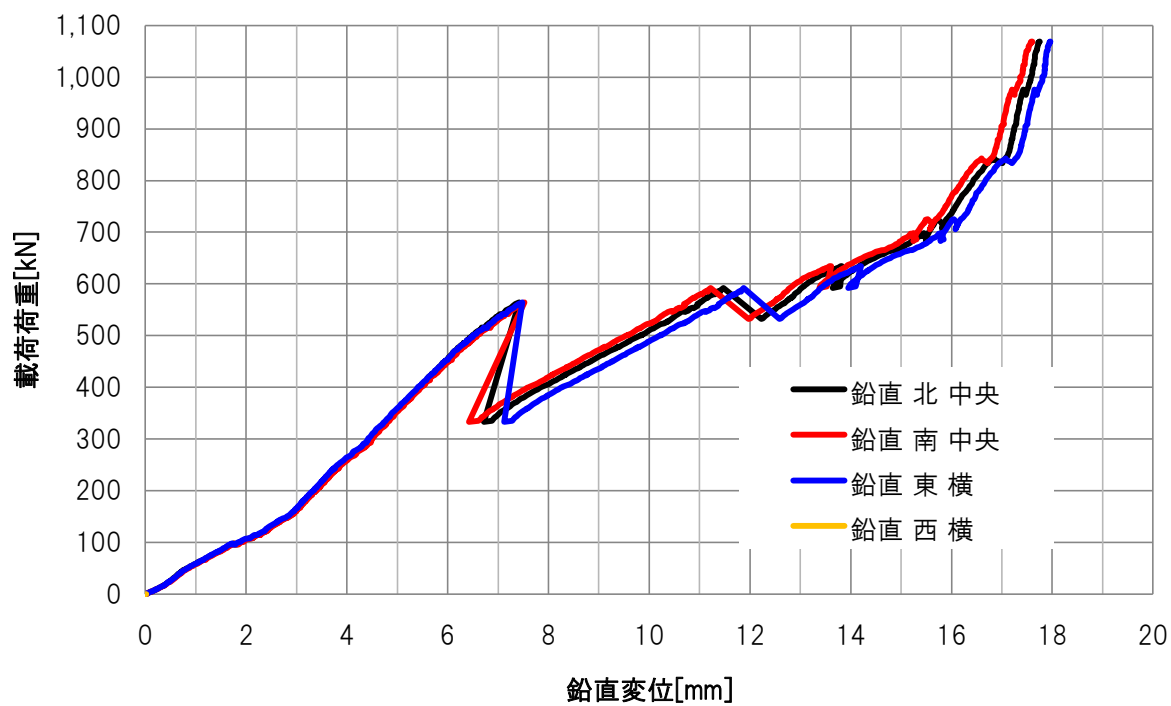


図 4—33 載荷荷重—鉛直変位関係(G1-B6)

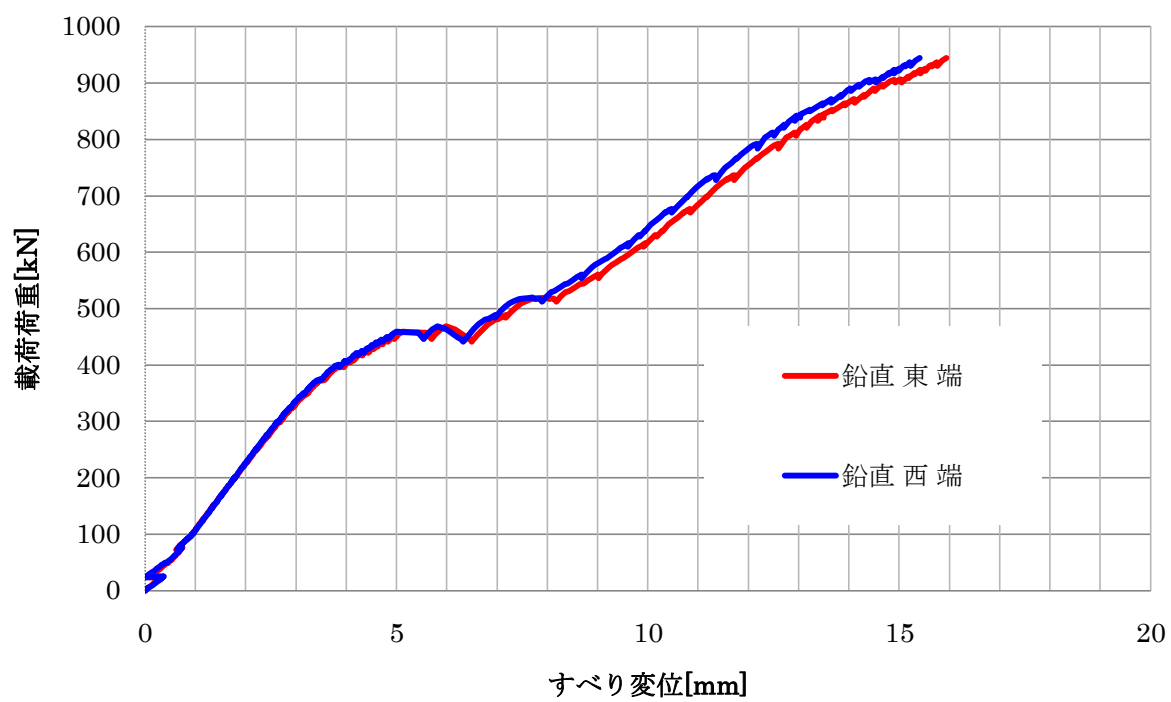


図 4-34 載荷荷重—両端鉛直変位関係(G0-B4)

4.3.3 すべり変位量を考慮

載荷荷重－すべり変位関係を見ると、わずかではあるが、徐々にすべっている事がわかる。すなわち、最初から、すべりの分だけ剛性は理論値よりも低下すると考えられる。このすべりを考慮した載荷荷重－鉛直変位関係を考察する。

すべりを考慮する為に、図 4-35 に示すように、試験体をモデル化する。試験体の H 形鋼 2 本は、完全剛体と仮定し、すべった分(Δ)だけ、梁がたわむモデルとする。図 4-35 のように仮定した時のすべりによる鉛直変位量を算出する。算出方法を下記に示す。

三角形の相似関係より

$$1800 : \delta' = 500 : \Delta$$

$$\therefore \delta' = \frac{1800\Delta}{500}$$

δ' : すべりによる鉛直変位量[mm]

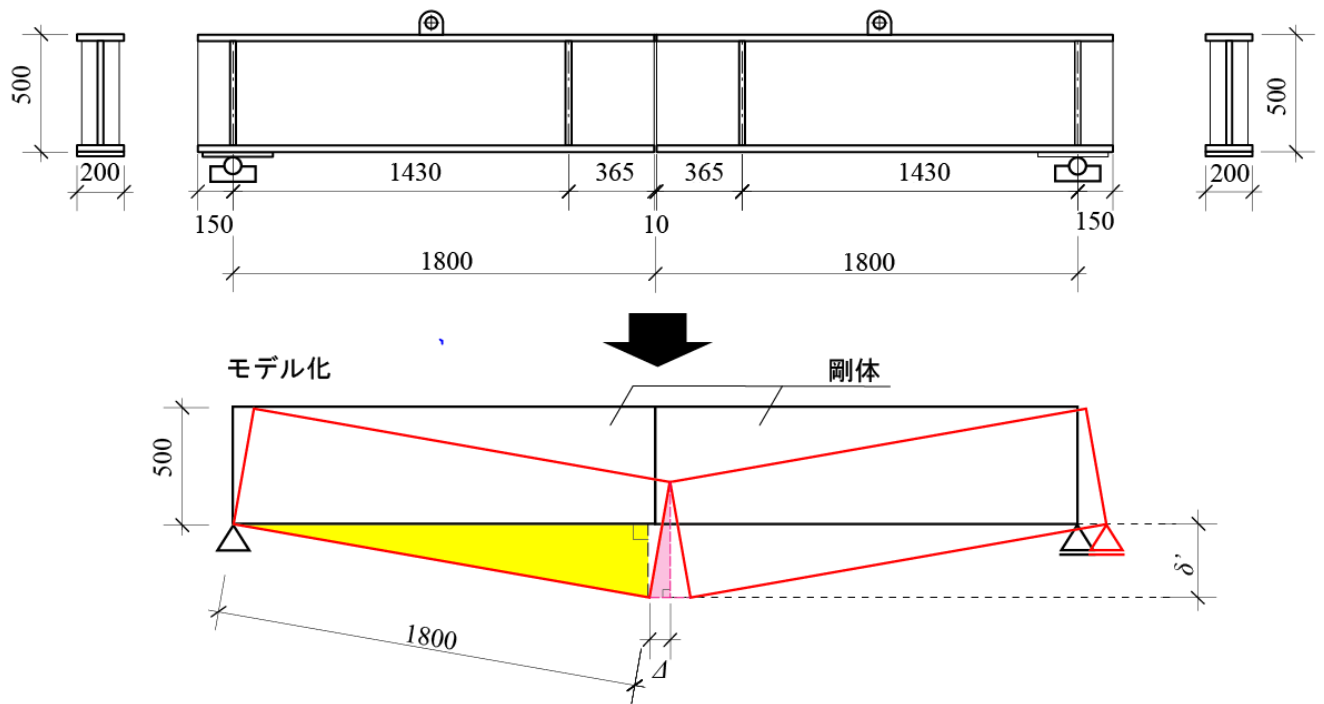
Δ : すべり変位計全 8 機のすべり変位量 [N/mm²]

すべりによる鉛直変位 δ を実測の鉛直変位から引いた鉛直変位と載荷荷重の関係を、図 4-36 に示す。

また、すべった時のすべり変位を表 4-37 に示す。剛性の上昇率は、すべりを考慮した鉛直変位から鉛直変位を減じた値を、鉛直変位で除した値[%]を示す。

すべり前において、剛性は若干変化があり、表 4-37 の剛性の上昇率によれば、8.57～13.14[%]の上昇があるとわかった。すべりを考慮しないと、約 10[%]の剛性の低下があるが、他にも剛性低下の原因があると考えられる。

このモデルは、H 形鋼が完全剛体と仮定した時にしか成り立たず、かなり強引なモデル化である。このモデルですべりによって刻々と変化する梁の剛性を評価する事は大変難しいが、すべりが剛性を低下させているのは確かである事はわかった。したがって、すべりが複雑に作用して、梁の剛性が理論値よりも低下したと考えられる



δ' : すべりによる鉛直変位量[mm]

Δ : すべり変位計全 8 機の平均すべり量[mm]

図 4-35 すべりを考慮した鉛直変位を算出する為のモデル化

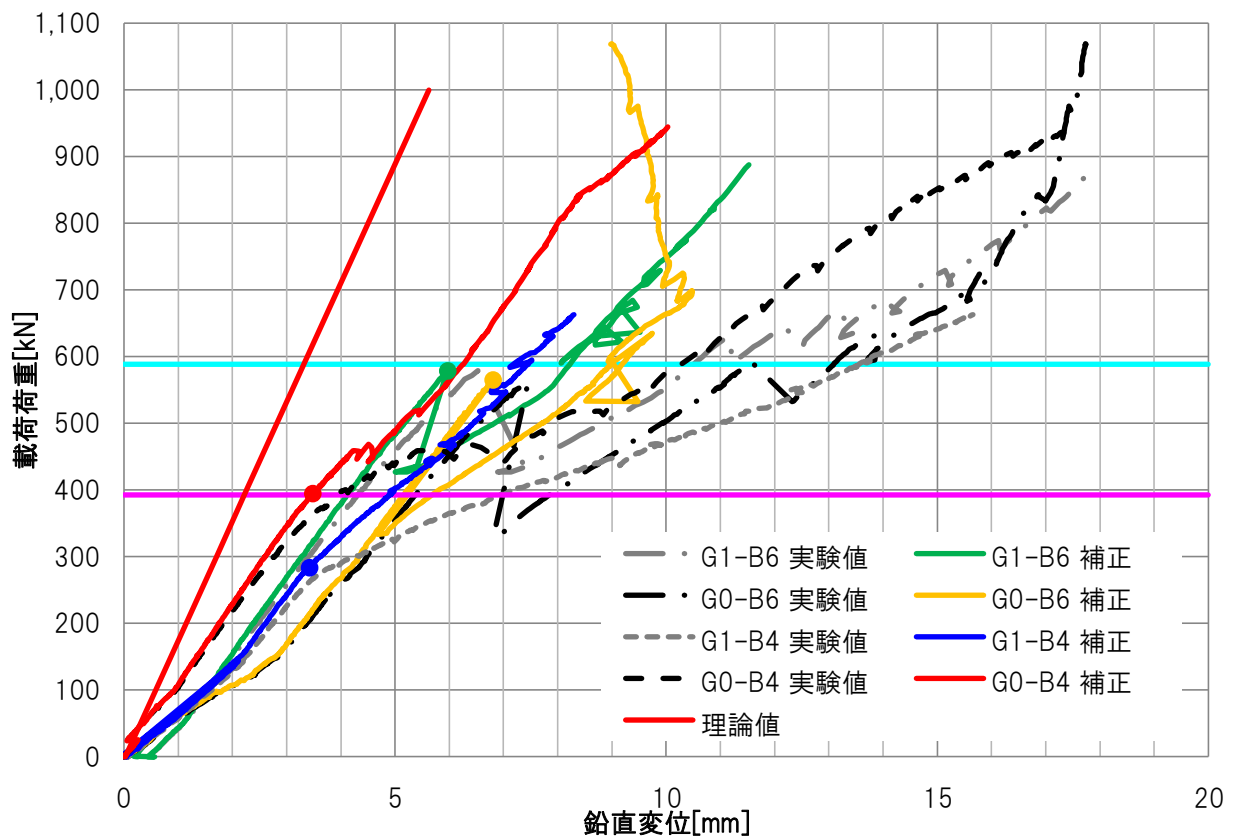


図 4-36 すべりを考慮した載荷荷重—鉛直変位関係

表 4-37 すべりを考慮した鉛直変位

試験体名	すべり荷重	鉛直変位 [mm]	すべりを考慮した 鉛直変位 [mm]	剛性の上昇率 [%]
	[kN]			
G0-B4	394.82	3.97	3.48	12.38
G1-B4	282.88	3.94	3.42	13.14
G0-B6	564.57	7.47	6.80	8.90
G1-B6	578.60	6.53	5.97	8.57

4.4 添板の応力度

本実験は、試験体が弾性範囲内で試験を終わらせられるように、計画を立てた。しかしながら、肌すき 1[mm]の影響を受けて、添板が実際は降伏していた可能性はある。ここでは、施工試験、及びすべり試験を経て全試験体の添板が降伏していなかったかどうか確認をする。施工試験、すべり試験を経て、最もひずみが多く入っていると予想されるのは、添板の中央であると考えられるが、確認の為、図 2-13、図 2-14 に示した、全ての添板のひずみを対象に、添板が降伏していなかったかどうかを確認をする。

施工試験時に入ったひずみとすべり試験時に入ったひずみを加算し、すべった時に添板に入ったひずみより算出した応力度の結果を表 4-38、表 4-39、図 4-40、図 4-41 に示す。応力度は式(4.1)より、各枚に貼付したひずみから算出した。添板の降伏応力度は、398[N/mm²]である。

$$\sigma = \varepsilon E \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(4.1)}$$

σ : 応力度[N/mm²]

ε : ひずみ[×10⁻⁶]

E : ヤング係数 [N/mm²]

表 4-38～図 4-41 より、G0-B4 は「下板 南 中央 U」が 291[N/mm²], G1-B4 は「下板 南 R1」が 325 [N/mm²], G0-B6 は「下板 北 L1-4」が 385[N/mm²], G1-B6 は「上板 南 中央 U」が 389 [N/mm²]で最大の応力度であることがわかる。表 4-38～図 4-41 より、すべった時までは、添板はどれも降伏していない事がわかる。

また、表 4-38～図 4-41 は、試験体の自重を考慮しておらず、実測ひずみより算出した応力度である。自重については、本章 4.5.1 に詳細に示すが、各自重分を考慮する必要がある。

表 4-42 を参考に、各自重分を載荷荷重として換算し、同じ載荷荷重時に入力された実測ひずみを線形補間して求めた応力度は、どれも $0 \sim 2[\text{N/mm}^2]$ であった。つまり、自重分を加算しても、G0-B4 は $293[\text{N/mm}^2]$ 、G1-B4 は $327[\text{N/mm}^2]$ 、G0-B6 は $387[\text{N/mm}^2]$ 、G1-B6 は $391[\text{N/mm}^2]$ となり、降伏応力度に達していないことがわかる。

表4-38 G0-B4, G1-B4の添板の応力度(すべり荷重時)

試験体名	すべり荷重 [kN]	すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]													
		上板 北 L4	上板 北 L1-4	上板 北 L1	上板 北 中央 _上	上板 北 R2	上板 北 R2-3	上板 北 R3	上板 北 L4s	上板 北 L1-4s	上板 北 L1s	上板 北 中央 _上	上板 北 R2s	上板 北 R2-3s	上板 北 R3s
G0-B4	394.82	-2	95	107	107	113	111	23	-5	58	91	91	88	53	0
G1-B4	282.88	11	144	309	87	43	83	19	2	39	54	59	53	42	3

試験体名	すべり荷重 [kN]	すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]													
		上板 南 L3	上板 南 L2-3	上板 南 L2	上板 南 中央 _上	上板 南 R1	上板 南 R1-4	上板 南 R4	上板 南 L3s	上板 南 L2-3s	上板 南 L2s	上板 南 中央 _上	上板 南 R1s	上板 南 R1-4s	上板 南 R4s
G0-B4	394.82	11	94	120	112	131	131	18	0	61	92	57	94	64	-6
G1-B4	282.88	14	140	295	92	42	91	15	6	28	68	70	59	46	3

試験体名	すべり荷重 [kN]	すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]													
		下板 北 L4	下板 北 L1-4	下板 北 L1	下板 北 中央 _上	下板 北 R2	下板 北 R2-3	下板 北 R3	下板 北 L4s	下板 北 L1-4s	下板 北 L1s	下板 北 中央 _上	下板 北 R2s	下板 北 R2-3s	下板 北 R3s
G0-B4	394.82	80	198	231	-147	250	172	49	-12	56	84	72	83	-31	-27
G1-B4	282.88	82	187	173	111	320	229	89	1	34	63	10	82	46	-1

試験体名	すべり荷重 [kN]	すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]													
		下板 南 L3	下板 南 L2-3	下板 南 L2	下板 南 中央 _上	下板 南 R1	下板 南 R1-4	下板 南 R4	下板 南 L3s	下板 南 L2-3s	下板 南 L2s	下板 南 中央 _上	下板 南 R1s	下板 南 R1-4s	下板 南 R4s
G0-B4	394.82	86	-17	236	-111	240	174	49	-7	37	74	291	73	52	-16
G1-B4	282.88	74	174	154	110	325	210	69	4	37	69	11	72	32	8

表4-39 G0-B6, G1-B6の添板の応力度(すべり荷重時)

すべり荷重		すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]								
試験体名	[kN]	上板 北 L5	上板 北 L4-5	上板 北 L1-4	上板 北 L1	上板 北 中央 _上	上板 北 R2	上板 北 R2-3	上板 北 R3-6	上板 北 R6
G0-B6	564.57	18	131	189	184	240	186	188	158	37
G1-B6	578.60	2265	200	235	323	306	124	155	114	9

すべり荷重		すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]								
試験体名	[kN]	上板 北 L5s	上板 北 L4-5s	上板 北 L1-4s	上板 北 L1s	上板 北 中央 _上	上板 北 R2s	上板 北 R2-3s	上板 北 R3-6s	上板 北 R6s
G0-B6	564.57	13	65	154	202	201	191	153	128	5
G1-B6	578.60	11	80	188	200	20	233	174	74	10

すべり荷重		すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]								
試験体名	[kN]	上板 南 L6	上板 南 L3-6	上板 南 L2-3	上板 南 L2	上板 南 中央 _上	上板 南 R1	上板 南 R1-4	上板 南 R4-5	上板 南 R5
G0-B6	564.57	32	106	156	165	256	90	126	119	31
G1-B6	578.60	19	165	206	309	389	165	180	137	11

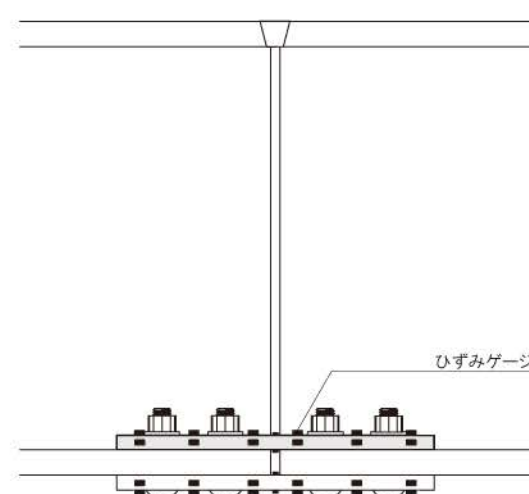
すべり荷重		すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]								
試験体名	[kN]	上板 南 L6s	上板 南 L3-6s	上板 南 L2-3s	上板 南 L2s	上板 南 中央 _上	上板 南 R1s	上板 南 R1-4s	上板 南 R4-5s	上板 南 R5s
G0-B6	564.57	8	18	37	44	78	61	67	34	7
G1-B6	578.60	10	69	191	218	40	218	187	84	8

すべり荷重		すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]								
試験体名	[kN]	下板 北 L5	下板 北 L4-5	下板 北 L1-4	下板 北 L1	下板 北 中央 _上	下板 北 R2	下板 北 R2-3	下板 北 R3-6	下板 北 R6
G0-B6	564.57	50	255	385	277	294	171	238	189	59
G1-B6	578.60	70	217	258	216	378	362	281	206	477

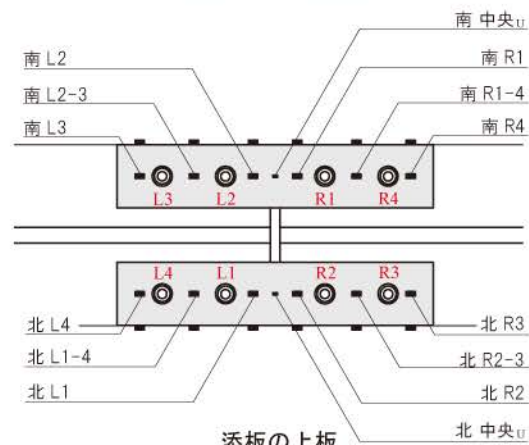
すべり荷重		すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]								
試験体名	[kN]	下板 北 L5s	下板 北 L4-5s	下板 北 L1-4s	下板 北 L1s	下板 北 中央 _上	下板 北 R2s	下板 北 R2-3s	下板 北 R3-6s	下板 北 R6s
G0-B6	564.57	17	87	168	128	21	92	13	-12	25
G1-B6	578.60	-2	43	89	151	-73	125	95	36	-8

すべり荷重		すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]								
試験体名	[kN]	下板 南 L6	下板 南 L3-6	下板 南 L2-3	下板 南 L2	下板 南 中央 _上	下板 南 R1	下板 南 R1-4	下板 南 R4-5	下板 南 R5
G0-B6	564.57	110	324	250	113	242	104	183	255	119
G1-B6	578.60	2	38	60	115	350	174	78	31	1

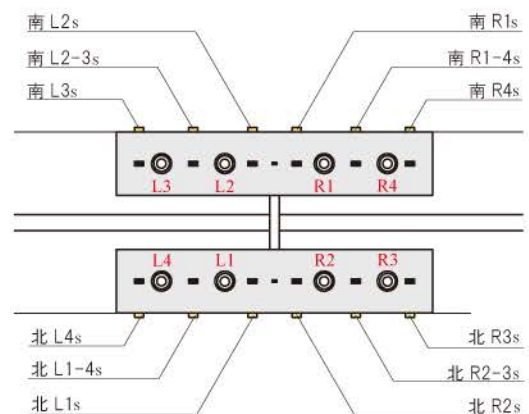
すべり荷重		すべり時の添板各箇所の応力度[N/mm ²]								
試験体名	[kN]	下板 南 L6s	下板 南 L3-6s	下板 南 L2-3s	下板 南 L2s	下板 南 中央 _上	下板 南 R1s	下板 南 R1-4s	下板 南 R4-5s	下板 南 R5s
G0-B6	564.57	66	45	32	8	5	-14	-8	24	53
G1-B6	578.60	-2	41	98	133	-74	175	107	33	-2



北側から見た試験体

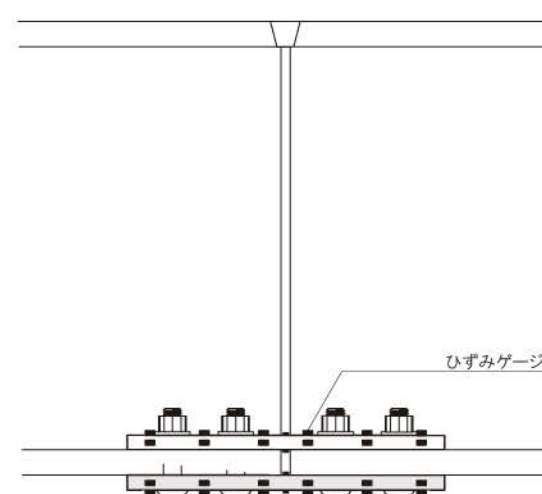


添板の上板

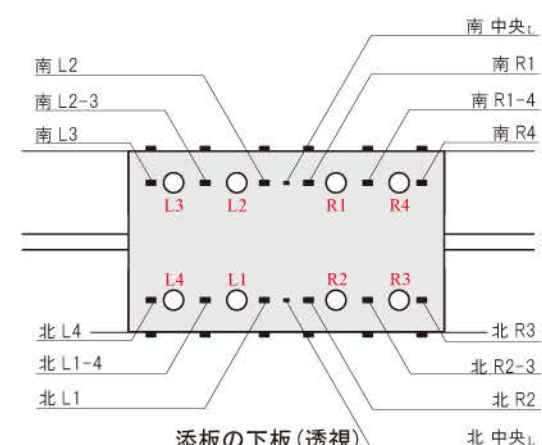


添板の上板

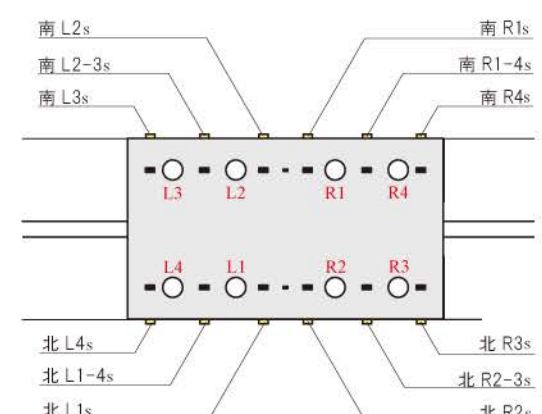
図4-40 添板の名称(上板)



北側から見た試験体



添板の下板(透視)



添板の下板(透視)

図4-41 添板の名称(下板)

4.5 実験方法の妥当性とすべり耐力への影響

第3章まで述べてきた中で、試験体に異状が見られたもの、また実験に異状が見られたものはないとわかった。したがって、試験体個々の試験体、実験方法の差異の影響で①②が起こったわけではないことがわかった。

したがって、実験方法が妥当であったかどうかの考察を行った。

4.5.1 載荷荷重に自重を考慮

第1章でも述べたが、本研究の様に梁継手を用意し、高力ボルト摩擦接合のすべり試験を行いすべり耐力を評価した研究はない。本実験は、既往の研究をもとに実験計画を立て、モーメントを介して実験対象部分に引張力をかけた。既往の研究が最も多い標準試験体を用いたすべり試験では、試験体を単純引張載荷していき、主すべり、またはすべり量が0.15～0.20[mm]に達した時をすべり荷重とし、引張載荷の値をすべり耐力としている¹⁸⁾。そこに、試験体の自重は考慮されていない。しかしながら、本実験では、モーメントにより引張力を与えている為、自重の影響で実験対象部分に引張力が入る。よって、すべり耐力を評価するに当たり、自重も考慮して載荷荷重を求める必要がある。結果を表4-42に示す。試験体の自重は、自重が大きすぎて計測できなかった為、実測寸法を基に体積を算出し、文献19)に基づいて比重を0.785[kg/cm³・m]とし、更に、重力加速度を9.8[m/s²](すなわち、1[kgf]=9.8[N])として自重を載荷荷重として算出し、評価した。表4-42に示した表は、H形鋼2本、添板、スティフナー、ボルトの各重量を合計したものである。自重の重量は、約590[kg]であり、載荷荷重としては約4[kN]であった。

表4-43に、自重を考慮したすべり荷重を示す。表中には、自重考慮のすべり荷重を設計値で除した値[%]、及び「影響度」として、 $P_{すべり+自重}/P_s$ から $P_{すべり}/P_s$ を引いた値[%]を示す。

「影響度」を見ると、0.69～1.03 [%]のすべり耐力の増加がみられた。しかしながら、G0-B6のすべり耐力は設計値に達せず、G0-B6とG1-B6のすべり耐力の関係も変化はない。

表 4-42 自重

試験体名	自重[kg]	換算した載荷荷重[kN]	影響度[%]
G0-B4	590.93	4.03	1.03
G1-B4	592.62	4.05	1.03
G0-B6	597.85	4.08	0.69
G1-B6	599.81	4.09	0.70

表 4-43 すべり荷重

試験体名	すべり荷重 $P_{\text{すべり}}$ [kN]	自重考慮の すべり荷重 $P_{\text{すべり+自重}}$ [kN]	設計値 P_s [kN]	すべり荷重 ／設計値 $P_{\text{すべり}}/P_s$ [%]	自重考慮のすべり荷重 ／設計値 $P_{\text{すべり+自重}}/P_s$ [%]	影響度 [%]
G0-B4	394.82	398.85	392.12	100.69	101.72	1.03
G1-B4	282.88	286.93	392.12	72.14	73.17	1.03
G0-B6	564.57	568.65	588.18	95.99	96.68	0.69
G1-B6	578.60	582.69	588.18	98.37	99.07	0.70

4.5.2 試験体, 載荷装置の設置位置がすべり耐力に与える影響

1) 試験体の設置位置がすべり耐力に与える影響

式(2.1), 式(2.2)よりわかるように, 本実験の入力モーメントは載荷荷重 P との載荷点から支点までの距離 L により与えられる(図 2-1 参照). 特に, L においては, 試験体の設置位置が入力モーメントに作用してくる. 設置位置がすべり耐力に与える影響を確認する必要がある為, 考察を行った.

確認方法は, 予想される設置差のみによる下端フランジ継手引張力を, 設置差なしの下端フランジ継手引張力で除した値[%]とし, 設置差によるすべり耐力への影響度[%]を調べた.

L は 1430[mm]であるが, 設置差 1[mm], 5[mm]とした場合の影響度, すなわち, L が 1431[mm], 1435 [mm]の場合とした時の, 1430[mm]に対するすべり耐力への影響度を表 4-44 に示す.

表 4-44 より, 設置差 1[mm]の場合, すべり耐力への影響度は 0.07[%]の増加で, 設置差 5[mm]の場合, 0.35[%]の増加である. 共に, すべり耐力への影響度は 1[%]未満で, すべり耐力への影響はほぼないと判断できる.

フランジ重心間距離 j についても L と同様の方法で, 影響度を確認した. j は 472.0[mm]であるが, 計測誤差-0.5[mm], -1.0[mm]とした場合の影響度, すなわち, 471.5[mm], 471.0[mm]の場合とした時の, 472[mm]に対するすべり耐力への影響度を表 4-44 に示す.

表 4-44 より, 計測誤差-0.5[mm]の場合, すべり耐力への影響度は 0.11[%]の増加で, 計測誤差-1.0[mm]の場合, 0.21[%]の増加である. 共に, すべり耐力への影響度は 1[%]未満で, すべり耐力への影響はほぼないと判断できる.

表 4-44 ボルト 1 本当りのすべり耐力

要因	すべり耐力への影響度[%]
L+1[mm]の場合	0.07
L+5[mm] の場合	0.35
j-0.5[mm]の場合	0.11
j-1.0[mm]の場合	0.21

2) 載荷装置の設置位置がすべり耐力に与える影響

図 2-1 よりわかるように、本実験の入力モーメントは、実験対象部分の区間(L' 区間)で等モーメントになっている必要がある。つまり、図 4-45 の様に、載荷梁の中央部にロードセルから入力される載荷荷重点がなかった場合、そのモーメントの傾きが与えるすべり耐力への影響度を確認した。確認方法は、図 4-45 に示すように、載荷荷重点を載荷梁の距離 a[mm], b[mm]と変化させ、L の距離は左右同じとして考えた。全ての試験において、同一の載荷梁を用いているので、載荷梁の全長、すなわち a+b の距離は一定値 740[mm]として考えた。載荷梁の設置位置とモーメント図の関係は図 4-3 の通りで、 M_a と M_b に勾配が発生する。設置差 ± 1 [mm]の場合、すなわち a=371[mm], b=369[mm]の場合と、設置差 ± 3 [mm]の場合のすべり耐力への影響度[%]を調べた。

設置差 ± 1 [mm]の場合(a=369[mm], b=371[mm])

図 4-3 と式(2.1),(2.2)より、モーメントが異なる場合の下端フランジ継手引張力は、それぞれ左右で異なり、式(4.2),(4.3)のようになる。

$$N_{Fa} = \frac{M_a}{j} = \frac{369}{740} \cdot \frac{PL}{j} \quad \dots \dots \dots \text{式(4.2)}$$

$$N_{Fb} = \frac{M_b}{j} = \frac{371}{740} \cdot \frac{PL}{j} \quad \dots \dots \dots \text{式(4.3)}$$

設置差がない場合は、式(2.1), (2.2)より、式(4.4)のようになる。

$$N_F = \frac{M}{j} = \frac{370}{740} \cdot \frac{PL}{j} \quad \dots \dots \dots \text{式(4.4)}$$

設置差による影響度は、式(4.5)の様に算出した。

$$\text{影響度} = \frac{N_{Fa} - N_F}{N} \quad \text{又は,} \quad \frac{N_{Fb} - N_F}{N} \quad \dots \dots \dots \text{式(4.5)}$$

結果、影響度は、 N_{Fa} 側では-0.27[%], N_{Fb} 側では 0.27[%]の増減があった。

設置差 ± 3 [mm]の場合($a=367$ [mm], $b=373$ [mm])

同様に，影響度を算出した結果， N_{Fa} 側では -0.81 [%]， N_{Fb} 側では 0.81 [%]の増減があった．

より大きな下端フランジ継手引張力が作用した継手側が早期にすべり，すべり耐力に影響すると考えられる．したがって，増加側に着目したが，どちらもすべり耐力への影響度は ± 1 [%]未満で，すべり耐力への影響はほぼないと判断できる．

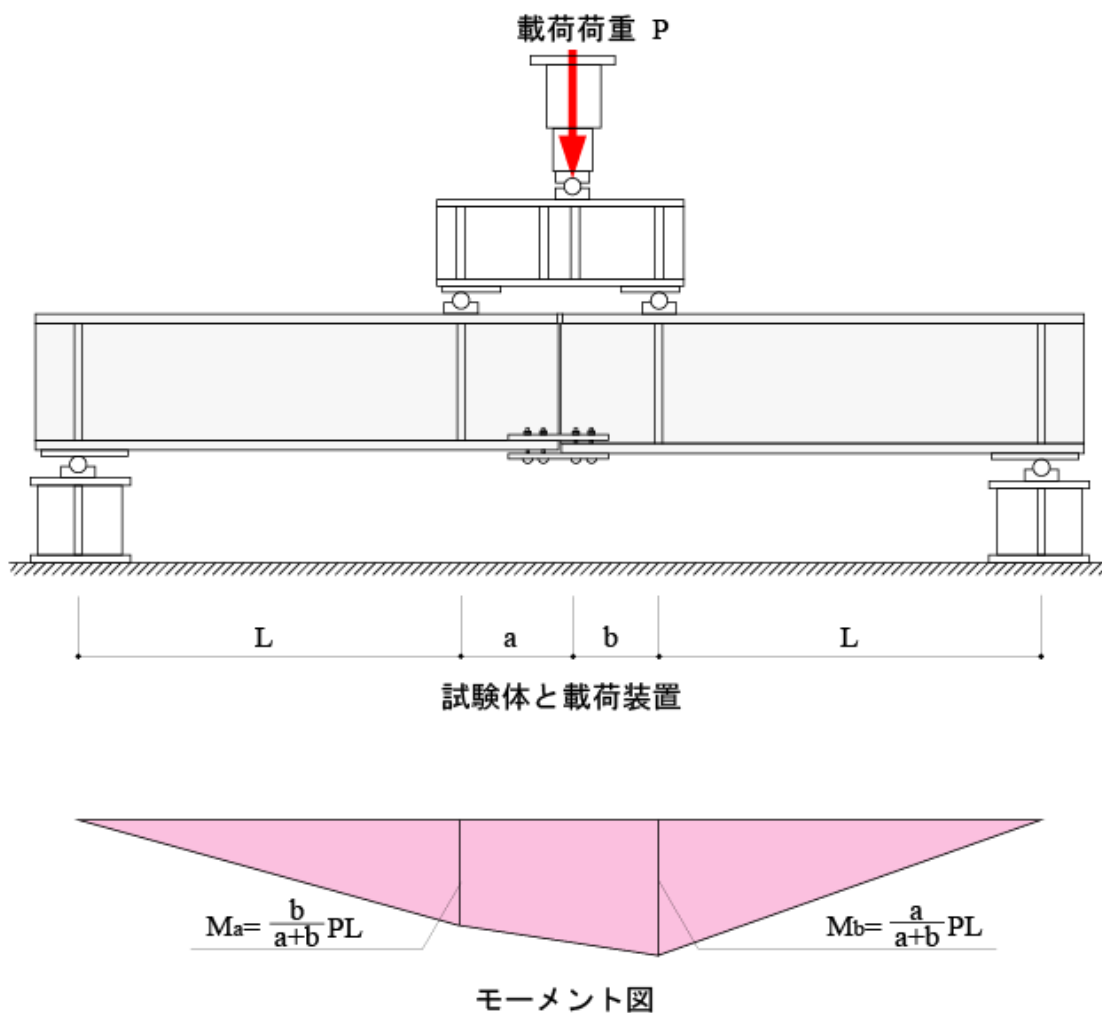


図 4-45 載荷梁の設置位置と入力モーメントの関係

4.5.3 試験体がすべり耐力に与える影響

各試験体のすべり耐力を求めるに当たり、式(2.1)、式(2.2)を利用してきたが、これらの式は、図4-46の様に上端フランジの継手の影響を全く受けず、全ての引張力が下端フランジに作用していた時に利用できる式である。上端フランジの影響を全く受けない理想的な試験体は図4-46のa)のように上端フランジがピン接合されているものである。しかしながら、試験体を作製するにあたり、上端フランジをピン接合にすることは非常に困難であった為、本実験では完全溶け込み溶接接合とした。このように、本来ならばピン接合である部分を溶接接合にした事が、すべり耐力に与える影響を確認した。

設計寸法から求めた溶接接合がすべり耐力に与える影響は次の様に算出した。詳細な計算手順は、付録1に示す。

弾性範囲内でのすべり試験である為、ピン接合と溶接接合の違いは、ピン接合ではモーメントを受け持たないが、溶接接合では上端フランジもモーメントを受け持つ事である。

すなわち、図4-47のようにひずみ分布、応力度分布が変化する。

計算方法は次の通りである。

釣合いより、式(4.6)を用いてそれぞれの中立軸までの距離 d 、 d' を算出した。

$$N_t = N_c = E \cdot \int \varepsilon A \quad dx \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(4.6)}$$

N_t : 引張合力[N]

N_c : 圧縮合力[kN]

E : ヤング係数 $2.05 \times 10^5 [\text{N}/\text{mm}^2]$

ε : ひずみ $[\times 10^{-6}]$

A : 各枚の断面積 $[\text{mm}^2]$

溶接接合の時の中立軸は $d=1.57[\text{mm}]$ 、ピン接合の時の中立軸は $d'=8.57[\text{mm}]$ であった。同じ曲率になった時のそれぞれの ε_t 、 ε_t' を式(4.6)より求める。溶接接合・溶接接合の曲率を同じと仮定すると、相似より、下記の関係式が成り立つ。

$$\varepsilon_t : (250 - 1.57 + 16) = \varepsilon_t' : (250 - 8.57 + 16)$$

$$\varepsilon_t' = 0.9735 \varepsilon_t$$

ε_t' が算出できれば、他の ε も ε_t を用いて算出できる。

$$\varepsilon_c = 0.9513 \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_c' = 0.8719 \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_x = 0.8454 \varepsilon_t$$

これらの ε より、 N_c 、 N_c' と ε_t の関係式を算出し、設計値に達する時の N_c と N_c' の差分を算出する。差分の応力が、溶接接合により消費している載荷荷重である。

$$N_c = 5030.76\varepsilon_t E$$

$$N_c' = 4882.64\varepsilon_t E$$

$$N_c - N_c' = (5030.76 - 4882.64)\varepsilon_t E = 148.12\varepsilon_t E$$

また、ボルト 4 本の試験体の設計すべり耐力は 594[kN](594000[N])である為、 $E=2.05 \times 10^5$ [N/mm²]とすると、

$$N_t' = N_c' = 4882.64\varepsilon_t E = 594000$$

$$\therefore \varepsilon_t = 593.441[\times 10^{-6}]$$

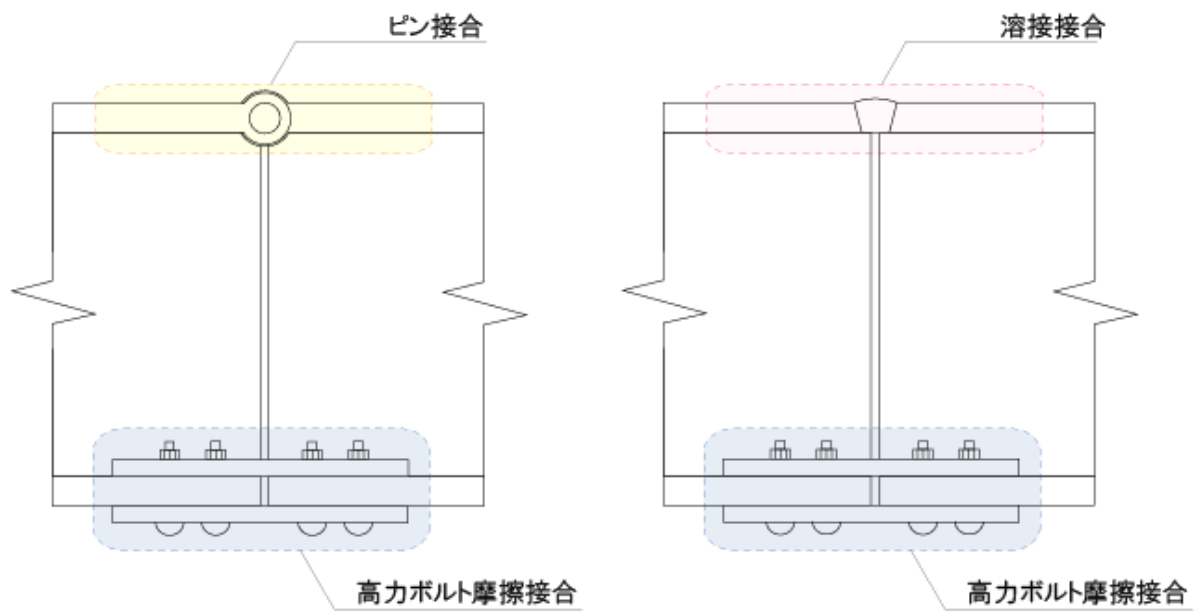
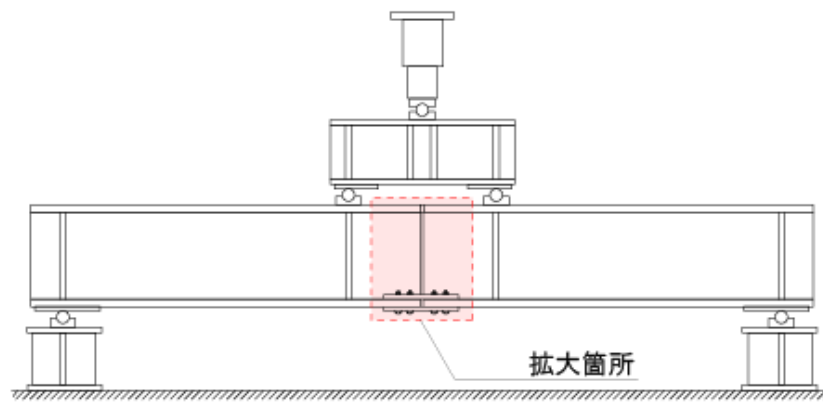
下記の式に代入すると、

$$N_c - N_c' = 148.12\varepsilon_t E = 18.02[\text{kN}]$$

したがって、ボルト 4 本の試験体において、溶接接合の試験体の方が、18.02[kN]多く载荷しなければ、ピン接合と同じ曲率にならない事になる。つまり、溶接接合部分が 18.02[kN]、引張力を消費している事になる。

ボルト 6 本の試験体についても、設計すべり耐力 891[kN]として同様に行うと、27.03[kN]となる。

また、溶接接合がすべり耐力に与える影響は、18.02[kN]、27.03[kN]をそれぞれの設計すべり耐力で除した値となる。共に影響度は 3.03[%]となった。本来よりも 3.03[%]多く荷重を入れなければならない為、すべり耐力への影響は、-3.03[%]となり、実験値のすべり耐力よりも溶接接合の影響を考慮すると、真のすべり耐力は小さい事になる。

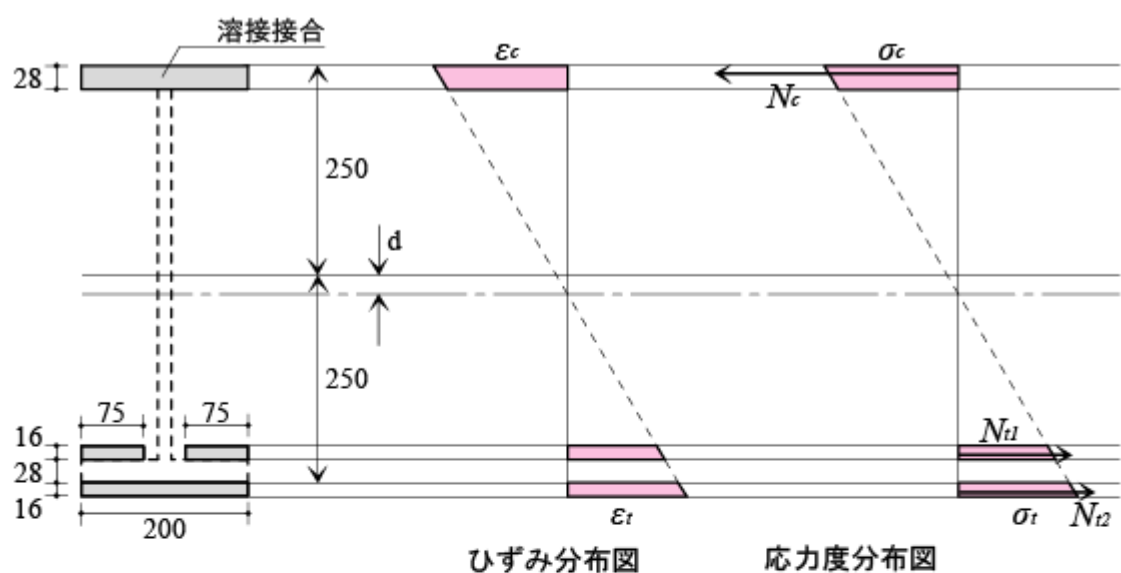


3え

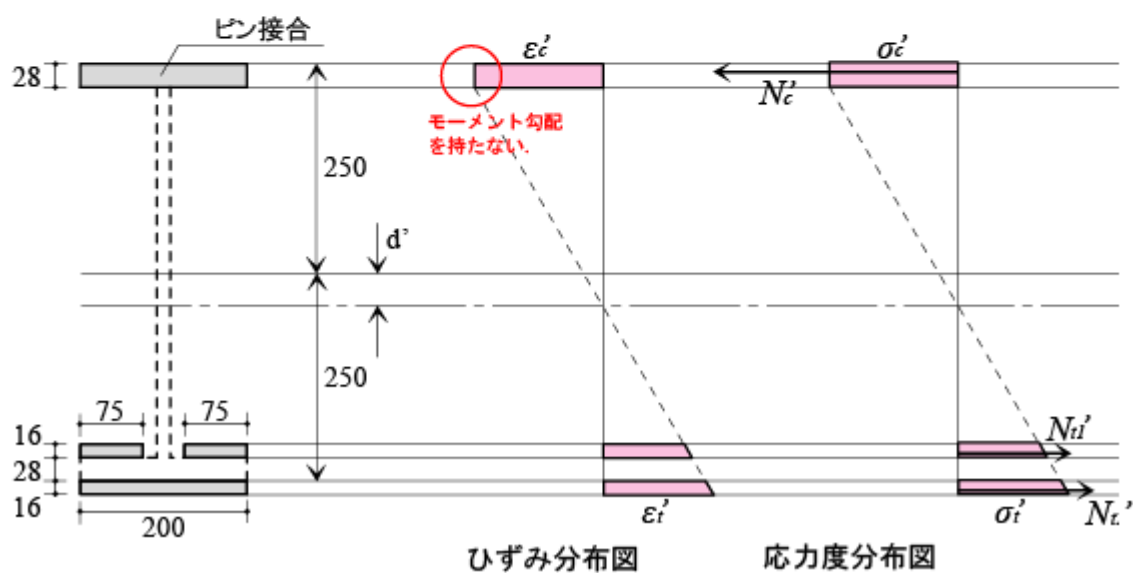
A) 理想的な試験体

B) 実際の試験体

図 4-46 理想的な試験体と実際の試験体



A) 溶接接合の時



B) ピン接合の時

図 4-47 接合方法の違いとひずみ・応力度分布図

4.5.4 入力曲げモーメントの確認

すべり試験時に理論通り、曲げモーメントが等分布で入力されているかどうか確認する為に、全試験体には試験体断面にひずみゲージを貼付していた。(図 2-13, 図 2-14 図中の A 断面参照。)各断面のひずみ分布図より、モーメントを算出し、入力曲げモーメントについて考察する。

図 2-13, 図 2-14 より、A 断面と同じ断面が試験体の東西にある。試験体 1 体について、計 2 断面、28 枚のひずみゲージについて考察した。

1) ひずみ分布図

図 4-48～図 4-51 は、各試験体のすべり荷重時の A 断面のひずみ分布図である。ただし、図 4-51 においては、載荷荷重時にゲージが切れてしまったものがあった為、すべり直前の荷重時の図である。A)は試験体に貼付したゲージ個々のひずみ分布図で、B)は、A)の東西ごとに平均した値を示している。A), B)共に、縦軸は梁せいの半分を原点としたひずみゲージ貼付位置までの距離[mm]、横軸はひずみ[$\times 10^{-6}$]である。B)においては、東西ごとの近似線の数式が示してあるが、これは 2)応力で詳細を述べる。理論値は、式(4.7)より算出した値で、載荷荷重より求めた。

$$\varepsilon = \frac{PL}{2EZ} \quad \dots \dots \dots \text{式(4.7)}$$

ε : ひずみ [$\times 10^{-6}$]

P : 載荷荷重 [kN]

L : 載荷点から支点までの距離 1430 [mm]

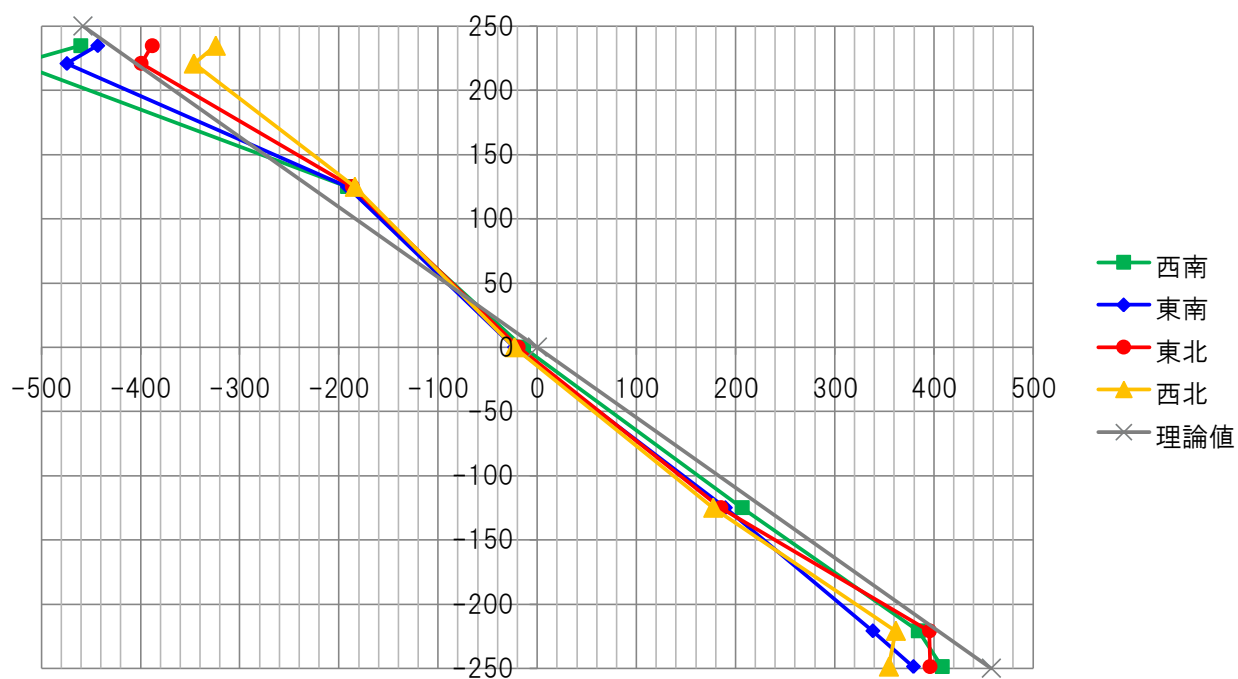
E : ヤング係数 2.05×10^5 [N/mm²]

Z : 断面係数 [mm³]

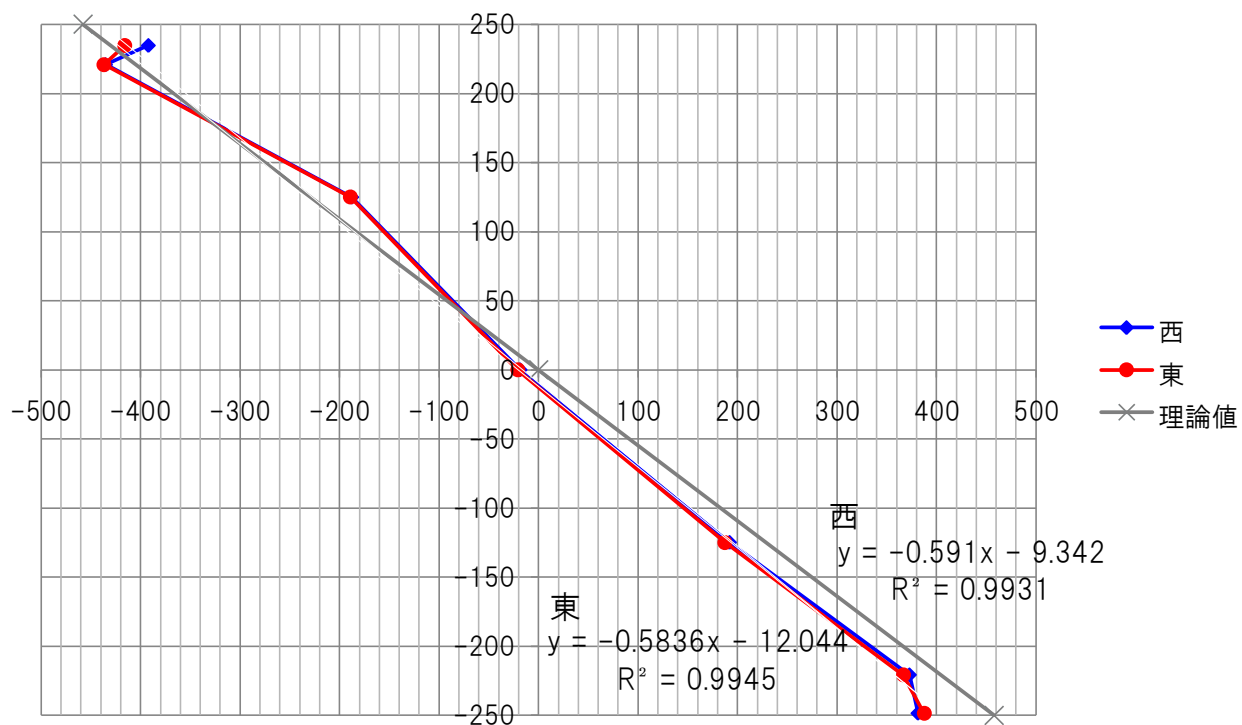
図 4-48～図 4-51 の A)は試験体の東西軸、および南北軸の 2 軸の中心に載荷荷重がかかっていたかの確認をし、B)は試験体に入力された曲げモーメントが等曲げモーメントになっているかの確認と、理論値との比較をする。

図 4-48～図 4-51 の A)から、2 軸の中心に載荷荷重がかかっているか確認するが、図 4-51 A)の $y=-125$ [mm]の点以外は、ほぼどれも同じ程度の値を示しており、4 本のグラフはよく一致している。

図 4-48～図 4-51 の B)から、グラフの西と東を比較すると、ボルト 4 本の試験体についてグラフは非常によく一致している事がわかった。ボルト 6 本の試験体は、グラフにばらつきが見られた。G0-B6 においては原点の上下に、G1-B6 においては原点の下にばらつきが見られる。理論値との比較だが、図 4-48～図 4-51 からは判断できない為、2)応力, 3)入力曲げモーメントで述べる事とする。

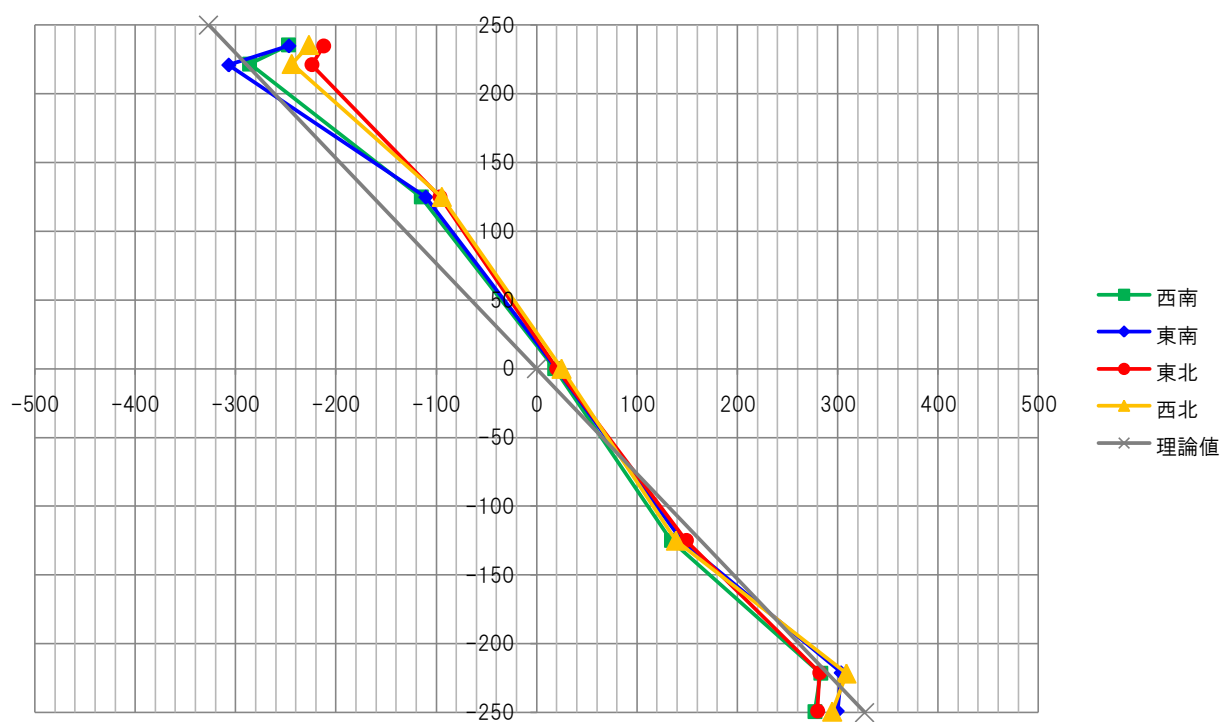


A)個々のひずみ分布図

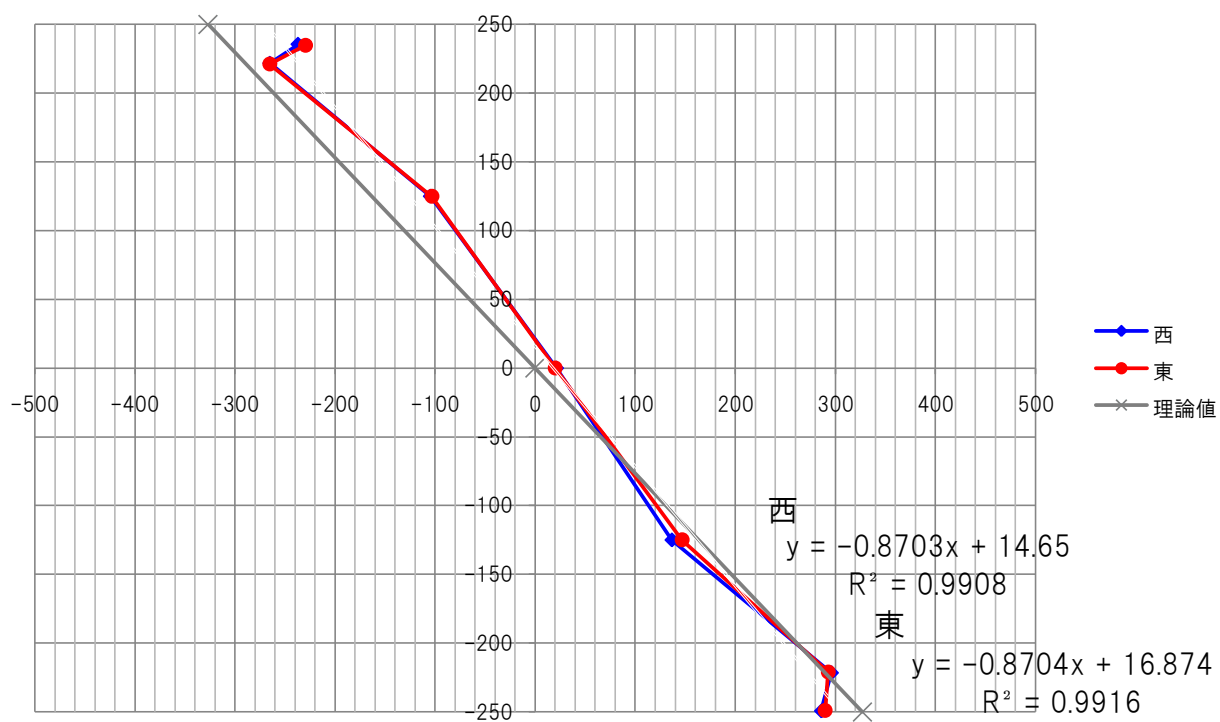


B)H 形鋼毎で平均したひずみ分布図

図 4-48 ひずみ分布図(G0-B4, 載荷荷重 394.82[kN]時)

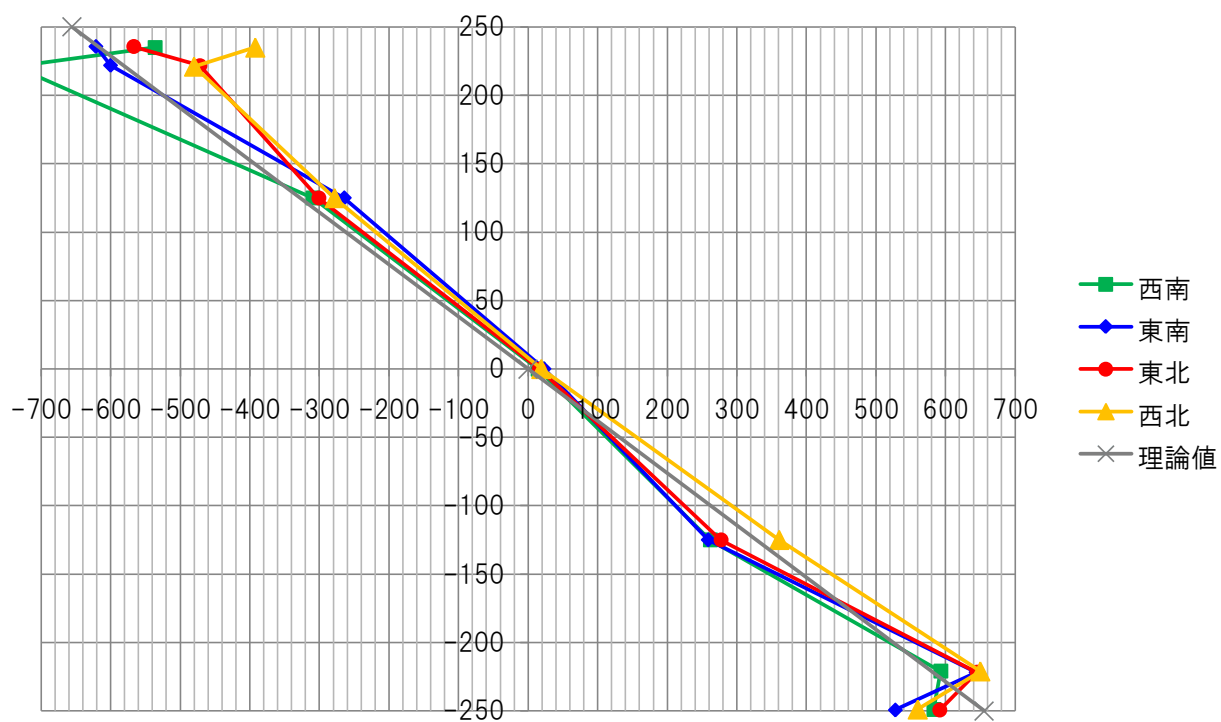


A)個々のひずみ分布図

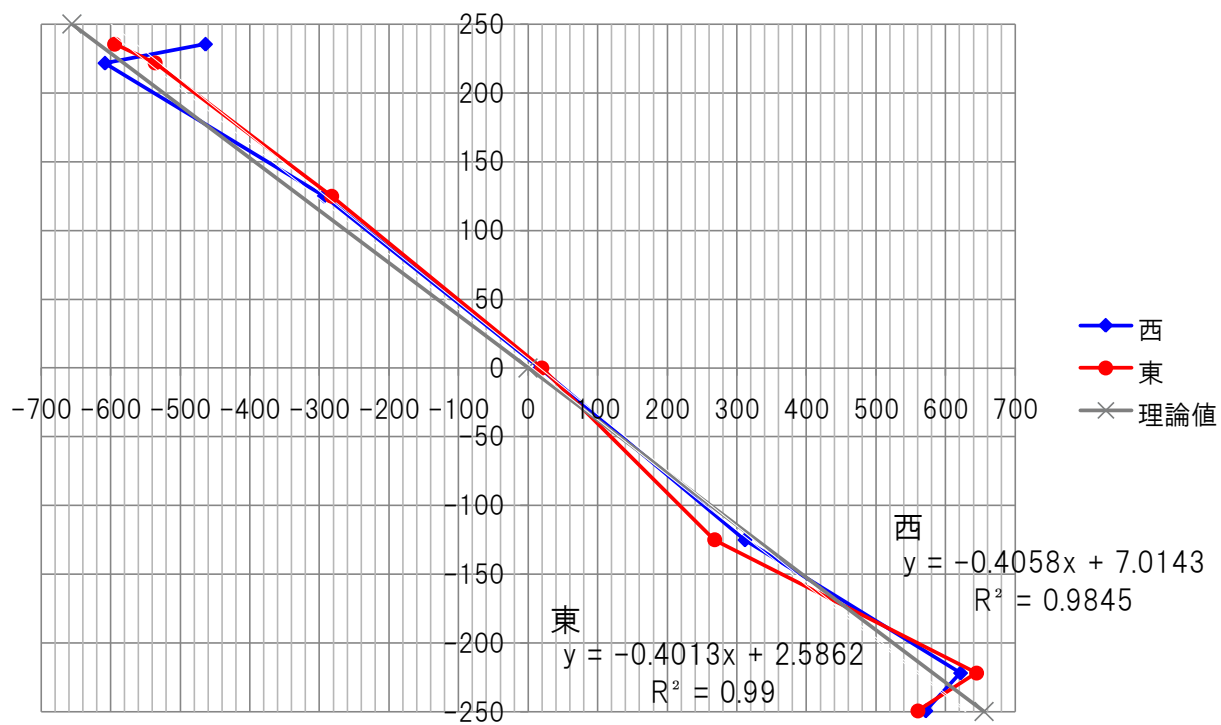


B)H 形鋼毎で平均したひずみ分布図

図 4-49 ひずみ分布図(G1-B4, 載荷荷重 282.88[kN]時)

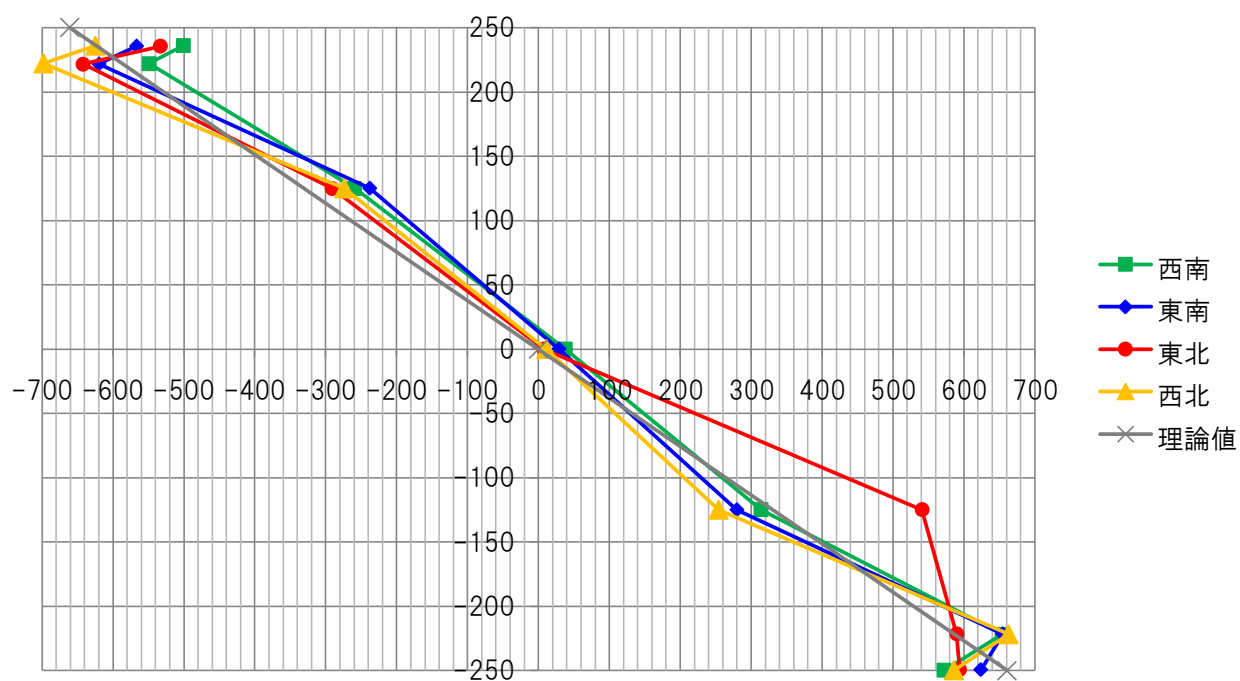


A)個々のひずみ分布図

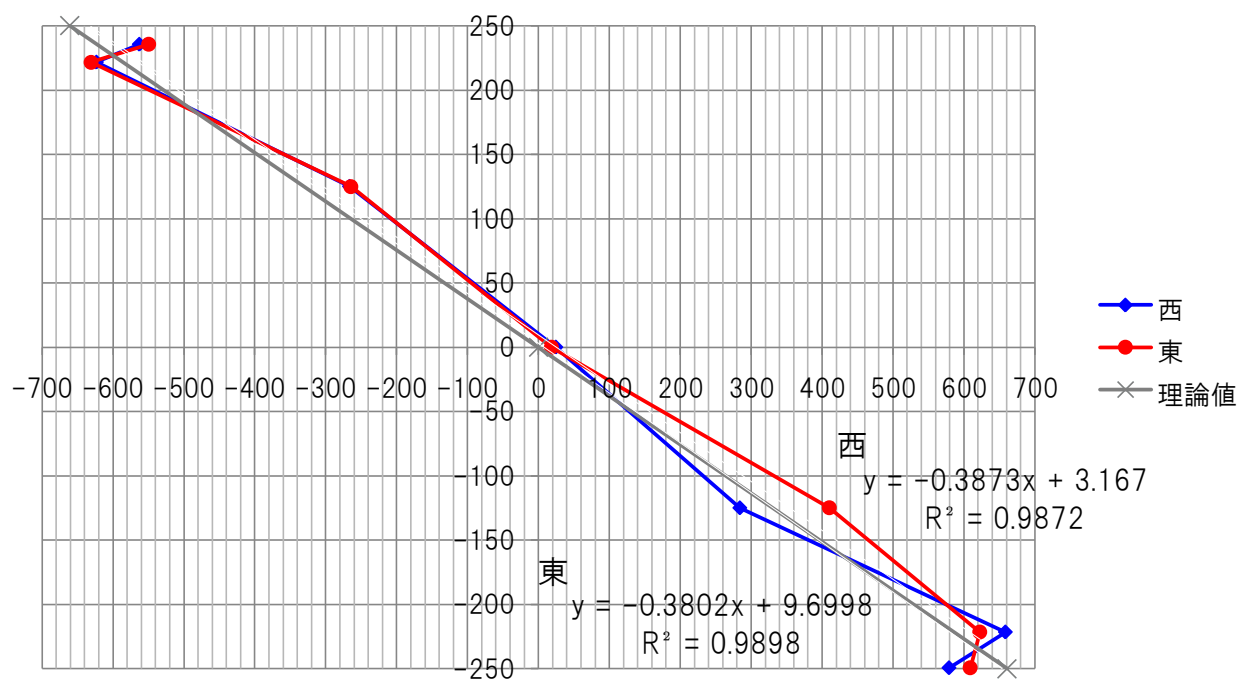


B)H 形鋼毎で平均したひずみ分布図

図 4-50 ひずみ分布図(G0-B6, 載荷荷重 564.57[kN]時)



A)個々のひずみ分布図



B)H 形鋼毎で平均したひずみ分布図

図 4-51 ひずみ分布図(G1-B6, 載荷荷重 571.42[kN]時)

2) 応力

図 4-48～図 4-51 の B)内に示した数式は、最小二乗法により求めた線形近似直線である。これらの数式を元に、東西毎のひずみから得られる応力を算出した。応力の算出方法を説明するにあたり、図 4-52 のように記号を定める。始めに、図 4-48～図 4-51 の B)から得られた線形近似直線を $y=a+b$ とし、各枚 ε_{c1} , ε_{c2} , ε_0 , ε_{t1} , ε_{t2} を求めた。また、実測寸法(図 2-7, 表 2-8 参照) より T_{FU} , T_{FL} , T_W , B_L , B_U , H_{WU} , H_{WL} を求めた。

$$N = \varepsilon EA \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(4.8)}$$

N : 応力[N/mm²]

ε : ひずみ [$\times 10^{-6}$]

E : ヤング係数[N/mm²]

A : 断面積[mm²]

式(4.8)を利用して、ひずみ分布図の圧縮側から算出した力を「圧縮力」として、引張側から算出した力を「引張力」として算出した。結果を表 4-53 に示す。算出は H 形鋼 1 本毎に行い、東と西として結果を示す。更に圧縮力と引張力の平均値を「平均」として表し、試験体 1 本としての結果を「東西平均」として示す。

$$N_{FU} = \frac{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}}{2} E_F \cdot T_{FU} \cdot B_U$$

$$N_{WU} = \frac{\varepsilon_{c2}}{2} E_W \cdot H_{WU} \cdot T_W$$

$$N_{WL} = \frac{\varepsilon_{t2}}{2} E_W \cdot H_{WL} \cdot T_W$$

$$N_{FL} = \frac{\varepsilon_{t1} + \varepsilon_{t2}}{2} E_F \cdot T_{FL} \cdot B_L$$

N_{FU} : 上端フランジの圧縮力[kN]

N_{WU} : 上端ウェブの圧縮力[kN]

N_{WL} : 下端ウェブの引張力[kN]

N_{FL} : 下端フランジの引張力[kN]

$$\text{圧縮力} = N_{FU} + N_{WU}$$

$$\text{引張力} = N_{FL} + N_{WL}$$

表 4-53 より、東西に関わらず、G0-B4 は圧縮力が大きく、他の 3 体は引張力が大きい事がわかった。引張力と圧縮力の差分、およびその割合を表 4-54 に示す。引張力から圧縮力

を引いた値[kN]を「差分」とした．更に差分を平均で除した値[%]を「差分／平均」として示し，その度合を調べた．「差分／平均」は，-12.62～18.41[%]とかなりのばらつきがみられる．これは，図 4-48～図 4-51 の B)の数式にからもわかるが，その試験体も線形近似直線 $y=a+b$ の b 項が存在し，本来は 0 であるはずの軸力が入っている事がわかる．したがって，軸力が作用している為，圧縮力と引張力に差がみられたと考えられる．軸力について，何故入るのかという考察は，3)入力曲げモーメント 補足 B)で述べる事とする．

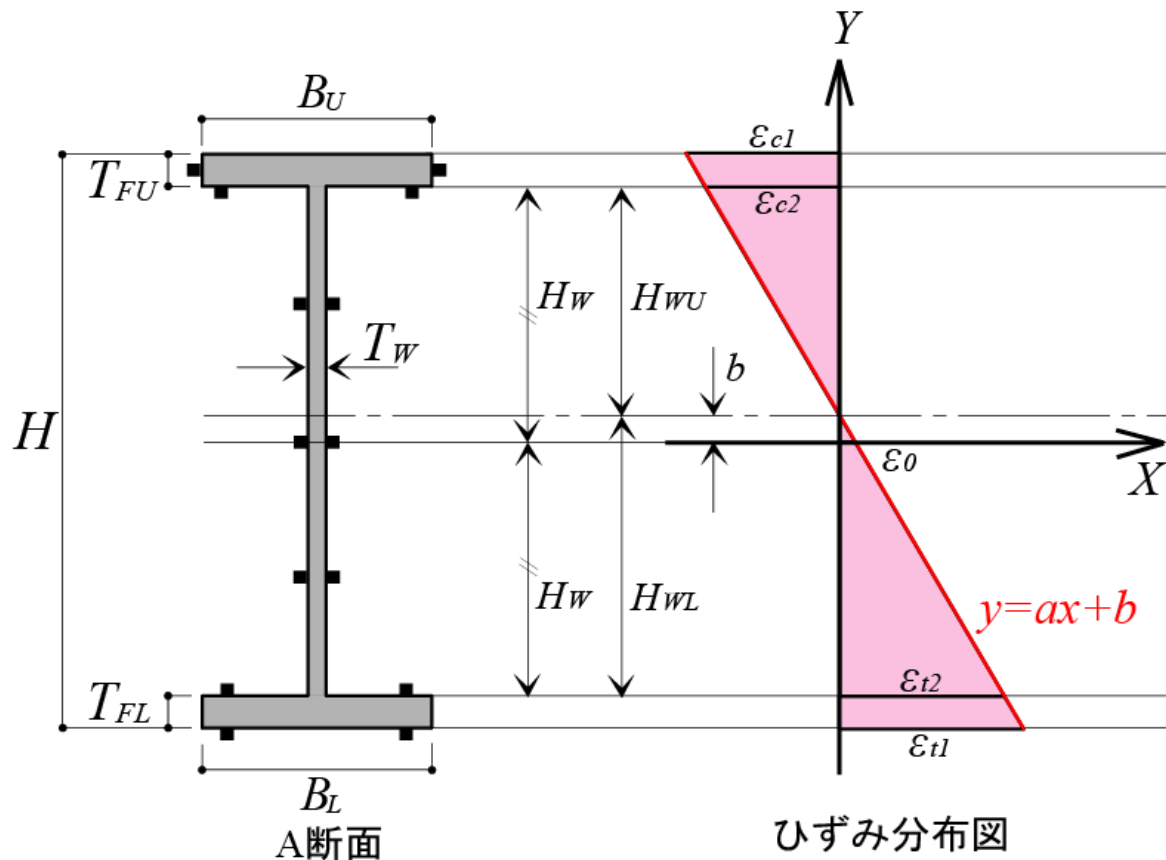


図 4-52 記号説明

表 4-53 圧縮力，引張力

試験体名	載荷荷重 [kN]	圧縮力[kN]		引張力[kN]		平均[kN]		東西平均 [kN]
		東	西	東	西	東	西	
G0-B4	394.82	649.08	630.79	572.05	572.67	610.56	601.73	606.14
G1-B4	282.88	373.29	377.25	448.97	443.84	411.13	410.55	410.84
G0-B6	564.57	871.69	845.90	894.69	912.12	883.19	879.01	881.10
G1-B6	571.42	887.52	907.05	985.70	943.06	936.61	925.06	930.83

表 4-54 圧縮力, 引張力の結果

試験体名	差分 [kN]		差分/平均[%]	
	東	西	東	西
G0-B4	-77.03	-58.12	-12.62	-9.66
G1-B4	75.67	66.59	18.41	16.22
G0-B6	23.00	66.22	2.60	7.53
G1-B6	98.18	36.00	10.48	3.89

3) 入力曲げモーメント

入力曲げモーメントを算出するにあたり, 軸力を算出する必要がある. 図 4-48~図 4-51 の B) の線形近似直線の数式から, 軸力を算出する. 算出方法は式(4.8)を利用し, 下記のように求める. 結果を表 4-55 に示す. 更に, 軸力の影響を除いた入力曲げモーメントを式(4.9)から算出し, 結果を表 4-56 に示す.

$$N_{FUN} = \varepsilon_0 E_F \cdot T_{FU} \cdot B_U$$

$$N_{WUN} = \varepsilon_0 E_W \cdot H_{WU} \cdot T_W$$

$$N_{WLN} = \varepsilon_0 E_W \cdot H_{WL} \cdot T_W$$

$$N_{FLN} = \varepsilon_0 E_F \cdot T_{FL} \cdot B_L$$

N_{FUN} : 上端フランジの軸力[kN]

N_{WUN} : 上端ウェブの軸力[kN]

N_{WLN} : 下端ウェブの軸力[kN]

N_{FLN} : 下端フランジの軸力[kN]

圧縮側の軸力 = $N_{FUN} + N_{WUN}$

引張側の軸力 = $N_{FLN} + N_{WLN}$

軸力 = $N_{FUN} + N_{WUN} + N_{FLN} + N_{WLN}$

モーメントによる圧縮力 = 圧縮力 + 圧縮側の軸力
 モーメントによる引張力 = 引張力 - 引張側の軸力

.....式(4.9)

式(4.9)より, 東西毎のひずみから得られる入力曲げモーメントを式(4.10)より算出した.

$$M = N \cdot y \quad \dots \dots \dots \text{式(4.10)}$$

M : モーメント[kN・m]

N : モーメントによる圧縮力, 引張力[kN]

y : 距離 [m]

式(4.10)を利用して、次のように各枚のひずみから得られる入力曲げモーメントを求めた。

$$M_{FU} = (N_{FU} - N_{FUN}) \cdot \left(\frac{2T_{FU}}{3} + H_{WU} \right)$$

$$M_{WU} = (N_{WU} - N_{WUN}) \cdot \frac{2H_{WU}}{3}$$

$$M_{WL} = (N_{WL} - N_{WLN}) \cdot \frac{2H_{WL}}{3}$$

$$M_{FL} = (N_{FL} - N_{FLN}) \cdot \left(\frac{2T_{FL}}{3} + H_{WL} \right)$$

M_{FU} ：上端フランジの曲げモーメント[kN・m]

M_{WU} ：上端ウェブの曲げモーメント[kN・m]

M_{WL} ：下端ウェブの曲げモーメント[kN・m]

M_{FL} ：下端フランジの曲げモーメント[kN・m]

入力曲げモーメント = $M_{FU} + M_{WU} + M_{WL} + M_{FL}$

結果を表 4-56 に示す。入力曲げモーメントが等曲げモーメント区間で、東西で一致しているか確認をする為に、東のモーメントから西のモーメントを引いた値を「差分」として示した。更に、差分の度合を知る為に、差分を平均で除した値[%]を「差分/平均」として示した。表 4-56 の「差分/平均」を見ると、全体の入力曲げモーメントの-0.02~1.37[%]で、約 1[%]程度である。これは、全試験体において等曲げモーメントが実験対象部分に入っていたと言える。

表 4-57 は、入力された曲げモーメントと理論値との比較をする為に用意した表である。理論値は、式(2.1)より載荷荷重から算出した値である。「モーメント入力率」は、表 4-56 の東、西、平均それぞれのモーメント値を理論値で除した値[%]である。モーメント入力率を見ると、88.61~99.72[%]であり、ほぼ理論通りモーメントが入っていた事がわかる。理論値に対し、約 90[%]の入力曲げモーメントが入っていた事がわかる。G1-B4 においては 88.61[%]と他 3 体と比べモーメント入力率が小さいが、これは、載荷荷重に対する軸力の影響の割合が大きい事が原因であると考えられる。割合にすると下記の様になる。G1-B4 は軸力の影響が、25.14[%]と他の 3 体と比べ、影響が大きいことがわかる。したがって、理論値と入力曲げモーメントに差が見られたと考えられる。

$$G0-B4 : -67.57 / 394.82 = 17.11[\%] \quad G1-B4 : 71.13 / 282.88 = 25.14[\%]$$

$$G0-B6 : 44.61 / 564.57 = 7.90[\%] \quad G1-B6 : 67.09 / 571.42 = 11.74[\%]$$

1)~3)をまとめると、軸力を除いて評価すると、全試験体において東西のモーメントの差分/平均が-0.20~1.37[%]であった事より、実験対象部分に等曲げモーメントがきちんとかか

っていたとわかった。

表 4-57 で、入力曲げモーメントと理論値を比較すると、90[%]以上のモーメントが入力されているここからも、非常に理論値通りのモーメントが入っていた事が分かる。

つまり、軸力が入っていない状態で、入力曲げモーメントと理論値を比較すると、G1-B4を除く他 3 体においては理論値と非常によく一致している事がわかった。(表 4-57 参照)よって、軸力がすべり耐力に及ぼす影響を、結果であるすべり耐力(表 3-17)において考慮する必要がある。軸力がすべり耐力に与える影響は、本章 4.4.5 に示す。

また、ゲージ貼付誤差があった場合、その貼付誤差がモーメントへ与える影響を補足 A)として考察したが影響は 0.02[%]なので影響はないと言える。

さらに、軸力が発生した原因については補足 B)として考察した。

表 4-55 軸力

試験体名	軸力(近似線) $N_{F\text{ 近似}}[\text{kN}]$	軸力(実測値) $N_{F\text{ 実測}}[\text{kN}]$
G0-B4	-67.57	-73.31
G1-B4	71.13	81.87
G0-B6	44.61	67.34
G1-B6	67.09	85.50

表 4-56 入力曲げモーメント

試験体名	入力曲げモーメント[kN]				差分/東西平均 [%]
	東	西	東西平均	差分(東-西)	
G0-B4	266.26	262.64	264.45	3.61	1.37
G1-B4	179.04	179.39	179.22	-0.35	-0.20
G0-B6	386.48	384.03	385.26	2.44	0.63
G1-B6	409.60	405.26	407.43	4.34	1.07

表 4-57 入力曲げモーメントと理論値の関係

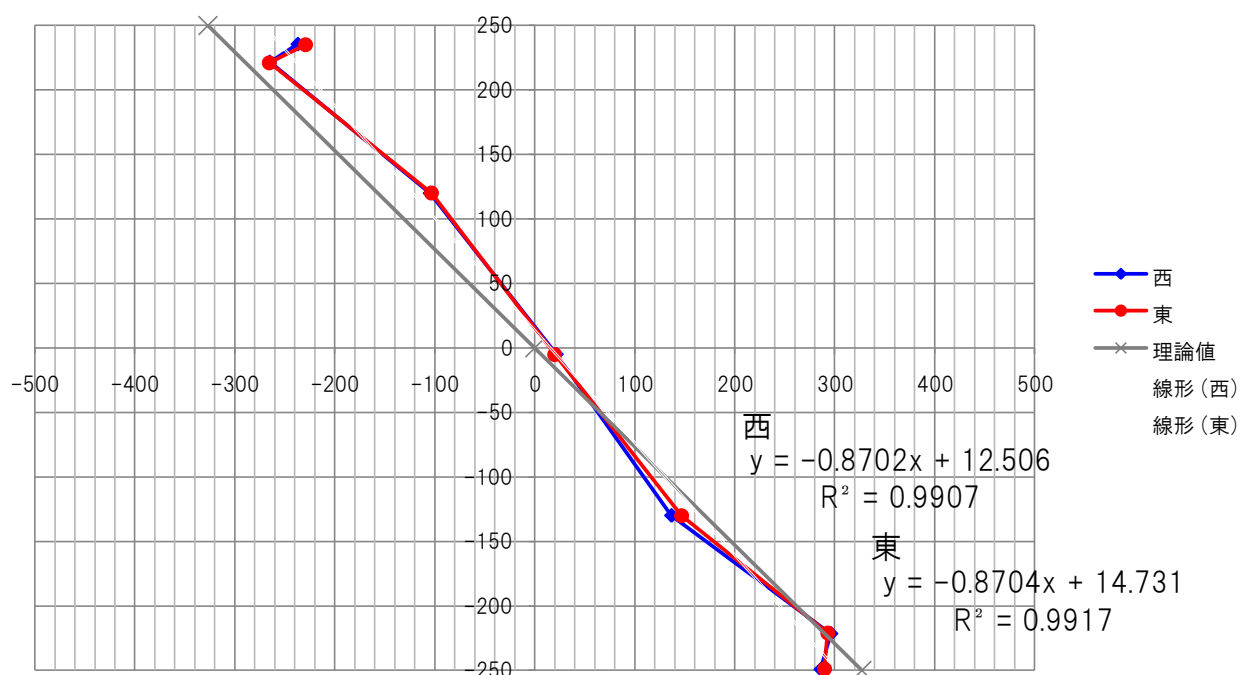
試験体名	モーメント[kN]		モーメント入力率[%]
	東西平均	理論値	東西平均/理論値
G0-B4	264.45	282.30	93.68
G1-B4	179.22	202.26	88.61
G0-B6	385.26	403.67	95.44
G1-B6	407.43	408.57	99.72

補足 A)ひずみゲージ貼付位置の誤差が入力曲げモーメントに与える影響

ひずみゲージ貼付位置の誤差が入力モーメントに与える影響について考察する。

最も貼付誤差が大きいと考えられるのは、梁せいの中央部($y=125, 0, -125[\text{mm}]$)に位置するひずみゲージであり、特に梁せいの中央 $y=0[\text{mm}]$ に貼付誤差があると、それを基準に $y=125, -125[\text{mm}]$ を貼付したので、連動して貼付誤差が発生してしまう。中央部に貼付誤差があるという事は、すなわち軸力に対して影響を及ぼすことになる。従って、補足 A)では、軸力の影響が大きかった G1-B4 についてその誤差を確認する。

中央部の貼付誤差を $-5[\text{mm}]$ ($y=120, -5, -130[\text{mm}]$) と仮定した時を考える。ひずみ分布図は図 4-58 のようになり、線形近似直線は図中に示した通りになる。この線形近似直線から、2)応力、3)入力曲げモーメントと同様の処理を行った結果を、表 4-59 に示す。「モーメント入力率」を見てもその差は $0.02[\%]$ と貼付位置の誤差は影響はないと言える。



H 形鋼毎で平均したひずみ分布図

図 4-58 ひずみ分布図(G1-B4, 載荷荷重 394.82[kN]時)

図 4-59 ゲージ貼付位置の誤差を考慮した場合の各値と入力曲げモーメント

試験 体名	すべり 荷重 [kN]	圧縮力 [kN] 東西平均	引張力 [kN] 東西平均	軸力 [kN]		入力曲げモーメント [kNm] 東西平均		モーメント 入力率 [%] 東西平均
				圧縮側 東西平均	引張側 東西平均			
G1-B4	282.88	33.61	35.66	33.61	35.66	179.22	202.26	88.61
考慮時		29.15	30.70	29.15	30.70	179.26		88.63

補足 B)軸力が入る原因に及ぼす影響について

4.5.4 3)において, 表 4-55 より全試験体において軸力が-67.57~71.13 [kN]入っている事がわかった. 理論上, 曲げモーメントしか入らないはずの試験体に軸力が作用している原因を考察する. 軸力が作用した原因を追求するにあたり, 軸力に直接関係のある試験体中央 $y=0[\text{mm}]$ に貼付したひずみにおいて, すべり試験時にどのような過程で軸力が作用したのか明確にする為に, 載荷荷重-ひずみ関係を図 4-60 に示す.

また, 載荷荷重に対する軸力の割合を知る為に, 軸力-載荷荷重関係を図 4-61 に示す.

図 4-61 の軸力算出に用いたひずみは, 線形近似直線から算出したひずみ値ではなく, 図 4-60 に示すひずみの実測値を取り扱った. 中立軸の位置は線形近似直線の $y=b$ の項とし, 軸力の算出方法は, 式(4.8), 式(4.9)を利用して, 下記の様に算出した.

$$N_{FUN\text{実測}} = \varepsilon_{0\text{実測}} E_F \cdot T_{FU} \cdot B_U$$

$$N_{WUN\text{実測}} = \varepsilon_{0\text{実測}} E_W \cdot H_{WU} \cdot T_W$$

$$N_{WLN\text{実測}} = \varepsilon_{0\text{実測}} E_W \cdot H_{WL} \cdot T_W$$

$$N_{FLN\text{実測}} = \varepsilon_{0\text{実測}} E_F \cdot T_{FL} \cdot B_L$$

$\varepsilon_{0\text{実測}}$: 断面中央 $y=0[\text{mm}]$ に貼付したゲージの実測ひずみ[kN]

$N_{FUN\text{実測}}$: 上端フランジの圧縮力[kN]

$N_{WUN\text{実測}}$: 上端ウェブの圧縮力[kN]

$N_{WLN\text{実測}}$: 下端ウェブの引張力[kN]

$N_{FLN\text{実測}}$: 下端フランジの引張力[kN]

$$\text{圧縮側の軸力} = N_{FUN\text{実測}} + N_{WUN\text{実測}}$$

$$\text{引張側の軸力} = N_{FLN\text{実測}} + N_{WLN\text{実測}}$$

図 4-61 の理論値は, 99 ページ以降に示す.

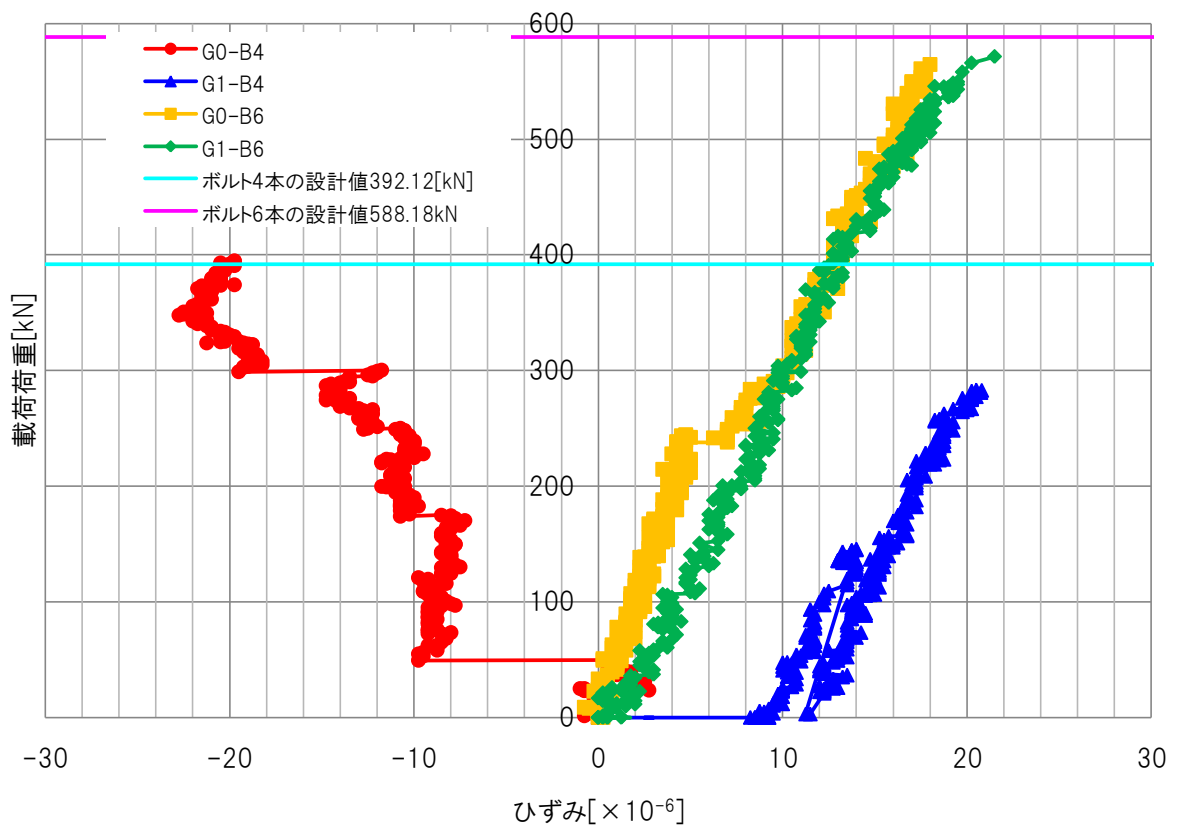


図 4-60 載荷荷重—ひずみ関係

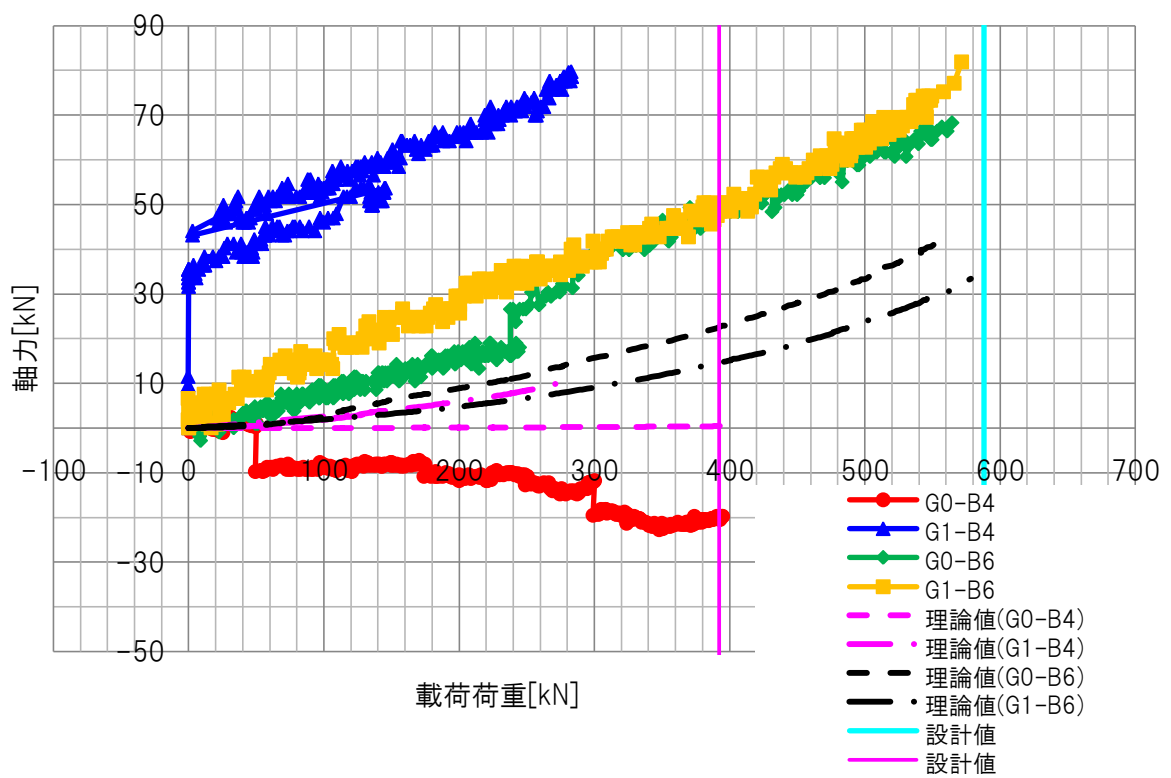


図 4-61 載荷荷重—軸力関係

表 4-62 軸力

試験体名	すべり荷重	軸力 (近似直線)	軸力 (実測値)	軸力 (理論値)	軸力(実測値)/載荷荷重
	[kN]	N_F 近似[kN]	N_F 実測[kN]	[kN]	[%]
G0-B4	394.82	-67.57	-73.31	12.33	-9.55
G1-B4	282.88	71.13	81.87	11.31	14.09
G0-B6	564.57	44.61	67.34	43.59	6.05
G1-B6	571.42	67.09	85.50	33.44	7.16

では、下記からは、軸力が入った原因の追究について言及していく。

軸力、特に引張軸力が作用する原因として、図 4-63 のように、試験装置が静定梁ではなく、不静定梁であった事が原因であると考えられる。図 4-63 の A)は、支点 A が回転支持、支点 B が移動回転支持であり、図 4-63 の B)は、支点 A, B 共に回転支持である。図 4-63 の C)は、静定梁に載荷した時であるが、支点 B が移動回転支持であるので、曲がった分だけ支点 B は左に移動し、梁の全長は l のままであるが、支点間距離は l' のように短くなる。一方、図 4-63 の D)は、両支点共に移動できないので、支点間距離 l は変わらないが、梁自身の長さは元の長さよりも増加する。

図 4-63 の C)では、支点 B が移動回転支持であるので、B 支点の水平反力は 0[kN]であり、梁に軸力は作用しないが、図 4-63 の D)では、支点 A, B をそのままの位置に保とうとして、左右の回転支持には、図のような大きさの等しい逆向きの水平反力 R_{Ax} , R_{Bx} が生じる。これらは、図 4-63 の C)において、移動した支点 B をスパン l である位置に戻そうとする力に対応しているものであり、載荷荷重、たわみ、スパンの関数で表される。図 4-63 の D)における梁自身の伸びを、 λ とおくと、おおよそ $\lambda = l - l'$ で表わされる。この伸びを生じさせているものが、図 4-63 の D)の水平力 R_{Ax} , R_{Bx} と考えれば、これらの反力は式(4.11)のようになる。文献 20)に、同様の考え方が載っており、式(4.11)は文献 20)より引用した。

$$R_{Ax} = R_{Bx} = \frac{\lambda}{l} EA \quad \dots \dots \dots \text{式(4.11)}$$

R_{Ax} , R_{Bx} : 支点 A, B の水平反力 [N]

λ : 梁自身の伸び [mm]

l : 支点間距離 [mm]

E : ヤング係数[N/mm²]

A : 梁の断面積[mm²]

実測の鉛直変位をもとに、 λ を求めると、図 4-64 のホイヘンスの近似値²¹⁾を利用して、式(4.12)の様に λ を求める事ができる。 λ が求められれば、式(4.11)より、水平反力が算出でき、軸力の理論値が算出できる。

三平方の定理より、

$$b = \sqrt{1800^2 + \delta^2}$$

ホイヘンスの近似値²¹⁾より、

$$l' = \frac{8b - 3600}{3}$$

$$\lambda = l' - 3600 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(4.12)}$$

b : 図 4-64 の B)に示す長さ [mm]

δ : 実測の鉛直変位[mm]

l' : 梁がたわんだ時の長さ[mm]

式(4.11)、式(4.12)により、算出した軸力の理論値と実測値を比較したものを図 4-65～図 4-68 に示す。また、すべった時の理論値を表 4-62 の「軸力(理論値)」に示す。

図 4-67 の G0-B6 においては、非常によく理論値と実測値が一致している。図 4-66、図 4-68 の G1-B4、G1-B6 においては、軸力の値のみに着目すると、理論値と実測値に差が見られるが、その増加率(傾き)においては、非常によく一致している。特に G1-B4 においては、実測値において初期の軸力にばらつきがみられる。したがって、初期の軸力のばらつきを考慮し、安定した軸力のみで評価すると、軸力の実測値が理論値と良く類似している事から、G1-B4、G0-B6、G1-B6 においては、不静定支点が影響して、軸力が試験体に入ってしまったと考えられる。

しかしながら、G0-B4 においては、軸力自身の作用方向が圧縮と引張で異なるため、不静定支点が原因で軸力を及ぼしているのではないと考えられる。

図 4-63 の A)のように、静定梁として、支点が作用していた場合、軸力は作用しない。しかしながら、梁自身がたわむことで、載荷荷重は支点に対して垂直に作用しているのに対して、梁は僅かにたわんで傾いているので、そこに若干の圧縮軸力が作用する場合がある。これによる圧縮軸力を算出すると、図 4-69 より、三角形の相似関係より圧縮軸力が算出できる。

三角形の相似関係より、

$$N_{\text{圧縮}} : \frac{P}{2} = \delta : 1800$$

$$N_{\text{圧縮}} = \frac{\frac{p}{2} \delta}{1800}$$

G0-B4 において、圧縮軸力について算出した結果を図 4-70 に示す。

結果、作用していたと考えられる圧縮軸力はすべったと判断した時で 0.435[kN]であり、実測値の方がかなり大きな圧縮軸力を受け待っている事がわかった。

G0-B4 においては、おそらく静定梁として支点が作用していたと考えられるが、どんなメカニズムで圧縮軸力が-73.30[kN]もかかっていたかという原因は解明できなかった。

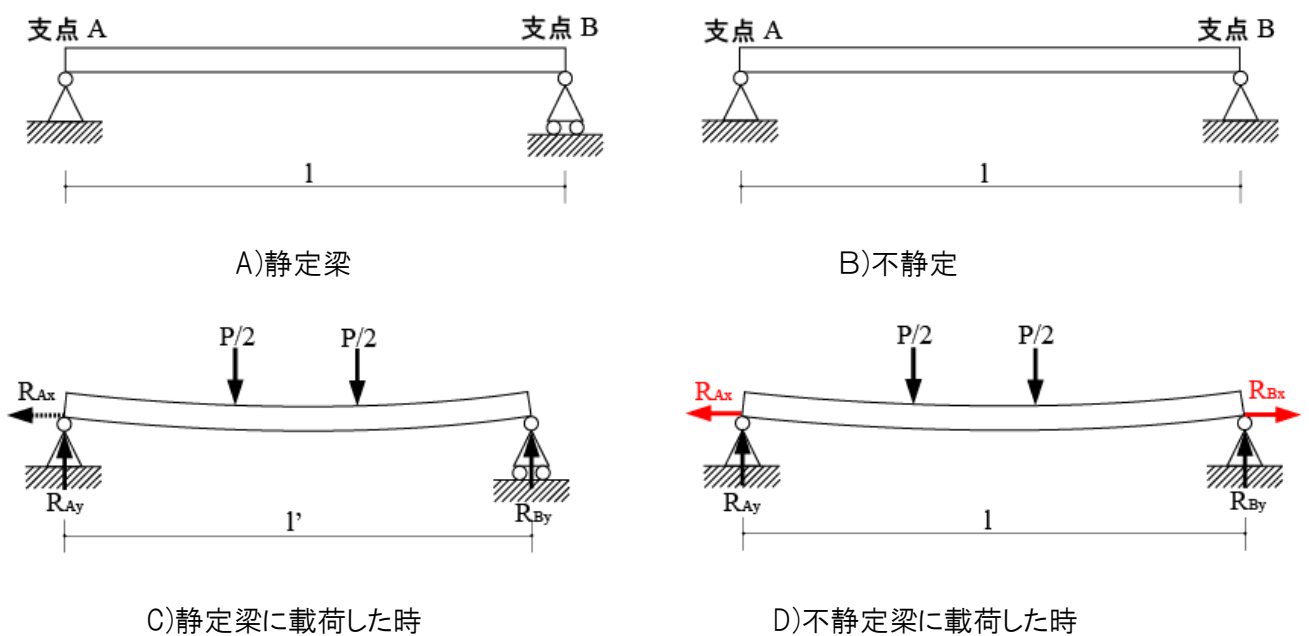
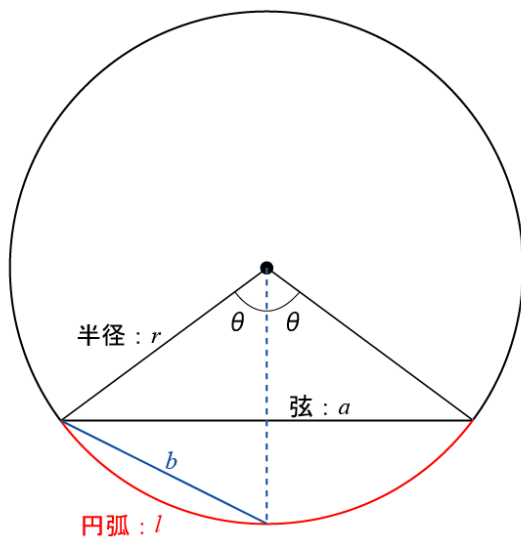


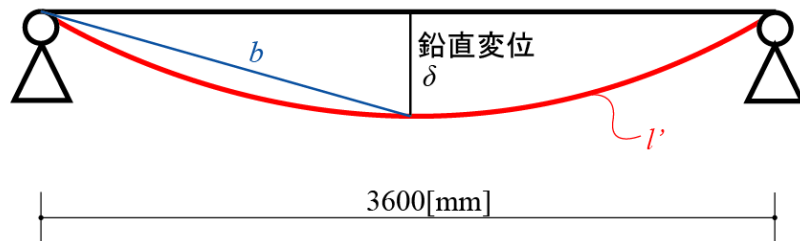
図 4-63 軸力発生の原因説明図



ホイヘンスの近似値

$$l = \frac{8b - a}{3}$$

A)ホイヘンスの近似値



B)今回の実験の力学モデル

図 4-64 ホイヘンスの近似値

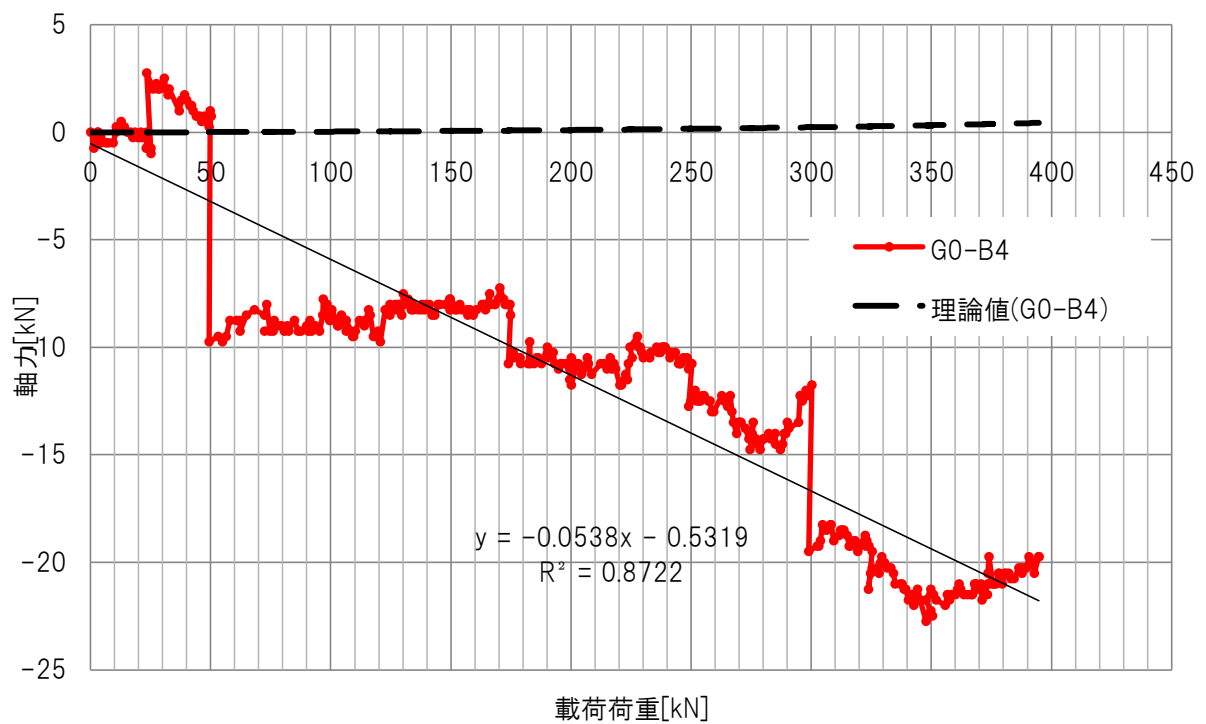


図 4-65 軸力の実測値と理論値(G0-B4)

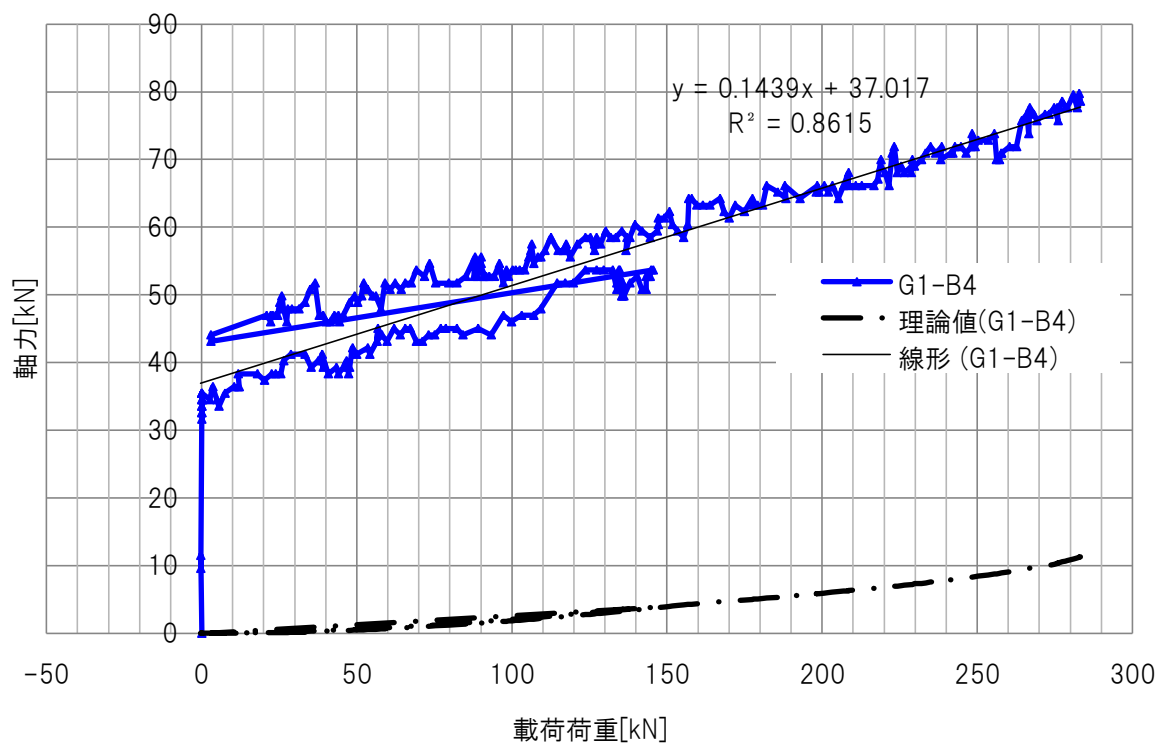


図 4-66 軸力の実測値と理論値(G1-B4)

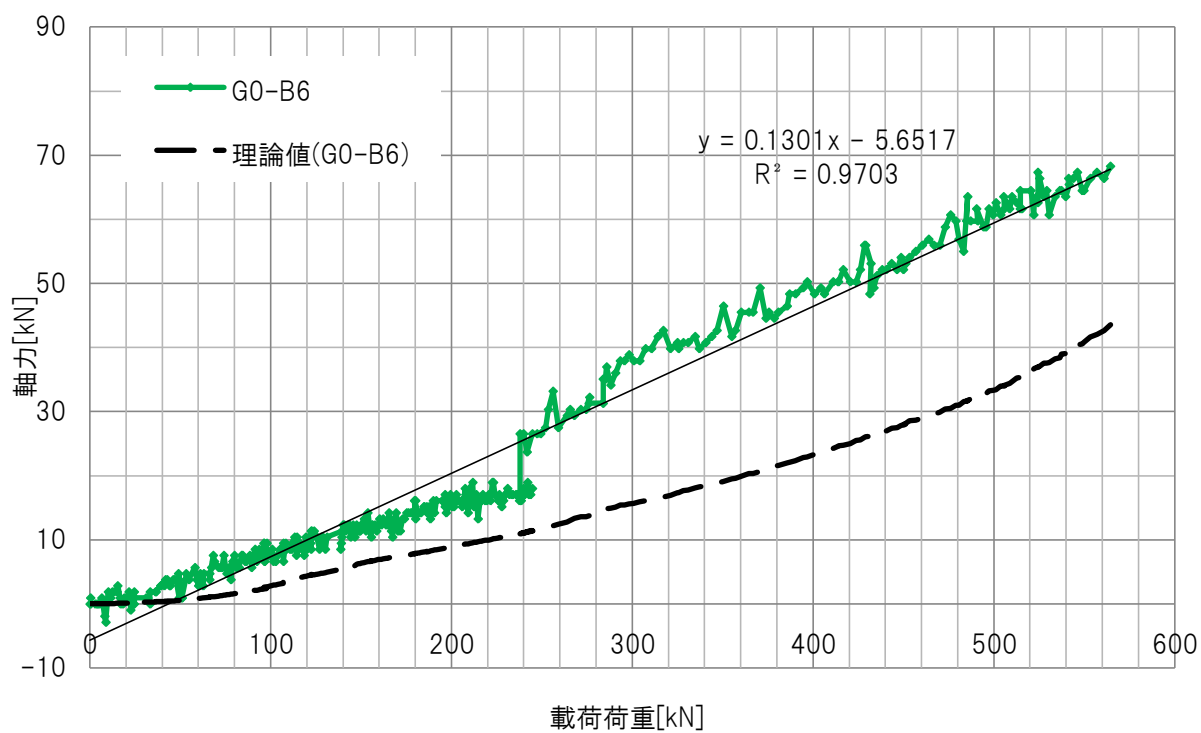


図 4-67 軸力の実測値と理論値(G0-B6)

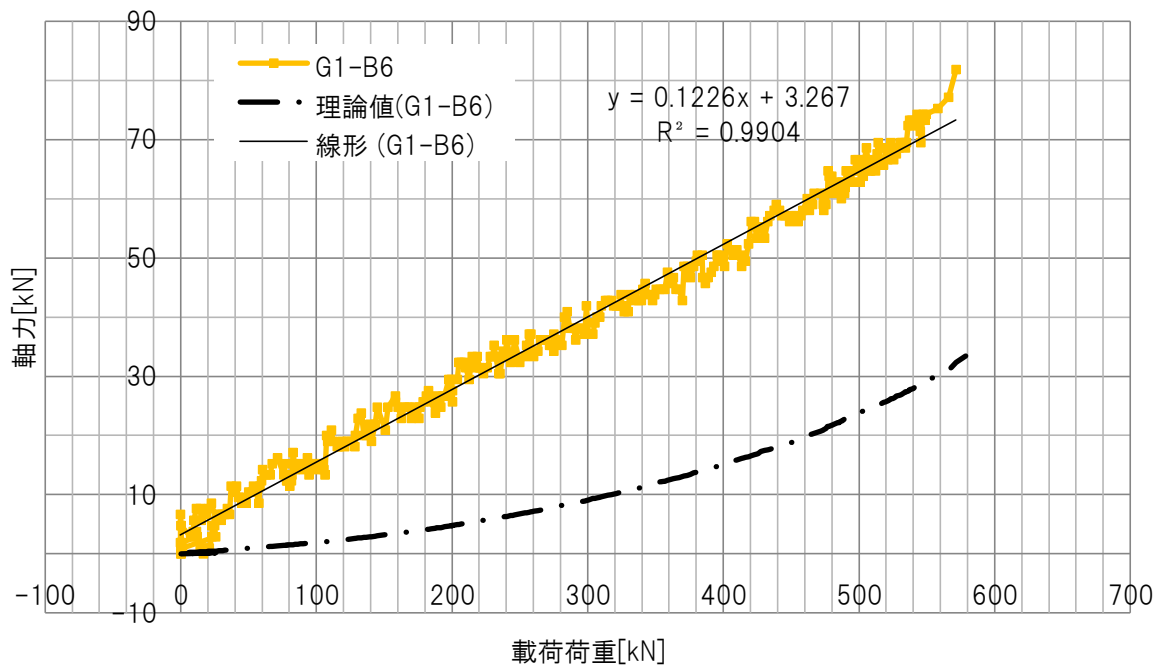


図 4-68 軸力の実測値と理論値(G1-B6)

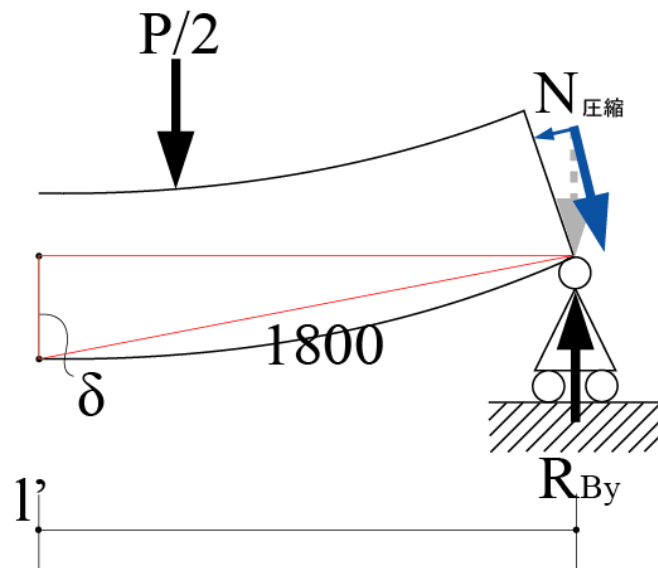


図 4-69 圧縮軸力の算出方法

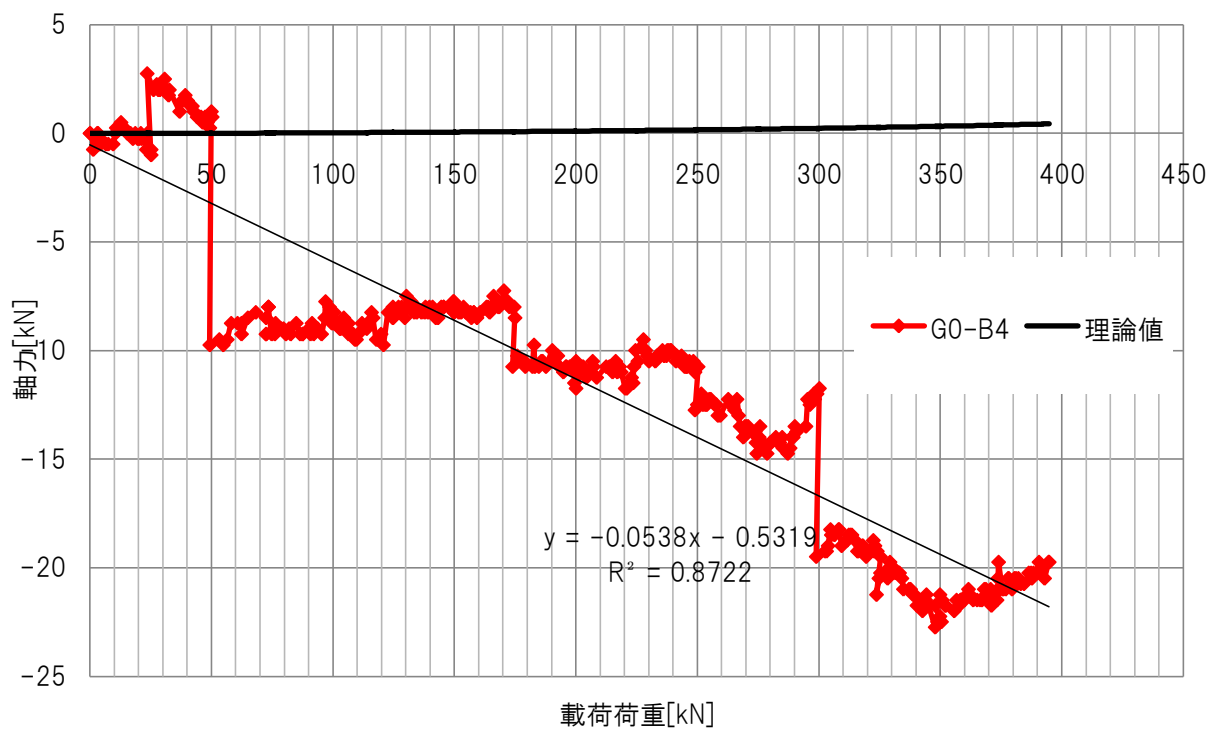


図 4-70 軸力の実測値と圧縮軸力の理論値(G0-B4)

4.5.5 軸力がすべり耐力に与える影響

本実験方法ですべり試験を行うと、試験体に表 4—55 の様に軸力が作用していることが分かった。また、4.5.4 の考察により、軸力の影響を除いたモーメントのみで評価すると、その入力曲げモーメントは、式(2.1)に示す理論理によるモーメントとほぼ等しい事がわかった。つまり、ロードセルの読みから算出したすべり耐力(表 3—17)に、軸力の影響を込みこまないと真のすべり耐力を算出できないことがわかった。

ここでは、軸力がすべり耐力に与える影響を考察し、真のすべり耐力を算出する。

まず、軸力が与えるすべり耐力の影響は、式(2.2)の N_F に直接作用する力であるので、軸力の分だけ、ダイレクトにすべり耐力の増減がある。表 4—71 に軸力の影響を示す。表 4—71 の「すべり耐力」は、すべり荷重より式(2.1)(2.2)を利用して求めた下端フランジ継手作用引張力である。軸力は、 ε_θ の実測値を用いた。更に、「すべり耐力への影響度」は、軸力(実測値)をすべり耐力で除した値[%]を示す。

表 4—71 より、軸力がすべり耐力に及ぼす影響は、G0-B4 はすべり耐力を 6.27[%]減少させ、他 3 体では 3.98～9.27[%]増加させる結果となった。今まで考察してきたすべり耐力に与える影響の中で、最も大きい影響である事がわかった。

表 4—72 に表 4—71 を用いた、軸力を考慮したすべり耐力を示す。表 4—72 の「補正值」はすべり耐力に軸力(実測値)を加算した値をボルト本数で除した値である。軸力を考慮したすべり耐力の設計すべり耐力に対する発現率は、「補正值／設計すべり耐力」に示した。結果は、ボルト 6 本の試験体においては設計値に達し、G0-B4 は 94.84[%]、G1-B4 は 79.08[%]と設計値に達しなかった。

図 4—73 は、軸力考慮前のすべり耐力と、軸力を考慮したすべり耐力を載せた、全試験体のすべり耐力比較図である。軸力を考慮したすべり耐力をみると、ボルト 4 本の試験体は設計値に達せず、ボルト 6 本の試験体は設計値に達する事がわかった。

表 4—71 軸力がすべり耐力に及ぼす影響

試験体名	すべり荷重	すべり耐力	軸力(実測値)	すべり耐力への影響度
	[kN]	N_F [kN]	$N_{F\text{実測}}$ [kN]	$N_{F\text{実測}}/N_F$ [%]
G0-B4	394.82	601.04	-73.31	-6.27
G1-B4	282.88	429.88	81.87	9.27
G0-B6	564.57	857.66	67.34	3.98
G1-B6	571.42	877.55	85.50	4.66

表 4-72 軸力を考慮したすべり耐力

試験体名	G0-B4	G1-B4	G0-B6	G1-B6
ボルト 1 本当りのすべり耐力[kN]	150.26	107.47	142.94	146.26
補正值[kN]	140.83	117.44	148.63	153.08
すべり耐力/設計すべり耐力[%]	101.19	72.37	96.26	98.49
補正值/設計すべり耐力[%]	94.84	79.08	100.09	103.08

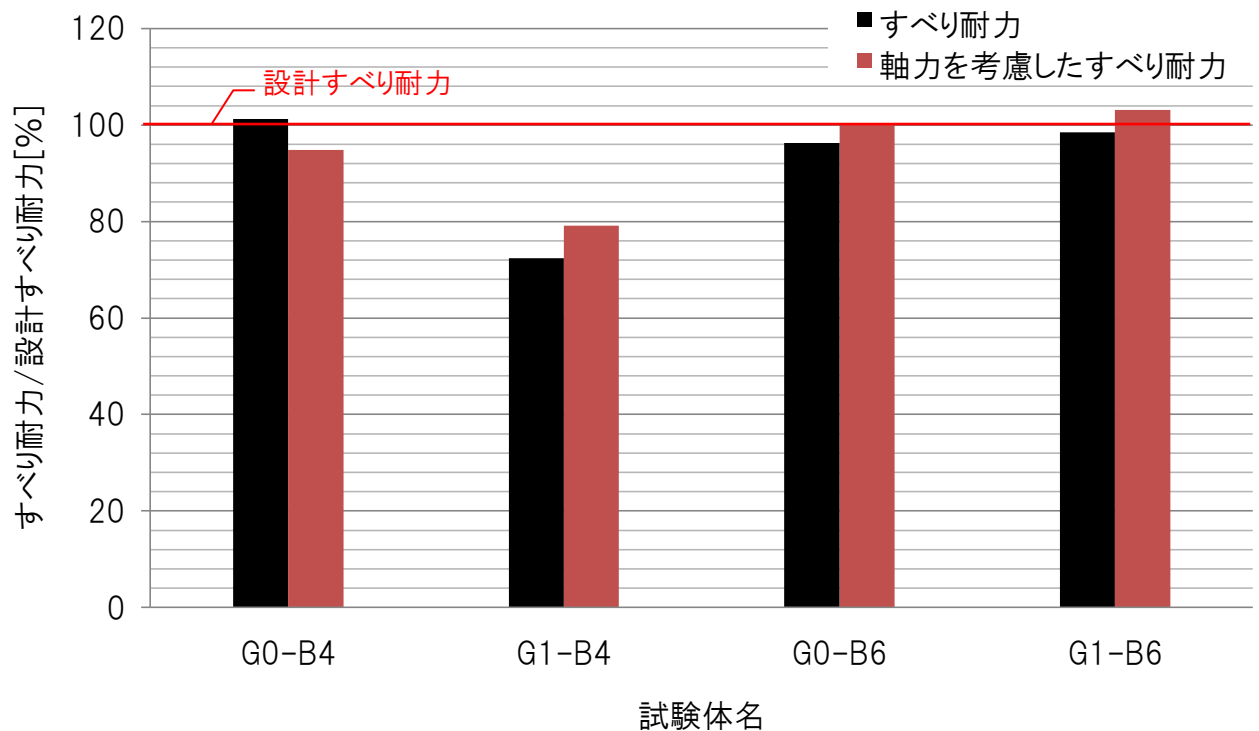


図 4-73 軸力を考慮したすべり耐力比較図

4.5.6 まとめ

ここでは、4.2～4.5.5 までの実験上様々な要因によるすべり耐力への影響を複合的に評価し、本実験の妥当性を検証する。

4.2～4.5.5 までの実験上様々な要因による複合的なすべり耐力への影響は、108 ページに示す例のように求めることができ、表 4-74 に全試験体毎のすべり耐力への複合的影響の結果をまとめた。表 4-74 より、最小-6.77[%]、最大 9.64[%]のすべり耐力への影響があるとわかった。中でも、軸力の影響はかなり大きく、本実験方法ですべり試験を実施した場合は、軸力の考慮が必要不可欠であると考えられる。

実験の妥当性については、軸力の考慮を行えば、表 4-75 の様になり最小-2.11[%]、最大 0.66[%]のすべり耐力への影響があるとわかった。

4.1 で、標準試験体実験の肌すき 1[mm]は-21.8[%]のすべり耐力への影響があり、本実験も同じ肌すき 1[mm]であれば、同程度のすべり耐力への影響が期待できると述べた。肌すき 1[mm]が及ぼすであろう影響 21.8[%]に対し、実験方法が与える影響は、-2.11～0.66[%]であった。つまり、影響度合いを比較すると、次の様な関係が成り立つ。

$$\begin{array}{ccc} \text{実験方法がすべり耐力に与える影響} & < & \text{肌すき量 1[mm]が与えるであろう影響} \\ -2.11 \sim 0.66 [\%] & & -21.8 [\%] \end{array}$$

肌すき量 1[mm]が与える影響を 100[%]と仮定すると、実験方法が与えるであろう影響は、

$$-2.11 / 21.8 = 9.68 [\%]$$

$$0.66 / 21.8 = 3.03 [\%]$$

となり、肌すき量 1[mm]が与える影響に対して、どちらも 10[%]程度しかない。実験方法がすべり耐力に与える影響は、肌すき量 1[mm]が与えるであろう影響よりかなり小さい為、本実験方法は妥当性があり、問題はなかったと言える。

すなわち、実験上混入してしまう誤差は-2.11～0.66[%]の約 3[%]である。これを踏まえ、更に軸力を考慮した実験結果(表 4-7)を見て行くと、考察目的①肌すき 0[mm]の G0-B6 が設計すべり耐力に達しなかった事については、軸力を考慮すれば、設計すべり耐力に達する事が分かった。また、代わりに G0-B4 が設計すべり耐力に達しなかったが、その低下率は、5.16～5.66[%]と、実験上混入してしまう誤差と非常に近い値である為、問題は無いと考えた。

考察項目②G0-B6 のすべり耐力よりも G1-B6 のすべり耐力の方が上であった事について を検証する。すべり耐力結果(表 4-7)を見ると、G0-B6 と G1-B6 の差は次のようになり、実験上混入してしまう誤差 3[%]と比較すると、ほぼ同程度であると言える。

$$102.09 - 98.80 = 3.29 [\%]$$

$$103.08 - 100.09 = 2.99 [\%]$$

したがって、②は実験方法による混入してしまう影響が原因で、結果が予想と逆転してしまったと考えられる。

例：G0-B4 について

■増加側

材料伸びによる影響：1.27[%]のすべり耐力の増加

自重による影響：1.03[%]のすべり耐力の増加

試験体設置位置 L+5[mm]による影響：0.35[%]のすべり耐力の増加

フランジ重心間距離 j-1.0[mm]による影響：0.21[%]のすべり耐力の増加

載荷梁設置位置 a+3, b-3[mm]による影響：0.81[%]のすべり耐力の増加

ひずみゲージ貼付誤差による影響：0.02[%]のすべり耐力の増加

溶接接合(実験値)による影響：3.03[%]のすべり耐力の減少

軸力による影響：6.27[%]のすべり耐力の減少

合計：5.61[%]のすべり耐力の減少

■減少側

材料伸びによる影響：1.27[%]のすべり耐力の増加

自重による影響：1.03[%]のすべり耐力の増加

試験体設置位置 L-5[mm]による影響：0.35[%]のすべり耐力の減少

フランジ重心間距離 j+1.0[mm]による影響：0.21[%]のすべり耐力の減少

載荷梁設置位置 a+3, b-3[mm]による影響：0.81[%]のすべり耐力の増加

ひずみゲージ貼付誤差による影響：0.02[%]のすべり耐力の減少

溶接接合(理論値)による影響：3.03 [%]のすべり耐力の減少

軸力による影響：6.27[%]のすべり耐力の減少

合計：6.77[%]のすべり耐力の減少

■増加側と減少側の差分の絶対値

$$|-4.20 - (-6.77)| = 2.57[\%]$$

表 4-74 すべり耐力に与える複合的影響のまとめ

試験体名	材料 伸び	自重	載荷点と 支点の距離 L+5	フランジ 重心間距離 j-1.0	載荷梁の 設置誤差 a+3,b-3	溶接接合 の影響 (理論,実験)	ゲージ 貼付誤差 ±5	軸力の 影響	増加側
G0-B4	1.27	1.03	0.35	0.21	0.81	-3.03	0.02	-6.27	-5.61
G1-B4	0.98	1.03	0.35	0.21	0.81	-3.03	0.02	9.27	9.64
G0-B6	0	0.69	0.35	0.21	0.81	-3.03	0.02	3.98	3.03
G1-B6	0	0.7	0.35	0.21	0.81	-3.03	0.02	4.66	3.72

試験体名	材料 伸び	自重	載荷点と 支点の距離 L-5	フランジ 重心間距離 j+1.0	載荷梁の 設置誤差 a+3,b-3	溶接接合 の影響 (理論値)	ゲージ 貼付誤差 ±5	軸力の 影響	減少側
G0-B4	1.27	1.03	-0.35	-0.21	0.81	-3.03	-0.02	-6.27	-6.77
G1-B4	0.98	1.03	-0.35	-0.21	0.81	-3.03	-0.02	9.27	8.48
G0-B6	0	0.69	-0.35	-0.21	0.81	-3.03	-0.02	3.98	1.87
G1-B6	0	0.70	-0.35	-0.21	0.81	-3.03	-0.02	4.66	2.10

表 4-75 すべり耐力に与える複合的影響のまとめ(軸力考慮の場合)

試験体名	材料 伸び	自重	載荷点と 支点の距離 L+5	フランジ 重心間距離 j-1.0	載荷梁の 設置誤差 a+3,b-3	溶接接合 の影響 (理論,実験)	ゲージ 貼付誤差 ±5	増加側
G0-B4	1.27	1.03	0.35	0.21	0.81	-3.03	0.02	0.66
G1-B4	0.98	1.03	0.35	0.21	0.81	-3.03	0.02	0.37
G0-B6	0	0.69	0.35	0.21	0.81	-3.03	0.02	-0.95
G1-B6	0	0.7	0.35	0.21	0.81	-3.03	0.02	-0.94

試験体名	材料 伸び	自重	載荷点と 支点の距離 L-5	フランジ 重心間距離 j+1.0	載荷梁の 設置誤差 a+3,b-3	溶接接合 の影響 (理論値)	ゲージ 貼付誤差 ±5	減少側
G0-B4	1.27	1.03	-0.35	-0.21	0.81	-3.03	-0.02	-0.50
G1-B4	0.98	1.03	-0.35	-0.21	0.81	-3.03	-0.02	-0.79
G0-B6	0	0.69	-0.35	-0.21	0.81	-3.03	-0.02	-2.11
G1-B6	0	0.70	-0.35	-0.21	0.81	-3.03	-0.02	-2.10

4.6 食い違いによる肌すきがすべり耐力に与える影響

4.5 までの考察により，実験方法は妥当であった事はわかった．したがって，食い違いによる肌すき 1[mm]のみがすべり耐力に与える影響を考えると，表 4-76 の様になる．表 4-76 は，表 3-17 から，各軸力($N_{F \text{ 近似}}$ ， $N_{F \text{ 実測}}$)の影響を考慮したすべり耐力である．更に，表 4-53 に示した引張力は，最もすべり耐力の真値に近い値であるので，これも評価した．

図 4-77 に表 4-76 のすべり耐力比較図を示す．縦軸はすべり耐力を設計すべり耐力で除した値[%]，横軸は試験体名である．

図 4-77 より，軸力考慮のグラフは，最も真値に近い引張力に考慮前よりも近づいている事がわかった．しかしながら，どのように軸力を評価するのが，最も良いのか分からなかった為，今回は，引張力ですべり耐力を評価した．引張力で評価したものを図 4-78 に示した．

図 4-78 より，食い違いによる肌すきの影響は，ボルト 4 本の試験体は肌すきがあると，設計すべり耐力に対し約 25%もすべり耐力を低下させる事が分かった．しかしながら，ボルト 6 本の試験体は，肌すきの有無に関わらず，すべり耐力は増加し設計すべり耐力に達した．すなわち，ボルト 6 本の安全率 1.5 倍考慮は，食い違いによる肌すき 1[mm]に効果があると言える．厳密にみると，G0-B4 は設計すべり耐力に達しなかったが，設計すべり耐力との差は 3.64[%]である．この差は，実験上混入する可能性のある誤差に非常に近い為，設計すべり耐力に達しなかったが，問題は無いと考える．また，ボルト 6 本の試験体は，G0-B6 より G1-B6 のすべり耐力の方が大きい，その差は 6.85[%]と，実験上混入する可能性のある誤差の 2 倍程度で，G1-B4 が設計すべり耐力に達しなかった明確な差に比べれば，極小さい差である為，この差も問題ないと考える．

表 4-76 実験方法による影響を排除したすべり耐力

すべり耐力の評価方法			G0-B4	G1-B4	G0-B6	G1-B6
すべり耐力 = $\frac{PL}{2j}$	考慮前	すべり耐力/設計すべり耐力	101.19	72.37	96.26	98.49
	軸力考慮	N _{F近似} /設計すべり耐力	95.34	78.20	98.80	102.09
		N _{F実測} /設計すべり耐力	94.84	79.08	100.09	103.08
引張力で評価		引張力/設計すべり耐力	96.36	75.15	101.39	108.24

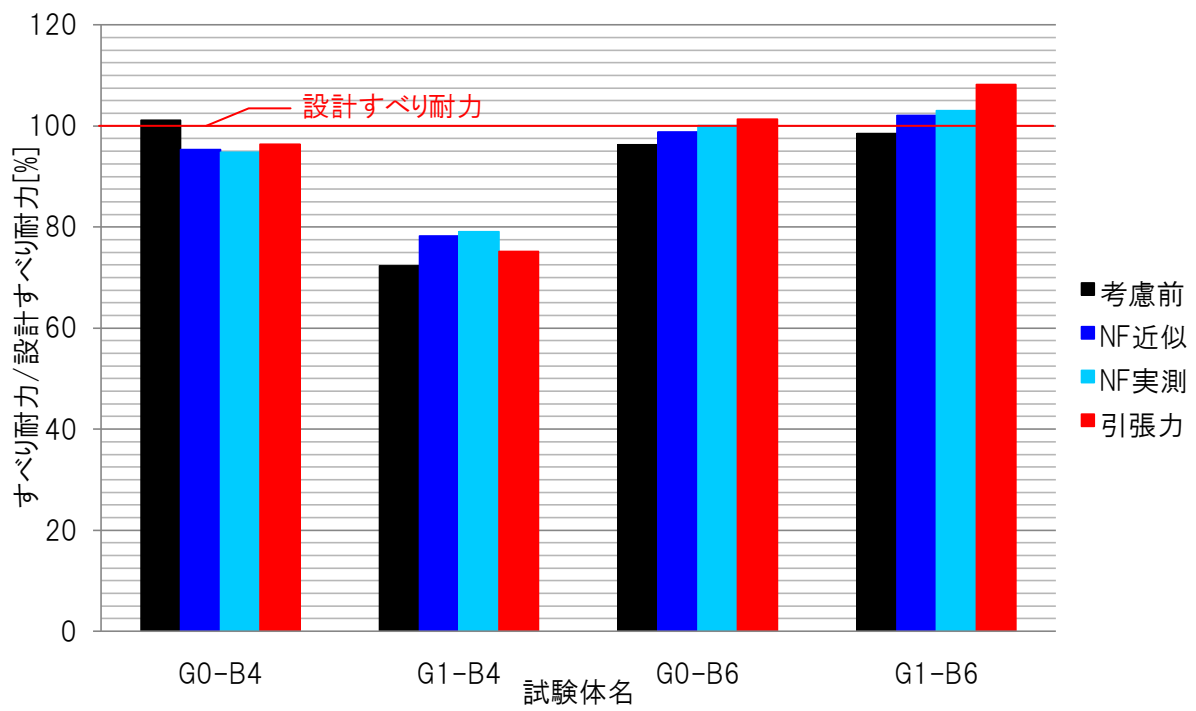


図 4-77 補正したすべり耐力の比較

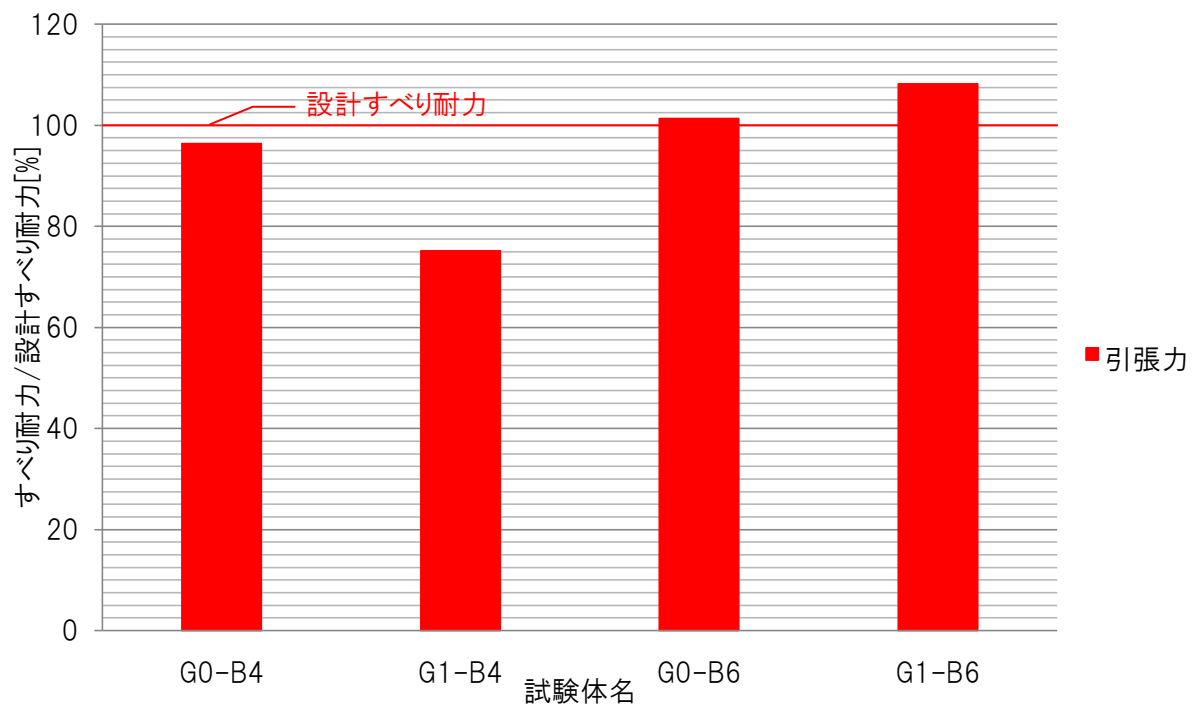


図 4-78 引張力で評価したすべり耐力の比較

4.7 肌すきの種類がボルト導入張力・すべり耐力に与える影響

本研究の最大の目的は、食い違いによる肌すきがすべり耐力にどの程度影響を及ぼすか明確にする事と、板厚差による肌すきの影響と比べ、その危険性を明らかにする事であった。食い違いによる肌すきの影響は、4.6 に示した通りであり、4.6 を踏まえた上で、板厚差による肌すきとの影響の違いを示す。

まず、異なる実験を比較するには、実験、及び試験体の条件を整理する必要がある。従って、その違いを表4-79 に示す。なお、便宜上、本実験を実大実験と名付ける。実験の差異は、載荷方法、肌すきの種類、片側ボルト本数、母材の厚み、添板の長さ(長手方向)、添板の長さ(短手方向)であり、これら以外の条件は全て同じである。これを踏まえて、4.7.1, 4.7.2 の考察を行う。

表4-79 標準試験体と実大実験の試験体についての比較

比較項目		標準試験体実験 (G0-G-T100)	実大実験 (G0-B4)	実大実験 (G0-B6)
載荷方法		単純引張力を与える	モーメントにより引張力を与える	
肌すきの種類		板厚差	食い違い	
ボルト	ボルト種類(ボルト径)	S10T(M20)		
	ボルト孔	φ22		
	ピッチ	70mm		
	片側ボルト本数	2本	4本	6本
母材	鋼材の種類	SM490		
	厚み	25mm	28mm	
添板	せん断面数	2面		
	摩擦面の処理	ショットブラスト		
	鋼材の種類	SM490		
	厚み	16mm		
	長さ(長手方向)	350mm	350mm	490mm
	長さ(短手方向)	上板 100mm 下板 100mm	上板 150mm※1 下板 200mm	
締め付け	一次締めトルク	150Nm		
設計すべり耐力		148.5kN/本		

※1：ウェブ部分は添板が無い為、ウェブを挟んだ左右2枚×1枚あたりの長さ75mm＝150mmとなる。

4.7.1 肌すきの種類がボルト導入張力に与える影響

4.1 に示したが、標準試験体実験も、実大実験も、同一のボルトを使用し、更に、試験体の鋼材の種類も同一である。肌すきの種類の違いが締め付け過程で与える影響として、ボルト導入張力の違いをここで明らかにする。食い違いによる肌すきがボルト導入張力に与える影響は、3.1.1 に示す通りである。板厚差による肌すきが与える影響は、4.1 に示す通りである。食い違いによる肌すきがボルト導入張力に与える影響(図 3-4～図 3-6 参照)と、板厚差がボルト導入張力に与える影響(図 4-11～図 4-15 参照)の差を比較すると、全体的に、食い違いによる肌すきの方が、ボルト張力の変動が大きく、締め付け対象ボルト周辺のボルト張力を減少させる傾向がある。特に、板厚差による肌すきは本締め時の張力変動が僅かなのに対し、食い違いによる肌すきは本締め時にも張力変動が大きい。

また、最終ボルト張力(表 3-7, 表 4-16 参照)を比較すると、平均張力で評価すると、肌すき 1[mm]は肌すきの種類に関係なく、どの試験体も設計ボルト張力を下回る。

ナット回転量(表 3-8, 表 4-17)は、明らかに食い違いによる肌すきの方が、大きな値が出ている。

4.7.2 肌すきの種類がすべり耐力に与える影響

表 4-79 より載荷方法・肌すきの種類(板厚差, 食い違い)以外で異なる事は、母材の厚み、添板長さ(長手・短手方向)・片側ボルト本数である。本実験と標準試験体実験は実験方法が異なるが、式(4.14)によれば片側ボルト本数さえ考慮すれば、すべり耐力の評価に母材の厚み、添板長さ(長手・短手方向)は関係しない事がわかる。したがって、本実験と標準試験体実験のすべり耐力を比較する事は妥当であると考える。

すべり耐力

$$R_s = n \cdot m \cdot \mu \cdot N_i \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式(4.14)}$$

n : ボルト本数

m : せん断面数

μ : 接合面のすべり係数

N_i : 高力ボルトの初期導入張力[kN]

肌すきの種類に着目したすべり耐力比較図を図 4-80 に示す。ボルト本数を考慮する為、縦軸はすべり耐力を設計すべり耐力で除した値[%], すなわちボルト 1 本当りのすべり耐力としている。横軸は、試験体名である。肌すきの種類に着目したすべり耐力への影響を抜き出したいので、比較は、図中の赤の試験体(G1-B4 と G05 シリーズ)で行う。

比較すると、食い違いによる肌すきがすべり耐力に与える影響と、板厚差による肌すきがすべり耐力に与える影響は、ほぼ同じである事がわかる。

次に、図 4-80 の G1-B6 と G05 シリーズを比較する。比較すると、G1-B6 の方がすべり耐力は上であり、ボルト本数を増すことによる効果が認められる。

更に、施工時、G1-B6 はナット回転法で不合格となったボルト L1 があるにも関わらず、設計すべり耐力に達した。したがって、ナット回転法で不合格となっても、安全率 1.5 倍したボルト本数を使用すれば、すべり耐力は設計すべり耐力を上回り、継手性能は確保できると言える。

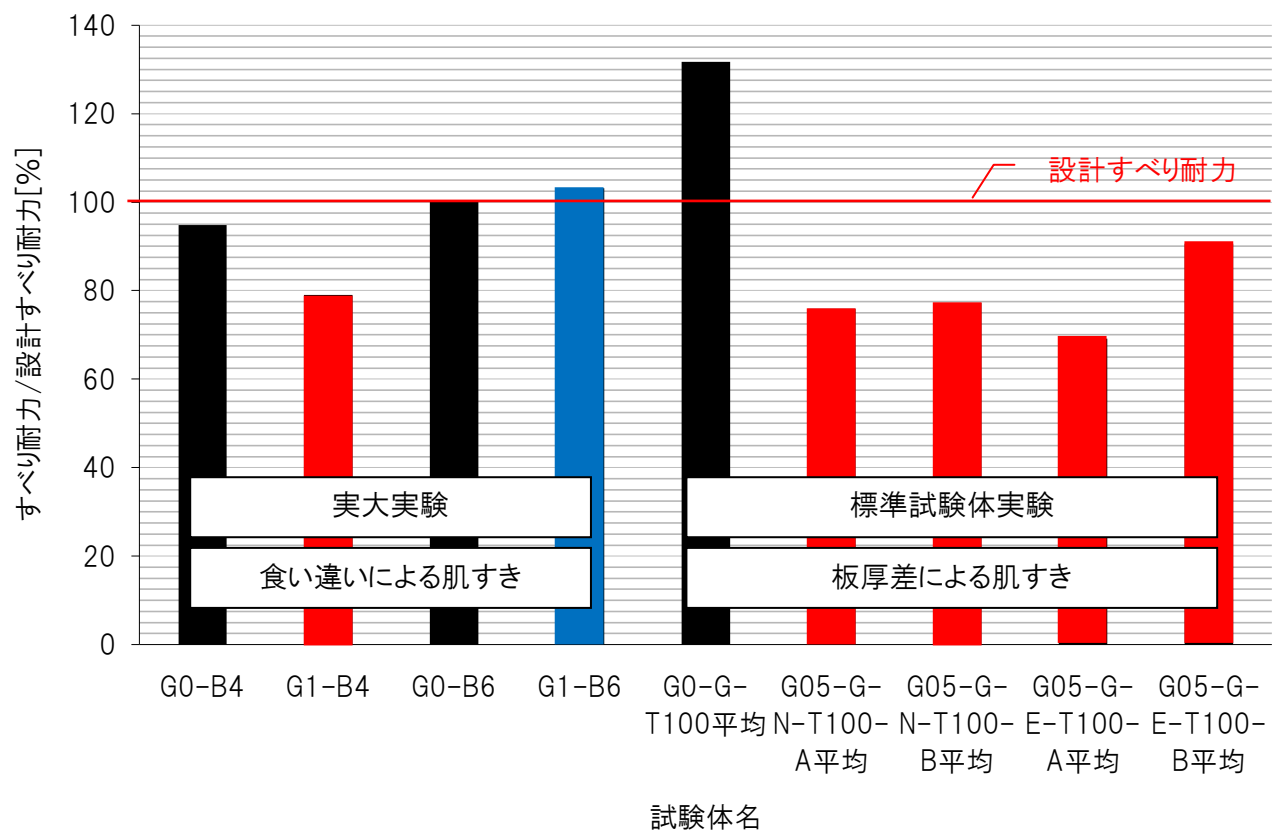


図4-80 肌すきの種類に着目したすべり耐力比較図

第 5 章 結論

5.1	まとめ	.....116
5.2	改善点	.....117
5.3	今後の課題	.....117

5.1 まとめ

本実験で得られた知見を下記に示す.

- 1) 食い違いによる肌すき 1[mm]は, ボルトの締め付け過程で, ボルト張力が変動する.
ボルト本数を安全率 1.5 倍しても, 締め付け過程でボルト張力は変動するが, その変動量は, 減少する.
- 2) 食い違いによる肌すき 1[mm]は, ボルト 4 本においては, 設計すべり耐力に達しない.
設計値の 1.5 倍(安全率を考慮)したボルト 6 本においては, 設計すべり耐力とほぼ同程度のすべり耐力を発揮する.
- 3) 食い違いによる肌すき 1[mm]と板厚差による肌すき 1[mm]は, 共にボルト導入張力の変動が見られ, 前者は一次締め時, 本締め時共に変動があるが, 後者は主に一次締め時にしか変動がない.
- 4) 食い違いによる肌すき 1[mm]と板厚差による肌すき 1[mm]は, 施工後のナット回転量への影響は前者の方が大きい.
- 5) 食い違いによる肌すき 1[mm]と板厚差による肌すき 1[mm]は, すべり耐力に及ぼす影響は同程度である.

5.2 改善点

本実験における改善点を挙げる.

- 1) 軸力が発生しないように, 静定構造となるよう支点をピンとローラー支点にし, 水平移動が可能な様にする.
- 2) ピン, 及びローラーが回転し, 支点がモーメントを持たないようにする. また, 支点がモーメントを持った時に結果から考慮できるように, ピンに回転をチェックする.

5.3 今後の課題

- 1) ボルト 6 本(設計値の 1.5 倍)は, 効果がある事を確かめる為に, ボルト 6 本の板厚差の肌すき 1[mm]を有する標準試験体実験によるすべり試験を行う必要がある.
- 2) 食い違いによる肌すき量が 1[mm]を超えた時のすべり耐力への影響を明らかにする必要がある.
序論でも述べたが, 食い違いによる肌すきは最悪の場合, 最大 6[mm]にもなる. 食い違いによる肌すき量 1[mm]を超えた時のすべり耐力への影響は, 板厚差の肌すきと同等とは限らない. したがって, 今後, 研究を進める必要がある.
- 3) フィラープレートを挟んだ試験体によるすべり耐力への影響を明らかにする必要がある.

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨工事標準仕様書，JASS6，鉄骨工事 2007
- 2) 日本建築学会：鉄骨工事技術指針・工事現場施工要 2007
- 3) 岡田久志，志水和宏
「肌すきを有する高力ボルト摩擦接合重ね継手のすべり耐力に関する研究」
日本建築学会構造系論文集 第 570 号 p.159～p.166，2003.8
- 4) 内田直樹，降井繁蔵，西仁，西田芳弘，福井実，川村政美
「高力ボルト摩擦接合の肌すきの影響に関する実験」(その 1 実験)
日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)p.1199～p.1200，1976.10
- 5) 内田直樹，降井繁蔵，西仁，西田芳弘，福井実，川村政美
「高力ボルト摩擦接合の肌すきの影響に関する実験」(その 2 実験結果の考察)
日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)p.1200～p.1202，1976.10
- 6) 川村満，大越俊男，三町直志，後藤徳広
「肌すきのある接合部におけるトルシア形高力ボルトのすべり耐力試験」
日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)p.1407～p.1408，1993.9
- 7) 矢部喜堂，高橋正明，菊川春三，草深博道
「高力ボルトの締め付け施工に関する実験的研究」(その 2 部材締め付けにおける材間圧力の測定)
日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) p.1851～p.1852，1982.10
- 8) 高橋正明，矢部喜堂，菊川春三，草深博道
「高力ボルトの締め付け施工に関する実験的研究」(その 3 大型高力ボルト摩擦継手のすべり耐力)
日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) p.1853～p.1854，1982.10
- 9) 田中清，山田周平，山崎真司
「肌すきを有する高力ボルト摩擦接合部のすべり耐力について」
日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) p.1315～p.1316，1977.10

- 10) 橋本篤秀，北後壽，松下一郎
「ナット回転法に関する実験的研究」
日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) p.1187～p.1188, 1973.10
- 11) 橋本篤秀，北後壽，松下一郎
「ナット回転法に関する実験的研究」
日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) p.1045～p.1046, 1974.10
- 12) 橋本篤秀，北後壽，松下一郎，守屋一彦
「ナット回転法に関する実験的研究」(その3，肌すきのある摩擦接合部の迂り耐力)
日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) p.939～p.940, 1975, 10
- 13) 橋本篤秀，北後壽，松下一郎，守屋一彦
「ナット回転法に関する実験的研究」(その4，肌すき板締付け時の群ボルトの軸力変動)
日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) p.941～p.942, 1975.10
- 14) 日本建築学会 鉄骨工事技術指針・工事現場施工編
- 15) 日本建築学会 高力ボルト接合設計施工ガイドブック 1996 年改訂
- 16) 安形昌文，平林典久，川口淳，早藤正勝
「肌すきを有するトルシア形高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力に関する基礎的研究」
- 17) 下篠晃，牧野俊雄，五十嵐規矩夫，鈴木敏郎
「繰り返し荷重を受ける高力ボルト摩擦接合部のすべり挙動と耐力評価(高力ボルト接合部のすべり挙動に関する研究 その2)」
日本建築学会学術講演梗概集(北陸)p.953～954, 2002.8
- 18) 田中淳夫
鉄骨技術(STRUCTEC)：連載技術講座高力ボルト接合,8.高力ボルト接合の工作 p72～77, 1994.3
- 19) 財団法人 日本規格協会,JIS ハンドブック 鉄鋼Ⅱ 棒・形・板・帯/鉄管/線・二次製品 2010.
JIS G3192

20) 鶴戸口英善，川田雄一，倉西正嗣
材料力学(上巻)，東京裳華房，1957.5－1959.3

21) 入江盛一
微分学，培風館，1958.10

謝辞

本研究において、共同研究をして頂いた株式会社 中央鉄骨、早藤正勝氏に深く御礼を申し上げます。そして、本研究において、大変熱心なご指導をして頂いた三重大学大学院工学研究科建築学専攻、川口淳准教授に深く御礼を申し上げます。川口先生には、問題児でよく涙する私に対し、真っ正面から向き合い、根気よく私の欠点を指摘し続け、お叱り頂きました。ゼミ中もなかなか理解できない私に対し、私の本質を見抜き、社会に出るに当って必要不可欠なロジックに物事考える力を一から教えて頂きました。今まで誰も気づかなかった部分を3年間も、ご指摘し続け、直してやろうと熱心に御指導して下さいた事に、感謝の言葉ありません。生卵の殻の剥き方からはじまり、本当に多くの事を教えて頂き、ワークショップ等沢山のイベントで楽しませて頂きました。苦しく辛いこともありましたが、他でない川口先生のもとで3年間過ごせた事、心から嬉しく思います。

また、株式会社 竹中工務店、安形昌文氏には大学院卒業後であるにも関わらず、実験方法や進め方等ご相談に乗って頂き、ありがとうございました。三重大学工学部・工学研究科技術部、新美治利氏には実験の手伝いに終日付き合ってもらったり、パソコンのことや実験必要品の発注等までお手伝い頂きありがとうございました。三重大学創造開発研究センター・産学連携研究員、平林典久氏には、研究の進め方、実験の方法、実験から論文等、多くのご相談に乗って頂き、誠にありがとうございました。

川口研究室、橘さん、早坂君、柘植さん、仲矢君、野村君、西村君、孔君、忙しい中、実験及び実験の準備と、多大な時間お手伝い頂きありがとうございました。力仕事が多く、私1人ではできないことが山ほどありましたが、みなさんのご協力で進めることができました。

川口研究室の皆様には、数多くの意見、アドバイス、ご相談に乗って頂きました。皆様のご協力に感謝しております。

ここに、本研究においてご協力をして下さった多くの皆様に深く感謝の意を申し上げます。

付録

考察に出てくる詳細な計算方法を記した付録を示す。

付録 1

①

最終結果 溶接の部④

No. _____
Date _____

上端フランジがピン接合ではなく、溶接接合の時のすべり耐力への影響度
 <設計寸法に相当>

<溶接の時> <ピン時>

(i) 中立軸を求める。
 <溶接の時>
 中立軸の位置を d と置く。
 弾性範囲内ですべり試験を行っているので、上記の様にひずみ分布図が成る。
 三角比より、

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_c(250+d-28)}{250+d} \quad \dots ①$$

$$\epsilon_y = \frac{\epsilon_t(250-d)}{250-d+16} \quad \dots ②$$

$$\epsilon_z = \frac{\epsilon_t(250-d-28)}{250-d+16} \quad \dots ③$$

$$\epsilon_w = \frac{\epsilon_t(250-d-44)}{250-d+16} \quad \dots ④$$

又、 $\epsilon_c = (250+d) = \epsilon_t = (250-d+16) \times$

$$\epsilon_c = \frac{250+d}{250-d+16} \cdot \epsilon_t \quad \dots ⑤$$

$$N = E \int \epsilon \cdot A \quad \text{より}$$

$$N_c = E \times \frac{\epsilon_c + \epsilon_x}{2} \times 28 \times 200 \quad \dots ⑥$$

$$N_t = N_{t1} + N_{t2}$$

$$= E \times \frac{\epsilon_z + \epsilon_w}{2} \times 16 \times 75 \times 2 + E \times \frac{\epsilon_t + \epsilon_y}{2} \times 16 \times 200 \quad \dots ⑦$$

⑥に、⑤と①を代入して整理すると、

$$N_c = 2800 E \cdot \frac{472+d}{266-d} \cdot \epsilon_t \quad \dots ⑥'$$

(2)

No.

Date

⑦に、②～④を代入して整理すると、

$$N_t = \frac{800 \varepsilon_t E}{266 - d} \cdot (1674 - 7d) \quad \dots \textcircled{7}'$$

中立軸は、 $N_c = N_t$ が条件なので、

⑥' = ⑦' とすると、

$$2800 E \cdot \frac{472 + 2d}{266 - d} \cdot \varepsilon_t = \frac{800 \varepsilon_t E}{266 - d} (1674 - 7d)$$

$$\therefore d = 1,571.4$$

<ヒンジの時>

中立軸の位置を d' と置く。

三角形より、

$$\varepsilon_f' = \frac{\varepsilon_t' (250 - d')}{250 - d' + 16}$$

$$\varepsilon_z' = \frac{\varepsilon_t' (250 - d' - 28)}{250 - d' + 16}$$

$$\varepsilon_w' = \frac{\varepsilon_t' (250 - d' - 44)}{250 - d' + 16}$$

$$\text{又、} \varepsilon_c' = (250 + d' - 28) = \varepsilon_t' = (250 - d' + 16) \text{ 倍}$$

$$\varepsilon_c' = \frac{250 + d' - 28}{250 - d' + 16} \cdot \varepsilon_t'$$

$$N = E \cdot \int \varepsilon \cdot A \text{ より、}$$

$$N_c' = E \cdot \varepsilon_c' \cdot 28 \times 200 \quad \dots \textcircled{8}$$

$$N_t' = N_{t1}' + N_{t2}'$$

$$= E \cdot \frac{\varepsilon_z' + \varepsilon_w'}{2} \times 16 \times 75 \times 2 + E \cdot \frac{\varepsilon_c' + \varepsilon_f'}{2} \times 16 \times 200 \quad \dots \textcircled{9}$$

⑧を整理すると、

$$N_c' = \frac{222 + d'}{266 - d'} \cdot 5600 \cdot \varepsilon_t' \cdot E$$

⑨を整理すると、

$$N_t' = \frac{1674 - 7d'}{266 - d'} \cdot 800 \cdot \varepsilon_t' \cdot E$$

中立軸は、 $N_c' = N_t'$ が条件なので、⑧ = ⑨ とすると、

$$\frac{222 + d'}{266 - d'} \cdot 5600 \cdot \varepsilon_t' \cdot E = \frac{1674 - 7d'}{266 - d'} \cdot 800 \cdot \varepsilon_t' \cdot E$$

$$\therefore d' = 8,571.4$$

(ii)

溶接の時とピンの時に、曲率が同じに仮定すると、

$$\varepsilon_t = (250 - 1.57 + 16) = \varepsilon_t' = (250 - 8.57 + 16)$$

$$\varepsilon_t' = \frac{257.43}{264.43} \varepsilon_t = 0.9735 \varepsilon_t$$

$$\therefore \text{この時の } \varepsilon_c' = \frac{250 + d' - 28}{250 - d' + 16} \times 0.9735 \varepsilon_t = 0.8719 \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_c = \frac{250 + 1.57}{250 - 1.57 + 16} \cdot \varepsilon_t = 0.9513 \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_x = \frac{250 + 1.57 - 28}{250 + 1.57} \cdot 0.9513 \varepsilon_t = 0.8454 \varepsilon_t$$

④ 0.8983

$$N_c' = \varepsilon_c' \times E \times 28 \times 200 = 4882.64 \varepsilon_t E$$

$$N_c = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_x}{2} \times E \times 28 \times 200 = 5030.76 \varepsilon_t E$$

$$N_c' = N_c'' = N_s = 148.5 \times 4 \times 1000 [N] \text{ とし、この時、}$$

$$4882.64 \varepsilon_t \cdot 2.05 \times 10^5 = 148.5 \times 4 \times 1000$$

$$\varepsilon_t = 59.3441 \times 10^{-5}$$

$$= 593.441 \times 10^{-6}$$

$$N_c - N_c' = (5030.76 - 4882.64) \varepsilon_t \cdot E$$

$$= 148.12 \times \varepsilon_t E$$

$$= 148.12 \times 2.05 \times 10^5 \times \varepsilon_t$$

$$= 303.646 \times 10^5 \times \varepsilon_t$$

ボルト4本が設計値に達する時の $\varepsilon_t = 593.441 \times 10^{-6}$ での、

$$N_c - N_c' = 303.646 \times 10^5 \times 593.441 \times 10^{-6}$$

$$= 18.019 [kN]$$

ボルト6本が設計値に達する時の $\varepsilon_t = 890.162 \times 10^{-6}$

$$N_c - N_c' = 303.646 \times 10^5 \times 890.162 \times 10^{-6}$$

$$= 27.029 [kN]$$

つまり、ピン接合よりも溶接接合の方が、ボルト4本時は 18.019 [kN]

〃

6本時は 27.029 [kN]

より、力を入れないといふことが、T=0

$$\frac{18.019}{148.5 \times 4} \times 100 = 3.03 [\%], \quad \frac{27.029}{148.5 \times 6} \times 100 = 3.03 [\%]$$