

損傷制御設計のためのスリット付きボルトの せん断特性に関する検討

佐藤 京¹・寺澤 貴裕²・畠山 乃¹

¹正会員 土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

²正会員 工修 土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

1. はじめに

平成29年11月改訂版の道路橋示方書¹⁾では、要求された限界状態を超えないような耐荷性能を満足するように設計を行うことが規定されている。一方、照査に用いる地震動を超える作用（以下、超過作用）への対処としては、同示方書の2.7.2構造設計上の配慮事項の解説に記述はあるものの、設計者に委ねられている。

著者らは、超過作用への対策に復旧性の高い部材として、ゴム支承の下沓プレート取付ボルトに損傷を誘導する設計法（以下、損傷誘導設計法）の提案を目指し、要求される耐震性能を確保した上での橋梁部材の耐力階層精度を高めるため、RC橋脚の配筋やスリットを設けた取付ボルトのせん断挙動について検討を進めている。

取付ボルトの破断時における抵抗特性は、ゴム支承を対象とした水平載荷試験²⁾を報告しており、松村らの報告³⁾と同様に、ボルトに作用する軸力の影

響は小さく、せん断強度に大きく依存することを明らかにしている。しかしながら、橋梁が保有する耐震性能を満足し、復旧性に配慮した損傷に制御する必要があるため、取付ボルトに対するせん断強度とじん性を評価する精度の向上が不可欠である。

そこで、せん断破断における強度、ひずみを高い信頼性で制御することを目的に応力ひずみ推定式の基礎データ収集やスリット部の最適化を行うために実施したせん断破断試験結果について報告する。

2. 試験概要

(1) 試験装置および試験体

a) 試験装置

本検討では、図-1および図-2に示す載荷装置と載荷治具を用いて、試験体のせん断面に曲げモーメントが作用しないよう、図-2の治具を図-3のように組み立て、2面載荷試験を実施した。載荷治具は、油圧ジャッキに接触する載荷プレート側を凸型、固定

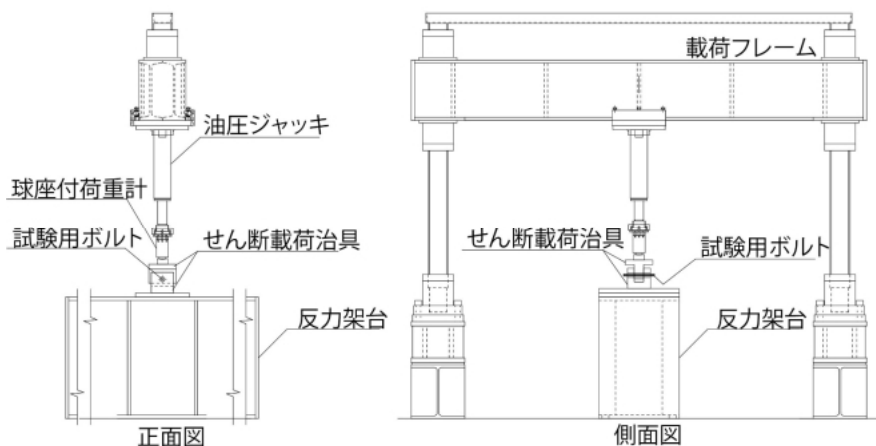


図-1 載荷施設

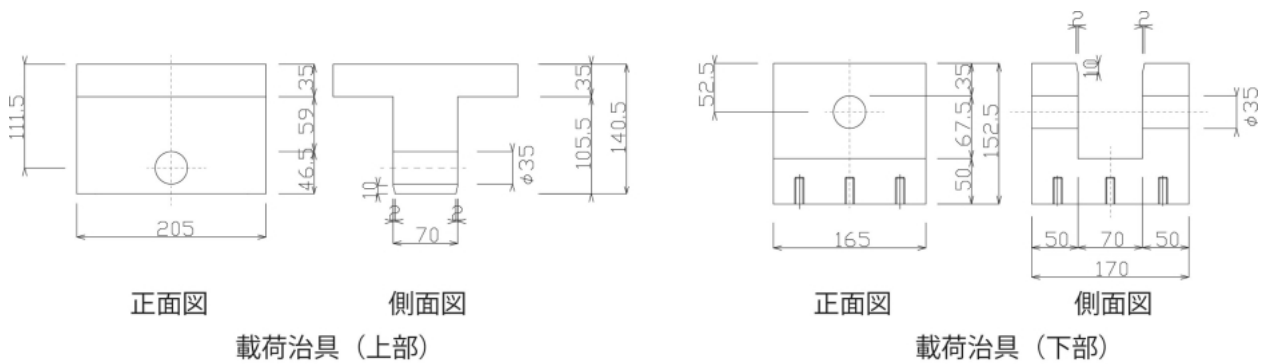


図-2 载荷治具 (S50C 材)

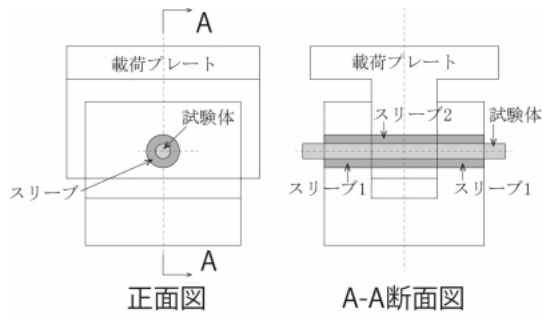


図-3 载荷治具 (組図)

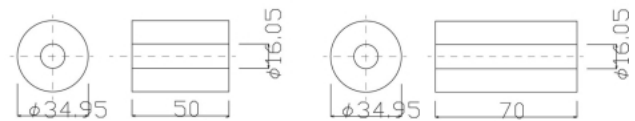


図-4 スリーブ (S55C 材)

となる下側を凹型に，S50C材を削り出しにより成型した．また，繰返し载荷を行うため，治具に損傷や変形が生じないように，試験体に図-4に示すS55C材を削り出しで製作したスリーブを装着して载荷治具に配置し，治具が損傷しないように配慮するとともに，载荷治具の孔とスリーブ間に生じる隙間が，試験体の挙動に与える影響をできるだけ小さくするため，製作上での最小値0.05mmとした．

载荷は，油圧ジャッキにより载荷プレートを鉛直下方に押すことで，せん断力を導入している．

b) 試験体

本試験では，2面せん断を行うため既成のボルトではなく，直径D=16mmの鋼材（強度区分10.9相当のSCM435）より試験体を製作した．用いた鋼材諸元を表-1に示す．試験体は，スリットの有無，ネジの有無を検討要素としている．試験では，試験体内部の軸方向ひずみ，表面ひずみを計測した．なお，表面ひずみを計測するための加工として溝を設けたことで断面積が変わること，さらに試験体を配置した際の拘束条件が異なるため，溝の影響を評価するために溝加工をしないケースも設けた．表-2には，対象ケース一覧を示し，測定項目を併記した．各ケースの試験体詳細図を図-5に示す．種別φ16とは，全長にわたって，ねじが無い棒鋼の試験体である．M16とは，両端部80mmの部分が並ねじ16と同等の加工でネジを形成し，めねじを配置したスリーブと組み合わせて，下沓取付ボルトを再現したボルトの

表-1 鋼材諸元

| 材質 | 鋼材径 | 降伏点 | 引張強さ | 伸び |
|--------|---------|--------------------------|--------------------------|--------|
| SCM435 | 16 (mm) | 880 (N/mm ²) | 994 (N/mm ²) | 22 (%) |

表-2 せん断試験ケース一覧

| 試験ケース | 種別 | ねじ規格 | スリットの有無 | 側面ひずみ計測 | 軸力計測 | 体数 |
|--------|-----|------|---------|---------|------|----|
| Case01 | φ16 | - | - | ○ | ○ | 2 |
| Case02 | φ16 | - | - | - | ○ | 3 |
| Case03 | φ16 | - | ○ | ○ | ○ | 5 |
| Case04 | φ16 | - | ○ | - | ○ | 5 |
| Case05 | M16 | 並ねじ | - | ○ | ○ | 2 |
| Case06 | M16 | 並ねじ | - | - | ○ | 3 |
| Case07 | M16 | 並ねじ | ○ | ○ | ○ | 5 |
| Case08 | M16 | 並ねじ | ○ | - | ○ | 10 |

試験体である．また，スリットの有無とは，ネジ部に隣接して深さ1.5mm，幅1.5mmで外周を削り，せん断破断を誘導する部分の有無を示している．試験体の側面ひずみや軸ひずみを測定するため，ひずみゲージを配置するための溝や孔を設けている．詳細は，図-5に示す通りである．

(2) 試験方法

本試験では，手動の油圧ジャッキにより载荷プレートを鉛直下方に押し，せん断力を導入している．

試験体の中央部70mmは，载荷プレートの下向きの一つ山の载荷治具内に収まり，試験体の両端にある80mmは，载荷治具の上向き二つ山に配置される．

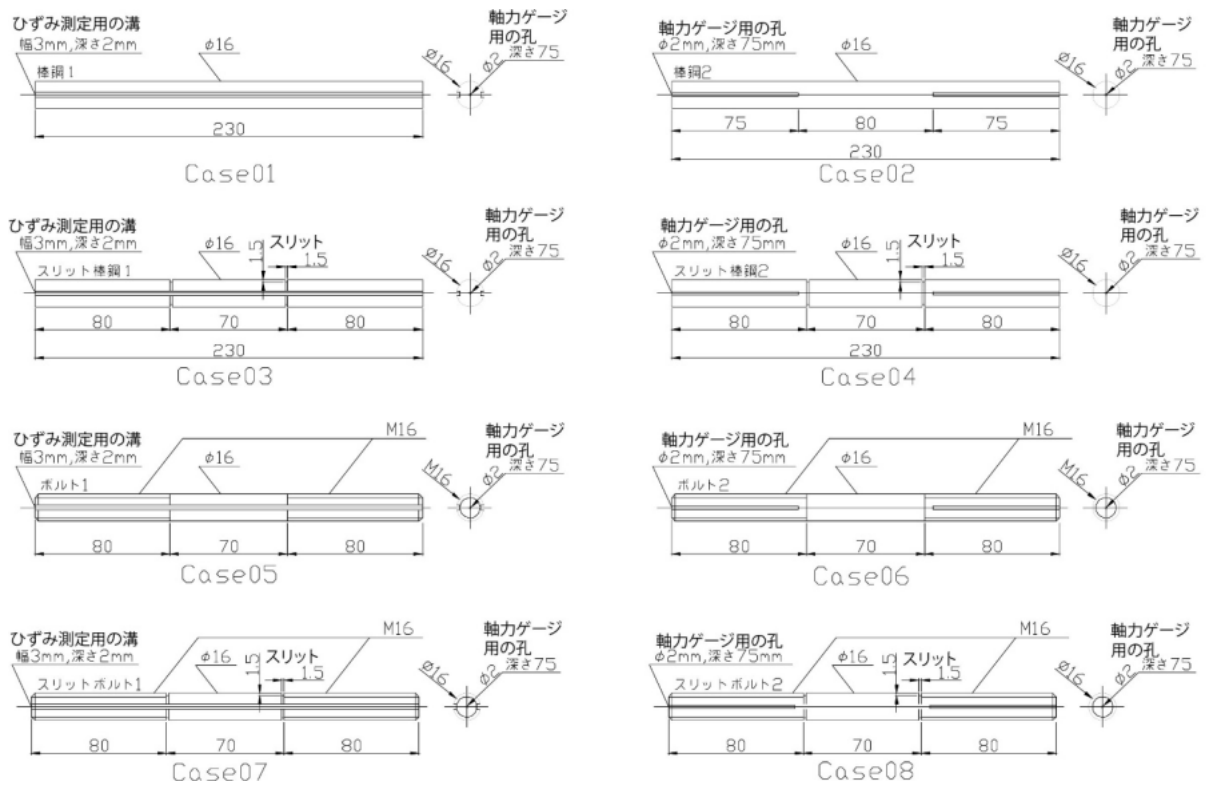
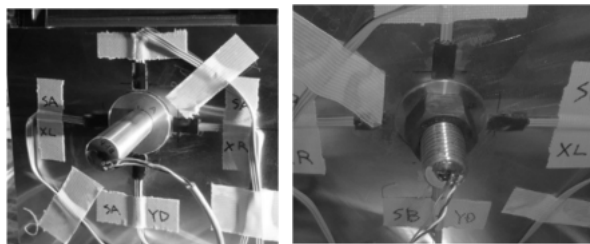


図-5 せん断試験用ボルト



(種別 φ16)

(種別 M16)

写真-1 試験の様子

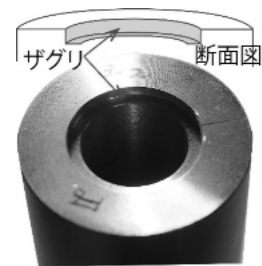


図-6 ザグリ加工の説明図

試験体の配置にあたり、S55C材で製作したスリーブに通して治具に配置し、棒鋼の端部は固定せず、ボルトにおいては、ナットを手締めにて端部を固定した。(写真-1参照)

下巻に相当するスリーブに、図-6に示すザグリの有無が破断に与える影響をcase04において確認し、それ以外のケースで、ネジの有無、スリットの有無による最大せん断耐力と強度のバラツキを検討した。試験においては、载荷荷重、载荷プレートの変位その他、試験体に配置した軸力や側面のひずみを計測している。

3. 試験結果

(1) スリーブ形状について

2面せん断試験の結果のうち、最大荷重、破断時

荷重に関する結果を表-3にまとめた。応力を算出する際の有効断面積は、スリーブ境界面における有効径に対して、ゲージ貼り付け等の欠損した断面も除いた面積である。なお、Case08-3はスリットがスリーブ内に位置したため検討から除外した。

図-7にスリットを有する棒鋼を対象としたCase04の最大応力と強度のバラツキを示す。図には、最大せん断応力度とせん断強度をグループとして、各ケースの計測値と、それぞれのグループの単純平均を実線で併記した。Case04-1, Case04-2, Case04-3は、ザグリが無いスリーブを用いて、Case04-4とCase04-5では、ザグりを有するスリーブを用いている。

最大せん断応力度、せん断強度ともに、単純平均値より上側にあるケースは、ザグリの無いケースである。一方、下側の値となったケースは、ザグりを有する2ケースとザグリ無しの場合のCase04-1である。破

表-3 せん断試験結果

| ケース名 | せん断抵抗断面 As(mm ²) | 最大荷重 S _{max} (kN) | 最大せん断応力度 (N/mm ²) | 最大荷重時の変位 (mm) | 破断荷重 St(kN) | せん断強度 (N/mm ²) | 破断変位 (mm) | ザグリ 無 |
|-----------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------|----------------|-------------------------------|--------------|----------|
| Case01-1 | 189.06 | 118.48 | 626.6 | 3.12 | 116.7 | 617.3 | 3.29 | |
| Case01-2 | | 118.74 | 628.0 | 3.28 | 118.1 | 624.7 | 3.38 | |
| Case02-1 | 201.06 | 131.41 | 653.6 | 3.11 | 130.9 | 651.1 | 3.19 | |
| Case02-2 | | 132.91 | 661.0 | 3.53 | 130.6 | 649.6 | 3.82 | |
| Case02-3 | | 132.05 | 656.7 | 3.43 | 131.0 | 651.6 | 3.56 | |
| Case03-1 | 129.73 | 80.39 | 619.6 | 1.22 | 76.5 | 589.6 | 1.64 | |
| Case03-2 | | 80.06 | 617.1 | 1.41 | 76.8 | 591.8 | 1.72 | |
| Case03-3 | | 80.52 | 620.6 | 1.29 | 78.7 | 606.9 | 1.52 | |
| Case03-4 | | 79.56 | 613.2 | 1.46 | 74.8 | 576.9 | 1.90 | |
| Case03-5 | | 81.17 | 625.6 | 1.30 | 77.9 | 600.4 | 1.63 | |
| Case04-1 | 132.73 | 84.70 | 638.1 | 1.23 | 83.0 | 625.6 | 1.38 | ○ |
| Case04-2 | | 95.14 | 716.7 | 1.38 | 92.9 | 700.2 | 1.56 | ○ |
| Case04-3 | | 93.02 | 700.8 | 1.42 | 91.1 | 686.6 | 1.58 | ○ |
| Case04-4 | | 86.44 | 651.2 | 1.34 | 85.2 | 641.7 | 1.47 | |
| Case04-5 | | 81.73 | 615.7 | 1.12 | 78.7 | 592.8 | 1.39 | |
| Case05-1 | 144.17 | 92.72 | 643.1 | 1.28 | 84.3 | 584.7 | 1.94 | |
| Case05-2 | | 89.53 | 620.9 | 1.39 | 77.7 | 538.7 | 2.17 | |
| Case06-1 | 156.17 | 99.68 | 638.2 | 1.47 | 94.1 | 602.3 | 2.09 | |
| Case06-2 | | 108.24 | 693.0 | 1.60 | 93.7 | 600.1 | 2.55 | |
| Case06-3 | | 105.99 | 678.7 | 1.51 | 99.3 | 635.8 | 2.14 | |
| Case07-1 | 129.73 | 81.39 | 627.4 | 1.81 | 75.9 | 585.0 | 2.29 | |
| Case07-2 | | 79.50 | 612.8 | 1.65 | 77.4 | 596.5 | 2.00 | |
| Case07-3 | | 81.11 | 625.2 | 1.73 | 78.8 | 607.6 | 1.99 | |
| Case07-4 | | 80.02 | 616.8 | 1.71 | 77.8 | 599.6 | 1.95 | |
| Case07-5 | | 80.16 | 617.9 | 2.16 | 76.9 | 593.1 | 2.56 | |
| Case08-1 | 132.73 | 81.82 | 616.4 | 1.49 | 80.4 | 605.7 | 1.66 | |
| Case08-2 | | 83.47 | 628.9 | 1.62 | 74.1 | 558.6 | 2.09 | |
| Case08-4 | | 80.38 | 605.6 | 1.71 | 77.5 | 584.1 | 1.96 | |
| Case08-5 | | 83.12 | 626.2 | 1.76 | 80.3 | 605.3 | 2.04 | |
| Case08-6 | | 82.64 | 622.6 | 1.61 | 80.0 | 602.3 | 1.95 | |
| Case08-7 | | 83.65 | 630.2 | 1.86 | 75.6 | 569.5 | 2.18 | |
| Case08-8 | | 82.94 | 624.8 | 1.61 | 80.4 | 605.7 | 1.89 | |
| Case08-9 | | 82.20 | 619.3 | 1.69 | 78.2 | 589.4 | 2.06 | |
| Case08-10 | | 81.96 | 617.4 | 1.66 | 79.0 | 595.1 | 1.94 | |

断面を確認するとCase04-1を含めたザグリ無しのケースは、写真-2のようなボルトのスリット部とスリーブ端部に接触痕が確認できた。ザグリ無しのケースにおいて、耐力差が生じた要因は不明確であるものの、試験体が隣接のスリーブに接触することで最大せん断応力度が高くなり、目的とするスリット断面を対象とした試験の信頼性が低くなる。さらにスリット部の構造としては、最適とは言い難い状況といえる。このことから、本報告においては、スリーブにザグリを設けた結果のみ取り扱う。

なお、写真-2の撮影方向として示した「A」と「A'」は、図-8に示した矢印方向に向かって撮影した面であることを示している。

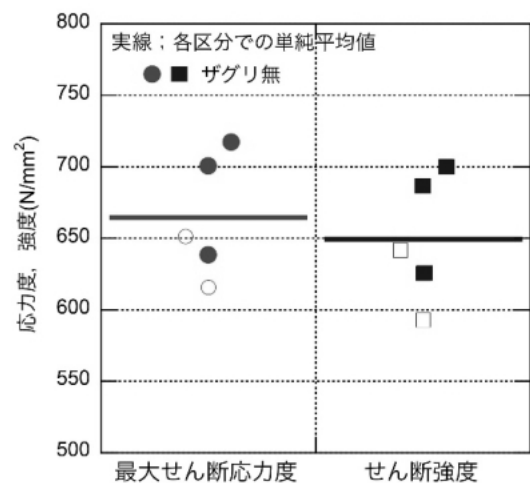


図-7 最大せん断応力度とせん断強度 (Case04)

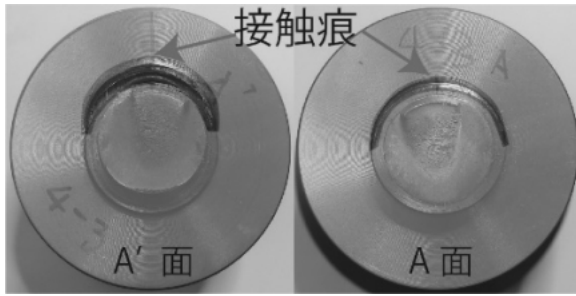


写真-2 Case04-3 破断 A 面とスリーブ状況

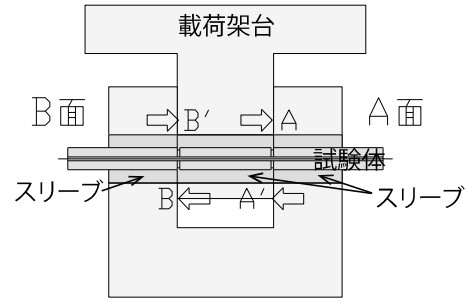


図-8 破断面の写真の撮影位置の解説図

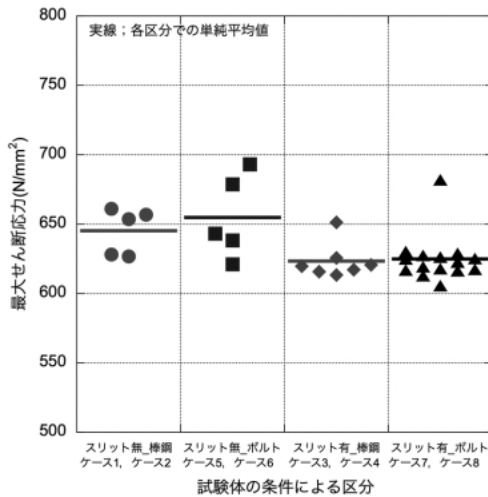


図-9 最大せん断応力度のバラツキ

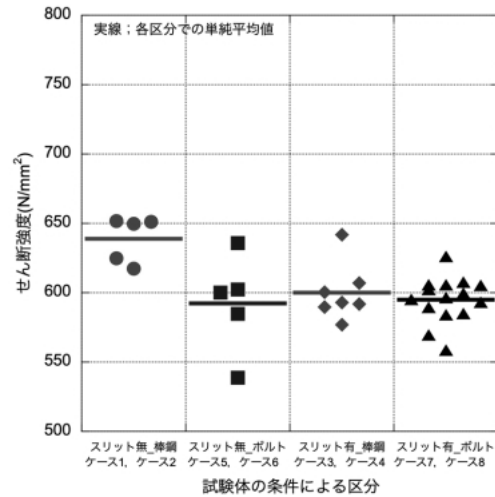


図-10 せん断強度のバラツキ

(2) 耐力や強度のばらつき

表-3で示した最大せん断応力度とせん断強度のバラツキについて、棒鋼とボルト、さらにスリットの有無に着目して整理した結果を示す。棒鋼とボルトと、それぞれのスリットの有無を区分として最大せん断応力度について図-9に示す。スリットの無い棒鋼とボルトを比較すると、最大せん断応力度の平均値は同程度であるが、ボルトの最大せん断応力度のバラツキが大きい。スリットを配置した棒鋼およびボルトの結果では、最大せん断耐力の平均値はスリット無と同じように、同程度の応力度となっている。さらに、スリットがあることでバラツキも小さいことが確認できる。

同様に図-10にせん断強度に関する区分毎の結果を示す。スリット無_棒鋼の平均強度が最も高く、それ以外のケースでは、スリット無_ボルトもスリットを有するものと同程度の強度であったことが確認できる。一方、スリット無_ボルトは、他の区分と比べてバラツキが大きいことが確認できる。

次にスリットを有する試験体を対象として、せん断载荷に対する降伏点、最大荷重点、破断（以下、特徴点）を、例えば図-11に示したせん断応力せん

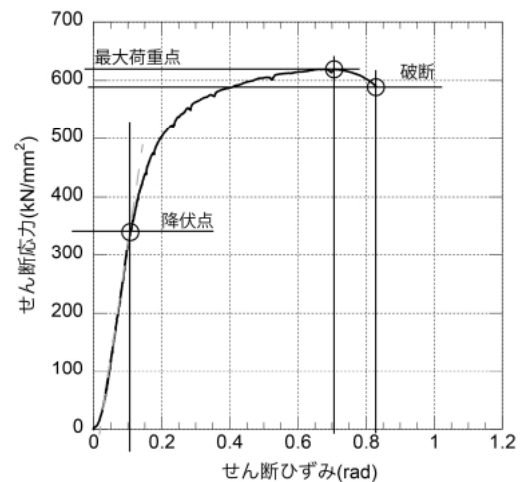


図-11 せん断応力せん断ひずみ関係

断ひずみ関係より読み取り、ネジなしとネジありに分け、特徴点に対するひずみや応力をバラツキ程度が明瞭になるように、単純平均（グラフ中の横実線）と合わせて図-12と図-13に示す。なお、せん断ひずみは、スリットの幅と鉛直変位の関係より求めた回転角である。

図-12に示したせん断ひずみは、いずれの点においても棒鋼よりボルトで計測したせん断ひずみが大

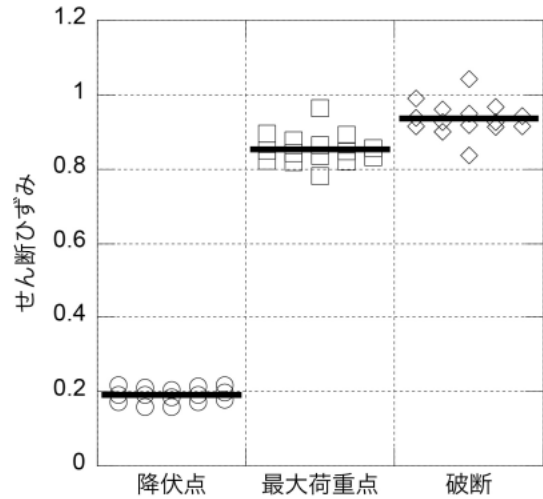
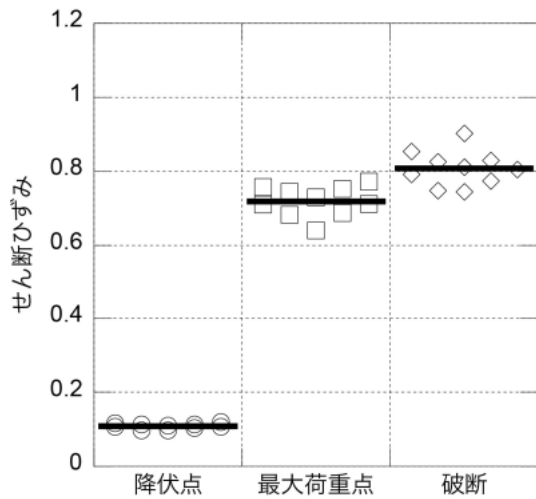


図-12 スリットを有する試験体の特徴点に対するせん断ひずみ（左；棒鋼，右；ボルト）

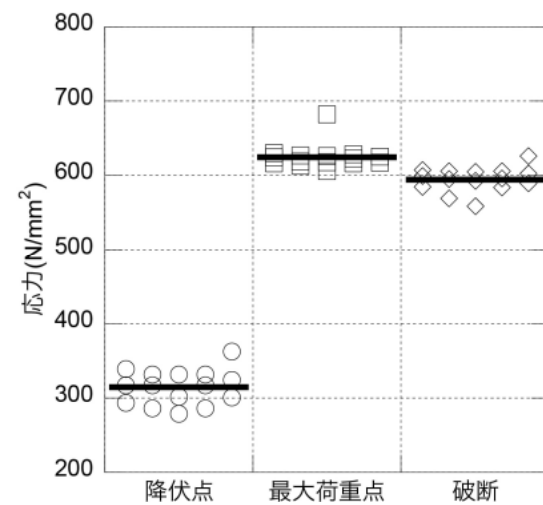
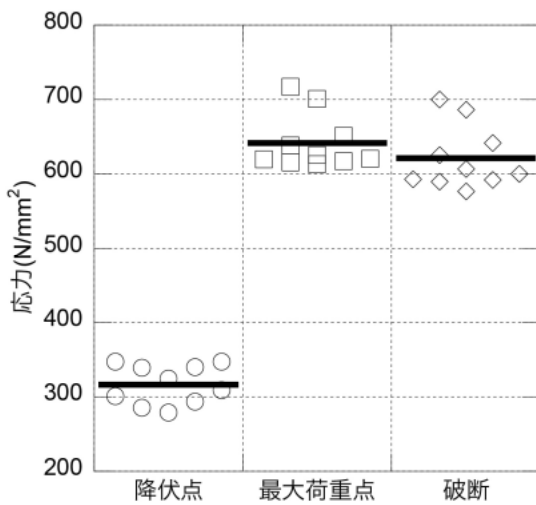


図-13 スリットを有する試験体の特徴点に対するせん断応力（左；棒鋼，右；ボルト）

きいが、降伏点におけるボルトと棒鋼の差0.1が、最大荷重点、破断のそれぞれの差と概ね等しいことから、降伏点におけるせん断ひずみの差が、その後の各点の値に影響を与えていると類推する。初期に生じた差の要因として、スリット幅の違いが要因であると想定している。図-14に示すようにスリットに隣接したネジ山がメネジで固定されない状況であった場合、見かけ上スリット幅が広くなることから、図-12に示したボルトのせん断ひずみよりも小さくなり、棒鋼の結果に近づくことになる。図-13に示したせん断応力については、降伏点における棒鋼とボルトの計測値が概ね一致している。また、そのほかの特徴点では、棒鋼のせん断応力がボルトの計測値より高い結果となっているがその差は小さい。

(2) せん断破断面

スリット無_棒鋼とそれ以外の区分において生じた平均強度の違いとスリット無_ボルトが他と比較

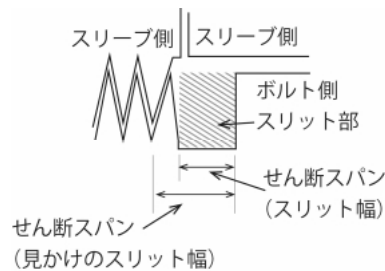


図-14 スリット部の拡大図

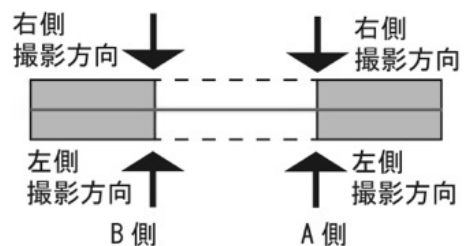


図-15 破断面の撮影方向の概要

するとバラツキが大きくなった要因を確認するため破断面を確認する。ここで、図示する破断面は、図-15に示すように3つに切断された試験体の両端に位置するものを側方から撮影し、上面（载荷プレート側）を中心に展開するように写真を配置したものを図-16から図-19に示す。本報告で掲載した写真は、試験体の条件による区分毎に代表するケースのみを示す。

図-16に示したスリット無_棒鋼は、载荷側となる上面は、下方に潰れているような変形が右面と表示した試験体の下、左面と表示した試験体の上の破断面側で確認できる。さらに、概ね鉛直に破断面が形成されている。

図-17に示したスリット無_ボルトにおいては、ボルトの上面において、下方に潰れる現象は顕著ではない。载荷側の状態が谷部から綺麗に破断するケースとネジ山がちぎられるようなケースが確認され、せん断境界部において、ネジの噛み合わせの違いが破断状態を不安定にしていると推察する。破断面は、長軸方向に対して鉛直方向に進展するのではなく、ネジ谷部の影響を受けたように傾きを持っている。

図-18や図-19に示したスリット有の区分では、スリット部がせん断変形し、破断面はスリット部に位置している。一部では、ネジ山がせん断変位する下方に変形したケースも確認されたものの、スリット部で破断を制御できていることが確認できる。

4. スリット部の最適化

2面せん断試験とせん断破断面を詳細に確認した結果より、以下のように整理することができる。

1) スリット無_棒鋼

载荷プレートが下方移動することにより、外側に位置する試験体の上側のみ延性変形している。

延性変形は下方たわみのような残留があるため、抵抗特性には曲げ抵抗も疑われる。

破断面の乱れは少ない。

2) スリット無_ボルト

プレート境界部に位置したネジ部の状態により、破断状態が異なり、強度等のバラツキが大きい。

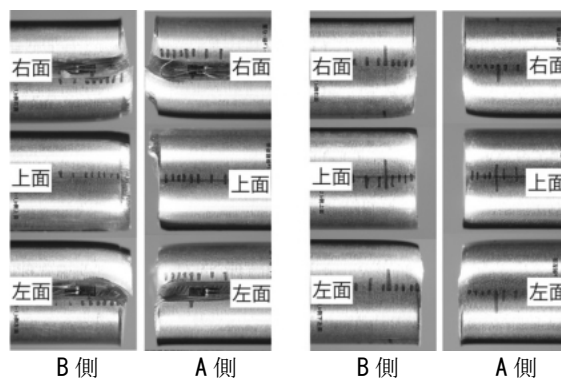
破断はネジ谷部に影響を受けている。

3) スリット有_棒鋼

スリット部でせん断変形が明瞭である。

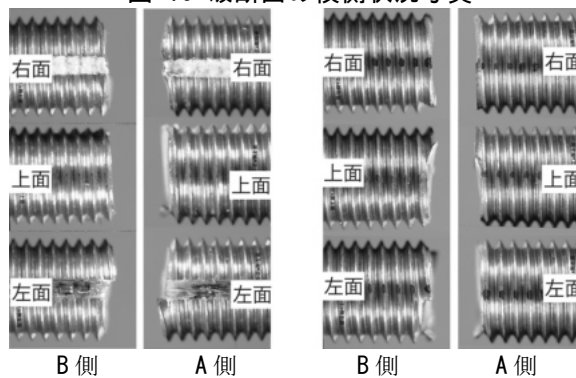
せん断スパン長が定義でき、破断までの変位が精度良く計算出来る可能性が高い

破断面は試験体の長軸に対して直角であり、ベースプレートに残存するボルトで下沓プレートの損傷確率を軽減出来る



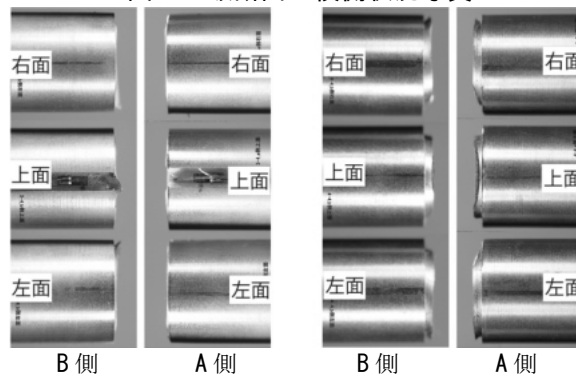
Case1-1 Case2-2

図-16 破断面の横側状況写真



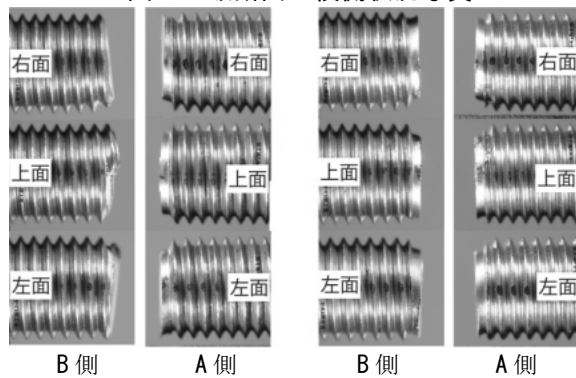
Case5-2 Case6-2

図-17 破断面の横側状況写真



Case3-4 Case4-4

図-18 破断面の横側状況写真



Case8-3 Case8-4

図-19 破断面の横側状況写真

4) スリット有_ボルト

スリット有_棒鋼と概ね同じ

ただし、ネジ山が載荷方向に変形するケースも確認される

以上のことから、スリットを有することで、純せん断となる破壊に誘導することが出来、せん断強度のばらつきを低減できる。さらに、1.5mmのスリット幅をせん断スパン長とすることで、破断変位を推定することができ、必要なじん性を確保することができる。

スリット有_棒鋼とスリット有_ボルトの結果から、強度等のバラツキを低減するためには、スリットとネジを隣接させず、スリットはネジ部以外の箇所配置することが良い。さらに、下沓プレートにザグリを設けることで、ベースプレートと下沓プレート境界にスリット部を配置させる施工精度が高められ、適切なボルト破断に誘導することができる。

図-20に示す構造が、最適なスリット部の構造として提案する。

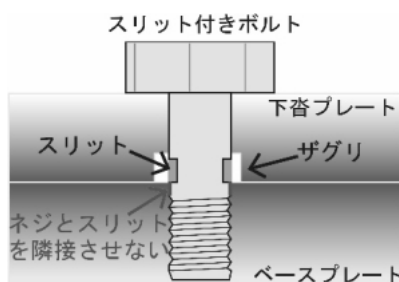


図-20 最適なボルト部構造

5. まとめ

せん断破断における強度、ひずみを高い信頼性で制御することを目的に応力ひずみ推定式の基礎データ収集やスリット部の最適化を行うために実施したせん断破断試験結果より以下の知見が得られた。

- 1) 下沓取付ボルトの応力やひずみのバラツキを低減するためにスリットを設けることが重要であることが再確認できたとともに、スリットとネジ部を隣接させるとネジ谷部の影響が不確定要素として、強度にバラツキを生じさせることが確認できた。
- 2) 下沓プレートのボルト締結部にザグリを設けることは、ボルト接合の施工性が向上するとともに、損傷誘導の信頼性を高めることができる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 1共通編，2017.
- 2) 佐藤京，寺澤貴裕，安中新太郎：超過作用時におけるゴム支承受付ボルトの抵抗特性に関する試験的検討，第24回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.95-100，2021.
- 3) 松村政秀，石原和之：軸部にスリットを設けたM12高力ボルトの引張及びせん断破断実験，構造工学論文集，Vol.58A 2012.