

損傷制御型支承の開発に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 29～令 1
担当チーム：CAESAR
研究担当者：大住道生、岡田太賀雄
澤田守、中尾尚史

【要旨】

設計を超過する作用が橋に作用した場合の対策として、支承部で損傷を制御することにより、橋全体系が致命的な損傷に至りにくくなるように損傷シナリオをデザインする方法がある。しかし、支承部で損傷を制御（損傷制御型支承の導入）するためには、損傷制御する部品や損傷させない部品を明確にし、これらの耐力や耐力のばらつきを正確に把握したうえで、設計方法を構築することが重要である。本課題では、損傷制御型支承の設計方法の構築に向けて、スリーブ管を用いてアンカーボルトで確実に損傷を制御するシステムの適用性について検討した。その結果、提案した損傷制御システムは適用性が十分にあることを確認できた。

キーワード：損傷制御、支承、アンカーボルト、耐力

1. はじめに

道路橋の耐荷性能の照査に用いる設計地震動は、地震動特性等のばらつきの影響を考慮して設定されているが、設計地震動を上回る地震動が発生する可能性は否定できない。また、津波や斜面変状、断層変位などの直接設計照査を行っていない極めて大きな作用に対して性能を確保することは困難であると考えられる。

この様な設計を上回る作用への対策方法の1つとして、特定の部材で損傷を制御することで損傷シナリオをデザインする方法がある。CAESAR ではアーチ橋を対象として、支承部で損傷を制御（損傷制御型支承の導入）することにより、橋全体系が致命的な被害に至りにくく、かつ機能回復しやすい構造にできることを確認している。

但し、損傷制御型支承を設計する場合、損傷制御する部品と損傷させない部品の耐力を設定し、これら部品の耐力を正確に評価したうえで、適切な耐力差を設定することが重要である。

そこで本課題は、損傷制御型支承の設計方法の構築に向け、スリーブ管を用いてアンカーボルトで確実に損傷を制御するシステム(図-1.1)の適用性について検討を行ったものである。

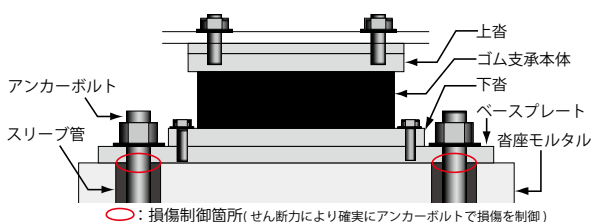


図-1.1 損傷制御型支承のイメージ図

2. 損傷制御に適した材質の検討

本章では、アンカーボルトで確実に損傷制御させるために最適な材質及び耐力を把握するため、純せん断载荷実験を行った結果を述べる。

2.1 材質が異なる場合の耐力の検討

本研究では、一般圧延用鋼材(SS400)、ねずみ鋳鉄(FC250)、ダグタイル鋳鉄(FCD600)を対象とし、実験供試体の径が50mmの丸棒を使用した。

本実験では、所内実験棟の反力床(厚さ1500mm)にある貫通穴(内径54mm)を利用した。この貫通穴に実験供試体を差し込み、载荷治具および油圧ジャッキを用いてせん断载荷を行った(写真-2.1)。また、载荷試験中に载荷治具の浮き上がり及び回転を防止するために鋼桁を用いた。なお、载荷治具と浮き上がり防止用の鋼桁との間にフラットローラー、载荷治具と反力床の間には金属板とグリスを用いて、これらの間の摩擦を十分に低減した。

実験は実験供試体にねじりが作用しないよう2台の油圧ジャッキを用いて平行に载荷した。载荷に際して、载荷治具の左右に取り付けた変位計により、载荷する

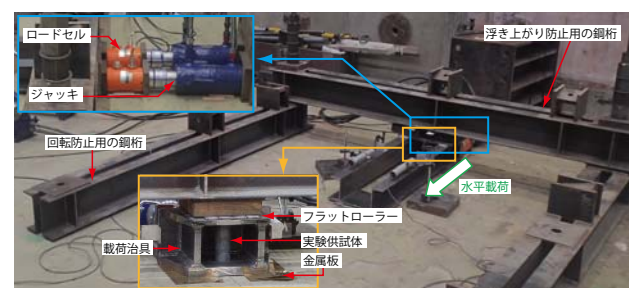


写真-2.1 実験装置のセットアップ状況

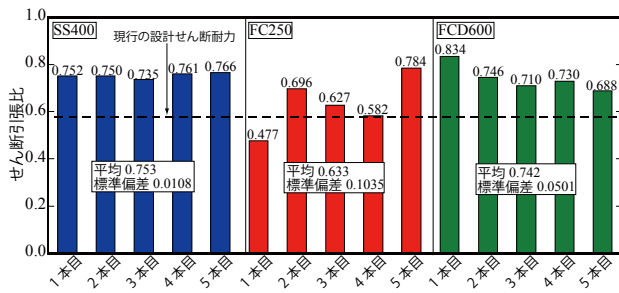


図-2.1 各材質ごとのせん断耐力とばらつきの関係

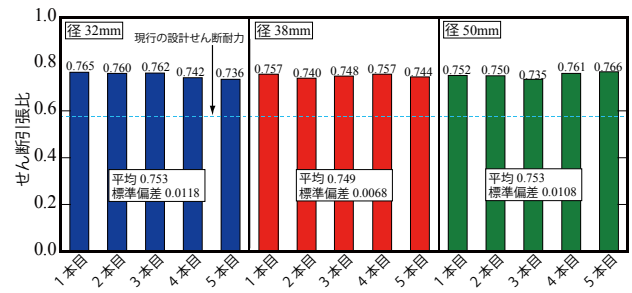


図-2.2 各アンカーボルト径におけるせん断引張比



(a) SS400



(b) FC250



(c) FCD600

写真-2.2 実験終了後の実験供試体の破断状態



(a) 径 32mm



(b) 径 38mm

写真-2.3 実験終了後の実験供試体の破断状態

ときの変位差が大きくなるように注意を払いつつ
 載荷した。載荷は単調増加載荷とし、実験供試体が破
 断するまで載荷した。

図-2.1 は各材質のせん断耐力とそのばらつき(標準
 偏差)を示したものである。縦軸は実験で計測した最大
 荷重を引張荷重(引張強さ×断面積：引張強さはミル
 シートの実強度)で割って無次元化したものである。本
 報告書ではせん断引張比と呼称する。図中には、道路
 橋示方書²⁾に示されている係数($1/\sqrt{3} \approx 0.578$ 、現行の
 設計せん断耐力と呼称)も図中に示した。

図より、各材質におけるせん断引張比の平均は、現
 行の設計せん断耐力よりも大きい値になっている。各
 材質におけるせん断引張比の標準偏差は、SS400 が最
 も小さくなっている。また、実験供試体のせん断破断
 位置のばらつきもSS400 が最も小さかった(写真-2.2)。
 したがって、本実験の範囲では一般圧延鋼材(SS400)
 が損傷制御の部品に適していると考えられる。

2. 2 径が異なる場合の耐力の検討実験

本実験では、実験供試体であるアンカーボルトの径
 を32mmと38mmにした場合について検討した³⁾。実
 験装置及び実験方法は写真-2.1及び前述の方法と同
 様である。また、実験供試体と載荷治具及び貫通穴の
 すき間にはスリーブ管(機械構造用炭素鋼：S45C)を用
 いた³⁾。本研究では、得られた結果から最大荷重(最大
 せん断荷重)とそのばらつきについて検討した。

図-2.2はせん断引張比を示したものである。図中
 には、図-2.1に示したアンカーボルト径50mmの結果と
 現行の設計せん断耐力も示した。図より、各アンカー
 ボルト径におけるせん断引張比は0.75程度であり現行
 の設計せん断耐力よりも大きくなっている。また、標
 準偏差は0.01程度以下であり、せん断引張比のばらつ
 きも小さかった。したがって、SS400の場合、アンカー
 ボルトの径が変わっても、せん断引張比(耐力)のばら
 つきが小さいことを確認できた。なお、スリーブ管に
 は変形等の損傷は見られなかったため、スリーブ管に
 S45Cを用いることが適切であることも確認できた。

3. 載荷高さが異なる場合の耐力の検討

前章の純せん断載荷実験により、SS400が損傷制御
 の材質に適していることを確認した。本章では、SS400

を対象として、載荷高さを変化させた場合の耐力のばらつきについて検討した結果を述べる。

実験装置を写真-3.1に示す。本実験も前述と同様に所内実験棟の反力床及び貫通穴を利用しているが、載荷治具の浮き上がりは拘束していない³⁾。また、本実験でも実験供試体と載荷治具及び貫通穴のすき間にはスリーブ管(S45C)を用いた³⁾。本研究では、載荷高さを125mm~750mmに変化させて水平方向に単増加載荷を行い、実験供試体が破断するまで載荷した。

実験結果を図-3.2及び写真-3.2に示す。縦軸は計測した最大荷重を前節の実験で得られた径32mmにおける最大荷重(5本の供試体の平均270.1kN、最大純せん断荷重と呼称)で割った値であり、純せん断荷重に対する載荷荷重の比を表している。また、図中には載荷高ささと実験供試体から載荷治具の先端までの距離の比(H/L)も示した。実験供試体の破断状態は、載荷高さが高くなると、曲げ変形しているような傾向がある。一方、最大荷重と最大純せん断荷重の比は1.0程度であり、標準偏差も0.02程度以下と小さかった。一方、載荷高さが750mm($H/L=1.11$)は、ジャッキのストローク限界まで載荷しても実験供試体は破断しなかった。

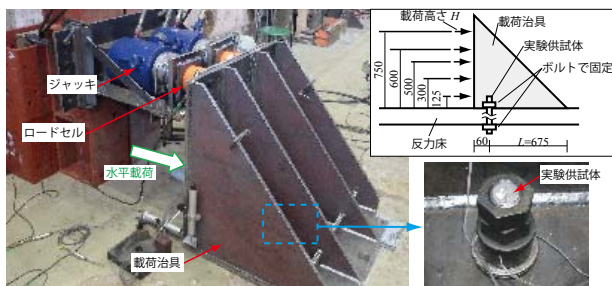


写真-3.1 実験装置のセットアップ状況

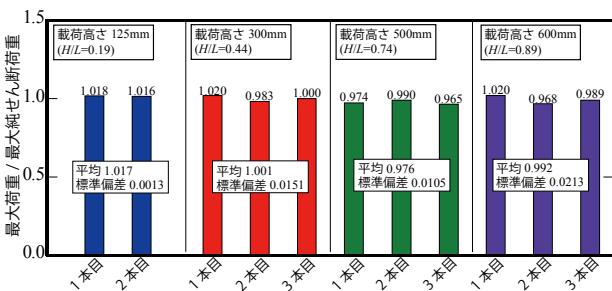


図-3.2 最大荷重/最大純せん断荷重の関係



(a) 125mm (b) 300mm (c) 500mm (d) 600mm

写真-3.2 実験終了後の実験供試体の破断状態

したがって、載荷高さが600mm以下($H/L=0.89$ 以下)の範囲では、載荷高さを変化させても最大荷重に変化が見られず、ばらつきも小さいと考えられる。なお、載荷治具に取り付けた変位計(水平、鉛直)から、載荷高さが高くなるにつれて、引張力の影響が大きくなるのがわかった。

4. ベースプレートと沓座モルタルの間に生じる付着力及び摩擦力の検討

アンカーボルトで損傷を制御する場合、アンカーボルトの耐力に加えてベースプレートと沓座モルタルの間に生じる付着力や摩擦力を考慮する必要があると考えられる(図-1.1参照)。そこで本章では、ベースプレートと沓座モルタルの間に生じる付着力や摩擦力の影響について、載荷実験により検討した⁴⁾。

本研究では写真-4.1に示した装置を用いて実験を行った。沓座モルタルは500mm×550mmの型枠に無収縮モルタル($t=50$)を打設して作製し、この上にベースプレート($t=16$)を載せてベースプレートと沓座モルタルの間に生じる摩擦力を計測した。付着力を計測する実験供試体は、ベースプレートを型枠に設置した状態で無収縮モルタルを2方向から流し込み、振動を与えながら打設した。なお、ベースプレートは溶融亜鉛メッキ処理した。

実験は所定の鉛直力を与えてから載荷高さ60mmで水平載荷を行い、水平変位が10mm程度に達するまで載荷した。ここで、鉛直荷重は支承の死荷重反力より小さいが、本研究では110kN(面圧0.6MPa)を載荷治具の中心に載荷した。なお、摩擦力の計測実験は各ケース3回行った。

図-4.1は載荷治具の変位及び荷重関係を示したものである。縦軸は載荷荷重、横軸は水平変位でありベースプレートが沓座モルタル上を動いた量である。図より、両者とも載荷治具が動き出す直前にピーク値を示し、載荷治具が動き始めると荷重は低下し、ほぼ一定の値に収束している。その時の値は、付着ありの場合



写真-4.1 実験装置のセットアップ状況

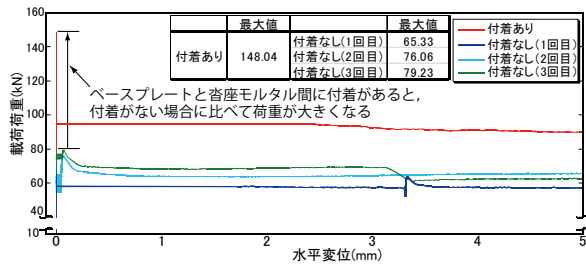


図-4.1 水平変位と載荷荷重の関係

はピーク値に対して約40%、付着なしの場合はピーク値に対して約10%から20%低下している。また、付着力ありのピーク値および載荷治具が動いているときの摩擦力は、付着なしに比べて大きくなっている。そのため、耐力階層化を行うときは、この付着力についても考慮する必要がある。

5. 損傷制御型支承の試設計

支承の各部品の耐力のばらつきを比較し、損傷制御部品としての適切な部品を検討した。

5.1 ベースプレート

アンカーボルトで損傷制御を行うことを想定して、アンカーボルトの規格及び寸法からベースプレートの設計に必要な板厚及び縁端距離が求められる。一般的に使用されているSM490(表-5.1)の場合、表-5.2に示すように25mm、55mmとなる。ここで、アンカーボルトの実験で得られたせん断耐力に標準偏差 2σ を考慮した278.6kNに対して必要となる板厚は38mmになり、通常設計時の板厚25mmを上回る。そのため、損傷制御するためにはベースプレートの板厚を上げる等の対策が必要である。ただし、SM490の材料強度の標準偏差は表-5.1に示すように0.1であり、SS400の標準偏差(0.0018、図-2.2)よりも大きい。

したがって、損傷制御部品としてはアンカーボルトの方が適切である。

5.2 ゴム支承本体

アンカーボルトの耐力はゴム支承の250%ひずみにおける水平力を上回るように設計されている。ここで、ゴム支承の250%ひずみの水平力と破断時の水平力には平均で2.77倍の耐力差があり⁶⁾、95%フラクティル値を考慮しても1.7倍程度の耐力差がある。一方、アンカーボルトのせん断耐力の制限値と実耐力には標準偏差 2σ を考慮しても1.5倍程度の耐力差である。そのため、ゴム支承本体は信頼性をもってアンカーボルトのせん断耐力以上の耐力を確保できるといえる。

前述したように、ゴム支承の破断時水平力のばらつ

表-5.1 SM490の材料特性⁵⁾

降伏強度(JIS値)(N/mm ²)	315.00
降伏強度(実強度の平均)(N/mm ²)	393.75
実強度/JIS値	1.25
標準偏差	0.10

表-5.2 ベースプレートの設計結果

	通常	損傷制御設計
アンカーボルトの材質	SS400	SS400
アンカーボルトの外径(mm)	32	32
アンカーボルトの縁端距離(mm)	55	55
アンカーボルトの孔径	34	34
アンカーボルトの許容せん断応力度(N/mm ²)	136	-
アンカーボルトのせん断耐力(実耐力)(N/mm ²)	-	393.75
ベースプレートの材質	SM490	SM490
ベースプレートの許容曲げ応力度(N/mm ²)	238	-
ベースプレートの曲げ耐力(N/mm ²)	-	393.75
ベースプレートの板厚(計算値)(mm)	25	38

表-5.3 セットボルトに使用する材料特性

	M20	M24	M30
降伏強度(JIS値)(N/mm ²)	830	830	830
降伏強度(実強度の平均)(N/mm ²)	898	845	934
実強度/JIS値	1.08	1.02	1.13
標準偏差	0.0539		

きは非常に大きく、損傷制御部品としてはアンカーボルトの方が適切である。

5.3 セットボルト

セットボルトは一般的に強度区分8.8の六角ボルトが使用されている。CAESARで別途実施した六角ボルトのせん断載荷実験より、強度区分8.8の六角ボルトの標準偏差は表-5.3に示したように0.0539であり、SS400の標準偏差(0.0018、図-2.2)よりもばらつきが大きい。したがって、損傷制御部品としてはアンカーボルトの方が適切である。

以上より、アンカーボルトが損傷制御部品として適切であることを確認できた。ただし、アンカーボルトの損傷制御断面には摩擦力が働き、摩擦力の影響により損傷制御部品と損傷させない部品の耐力が逆転する可能性がある。そのため、PTFE板(テフロン板)を設ける等、アンカーボルトの損傷制御断面の摩擦をできるだけ小さくする必要がある。

6. まとめ

本課題は、損傷制御型支承の設計方法の構築に向け、スリーブ管を用いてアンカーボルトで確実に損傷を制御するシステムの適用性について検討を行った。研究期間で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 純せん断載荷実験により、一般圧延鋼材(SS400)は铸铁(FC250)やダグタイル铸铁(FCD600)に比

べて、耐力や損傷箇所のばらつきが小さかった。したがって、SS400 が損傷制御に適していることを確認できた。

- 2) SS400 のアンカーボルト径を変化させた実験により、アンカーボルトの径が異なっても耐力のばらつきが小さいことを確認できた。
- 3) 載荷高さを変化させた実験により、載荷高さを変化させても耐力のばらつきが小さいことを確認できた。
- 4) スリーブ管に機械構造用炭素鋼(S45C)を用いた場合、せん断載荷してもスリーブ管に変形等が生じなかった。したがって、機械構造用炭素鋼がスリーブ管に適していることを確認できた。
- 5) 付着力及び摩擦力計測実験より、ベースプレートが動き始める直前のピーク値は、摩擦力に付着力が加わることで生じることを確認できた。

以上の成果により、提案した損傷制御システムは適用性が十分にあることを示すことができた。

今後は、損傷制御型支承の開発を実現するため、支承全体で考えた場合の各部品の耐力や耐力差を設定する方法について、引き続き研究を実施する。

参考文献

- 1) 中尾尚史、宮田秀太、大住道生：超過外力に対するアーチ橋の損傷制御に関する解析的研究、第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.57-64、2017
- 2) 2017(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編、2017
- 3) 中尾尚史、大住道生：損傷制御型支承に用いるアンカーボルトのせん断載荷実験、土木学会第 74 回年次学術講演会、Vol.74、I-91、2019
- 4) 中尾尚史、余野智哉、大住道生：ベースプレートと沓座モルタルの間に生じる付着力及び摩擦力の計測実験、土木学会第 75 回年次学術講演会、2020（発表予定）
- 5) 村越潤、梁取直樹、有馬敬育、清水英樹、小森大資：鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査、土木研究所資料第 4090 号、2008
- 6) 星隈順一、大住道生：ゴム支承の地震時の性能の検証方法に関する共同研究報告書、共同研究報告書第 512 号、2020