

## 片面施工用高力ボルトを用いた摩擦接合継手の数値解析的研究

### Numerical Analysis on Friction Joint with One-side Work High Strength Bolt

山田岳史\*1, 松井繁之\*2, 三田村浩\*3, 清田秀昭\*4

Takeshi Yamada, Shigeyuki Matsui, Hiroshi Mitamura and Hideaki Kiyota

\*1 博(工) (株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

\*2 工博 大阪工業大学 八幡工学実験場 構造実験センター (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4 番地)

\*3 博(工) (独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

\*4 神鋼ボルト(株) 大阪営業所 (〒541-0045 大阪市中央区道修町 3-4-10)

Steel plate-concrete composite slabs have been attracting attention due to high fatigue durability. However, a problem such as joining two bottom skin plates from upside has been leaving. To resolve the problem, “One-side work high strength bolt” had been developed. This research aims at improvement in workability of fastening the bolt on-site. Slip tests and numerical analyses have been carried out for friction joint specimens. The effect of filler-plate and bolt-hall-diameter on slip-load and slip-coefficient was discussed from these results, even as reasonability of the analysis model was verified. Furthermore, ability of enlargement of bolt-hall-diameter was investigated by using the same analytical method.

*Key words: One-side work high strength bolt, Numerical analysis, Filler plate, Bolt hall diameter*

#### 1. まえがき

道路橋床版の中でも高い耐久性を有する鋼・コンクリート合成床版(以下、合成床版と称す)は、その優れた構造特性から、今日ではRC床版、PC床版と並んで多くの実績を有する床版の一つとなっている。特に、底鋼板を有することを特徴とする合成床版は、RC床版、PC床版の鉄筋量に比べて、その鋼材量がきわめて多いため、圧縮域コンクリート深さが大きくなり、押し抜きせん断耐力などの点で高い性能を発揮することとなる。また、引張材である底鋼板にはコンクリート打設時の型枠も兼務させることから、合成床版の施工上のメリットとして、型枠の取り外し作業が不要となり、条件によっては足場が不要となる場合があることなどが挙げられる。しかし、実用の上で合成床版が有する構造性能を発揮させるためには、鋼板パネルを確実に接合しなければならない。鋼板パネル接合時の足場フリー化を目指して、片面から底鋼板を接合する方法に関して種々の技術開発がなされてきた。それらの特徴が土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会の報告書<sup>1)</sup>で紹介されている。大別すると、底鋼板の直接の応力伝達は期待しないがコンクリート中の鉄筋で補強を図った荷重非伝達型と底鋼板同士を添接板で接合する荷重伝達型がある。さらに、荷重伝達型の中には引張接合方式と摩擦接合方式がある。

前述のとおり合成床版の性能を最大限に引き出すためには、荷重伝達型が望ましいが、実際の床版では作用力(主桁作用+床版作用)が小さいことから荷重非伝達型の接合方法もある。一方、荷重伝達型継手については、はり供試体の支間中央部に各種接合法を適用した疲労試験の結果が、鋼構造物設計指針 PART B

合成構造物<sup>2)</sup>で紹介されている。その中で、引張接合に関しては、高力ボルトの疲労破壊や底鋼板の疲労き裂などが報告されている。一方、摩擦接合継手に関しては、継手のない供試体と同様にずれ止めを起点とした底鋼板の疲労破壊であったと報告されている。したがって、合成床版底鋼板の継手に関して、耐疲労性を考慮した場合には、摩擦接合継手を採用するのが合理的と言える。

そこで、合成床版の残された課題である片面施工による鋼板パネルの接合を可能とするために摩擦接合用の片面施工用高力ボルト(写真1)<sup>3,4)</sup>が開発された。ただし、このボルトを確実に締め付けるには、高い製作精度、架設精度が必要となる。本ボルトの普及拡大には、合成床版の鋼板パネルの製作誤差や架設誤差を接合部で吸収している実情に合わせる必要がある。

そこで、接合部に要求される誤差吸収へ対応するために、著者らはフィラープレートの挿入やボルト孔径の拡大によって対応することを考えた。本報では、フィラープレートの挿入やそのボルト孔径をパラメータとしたすべり試験の結果とそれを再現した数値解析によってそれらの妥当性ととも、摩擦接合継手における片面施工用高力ボルトの挙動についても言及する。

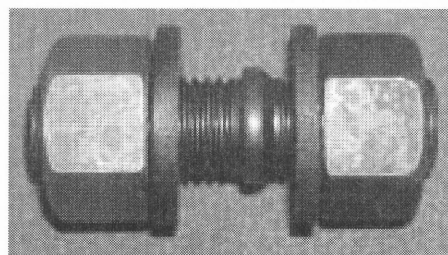


写真1 片面施工用高力ボルト

## 2. 片面施工用高力ボルト

片面施工用高力ボルトは、図1に示すとおりボルト軸のほぼ中央に節が付いた両ねじ高力ボルトであり、添接板厚 6mm 以上を対象としている。道路橋示方書<sup>5)</sup>によれば M22 の摩擦接合用の孔あけサイズは 24.5mm となっており、そのボルト軸の落下防止のために、24.5mm の底鋼板孔径よりも大きな 25.5mm を節の直径としている。さらに、底鋼板のボルト孔にボルト軸を挿通した際に、孔中心にボルトがセットできるようにテーパ加工を施している。

表1に合成床版をトルク法によって締め付ける場合の M22 片面施工用高力ボルトの施工手順を示す。

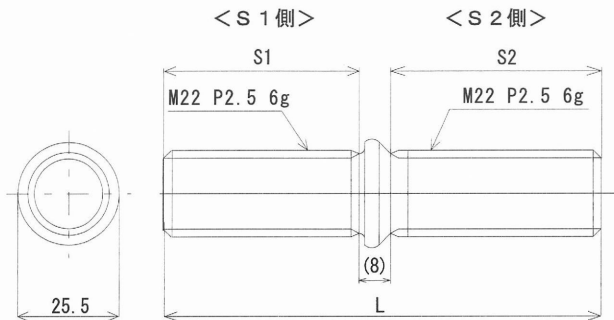


図1 片面施工用高力ボルトの軸部

表1 片面施工用高力ボルトの施工手順

合成床版の主桁架設前の施工	
手順①	底鋼板ボルト孔(φ24.5)にボルトのS2側を挿入する
手順②	S2側(底鋼板下面)に座金、ナットを装着し、ナットを本締めする。このときの締め付けトルクは約150N・mとする 本締めを必要とする理由は、その後の手順で上面側添接板のナットを本締めする際に、共回りが発生するのを防止するためである
合成床版の主桁架設後の施工	
手順③	主桁上に架設された鋼板パネル同士を接合するために、添接板を設置する。ただし、添接板にあける孔径は、ボルト節径25.5mm よりも大きな26.5mm とする これは、道路橋示方書の拡大孔に関する記述(ボルト呼び径+4.5mm)を参考にしている
手順④	S1側(底鋼板上面)に座金、ナットを装着し、1次締めと本締めを行う 合成床版の場合は、鋼板厚が6~9mm程度であることから、1次締め時の締め付けトルクは約150N・mとし、本締め軸力は226kNである。S1側ナットを締め付けることでボルトには軸力が導入される
締め付け完了	

## 3. すべり試験および数値解析の概要

片面施工用高力ボルトの施工性向上を目指して、フィラープレートの挿入やボルト孔の拡大がすべり挙動に及ぼす影響を把握するために、すべり試験体を製作し、すべり試験を実施した。また、そのすべり試験について数値解析を実施し、数値解析手法の妥当性を確認するとともに、すべり試験を実施していないボルト孔径なども検討した。

### 3.1 すべり試験

一般に合成床版の底鋼板に適用されている摩擦接合継手は一面摩擦接合であるが、ここでは、片面施工用高力ボルトを用いた摩擦接合継手の基本的性能であるすべり荷重、すべり係数などを把握するために、土木学会出版の高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)<sup>6)</sup>の P46 に示されている標準試験体に則して二面摩擦接合のすべり試験体とした。

また、本試験体の塗膜は無機ジンクリッチペイントであり、膜厚は道路橋示方書に規定された合計膜厚で管理せず、母材、添接板、フィラープレートそれぞれの膜厚を 80 μm としている。締め付け方法はトルク法である。

すべり試験体の概要を表2と図2に示す。

表2 二面摩擦接合すべり試験体一覧

試験番号	試験体数	鋼種、降伏応力度およびボルト孔径			ボルト(M22)				
		母材	添接板	フィラープレート	種類	寸法			
		SS400	SS400	SS400		全長 L	S1	S2	
1	3	$\sigma_y=280\text{N/mm}^2$	$\sigma_y=300\text{N/mm}^2$	$\sigma_y=315\text{N/mm}^2$	F10T	黒皮	130	42	80
2	3	φ24.5	φ26.5	φ26.5	F10T	黒皮	150	52	90
3	3			φ29.5	F10T	黒皮	150	52	90

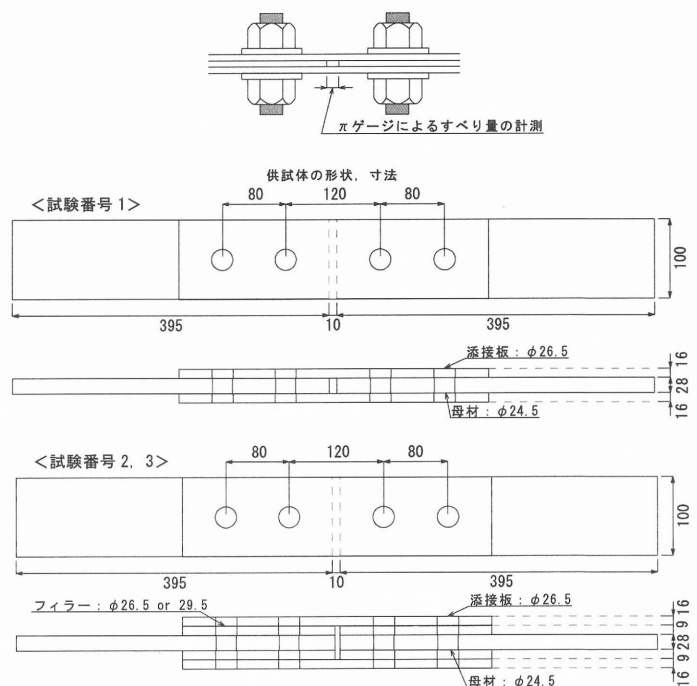


図2 二面摩擦接合すべり試験体の概要

### 3.2 数値解析

図3に2面摩擦接合すべり試験体の弾塑性有限要素解析モデルを示す。本解析では、ボルトとナットを一体化してモデル化するとともに、母材、添接板、フィラープレート、座金はそれぞれモデル化した。ボルト、座金を弾性材料、母材、添接板、フィラープレートを弾塑性材料とし降伏応力度 $\sigma_y=280\text{N/mm}^2$ とした。ヤング係数は $E=206\text{kN/mm}^2$ であり、降伏後の応力-ひずみ関係は $E/100$ で定義した。

ボルトへの軸力導入は、ボルト軸部の各要素を収縮させて再現し、S2側締付け時には、締付けトルク $150\text{N}\cdot\text{m}$ 相当の軸力 $40\text{kN}$ 、S1側締付け時には、ボルト軸力 $226\text{kN}$ を導入した。

また、母材-フィラープレート、フィラープレート-添接板、添接板-座金、座金-ナットの界面には接触を定義するとともに、界面にはクーロン摩擦を適用した。ここでは、摩擦係数を $0.7$ とした。

解析パラメータは、フィラープレートの挿入やフィラープレート孔径であり、これらがすべり荷重に及ぼす影響を把握するとともに、解析モデル化手法の妥当性を確認した。また、本試験では実施していないボルト孔径についても同様のモデル化を行ってその影響を把握した。

## 4. 試験および解析結果

### 4.1 すべり試験結果

すべり試験の結果一覧を表3に示す。すべての試験体のボルトにひずみゲージを埋込み、ボルト軸力を計測したものの、試験番号1-3、2-2はひずみゲージの不具合により、軸ひずみを計測できなかったため、標準ボルト軸力 $226\text{kN}$ を初期導入軸力 $N_1$ とした。

フィラープレートの有無、フィラープレートのボルト孔径がすべり荷重およびすべり係数に及ぼす影響はほとんどないことが分かる。

ただし、図4に示す荷重-すべり曲線より、すべり量 $0.4\text{mm}$ 程度で最大荷重となるものもあれば、最大荷重が明瞭に現れない場合もある。すべり荷重を最大荷重と定義するのであれば、大きなすべりを呈して最大荷重に至っても良いことになるため、すべり荷重の定義を再考する必要があると言える。摩擦接合継手に要

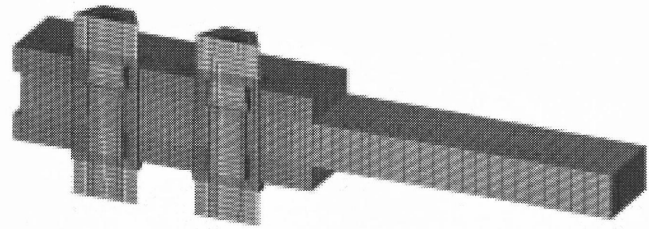


図3(a) 二面摩擦接合すべり試験体の解析モデル

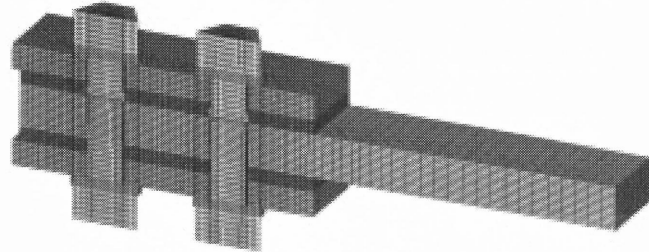


図3(b) フィラープレートを挿入した二面摩擦接合すべり試験体の解析モデル

求されるのは、すべり荷重だけでなく、すべり量そのものが小さいことでもある。さらに、合成床版では、底鋼板接合部はコンクリートと接しており、大きなすべりが生じるとコンクリートのひび割れを誘発することにもなる。したがって、すべり荷重は最大荷重で定義されるのではなく、接合部の変位であるすべり量に限界値を設ける必要があると言える。その限界値としては、コンクリートの許容ひび割れ幅が相当すると考えられる。

例えば、日本建築学会の鋼構造接合部設計指針<sup>7)</sup>に記載されているすべり係数評価試験法では、すべり荷重が明瞭でない場合は、すべり量 $0.2\text{mm}$ に対応する荷重をすべり荷重としている。ただし、文献<sup>7)</sup>では、添接板と母材の相対変位をすべりと定義している。

本ボルトは合成床版の片面施工用高力ボルトであることから、母材の変位をすべり量と考えることとし、そのすべり量 $0.2\text{mm}$ に対応した場合についても表3に追記した。フィラープレートを挿入した場合、著しくすべり係数が低下することが分かる。これは図4に示すとおり、フィラープレートがない試験体1に比べて初期勾配が小さいためである。この条件下でも道示が要求する摩擦係数 $0.4$ を満足することが分かる。

表3 すべり試験結果の一覧

項目 Test Piece No.	許容力 (kN)	初期導入 軸力( $N_1$ ) (kN)	締付け後 24h軸力( $N_2$ ) (kN)	すべり荷重 (kN)	すべり係数 ( $\mu_1$ )	すべり係数 ( $\mu_2$ )	許容力比	24h後 軸力減衰率 (%)	0.2mm 対応荷重 (kN)	0.2mm対応 すべり係数 ( $\mu_{0.2}$ )	0.2mm対応 許容力比
1-1	192	239.6	219.7	629.6	0.66	0.72	3.28	8.31	539.1	0.56	2.81
1-2	192	212.9	188.2	584.1	0.69	0.78	3.04	11.59	524.3	0.62	2.73
1-3	192	226	—	577.1	0.64	—	3.01	—	525.6	0.58	2.74
Average	—	—	—	596.9	0.66	—	3.11	—	529.7	0.59	2.76
2-1	192	234.0	204.8	603.8	0.65	0.74	3.14	12.48	460.7	0.49	2.40
2-2	192	226	—	589.0	0.65	—	3.07	—	450.2	0.50	2.34
2-3	192	244.5	215.5	593.0	0.61	0.69	3.09	11.87	449.0	0.46	2.34
Average	—	—	—	595.3	0.63	—	3.10	—	453.3	0.48	2.36
3-1	192	241.3	216.6	580.6	0.60	0.67	3.02	10.25	451.9	0.47	2.35
3-2	192	237.0	207.2	593.9	0.63	0.72	3.09	12.56	448.1	0.47	2.33
3-3	192	226.1	197.4	602.7	0.67	0.76	3.14	12.69	461.4	0.51	2.40
Average	—	—	—	592.4	0.63	—	3.09	—	453.8	0.48	2.36

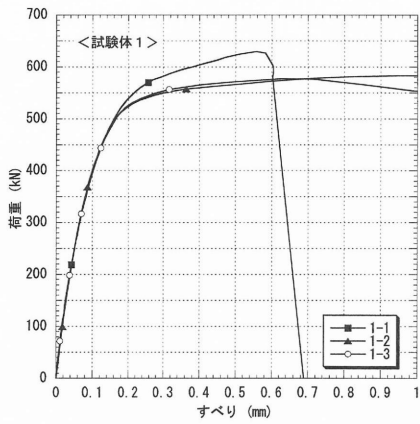


図 4(a) 試験体 1 の結果

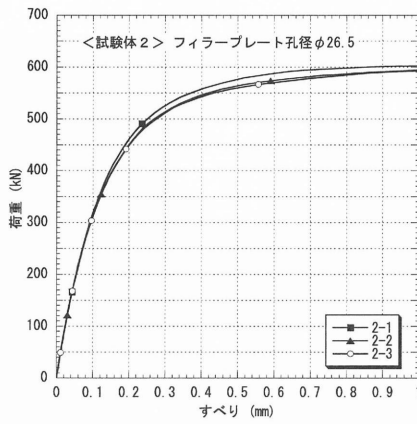


図 4(b) 試験体 2 の結果

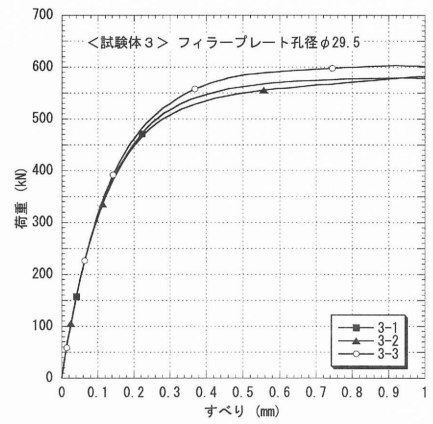


図 4(c) 試験体 3 の結果

## 4.2 数値解析結果

### (1) 片面施工用高力ボルトの締付け解析

ボルト軸に節を有する本ボルトに関して、ボルト孔内での節の挙動を試験では把握できないことから、図 3(a) に示す解析モデルを用いて、前述の締付け手順に則った締付け解析を実施した。解析方法は、① S 2 側締付けトルク 150N・m に相当する締付け軸力約 40kN を導入し、② S 1 側締付けで、226kN の軸力を導入した。

この締付け解析における締付け段階ごとの結果を図 5 に示す。なお、図 5 に表示された応力はミーゼス応力である。S 2 側締付け時には、ボルト節部と節が接触する母材孔のエッジ部に局部応力が発生することが分かる。特に高張力鋼である本ボルトには、500N/mm<sup>2</sup> を超過する応力が発生している。

一方、S 1 側締付け時には、節と母材孔のエッジ部とが離れ、S 2 側締付け時に発生した局部応力は緩和されるものの応力が残留している。局部を議論するにはメッシュサイズが大きすぎるものの、本解析モデルで言えば、節と母材孔のエッジ部との離間距離はおおよそ 0.15mm である。

### (2) すべり試験の再現解析

図 3(a), (b) の解析モデルを用いて、すべり試験 1～3 の再現解析を行った。各試験結果と解析結果との比較を図 6 に示す。

いずれの結果についても試験結果と解析結果は、300kN 以降で呈される試験結果の非線形挙動を除けば、ほぼ一致していることが確認できる。本解析では摩擦係数を 0.7 としているが、最大荷重においてやや解析結果が高い傾向にある。したがって、すべり試験体の摩擦係数としては 0.7 を若干下回るものと推察される。ただし、本解析で議論している摩擦係数は、初期導入軸力 226kN でのものであり、すべり試験では 24 時間の軸力減衰もあつてのすべり荷重であるため、正確な摩擦係数を把握するには、24 時間減衰後のボルト軸力を用いて数値解析を実施すべきである。したがって、ここでは、初期導入軸力 226kN に対して摩擦係数を評価すれば、0.7 をやや下回る程度と判断する。

また、図 6(a) 中の六角ボルトは、比較のためにボルト軸部に節のないボルトをモデル化した解析結果である。この結果、節のない場合、最大荷重に到達後は、

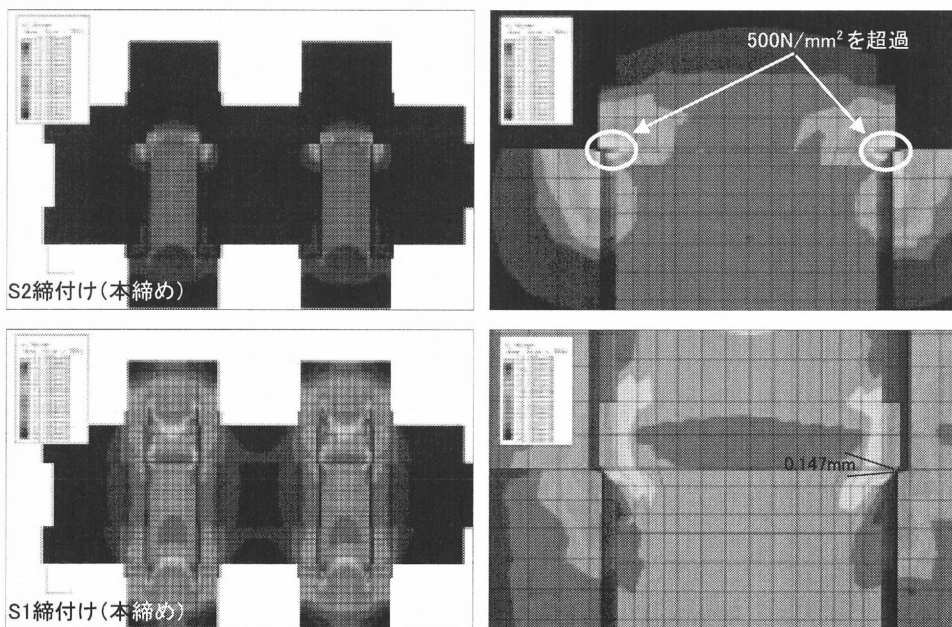


図 5 片面施工用高力ボルトの締付け解析結果（ミーゼス応力分布）

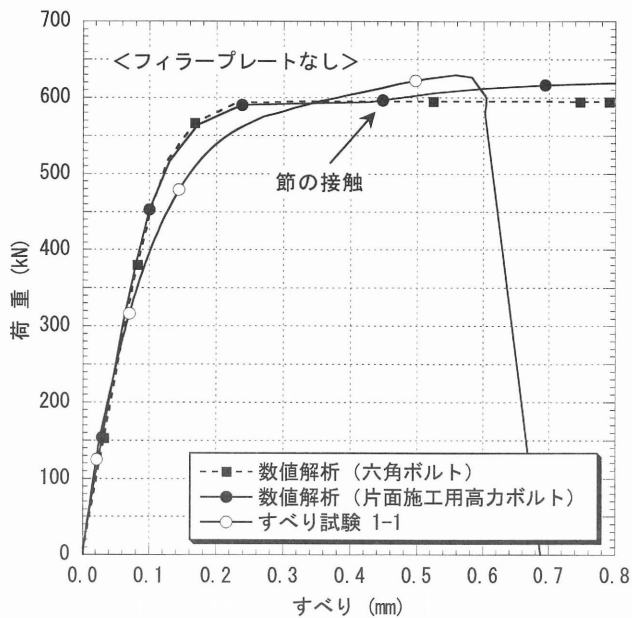


図 6(a) 2面摩擦接合すべり試験の結果比較

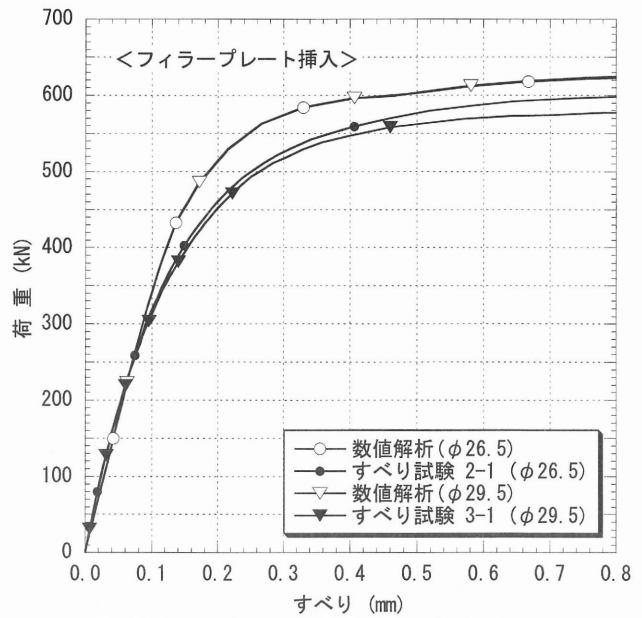


図 6(b) フィラープレート挿入試験の結果比較

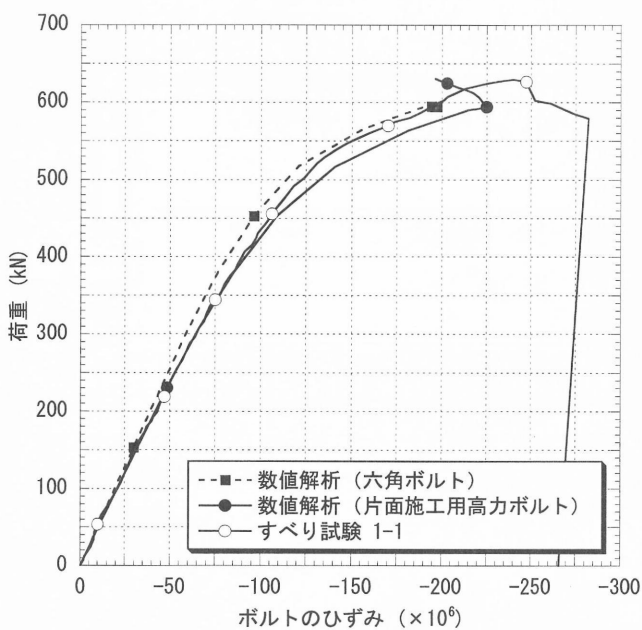


図 7 ボルト軸ひずみの推移

荷重レベルが一定となっている。一方、節のある片面施工用高力ボルトは、0.43mm以降に節が母材へ接触し、支圧接合へ移行するため、再び荷重が上昇することとなった。

図 7 にすべり試験中のボルト軸ひずみの推移の一例を示す。図 6(a) と同様に六角ボルトと片面施工用高力ボルトの解析結果を示す。ボルトの軸ひずみにおいても試験結果と解析結果が一致することが確認できた。

すべり試験結果において 300kN 以降、非線形挙動が現れた理由は、写真 2 に示すとおり、塗膜の剥離に起因しているものと考えられる。すなわち、300kN 以降の母材と添接板（あるいはフィラープレート）との間は、固着状態から徐々に塗膜が剥離しながらすべり出していたものと推察される。

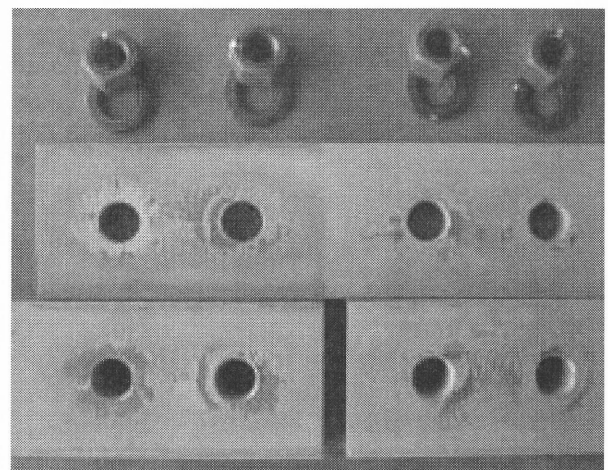


写真 2 塗膜の剥離状況

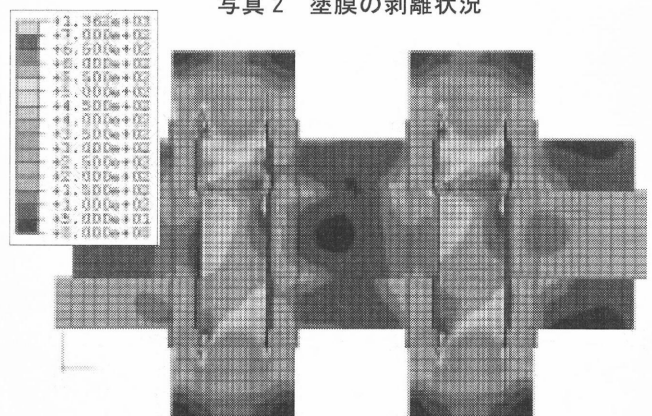


図 8 すべり 1.2mm 時のミーゼス応力分布

図 8 に 1.2mm のすべりが生じた時の片面施工用高力ボルトのボルト孔内での状況をミーゼス応力分布（試験体 1）として示す。すべり 1.2mm とは両側の各母材が 0.6mm すべった状態である。唯一弾性体としてモデル化したボルトにも、降伏応力度 ( $\sigma_y=1000\text{N/mm}^2$ ) を超過する応力が局部的に発生することが明らかになった。

### (3) ボルト孔径の影響把握

解析モデル化手法の妥当性が確認されたことから、すべり試験で実施していないパラメータについて解析的に検討した。施工性向上のためには、ボルト孔を大きくすることが有効であるため、フィラープレートのボルト孔をφ34.5とした。また、前述のとおりフィラープレートの挿入はすべりの増大を招くことにも繋がる。したがって、フィラープレートを使わず、添接板のボルト径をφ29.5とした場合についても検討した。

各解析結果を図9に示す。なお、本図中には、比較のためにフィラープレートのボルト孔径φ26.5、φ29.5、添接板孔径φ26.5の解析結果も示している。すべり試験の再現解析レベルではボルト孔径の影響はほとんどないことが明らかになった。これは、 $F = \mu N$ で定義づけられ、接触面積に依存しないクーロン摩擦則の下での数値解析であるからである。表4に350kN時のフィラープレートに作用する接触圧の分布を示す。孔径が大きくなってもしっかりと接触圧が発生していることが分かる。これは、本解析モデルの添接板厚が16mmであるため、φ26.5からφ34.5へ孔径が8mm大きくなって座金よりの支圧伝達に影響がないためと考えられる。したがって、合成床版の鋼板厚6mm~9mmを考えた場合には、確実な支圧伝達およびクーロン摩擦則の成立の可能性を見極める必要があると言える。

### 5. まとめ

片面施工用高力ボルトの施工性向上を目指して、二面摩擦接合継手を用いた基礎的検討を行った。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) フィラープレートおよびそのボルト孔径をパラメータとしてすべり試験を実施し、すべり係数に及ぼす影響はほとんどないことを確認した。ただし、片面施工用高力ボルトが合成床版接合部へ適用されることを考えて、許容ひび割れ幅を母材移動量すべり限界と考えるとすべり荷重を整理すると、すべり係数0.4は満足するものの、著しくすべり係数が低下することが明らかになった。
- (2) すべり試験の再現解析を実施した。クーロン摩擦則で界面挙動を定義した解析モデルで、すべり試験の再現ができることを確認した。
- (3) ボルト孔径をさらに拡大させる可能性について数値解析を用いて検討した。すべり試験体レベルではすべり荷重などに及ぼす影響はほとんどないことが判明した。ただし、合成床版の鋼板厚を考えた場合には、各鋼板での疲労き裂なども考慮して、その適用性について検討するべきと考えられる。

本研究は合成床版底鋼板の摩擦接合継手に関して、基礎的な検討を行ったものである。実際の継手は一面摩擦接合である場合が多いことから、今後、一面摩擦接合継手についても、コンクリートとの相互作用を含めて実践的な検討が必要であると言える。

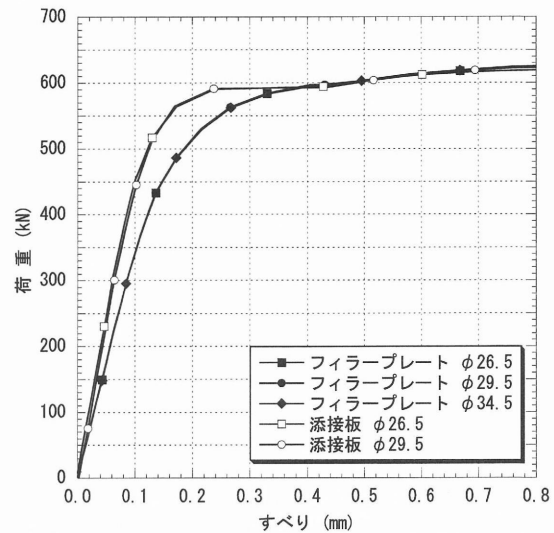
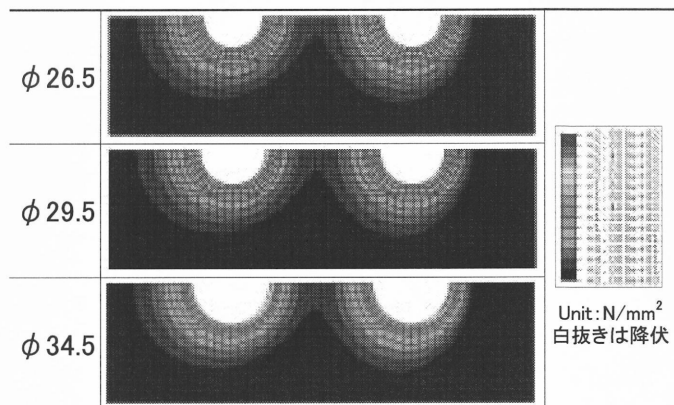


図9 ボルト孔径をパラメータとした数値解析結果

表4 母材-フィラープレート間の接触圧分布 (350kN)



謝辞：本報は、片面施工用高力ボルトの施工性向上に関する研究会で実施した研究成果の一部を報告するものである。本研究会のメンバーである川田工業(株)、ショーボンド建設(株)、(株)日本製鋼所、(株)宮地鐵工所の委員各位には多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004。
- 2) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，1997。
- 3) 山田岳史，沼田 克，岡本安弘，窪田 晃，松井繁之：縞鋼板とUボルトをずれ止めに用いた鋼板・コンクリート合成床版の構造特性，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.79-84，2003。
- 4) 鎌形吉伸，寺門三郎，山田岳史：合成床版の一面施工用高力ボルトの開発，第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.253-256，2004。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書 II 鋼橋編，2002。
- 6) 土木学会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)，2006。
- 7) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2006。