

# 高軸方向鉄筋比・高軸応力度条件下での 中空断面RC橋脚の地震時破壊特性

八ツ元 仁\* 堺 淳一\*\* 星隈順一\*\*\*

## 1. はじめに

山間部に建設される橋では、建設現場の条件から橋脚の高さが高くなる場合が多く、RC橋脚の場合には、橋脚自身の自重を軽減することにより地震時の影響を低減させ、基礎も含めた建設コストを抑えるために、橋脚の断面として中空断面が採用されることが多い。

橋の耐震設計においては、大地震時にはRC橋脚に曲げによる損傷を生じさせ、それに伴うエネルギー吸収を考慮した設計が行われる。ただし、この場合、橋に求められる耐震性能によっては、大地震後には橋脚に生じている損傷を点検できること、さらにはその損傷を補修できることが求められる。このような観点からすると、中空断面RC橋脚は、そもそも中空部内面の状況を点検することが困難な構造であるため、地震後における内面の損傷状況の点検や補修の実施が極めて難しい構造特性を有していることになる。

また、近年では、設計計算上可能な範囲で中空部を大きくし、結果的に壁厚が薄くなる例も出現しつつある。壁厚を小さくした構造になると、軸方向鉄筋の面積が断面総面積に占める割合（以降、軸方向鉄筋比）が高くなり、充実断面橋脚に比べ施工性が悪くなるだけでなく、橋脚基部の軸応力度も大きくなる等、塑性変形能の観点からも不利

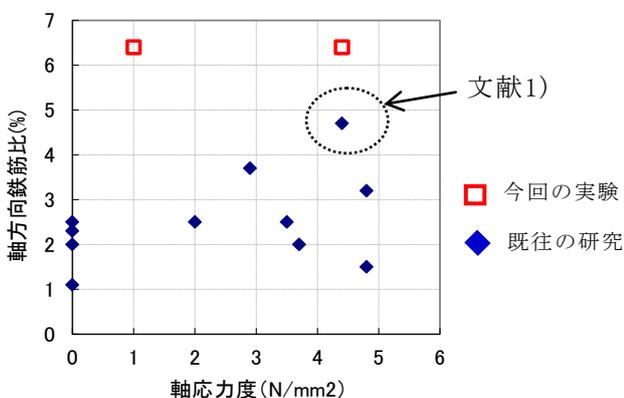


図-1 中空断面RC橋脚に対する既往の実験の構造条件

な構造条件となる可能性がある。

中空断面RC橋脚に関しては、既往の研究の中で図-1に示すような様々な構造条件下での耐震性能の検証が行われている。これらの結果によると、文献1)のように内面の損傷の進展課程まで正確に把握した実験は少ないが、文献1)で報告されているような橋脚基部での損傷が進行し、最終的には鉛直力の支持能力に影響を及ぼすような中空断面構造に特有の破壊形態がいくつか報告されている。文献1)では軸方向鉄筋にSD490を使用しているという特殊な条件が加わっていること、また、そもそも中空断面RC橋脚に対する実験自体が少ないことを考えると、全ての構造条件の中空断面RC橋脚でこのような破壊形態になると言及されるものではないが、高軸方向鉄筋比、高軸応力度といったある一定の条件が重なってくると、このような破壊形態を示す可能性があると考えられる。

そこで、本研究では、現段階における知見が十分でない高軸応力度かつ高軸方向鉄筋比の中空断面RC橋脚の耐震性能を把握するため、模型供試体を用いた正負交番繰返し載荷実験を行い、中空断面内面側も含めた損傷の進展過程と最終的な破壊形態に着目した検討を行った。

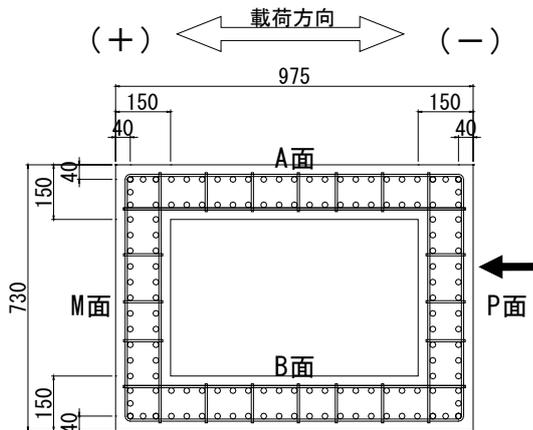
## 2. 実験の概要

図-2に実験概要を、表-1に供試体の構造諸元を示す。本実験では軸応力度の条件が中空断面RC橋脚の限界状態に与える影響を検証するため、同じ構造諸元の供試体を2体作製した。供試体の断面寸法は、実橋脚の1/7程度の規模である文献1)の供試体と同じとし、軸方向鉄筋比は水平耐力が同等となるように決定した。供試体に使用した軸方向鉄筋、帯鉄筋、横拘束筋はSD345であり、コンクリートの設計基準強度は40 N/mm<sup>2</sup>とした。帯鉄筋は鋭角フック、中間帯鉄筋は一般的に中空断面橋脚の施工で行われている、外周面側で鋭角フック、内面側で直角フックによる定着を行った(図-2(c))。また、横拘束鉄筋比については文献1)の構造条件と合わせて設定を

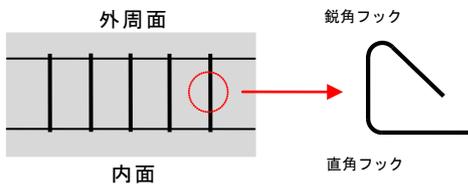
Failure Characteristics of RC Hollow Bridge Columns with High Steel Ratio under Cyclic Lateral Loading with High Axial Stress



(a) セットアップ状況図



(b) 断面図 (橋脚天端からの視点)



(c) 中間帯鉄筋の定着フック

図-2 供試体のセットアップ状況図と断面図  
表-1 実験供試体諸元

供試体No.	1	2
断面形状	中空	
載荷点高さ (mm)	4,200	
形状 (載荷方向×載荷直角方向)	975×730	
せん断スパン比	4.3	
軸方向鉄筋	種別	SD345
	鉄筋径	D16
	鉄筋比 (%)	6.4
横拘束筋	種別	SD345
	鉄筋径	D10
	間隔 (mm)	40 (中間帯鉄筋:80)
	有効長 (mm)	191.25
	体積比 (%)	2.8
軸力 (N/mm <sup>2</sup> )	4.4	1.0

行った。載荷については、想定した軸力を橋脚頭部に、水平載荷を橋脚基部より4,200mmの位置に与えた。高軸力状態を想定した供試体1には文献1)での実験条件と合わせるため柱基部での軸応力が4.4N/mm<sup>2</sup>となるように、供試体1の比較対象となる低軸力状態を想定した供試体2には、充

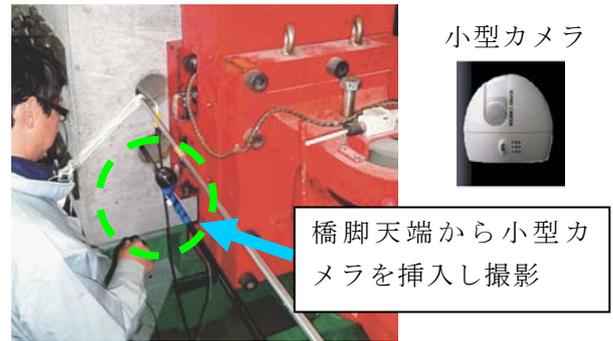


写真-1 内部観察の状況

実断面橋脚の平均的な軸力状態として軸応力が1.0N/mm<sup>2</sup>となるように軸力を与えた。水平載荷は変位制御により行い、基準変位 $\delta_0$ の整数倍の水平変位を各載荷ステップに対して3回繰り返す漸増載荷とした。なお、本実験では実験結果の比較が容易となるように、 $\delta_0$ を供試体1の初降伏変位である35mmで統一した。ひび割れなどの外観の変状については、外周面については目視による観察を行い、内面の変状については写真-1に示すように橋脚天端部に設けた穴から小型カメラを挿入して観察を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 水平荷重—水平変位の関係

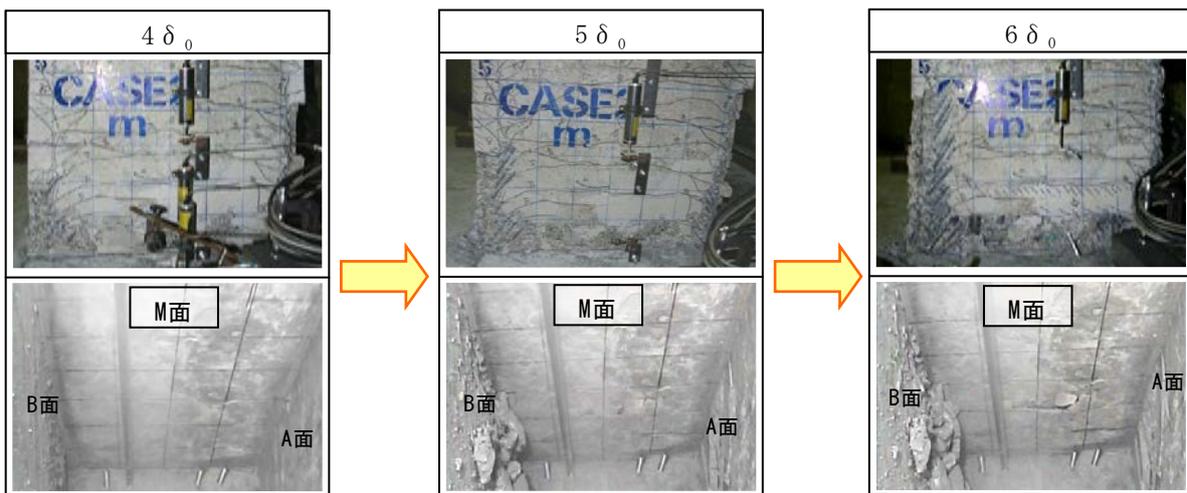
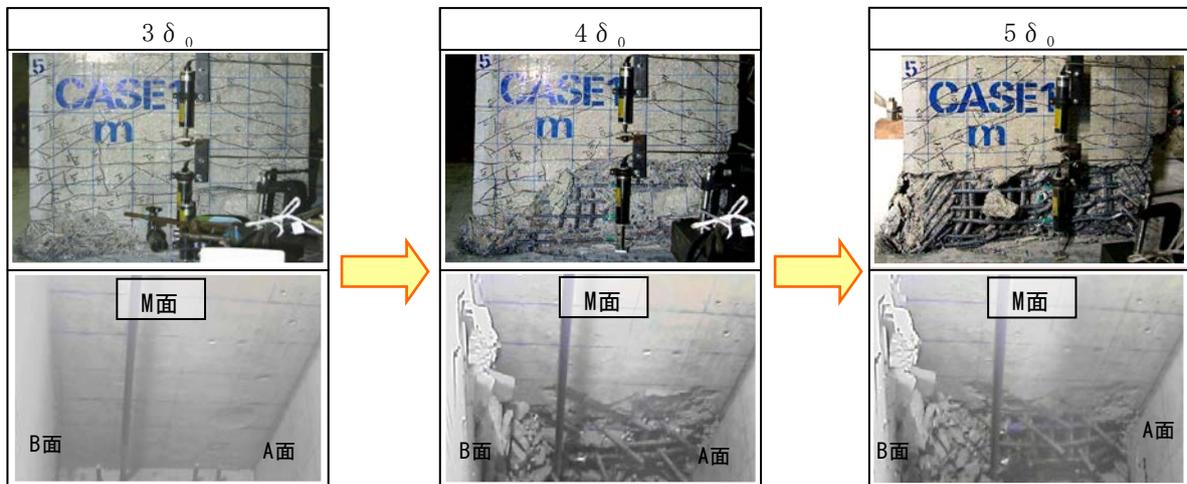
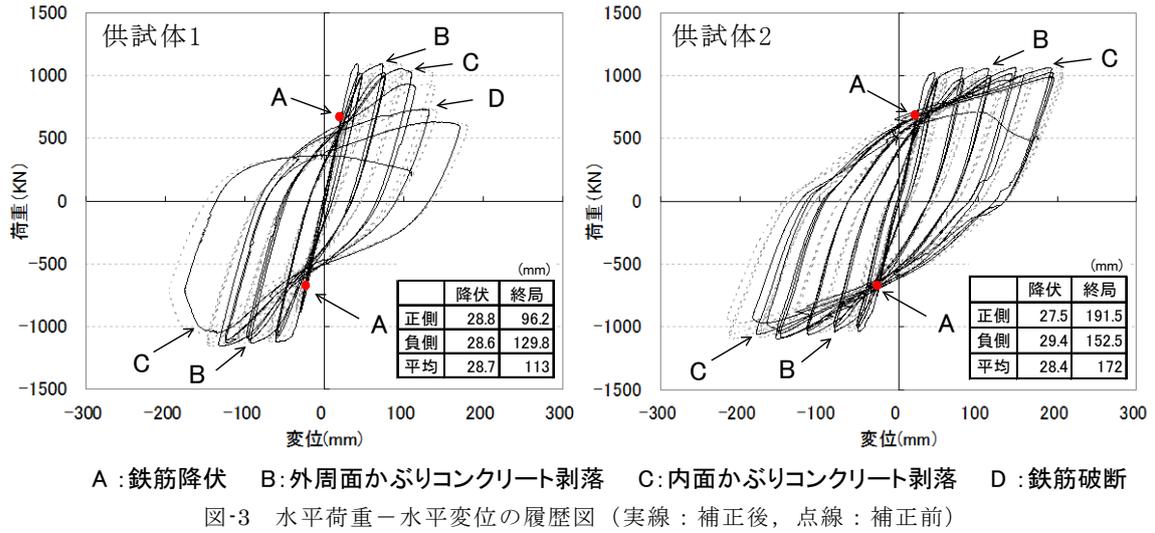
図-3に水平荷重—水平変位の履歴曲線を示す。図中には軸方向鉄筋の降伏時 (図中A)、かぶりコンクリートの剥落時 (図中B、図中C)、軸方向鉄筋の破断時 (図中D) の変位をあわせて記す。なお、図中の水平変位は鉄筋の伸び出しやフーチングの回転等に起因する変位量を控除している。

降伏変位は、供試体1と供試体2では差がほとんど無かったが、終局変位は供試体1で正負平均して113mm、供試体2で172mmとなり、塑性変形能に差が生じた。なお、ここで言う終局変位とは、最大耐力付近で安定していた水平荷重が大きく低下し始める直前の水平変位のことである。

#### 3.2 損傷の進展状況

図-4、図-5に各供試体の内面および外周面の損傷の進展状況を示す。

供試体1、供試体2とともに基準変位 $\delta_0$ よりも小さい変位段階からフランジ面で水平ひび割れ、ウェブ面で斜めひび割れが発生していた。ウェブ面での損傷については、充実断面橋脚での損傷状況に比べると、載荷変位が小さい段階から斜めひ



び割れが発生した。この結果は既往の研究結果と同じ傾向を示しており、せん断力に抵抗する面は壁厚が薄いと損傷が大きくなることを確認した。供試体1では、図-4に示すように $3\delta_0$ の載荷時に外周面でかぶりコンクリートの剥落が生じたが内面では損傷が発生しなかった。しかし、 $4\delta_0$ の載

荷時では外周面で軸方向鉄筋のはらみ出しが生じると同時に、内面で軸方向鉄筋のはらみ出し中間帯鉄筋の内面側の定着フック (直角フック) が開くという大きな損傷が生じた。なお、中間帯鉄筋の外周面側の定着フック (鋭角フック) は、実験終了時まで開かなかった。

供試体2では、図-5に示すように4 $\delta_0$ の載荷時に外周面がかぶりコンクリートの剥落が生じたが内面では損傷が発生しなかった。5 $\delta_0$ の載荷時には外周面での損傷が進展するとともに内面ではかぶりコンクリートの剥落が生じた。6 $\delta_0$ の載荷時には、供試体1の結果と同様に軸方向鉄筋のはらみ出しが外周面と内面とで同時に生じ、中間帯鉄筋の定着フックの開きは内面側でのみ生じた。

このように、いずれの供試体においても、かぶりコンクリートの剥落は外周面が内面より先行して生じるのに対し、軸方向鉄筋のはらみ出し等の大きな損傷は外周面と内面とで同時に生じた。また、中間帯鉄筋の内面側の直角フックは外周面側の鋭角フックに比べてフックが開きやすく、損傷の程度は内面側の方が大きくなった。

実験終了時の破壊状態については、供試体1では圧縮フランジ面でのコンクリートの圧縮破壊、供試体2ではウェブ面でのコンクリートの破壊、と破壊に至った部位が異なった。供試体1のように軸応力が大きい場合には、圧縮フランジのコンクリート破壊が早い段階で生じるが、供試体2のように軸応力が小さい場合には、圧縮フランジのコンクリート破壊がなかなか生じず、結果的に繰返しのせん断変形を受けてコンクリートが粉碎されたウェブ面の破壊が支配的となり、このような破壊状態の違いが生じたと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の結果、軸方向鉄筋にSD345を使用した場合でも高軸方向鉄筋比かつ高軸応力度の条件下の中空断面橋脚は、塑性変形が進展すると圧縮フランジでのコンクリートの圧壊が生じ、最終的には軸耐荷力に悪影響を及ぼすような損傷が生じる可能性があることがわかった。また、低軸応力度条件では、ウェブ面のコンクリートの破壊が支

配的となり最終的な破壊状態に至るとい、軸応力条件の違いが破壊する部位や破壊状態に大きな影響を与えることが明らかとなった。さらに、軸応力条件の違いに関わらず、軸方向鉄筋のはらみ出しという大きな損傷は外周面と内面とではほぼ同時に生じ、その時には中間帯鉄筋の内面側の直角フックのみが開き、内面側での損傷が大きくなるということが明らかとなった。これら実験的に得られた知見は、中空断面RC橋脚に対する地震時限界状態の評価においては、損傷の進展メカニズムが充実断面橋脚の場合と異なるという点だけでなく、地震後における損傷の点検の難易、損傷が生じた場合の補修の難易等も含めて検討する必要があることを示唆していると言える。

なお、このような背景から、平成24年に改定された道路橋示方書<sup>2)</sup>では、中空断面RC橋脚では、塑性ヒンジ領域とその近傍で塑性ヒンジの影響を受ける領域は充実断面とする等の対応がなされているところであるが<sup>2)</sup>、今後は、中空断面RC橋脚に求められる性能を踏まえつつ、①内面側に補修を必要とするような損傷が生じないようにする耐震設計技術、②曲げにより最終的な破壊に至っても軸耐荷力は確保可能な断面設計、③内面に損傷を生じさせないようにするための構造細目（内面側の中間帯鉄筋の端部フック形状の効果の検証）等について研究が求められる。

#### 参考文献

- 1) 玉越隆史、星隈順一:軸方向鉄筋にSD490を用いるRC中空断面橋脚の耐震性について、土木技術資料、2011年5月
- 2) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編、平成24年3月

八ツ元 仁\*



阪神高速道路株式会社技術部技術開発課（前土木研究所構造物メンテナンス研究センター 研究員）、修(工)  
Hitoshi YATSUMOTO

堺 淳一\*\*



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員、博(工)  
Dr. Junichi SAKAI

星隈順一\*\*\*



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員、博(工)  
Dr. Jun-ichi HOSHIKUMA