

超過作用時におけるゴム支承取付ボルトの 抵抗特性に関する試験的検討

佐藤 京¹・寺澤 貴裕²・安中新太郎²

¹正会員 （国研）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 修（工）（国研）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月に道路橋示方書の改訂版が発行された。この示方書では、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。しかし、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。

地域防災において災害復旧のみならず、救助、復興等の基盤をなす重要な機能が道路橋には求められており、緊急輸送道路網の橋においては、要求された限界状態を保持できないほどの損傷を与える超過作用に対しても致命的な損傷を回避する必要がある。こうした超過作用に対しては、早期回復が可能となる部材へ損傷を誘導・制御する設計法が今後求められるものと考えられる。

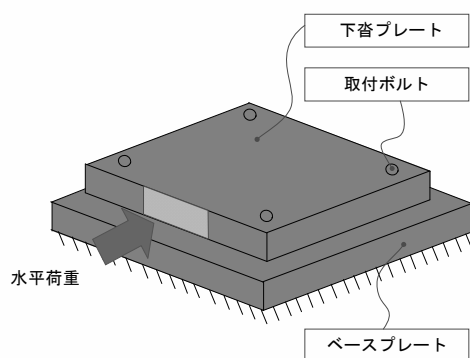
著者らは、超過作用への対策として復旧性の高い部材として、ゴム支承の下沓プレート取付ボルトに損傷を誘導する設計法（以下、損傷誘導設計法）

の提案を目指し、検討を進めている。

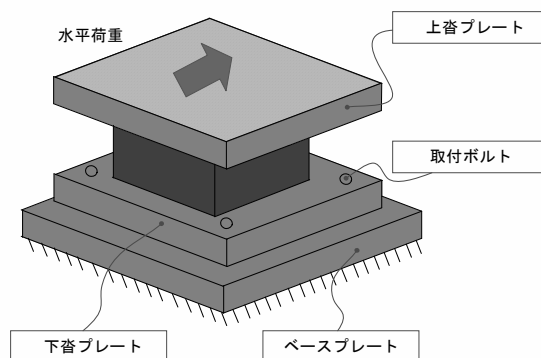
本報告では、文献1)による解析的検討結果を踏まえて実施した部材の抵抗特性に関する試験結果を報告する。

2. 損傷誘導部材の抵抗特性の検討

ゴム支承が介在した下沓プレート取付ボルトのせん断载荷試験により、ボルトの抵抗特性を評価するため、図-1 に示す試験体を用いたボルトのせん断破壊試験を実施した。試験は、図-1 a) に示す载荷対象の下沓プレートとベースプレートを複数本のボルトで固定したケース（以下、下沓プレート载荷試験）と図-1 b) に示す支承構造を有し、上沓プレートに载荷するケース（以下、支承部構造载荷試験）を実施し、支承部の固定方法の違いによる固定ボルトへの抵抗を検討するとともに、橋脚と支承構造を有するモデルによる損傷誘導設計法の検証試験に適用する取付ボルトの設置条件を検討した。各試験体に対する水平荷重载荷位置を図-2に示す。

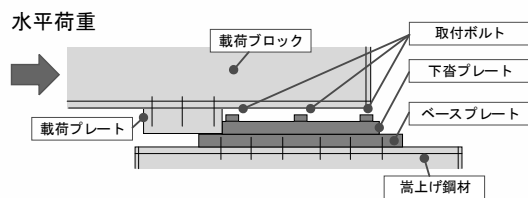


a) 下沓プレートとベースプレートの試験概要図

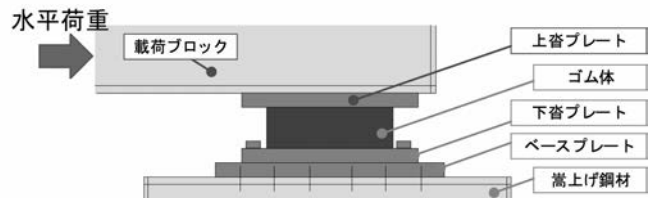


b) 支承構造を有する試験概要図

図-1 試験体概要図



a)下沓プレート載荷試験概要図



b)支承部構造載荷試験概要図

図-2 試験体載荷概要図

表-1 下沓プレート載荷試験の一覧

試験 No	適用ボルト	スリット寸法	固定ボルト数	ボルト締結力 (降伏荷重比)	ボルト孔誤差
1	M16,強度区分 10.9	$h=1.5, b=1.5$	4 本	0%	全ボルト孔 $\phi 18$
2	M16,強度区分 10.9	$h=1.5, b=1.5$	4 本	30%	全ボルト孔 $\phi 18$
3	M16,強度区分 10.9	$h=1.5, b=1.5$	4 本	70%	全ボルト孔 $\phi 18$
4	M16,強度区分 10.9	$h=4.5, b=1.5$	4 本	0%	全ボルト孔 $\phi 18$
5	M16,強度区分 10.9	$h=1.5, b=1.5$	6 本	30%	全ボルト孔 $\phi 18$
6	M16,強度区分 10.9	$h=1.5, b=1.5$	4 本	70%	$\phi 18@2, \phi 20@2$, 各対角に配置

表-2 支承部構造載荷試験の一覧

試験 No	載荷速度	適用ボルト	スリット寸法	固定ボルト数	ボルト締結力 (降伏荷重比)	ボルト締結力 軸力 (実測)	鉛直載荷
1	0.1	M16, 強度区分 10.9	$h=1.5, b=1.5$	4 本	0%	0kN	4N/mm^2 (360kN)
2	0.2	M16, 強度区分 10.9	$h=1.5, b=1.5$	4 本	30%	15kN	4N/mm^2 (360kN)
3	0.2	M16, 強度区分 10.9	$h=1.5, b=1.5$	4 本	70%	35kN	4N/mm^2 (360kN)

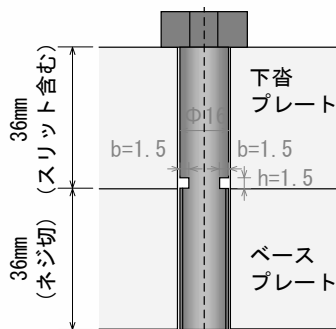


図-3 製作ボルトの概要図
(スリット形状：標準)

3. 試験概要

試験体の諸元を表-1および表-2に示す。下沓プレート載荷試験では、スリットの寸法、固定ボルト本数、ボルト締結力、ボルト孔誤差を評価するための試験体を設け、支承部構造載荷試験では、ボルト締結力を変化させた3試験体を設けている。いずれの試験もM16、強度区分 10.9のボルトを下沓取付けボルトに用いている。標準としたスリット寸法は、事前に行

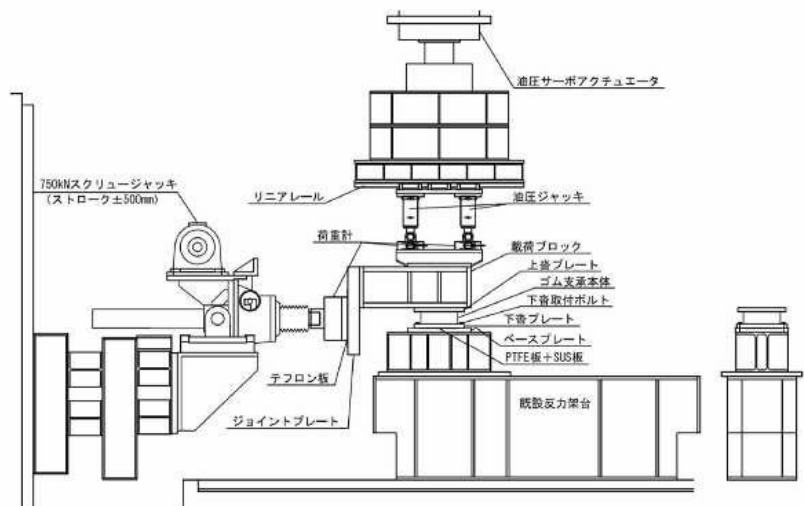


図-4 試験装置概要 (支承部構造載荷試験)

ったボルトせん断試験で破断荷重のばらつきが小さかった深さ $b=1.5\text{mm}$ 、幅 $h=1.5\text{mm}$ を採用した(図-3参照)。また、下沓プレート載荷試験では、スリット幅を $h=4.5\text{mm}$ としたボルトを対象とした試験を1ケース実施した。



写真-1 荷重状況（左；下沓プレート荷重試験，右；支承部構造荷重試験）

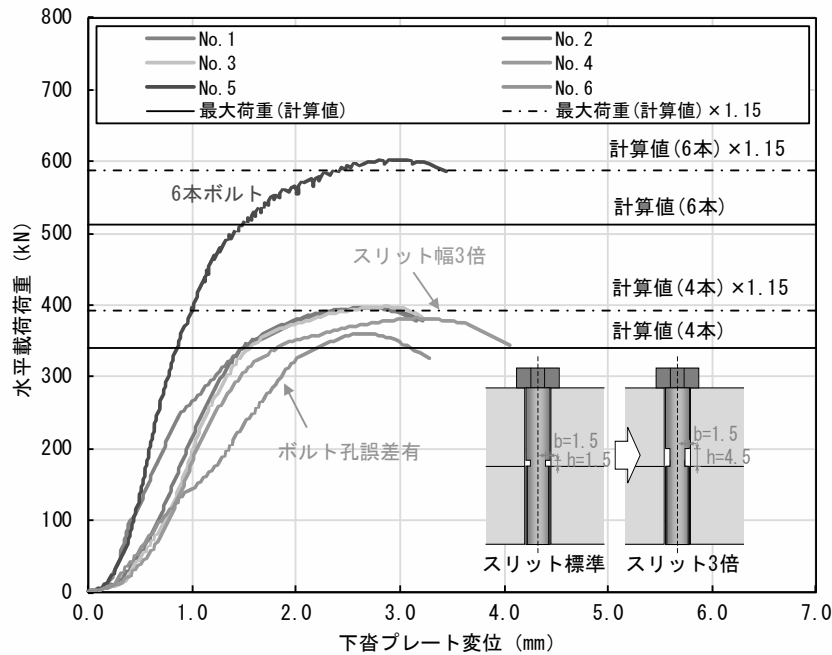


図-5 荷重変位関係

表-3 下沓プレート荷重試験における最大水平荷重（単位；kN）

配置 ボルト本数	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	設計値 公称値	設計値 実強度
4 本	396.8	395.6	397.8	382.1	-	360.0	318.8	341.1
6 本	-	-	-	-	602.9	-	478.2	511.8

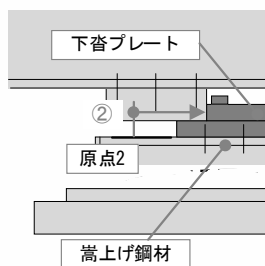


図-6 変位計測値の説明図

支承部構造荷重試験の荷重装置の概要を図-4、写真-1に示す。写真-1には、下沓プレート荷重試験の状況も合わせて示す。対象試験体への水平荷重は、反力壁に固定された750kNスクリージャッキにて与え、ジョイントプレート、荷重ブロックを介して上沓プレートに荷重伝達される。下沓プレート荷重試験においては、図-2a)に示す荷重プレートより下沓プレートに荷重が伝達される。支承部構造荷重試験では、ゴム支承本体に4.0N/mm²の鉛直方向の圧縮応力が作用するように、2基の油圧ジャッキにより360kNの鉛直軸力を導入する。

4. 試験結果と考察

(1) 下沓プレート荷重試験

試験における荷重変位関係を図-5に示す。図には、実強度とその1.15倍の値を比較参考値として示す。ここに示した変位は、図-6に示すベースプレートを固定している嵩上げ鋼材を原点とした。表-3には、各試験の最大荷重を示す。

ボルト締結力以外は同一条件で実施したNo.1, No.2, No.3試験体では、最大荷重点までの履歴に差が生じているものの、最大荷重は、いずれもほぼ400kNで、そのときの変位もほぼ一致している。さらに、ボルト本数を4本から6本に増やしたNo.5試験体も、ボルト本数の比である1.5倍（6本/4本）を考

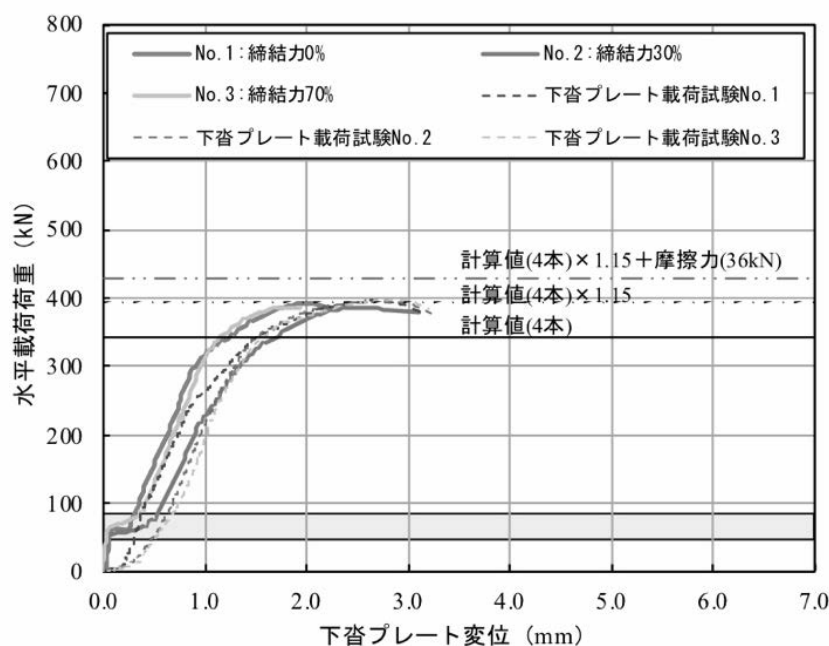


図-7 荷重変位関係

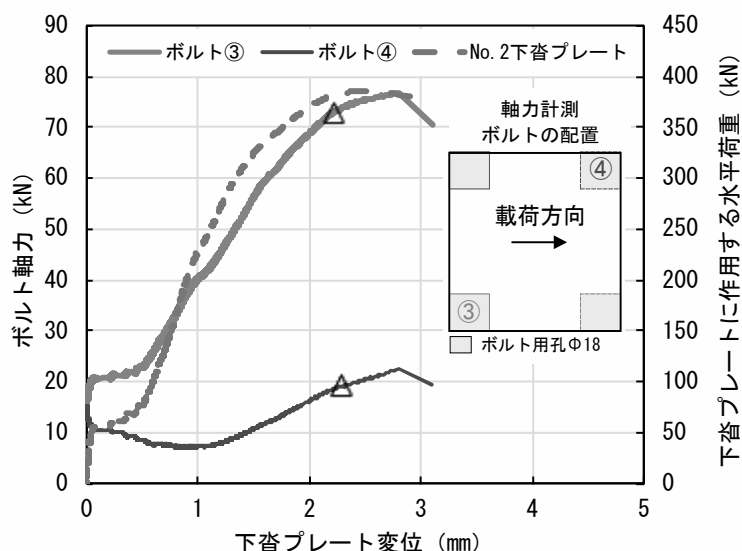


図-8 ボルト軸力と水平変位関係 (No.2 試験体)

慮すると、最大荷重は4本の場合と整合する。

一方で、同じボルト本数で深幅比 b/h （スリット深さ b ，スリット幅 h ）を大きくしたNo.4試験体やボルト孔誤差を設定したNo.6試験体では、最大荷重がNo.1，2，3より小さい。特に、ボルト孔の許容誤差の上限値を適用したNo.6試験体は、1割程度小さい値となっている。これは、水平載荷初期において一部のボルトが荷重を負担することで、破断のタイミングがずれた結果と想定される。

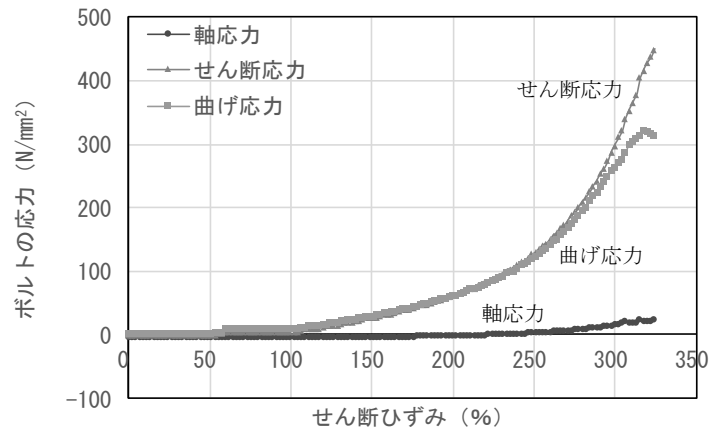
(2) 支承部構造載荷試験結

支承部構造載荷は、下沓プレート載荷試験と異なり、ゴム支承に鉛直荷重を載荷した上で、支承を通

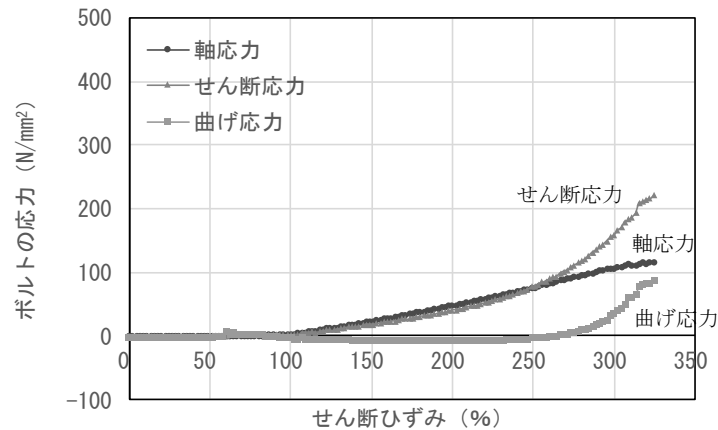
表-4 支承部構造載荷試験における最大荷重（単位；kN）

配置 ボルト本数	No.1	No.2	No.3	設計値 公称値	設計値 実強度
4 本	393.4	385.6	386.5	318.8	341.1

じて下沓プレートに荷重を載荷した試験である。試験で得られた水平荷重と下沓プレート変位の関係を図-7に示す。前項の下沓プレート載荷試験のNo.1，No.2，No.3の結果も合わせて示し、支承を通じた載荷による違いを比較した。ここに示す変位は、図-5と同様に嵩上げ鋼材を原点としたものである。表-4には、各試験の最大荷重を示す。



(a) ボルト C (押込側)



(b) ボルト D (引抜側)

図-9 支承本体取付ボルトの応力 (下沓側)

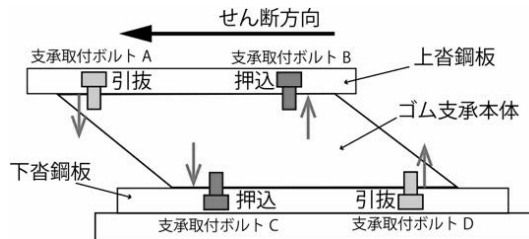


図-10 取付ボルトの引抜側、押込側の補足図

No.1からNo.3試験体は、図-7の荷重が50kNから80kNの範囲で変位が急増、または階段状に増加しているが、その点を除くと荷重変位の関係は、下沓プレート荷重試験の荷重変位関係と傾向が概ね一致しており、表-4に示す最大荷重も約390kNと概ね一致している。また、変位の急激な増加や階段状の増加履歴とボルトの締結力との関係は見られない。一方でこうした性状は、鉛直荷重を加えていない下沓プレート荷重試験では見られないことから、鉛直荷重により生じる下沓プレートとベースプレート間の摩擦抵抗が切れたことによる滑り出しの影響が現れたものと推察する。

次に試験体No.2により得られたボルトの軸力と下

沓プレート変位の関係を図-8に示す。また、文献1)の支承部構造荷重試験のシミュレーション解析の結果より、せん断荷重時に発生するボルト軸応力の関係とその補足を図-9と図-10に示す。図中に示した曲げ応力とは、取付ボルトの最外縁に作用する応力を解析で得られた破断面の曲げモーメントより算出した最外縁応力である。

軸力を計測したボルトは、図-8の右上に示すように配置した。これを文献1)の解析の際のボルト配置と比較するとボルト3がボルトD、ボルト4がボルトCに合致する。

図-8からはボルトの配置に応じ、軸力の発生の傾向に大きな違いが生じていることが確認できる。

水平载荷によりゴム支承がせん断変形するに従い、ボルト4では、下沓プレート変位1mm程度まで初期導入の締結力(15kN)が低下し、それ以降、せん断変位が増加するとともに軸力が徐々に増加し、せん断破断直前では締結力に対して8kN程度の増加となった。これに対し、ボルト3では、初期段階から下沓プレート変位の増加とともに軸力が増加し、せん断破断直前において77kNの軸力が発生している。破断時では、ボルト3と4の軸力比が概ね4倍程度の差が生じている。図-9に示した解析値においても、試験で配置したボルト3に対応するボルトDの軸力が小さく、また、その対角配置にあるボルトCの軸力は高く、概ね5倍程度の差が生じており、解析は試験結果と矛盾のない結果が得られたと考えられる。

水平载荷方向に対する前後のボルトの配置に着目すると、大きい軸力が生じた取付ボルト3と小さい軸力で推移したボルト4のいずれも下沓プレート変位がほぼ同値で破断していることから、作用する軸力による影響は小さく、ゴム支承を介して偏ったボルトへの荷重分布となる状況となっても、設計通りにせん断破断を誘導できることが確認できた。

4. まとめ

本報告では、超過作用への対策として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)の確立を目指し、下沓プレート取付ボルトの抵抗特性に関する試験を行った。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ボルトの破断荷重は、ボルト総本数分の強度と断面積により単純に評価でき、ボルト締結力による影響を受けない。
- ・各下沓プレート取付ボルトに作用する軸力に偏りが生じていてもせん断破断強度に与える影響は小さい。
- ・水平载荷によりボルトに大きな軸力(引張力)が作用しても、その影響は小さい。
- ・下沓プレートの取付ボルト孔の誤差が大きい場合は、せん断破断強度が低下する。損傷誘導設計の信頼性を高めるため、損傷誘導部材の破断強度の精度を高める検討が必要である。

今後は、上記の追加検討に加え、実橋梁の1/4スケールで設計した橋脚模型を用いた下沓プレート取付ボルトの破断試験による設計手法の検証試験を報告する。

参考文献

- 1) 寺澤貴裕, 佐藤 京, 安中新太郎: ゴム支承取付ボルトの超過作用時における破断に関する解析的検討, 橋梁等の耐震設計シンポジウム, 2021. (投稿中)