

高力ボルト摩擦接合継手の照査方法と設計への効果

三宅 温* 小林 裕介*

Verification Method for Friction Joints Using High-Strength Bolts and Its Effect on Design

Nodoka MIYAKE Yusuke KOBAYASHI

Friction joints using high strength bolts, which are commonly used in the connection of steel structures, resist tensile forces by friction on the contact surface between the bolted plates. This paper outlines a revision of the method of setting the coefficient used to calculate the resistance force. The trial design of the joint was carried out using the revised coefficients. The result confirmed that the new coefficients are effective in reducing the number of bolts. A method for verifying the failure of the jointed plates in the event of tearing and the conditions under which tearing is likely to occur is also outlined.

キーワード：高力ボルト摩擦接合継手，すべり係数，ちぎれ破断，ボルトのせん断

1. はじめに

鋼構造物等の連結部で一般的に使用される高力ボルト摩擦接合継手（以下、摩擦接合継手）は、高力ボルトで接合部材片を高い軸力で締付け、材間接触面に生じる摩擦抵抗により応力を伝達する方法である（図1）。摩擦接合継手を構造物へ適用する際には、常時および地震時に生じる作用に対して限界状態を設定し、必要な耐力を保持していることを照査等により確認する必要がある。

摩擦接合継手の照査における限界状態は、継手部のすべりを許容しない場合と許容する場合の2つに区分できる。すべりを許容しない場合は、前述した材間接触面にすべりが生じた状態を限界状態とし照査を行う。すべりを許容する場合は、すべりが生じた後に発生しうるボルトのせん断破壊、母板または添接板の引張破断（以下、鋼板の引張破断）およびちぎれ破断の3つを限界状態として照査する。

鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）（以下、鋼・合成標準）の第Ⅲ編 鋼・合成構造¹⁾（以下、鋼・合成構造編）では、摩擦接合継手の照査において、2009年鋼・合成標準から大きく2点変更している。1点目は、すべりを許容しない場合の照査において、すべり係数 μ の設定方法を見直した。すべり係数 μ は、摩擦接合継手のすべり耐力の特性値を算定する際に用いる係数であり、これまで設計時に想定する接触面の処理方法を2種類に限定していたが、今回の改訂により、処理方法を限定しないよう変更した。また、近年の研究成果^{2) 3)}から、厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下、無機ジンク）のすべり係数の標準的な値を見直した。

2点目は、すべりを許容する場合の照査において、す

べり後に生じうるちぎれ破断の具体的な照査方法を明記した。ちぎれ破断は、図2のように、継手に生じる引張力により、ボルト孔から縁端までの鋼板がせん断により抜け落ちる破壊形態である。ちぎれ破断は、破断面の形成に応じて複数の破断パターンがあるため、各パターンにおける照査式を新たに記載した。併せて、ちぎれ破断の照査の要否を判断しやすくするため、ちぎれ破断が発生しやすい条件を整理するとともに、破断パターンの絞り込みを容易にするため、板厚などの諸元が破断パターンに及ぼす影響を評価した。

本稿では、2つの変更点の概要とともに、改訂による効果や実設計で適用する際の留意点を示す。

2. すべり係数 μ の変更

摩擦接合継手の破壊に関する照査は、式(1)にて行う。

$$\gamma_i \cdot P_{jd} / P_{jud} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 P_{jd} : 継手に生じる設計断面力

P_{jud} : 継手の設計断面耐力

γ_i : 構造物係数

すべり係数 μ は、摩擦接合継手の破壊に関する照査

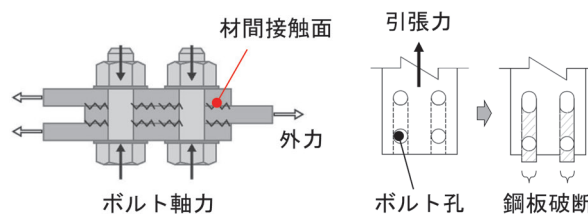


図1 高力ボルト摩擦接合継手の概要

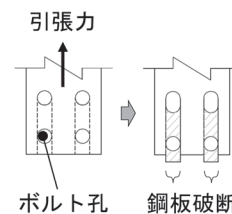


図2 ちぎれ破断

* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

表1 改定前後におけるすべり係数 μ の設定方法

| 項目 | 2009年鋼・合成標準 | 2024年鋼・合成構造編 |
|-------------|------------------------------------|---|
| 想定する接触面 | 鋼素地 厚膜型無機ジンクリッチペイント | 限定せず（鋼素地，厚膜型無機ジンクリッチペイント以外も設定可） |
| すべり係数 μ | 鋼素地 : 0.4 厚膜型無機ジンクリッチペイント : 0.4 | 標準的な値として以下を記載 〔鋼素地 : 0.4 厚膜型無機ジンクリッチペイント : 0.45 それ以外は，接触面の状態に応じて設定 |

において，継手の設計断面耐力 P_{jud} にすべり耐力を設定する場合に用いる係数である。このとき， P_{jud} は式(2)にて算定する。

$$P_{jud} = (n \cdot m \cdot \mu \cdot N / \gamma_s) / \gamma_b \quad (2)$$

ここに， n ：ボルト本数（本）

m ：摩擦面の数

μ ：すべり係数

N ：引張耐力

γ_s ：材料係数

γ_b ：部材係数

2.1 変更内容

すべり係数 μ の設定方法について，2009年鋼・合成標準および鋼・合成構造編の比較を表1に示す。設計時に想定する接触面の処理方法は，これまで鋼素地と無機ジンクのみとしていたが，今回の改訂により限定しないよう変更し，設計の自由度を増した。

また，無機ジンクを使用する場合，標準的なすべり係数 μ の値は，これまで0.4であったが近年の研究成果^{2) 3)}により0.45に変更した。この変更により無機ジンクを使用する際には，式(2)より，すべり係数 μ の増加に比例して設計すべり耐力 P_{jud} も1割程度増加するため，ボルト本数を低減することができる。

前記研究成果^{2) 3)}より，すべり係数 μ が0.45となる条件として以下の2項目を示している。

- ・無機ジンクリッチペイントの接触面片面当たりの最小膜厚が50 μ m以上，合計膜厚が100～200 μ m
- ・締付け厚さ150mm程度まで

鋼鉄道橋の摩擦接合継手では，従前より無機ジンクの標準膜厚を75 μ m（許容値60～90 μ m），鋼材厚を75mm以下（締付け厚さは150mm以下となる）としており，上記条件を満足する形で施工している。したがって，今回のすべり係数 μ の変更に際し，特に施工方法等を変更する必要はないものとなっている。

なお，すべり係数 μ を0.45に変更するとボルト本数が低減されるが，施工方法や施工条件を変更しない，すなわち従前と同じ条件でボルト本数のみ低減するため，実際の継手の耐力は従前と比べて下がることとなる。こ

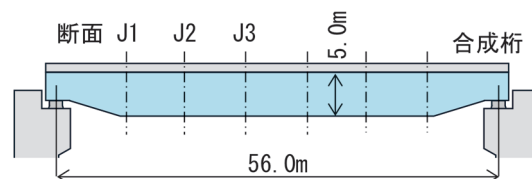


図3 対象橋りよう

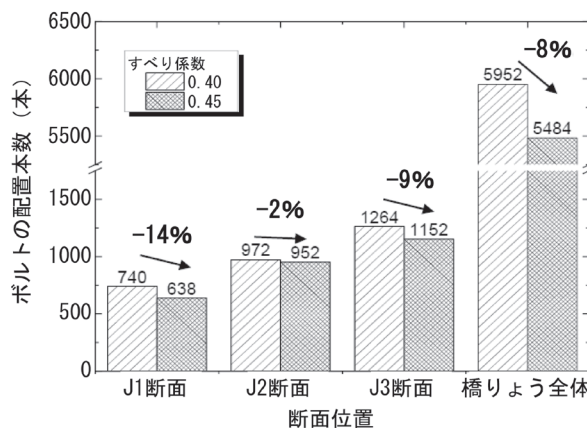


図4 配置本数の比較

れについては，従来すべり係数 μ を0.45とできたにもかかわらず，0.4で設計していたことで含まれていた安全余裕度分を陽に考慮したことに相当する。

2.2 効果の検証

無機ジンクを用いた場合のすべり係数 μ の変更による実設計への効果を検証するため，すべり係数 μ を0.4としたとき（2009年鋼・合成標準）と，すべり係数 μ を0.45としたとき（鋼・合成構造編）の主桁断面添接部の必要ボルト本数を比較した。

照査対象の橋りようを図3に示す。検証は，支間56.0m，桁高5.0mの合成桁を対象に，3か所の主桁断面の添接（J1～J3断面）についてそれぞれボルトの配置本数を算出した。その結果を図4に示す。前述した設計すべり耐力 P_{jud} の増加により，配置本数は最大14%減少，橋りよう全体においても8%の減少が見られた。ここで，各断面で配置本数の低減率にばらつきがある理由をJ2，J3断面に着目して説明する。J2，J3断面の必要本数および配置本数の具体値を表

2に示す。ここで、表2の具体値は同表の備考に示すように、それぞれの断面における下フランジの一つの添接板に着目した配置本数である。両断面ともすべり係数が0.4から0.45になりすべり耐力が増すことで、ボルトの必要本数が減少している。一方で、配置本数については、J3断面では減少しているもののJ2断面では減少しておらず、これはボルト配置（m行×n行）に依存していることが分かる。

このように、今回の改訂ですべり係数を変更したことにより必要ボルト本数は減るものの、実際に配置するボルト本数は、その配置により低減率にばらつきを生じる。

3. ちぎれ破断

連結部に高力ボルト摩擦接合継手を用いる際、施工上の理由等により、やむを得ず断面力が大きい箇所に連結部を設ける場合には、大規模地震時に連結部を無損傷とすることが不経済となる場合がある。このような場合には、継手のすべりを許容した照査を行う。

すべりを許容する場合の照査において、継手の破壊形態には、ボルトのせん断破壊、鋼板の引張破断およびちぎれ破断があり、ちぎれ破断にはさらに図5に示す3種類がある。なかぬけは、応力直角方向に2列以上並んだボルト間の鋼板が抜け落ちる現象で、応力直角方向のボルト中心間隔が小さい場合等に生じやすいと考えられる。そとぬけは、端側にあるボルト孔から縁端までの鋼板が抜け落ちる現象で、応力直角方向の縁端距離が小さい場合等に生じやすいと考えられる。はしぬけは、応力方向のボルト間の鋼板が抜け落ちる現象で、応力方向の

ボルト中心間隔が小さい場合等に生じやすいと考えられる。また、ボルトの配列によっては、はしぬけとボルトのせん断破断が同時に生じる場合もある。

鋼・合成構造編では、ちぎれ破断の照査方法を追加し、併せて、摩擦接合継手の諸元を基に上記4つの破壊形態が生じやすい条件を整理した。

3.1 変更内容

すべりを許容する場合の照査についても、照査は式(1)にて行う。このときの設計耐力 P_{jud} は、式(3)にて算定する。

$$P_{jud} = P_{ju} / \gamma_b \quad (3)$$

ここに、 P_{ju} : 継手耐力
 γ_b : 部材係数

継手耐力 P_{ju} は破壊形態により異なるため、照査には以下の式(4)~(7)にて算定した値のうち、最小のものを用いる。なお、ここで想定している継手は、前述したように、継手のすべりが鋼板（母材または添接板）の降伏に先行して発生する、すべり先行型継手である。

$$\text{ボルトのせん断} : P_{ju} = n \cdot m \cdot P_{vd} \quad (4)$$

$$\text{鋼板の引張破断} : P_{ju} = f_{sud} \cdot A_n \quad (5)$$

$$\text{ちぎれ破断} : P_{ju} = A_{ns} \cdot f_{sud} / \sqrt{3} + A_{nt} \cdot f_{sud} \quad (6)$$

表2 ボルト本数の低減効果

| 断面 | すべり係数 | 必要本数 | 配置本数 [m行×n列] | 低減割合 |
|----|-------|------|-----------------|------|
| J2 | 0.40 | 27.6 | 28本 [7行×4列] | 0% |
| | 0.45 | 24.6 | 28本 [7行×4列] | |
| J3 | 0.40 | 42.5 | 49本 [7行×7列] | -14% |
| | 0.45 | 37.9 | 42本 [7行×6列] | |

(備考) 算出箇所

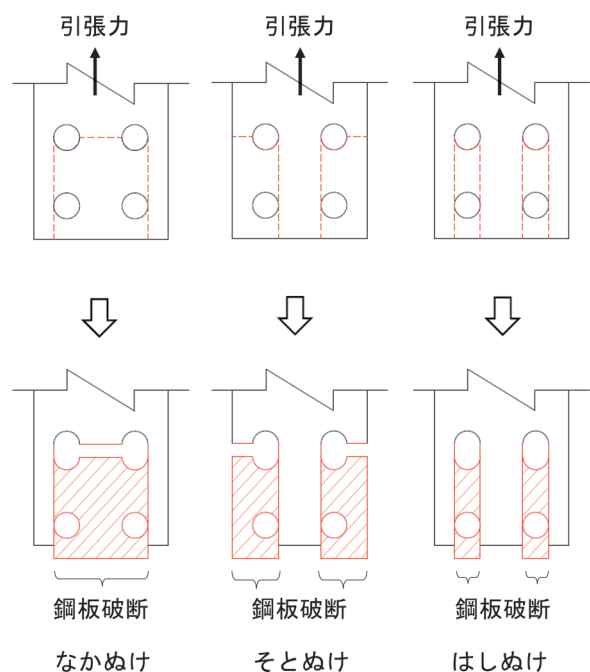
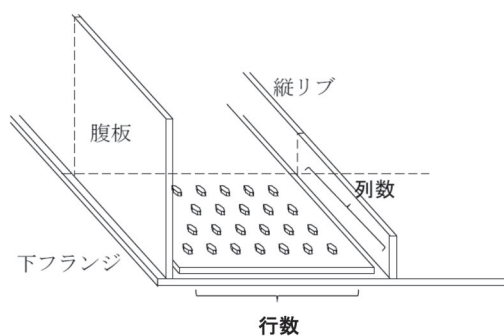


図5 ちぎれ破断の種類

はしめけとボルトのせん断の組合せ

$$: P_{ju} = A_{ns} \cdot f_{sud} / \sqrt{3} + (n_1 \cdot n_2 - n_2) \cdot m \cdot P_{vd} \quad (7)$$

ここに、

- n : ボルト本数
- m : ボルト軸部のせん断断面数
- P_{vd} : ボルト 1 本当たりの設計せん断強度
- f_{sud} : 鋼材の引張強度
- A_n : 鋼板の純断面積
- A_{ns} : せん断応力が生じる部分の有効断面積で
図 6 に示す箇所の板厚方向の断面積
- A_{nt} : 引張応力が生じる部分の有効断面積で図
6 に示す箇所の板厚方向の断面積
- n_1 : ボルト行数 (応力方向)
- n_2 : ボルト列数 (応力直角方向)

3.2 ちぎれ破断が生じやすい継手諸元の整理

式 (4)~(6) で示されるボルトのせん断、鋼板の引張破断およびちぎれ破断の破壊形態のうち、ちぎれ破断が生じやすい継手諸元を明らかにするため、ボルト本数や配列等を変更し継手耐力 P_{ju} の試算を行った。試算条件を表 3 に示す。材質は SM400、高力ボルトは M22 (F10T) に固定した。また、応力方向の試算条件はちぎれ破断を生じやすくするため、縁端距離 e_1 は最小 32mm、ボルト中心間隔 p_1 は構造上やむを得ない場合に用いるボルト径の 3 倍の 66mm に固定した。その他の摩擦面数、ボルト配置、板厚 t 、応力直角方向の縁端距離 e_2 およびボルト中心間隔 p_2 の条件を変動させ試算を行った。ここではボルト配置および板厚を変動させた試算内容を抜粋して示す。

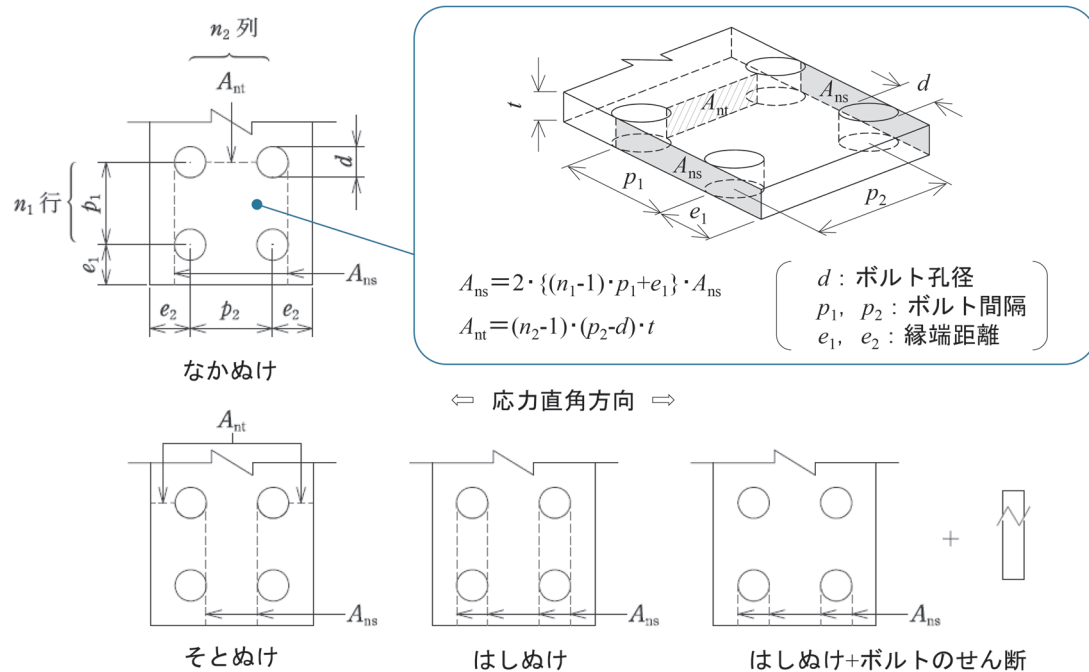


図 6 有効断面積

表 3 試算条件

| | | |
|------------------------|--|----|
| 材質、高力ボルト | SM400, M22 (F10T) | 固定 |
| 摩擦面数 | 1面, 2面 | 変動 |
| ボルト配列 (応力方向×応力直角方向) | 1×2, 1×3, 1×4, 2×1, 2×2, 2×3, 2×4, 3×1, 3×2, 3×3, 3×4, 4×1, 4×2, 4×3, 4×4 | 変動 |
| 板厚 t | 9~75 mm | 変動 |
| 応力直角方向の縁端距離 e_2 | 32~72 mm ($8t \leq 150$ mm) | 変動 |
| 応力直角方向のボルト中心間隔 p_2 | 66~216 mm ($24t \leq 300$ mm) | 変動 |
| 応力方向の縁端距離 e_1 | 32 mm (最小) | 固定 |
| 応力方向のボルト中心間隔 p_1 | 66 mm (ボルト径×3) | 固定 |

(1) ちぎれ破断となり得るボルト配置

ちぎれ破断となり得るボルト配置を確認するため、摩擦面2面、板厚 t を9mm、縁端距離 e_2 を32mm、ボルト中心間隔 p_2 を66mmに固定し、各ボルト配置の継手耐力 P_{ju} を試算した。各破壊形態における継手耐力 P_{ju} の試算結果を図7に示す。図中のちぎれ破断の耐力は、なかぬけ、そとぬけ、はしぬけおよびはしぬけとボルトのせん断の組合せの最小値を示している。耐力比較の結果、応力方向のボルトが1行の場合、ちぎれ破断の耐力が最小となり、その他はすべて鋼板の引張破断が最小となることが確認された。また、応力方向のボルト本数が2行以上の継手においても、応力方向のボルト本数が少ない配列ほど、鋼板の引張破断とちぎれ破断の耐力の差が小さくなっている。

以上より、応力方向のボルト本数が少ない配列ほどち

ぎれ破断が生じやすいと言える。

(2) 破壊形態がちぎれ破断となる板厚

(1)の結果をふまえ、すべり先行(すべり耐力が鋼板の降伏耐力より小さい)となる範囲のうち、ちぎれ破断が生じやすい、すなわち、ちぎれ破断の耐力が鋼板の引張破断やボルトのせん断のそれよりも小さくなる条件を絞り込むため、板厚 t を変更した場合の継手耐力 P_{ju} を試算した。対象は、実務でよく用いられる応力方向に2列以上のボルト配置のうち、ちぎれ破断の耐力が小さいボルト配置 2×1 (摩擦面1面)および 2×2 (摩擦面2面)とした。

板厚 t を9~75mmに変更した場合の継手耐力 P_{ju} を図8および図9に示す。ボルト配列 2×1 は、 t が9mm以上ですべり先行となり、9~11mmの範囲においてははしぬけ+ボルトのせん断が最小耐力となった。また、

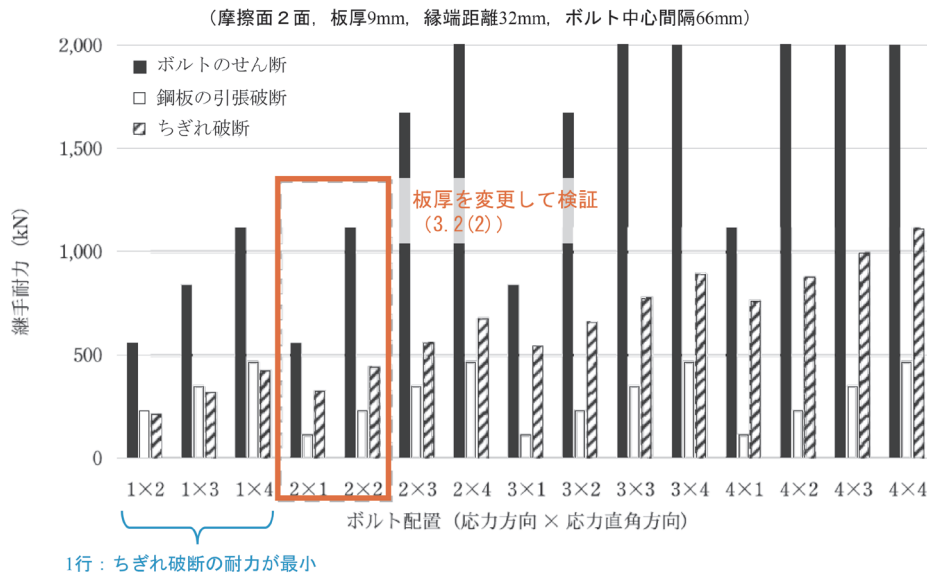


図7 ボルト配置ごとの継手耐力

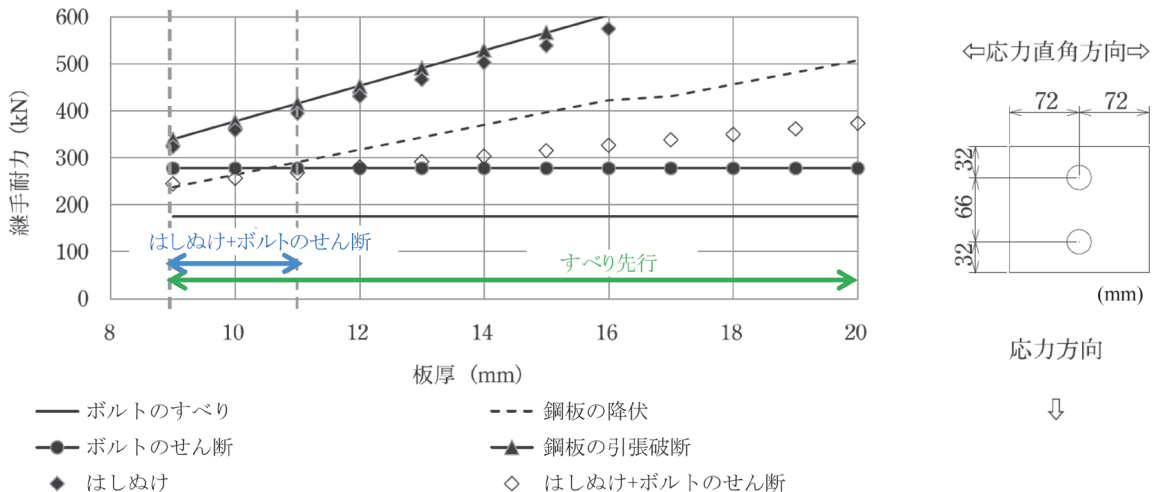


図8 ボルト配列 2×1 (摩擦面1面)

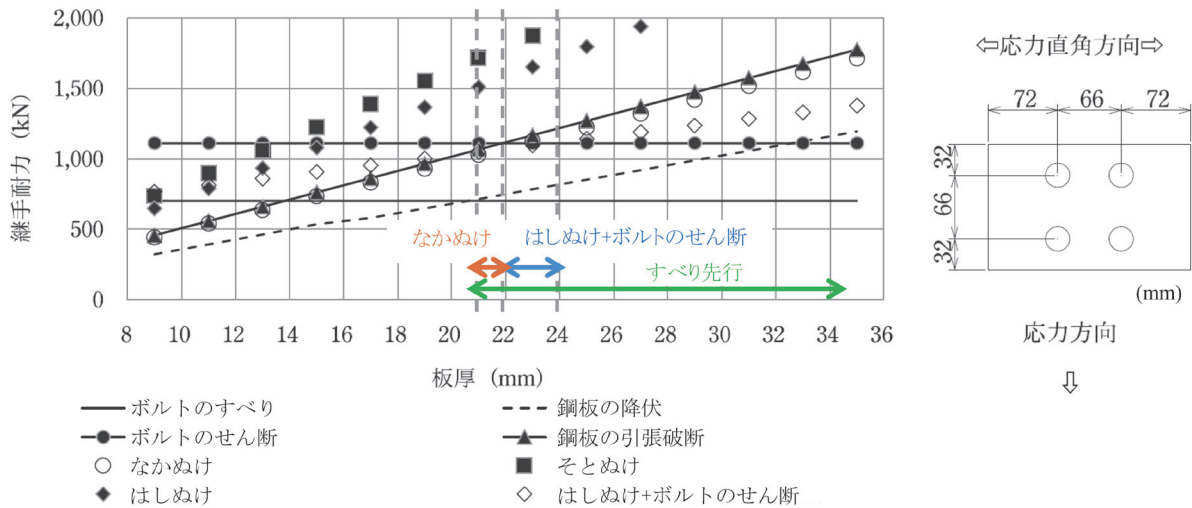


図9 ボルト配列 2×2 (摩擦面 2 面)

ボルト配列 2×2 は、 t が 21mm 以上ですべり先行となり、すべり後の最小耐力は 21mm ではなかぬけ、22、23mm でははしぬけ+ボルトのせん断であった。この結果より、板厚が薄いほどちぎれ破断が生じやすいことを確認した。

以上より、鋼・合成構造編で対象としている継手諸元ですべりを許容した場合、ボルト本数が少なく、板厚が薄いものほどちぎれ破断が生じやすいことを確認した。前述したように、図 6 における縁端距離 e_2 、ボルト中心間隔 p_2 によっても最小耐力となる破壊形態は変わること留意されたい。また、本試算では、はしぬけ、そとぬけが確認されなかったが、条件によっては生じうため照査にて確認が必要である。

4. おわりに

本稿では、鋼・合成構造編で変更した 2 点の概要と改訂による効果や実設計で適用する際の留意点を紹介した。

- (1) すべり耐力の算定に用いるすべり係数 μ は、想定する接触面に応じて処理方法を設定できるよう変更し、設計の自由度を向上させた。
- (2) 無機ジンクは、すべり係数 μ の標準的な値を 0.45 に設定できるものとした。この無機ジンクにおけるすべり係数の増加による効果を確認するため、改訂前後のすべり係数 μ の値である 0.4、0.45 を用いて、必要ボルト本数の試算を行ったところ、必要ボルト本数の低減効果が確認できた。
- (3) ちぎれ破断におけるなかぬけ、そとぬけおよびはしぬけの各破断パターンについて照査方法を追加した。

- (4) ボルト継手で生じうるボルトのせん断、鋼板の引張破断およびちぎれ破断の 3 つの破壊形態のうち、ちぎれ破断が生じやすい条件を検証した結果、応力方向のボルト本数が少なく、縁端距離やボルト中心間隔が大きく、板厚が薄い場合に生じやすいことが確認できた。

本稿で紹介した内容はいずれも、経済的な設計に寄与するものであり、今後の継手の設計に役立てていただけたら幸いである。

なお、これらの検討は国土交通省委託による鉄道の技術基準整備のための調査研究の一環として実施されたものである。

謝 辞

本稿の改訂内容は、国土交通省からの委託を受けて設立された「鋼・合成構造物の設計に関する委員会」で審議を重ね、とりまとめたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修、鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）第三編 鋼・合成構造、丸善出版、2024
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅱ 鋼橋・鋼部材編）・同解説、丸善出版、2017
- 3) 土木研究所、大阪市立大学：高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究報告書、第 428 号、2012