

# 論文 中空内部を充填せず部分的に RC 巻立て補強した中空断面 RC 柱部材の耐震補強効果の検証実験

後藤 源太\*1・飛田 一彬\*2・李 首一\*3・高橋 良和\*4

**要旨:** 中空断面 RC 橋脚を対象として、中空内部を充填せず部分的に RC 巻立て補強した場合の耐震補強効果を検証することを目的に、縮小供試体を用いて正負交番載荷実験を行い、その耐震補強効果を検証した。その結果、中空内部を充填せず部分的に RC 巻立て補強することによって、じん性率が上昇し、中空内部を充填した場合と同程度に軸沈下も抑制されたことから、一定の耐震補強効果が確保できる可能性が示された。一方で、中空内部を充填せず RC 巻立て補強する場合、中空内面でのはらみ出しによる損傷を防止することができないことに留意した配慮が必要であることも示唆された。

**キーワード:** 中空断面 RC 橋脚, 耐震補強, RC 巻立て, 軸沈下抑制

## 1. はじめに

山間部の橋梁では急峻な谷を横過するため、橋脚高 30m 以上の高橋脚が多く採用されており、これらの橋脚では、地震力の軽減や基礎への負担軽減のため、橋脚内部を充実とせず中空とした中空断面 RC 橋脚が採用される場合がある<sup>例えば 1)</sup>。南海トラフ地震等の大規模地震に備え橋梁の耐震補強が進められる中で、中空断面 RC 橋脚を対象とした耐震補強を実施するため、耐震補強効果の検証が行われており<sup>2)~6)</sup>、最近発刊された設計要領<sup>7)</sup>では、基部の巻立てに加えエアモルタルを中空内部に充填することで軸沈下を抑制し、中空断面 RC 橋脚特有の破壊形態である軸耐荷力の喪失<sup>8)</sup>を抑制できる工法が規定された。これら文献に示されるように、中空断面 RC 橋脚を対象とした耐震補強工法は現地施工可能な工法がいくつか提案されている。

ただし、これらの耐震補強工法はいずれも中空内部をコンクリートやエアモルタル等で充填することを前提としているため、施工する際には、写真-1 に示すような中空内部への充填用の孔を設ける必要があるため、既設橋脚の配筋状況によるが、配筋が密であると、既設鉄筋を切断せざるをえない場合もあり、既設橋脚の過度な損傷につながる懸念される。また、中空内部にコンクリートを充填する場合、施工ヤードの制限から生じる交通規制等、工費・工期の増大も懸念される。また、著者らの既往研究<sup>9)</sup>によれば、中立軸の位置が既設橋脚の壁厚内にあれば、中空内部でのかぶりコンクリートの剥落等の損傷は生じない可能性があることが示されていることから、必ずしも中空内部を充填しなくても、一定の耐震補強効果が確保できる可能性はありと予想される。



写真-1 中空内部への充填用の孔

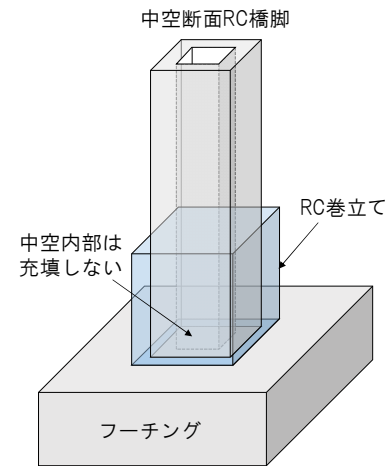


図-1 本研究で提案する補強イメージ

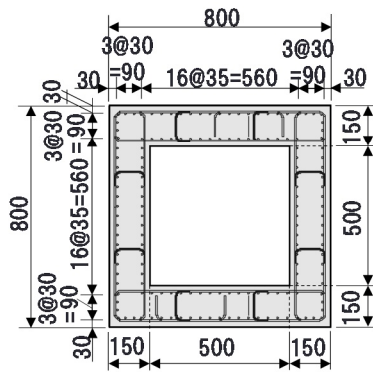
そこで、本研究では、中空断面 RC 柱部材を対象として、中空内部を充填せず部分的に RC 巻立て補強した縮小試験体の正負交番載荷実験を行い、その耐震補強効果を検証した。なお、本研究で提案する補強イメージは図-1 に示すとおりである。

\*1 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部橋梁研究室 研究員 工修 (正会員)

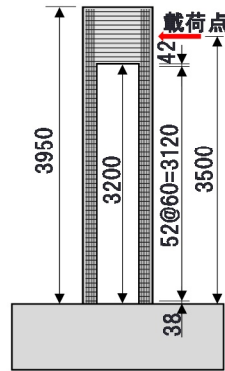
\*2 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部橋梁研究室 主任研究員 工学学士

\*3 NEXCO西日本コンサルタンツ(株) 大阪支店構造技術部 課長 工修

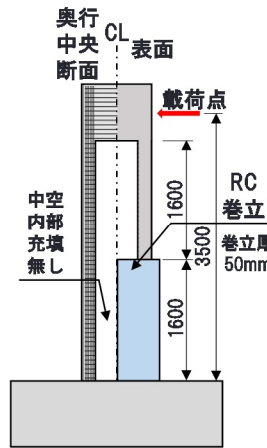
\*4 京都大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)



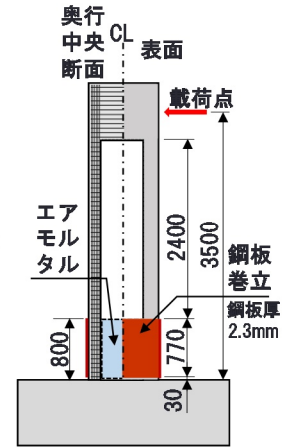
a) 断面図



1) C 中空\_NR



2) C 中空\_RCR



3) C 中空\_SPL

b) 柱部の断面図 ( 2), 3)については, CL より右側に表面を示す)

図-2 供試体の概要図

単位 : mm

表-1 供試体の構造諸元

供試体名		C中空_NR	C中空_RCR	C中空_SPL
既設断面諸元		中空		
軸応力 (N/mm <sup>2</sup> )		3.0[軸力換算1150kN]		
軸方向鉄筋	種別	SD345		
	鉄筋径 (mm)	D10		
		外側	30	
	内側	30		
軸方向鉄筋比 (%)	2.78			
帯鉄筋	種別	SD345		
	鉄筋径 (mm)	D6		
	間隔 (mm)	60		
	帯鉄筋比 (%)	0.70		
	フック形状	外側	直角フック	
内側		直角フック		
内空基部充填材料	充填材	—	—	エアモルタル
	充填高さ	—	—	短辺長 (1.0×D)
外側巻き立て	—	—	RC 巻立て	鋼板 巻立て
	—	—	2.0×短辺長 (2.0×D)	短辺長 (1.0×D)

表-2 材料試験結果 (コンクリート)

a) C 中空\_NR

コンクリート種別	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
柱1リフト	49	23.7	19.6	2.2
柱2リフト	37	30.8	23.0	2.4
柱3リフト	29	33.5	28.9	—

b) C 中空\_RCR

コンクリート種別	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
柱1リフト	162	48.5	29.3	3.5
柱2リフト	149	43.4	29.9	3.1
柱3リフト	140	41.1	27.7	3.0
柱4リフト	118	52.9	30.8	—
巻立て部 1リフト	20	36.8	23.3	2.4
巻立て部 2リフト	14	28.3	21.3	2.4

c) C 中空\_SPL

コンクリート種別	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
柱1リフト	168	44.2	29.5	3.6
柱2リフト	161	38.7	27.3	2.7
柱3リフト	155	40.8	27.9	2.6
柱4リフト	139	50.2	30.4	—
内空基部充填材料 エアモルタル	12	2.3	3.80	0.50
鋼板巻立て部 注入材 (無収縮モルタル)	8	56.9	25.4	4.7

## 2. 実験方法

### 2.1 実験供試体

#### (1) 供試体ケース

図-2 に供試体の概要図, 表-1 に供試体の構造諸元を示す。供試体は, C 中空\_NR: 無補強の供試体, C 中空\_RCR: RC 巻立て補強後の供試体, C 中空\_SPL: 鋼板巻立て補強かつ中空内部をエアモルタルで充填した供試体の 3 ケースとした。供試体名の記号は, NR が No Reinforcing の略, RCR が RC Retrofitting の略, SPL が Steel Plate Lining の略をそれぞれ意味する。ここで, C 中空\_RCR の実験結果との比較のため, C 中空\_NR は参考文献 3, C 中空\_SPL は参考文献 10 よりそれぞれ引用した。以降, 本論文では, 本項で述べた供試体名を用いることとする。

表-3 材料試験結果 (鉄筋)

a) C中空_NR						
使用箇所	径	規格	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
帯鉄筋・ 中間拘束筋	D6	SD345	367	200	587	25.0
柱部軸方向 鉄筋	D10	SD345	396	200	660	25.0
b) C中空_RCR 及び C中空_SPL						
使用箇所	径	規格	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
帯鉄筋・ 中間拘束筋	D6	SD345	369	200	595	26.0
柱部軸方向 鉄筋	D10	SD345	374	200	529	26.0

(2) 供試体の製作

表-2 にコンクリートの材料試験結果を示す。

C中空\_RCR, C中空\_SPL は、柱高さ方向に4リフトに分けて打設した。C中空\_NR は柱3リフトの打設高さが0.75mで他のリフトのそれが1.60mである。C中空\_RCR 及びC中空\_SPL は柱1リフトの打設高さが1.60m, 柱4リフトの打設高さが0.75mで、他のリフトのそれが0.80mである。RC巻立て部は各リフトの打設高さが0.80mである。表-3 に鉄筋の材料試験結果を示す。柱また、実橋脚では、死荷重や活荷重を受けた状態に対して巻立てを行うため、巻立て部が軸力を負担していないと考えられる。中空断面RC橋脚の場合、既設壁部の軸力負担の状況が破壊形態に影響を与える可能性があることから、本研究では、巻立て部が軸力を負担しないようにするため、柱部を製作した後に軸力を載荷した状態でRC巻立てを行い、正負交番載荷が終了するまで軸力を維持することで、実橋脚と軸力載荷条件を合わせた。

(3) 補強の考え方

供試体の補強の考え方は次のとおりである。

RC巻立ては橋脚下端から天端まで巻立てることが規定されている<sup>7)</sup>が、C中空\_RCRについては、補強に伴う基礎への負担増加をなるべく小さくするため、部分的にRC巻立て補強を施した。また、巻立て高は、本研究では、参考文献3で確認した基部の損傷範囲を参考に、塑性ヒンジ長の4倍の区間とした。塑性ヒンジ長の算出方法は道路橋示方書・同解説の年次によっても異なるが、かぶりの剥落が懸念される区間にRC巻立てを施すことが目的であることから、平成14年道路橋示方書<sup>11)</sup>を参考として、最大値の0.5D (D:補強前の断面短辺長)とした。巻立て厚は、参考文献7の規定を参考に、250mm厚の縮小比1/5より50mmとした。既往文献<sup>3)</sup>によれば、中空断面供試体に対して中実断面供試体が1δy程度のじん性

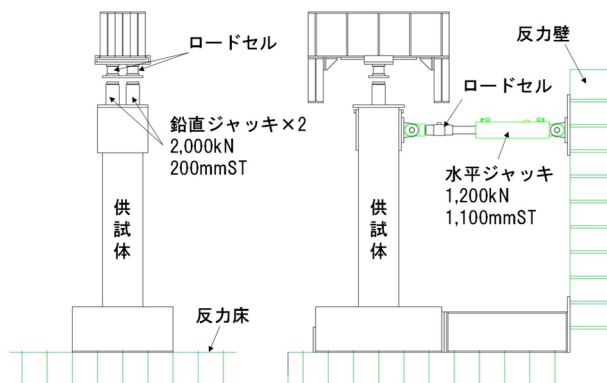


図-3 載荷システム

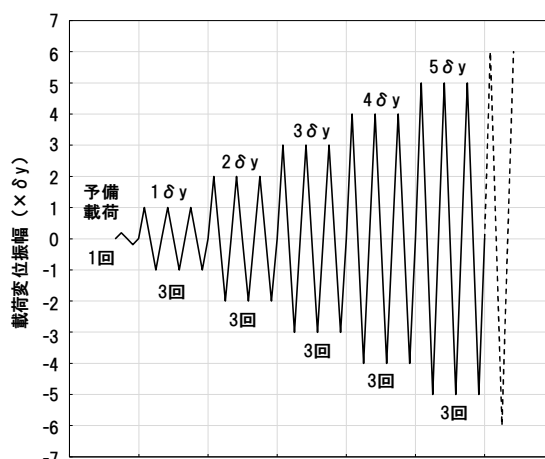


図-4 載荷パターン

率の向上が確認されたことから、同程度じん性率が向上するようにRC巻立て部の配筋(軸方向鉄筋:SD345D10, 70mm間隔, 帯鉄筋:SD345D6, 30mm間隔)を決定した。なお、C中空\_SPLの補強の考え方は参考文献10を参照されたい。

2.2 載荷方法

図-3 に載荷システムを示す。水平ジャッキで水平変位を与え、水平変位に伴う移動に追従するように、鉛直ジャッキ2台で軸応力3MPaに相当する1150kNを載荷した。図-4 に載荷パターンを示す。載荷方法は参考文献12を参考に最外縁鉄筋が降伏する変位から算定した基準水平変位δyの整数倍の水平変位を各振幅で3回繰り返す正負交番載荷とした。また、中空内部には360°カメラを設置し、常時、中空内部の破壊状況を確認できるようにした。

3. 実験結果の比較及び考察

実験結果の比較及び考察にあたっては、C中空\_SPLが設計要領<sup>7)</sup>と同様の考え方で補強された供試体であることから、C中空\_SPLを耐震補強後の目標性能とみなし、C中空\_RCRとの比較を行うことで耐震補強効果の検証を試みる。

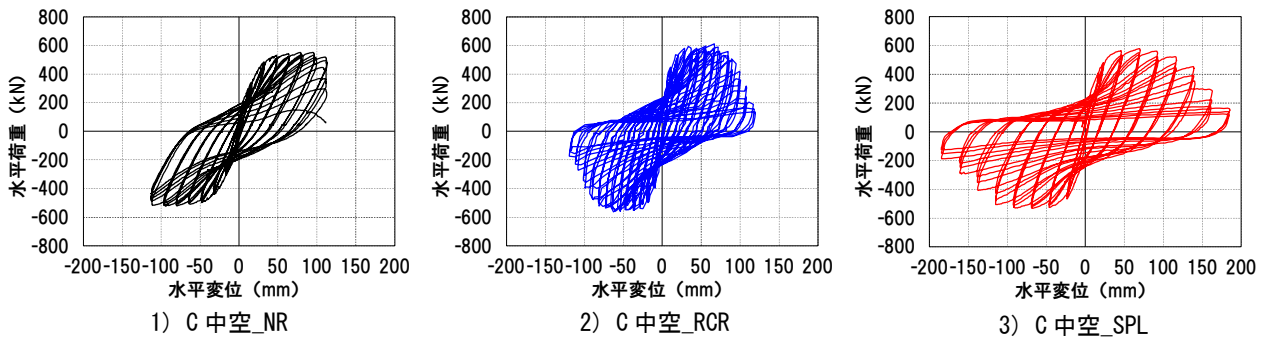


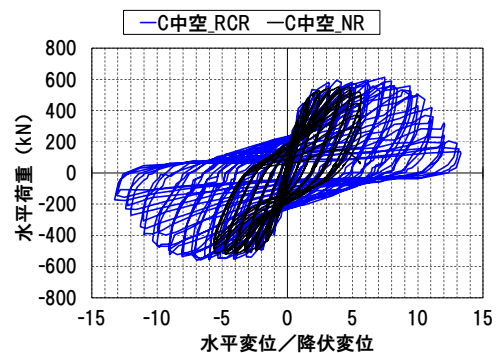
図-5 荷重変位関係及び鉛直変位－水平変位関係

### 3.1 荷重変位関係と損傷進行過程

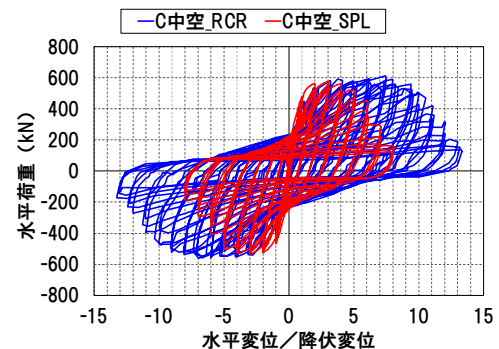
図-5 に荷重変位関係を示す。軸方向鉄筋は共通であることから、いずれの供試体も最大荷重は同程度であったが、補強方法によって初期剛性が異なるため、降伏変位に違いが生じていた (C 中空\_NR の  $\delta y$ : 16mm, C 中空\_RCR の  $\delta y$ : 9mm, C 中空\_SPL の  $\delta y$ : 23mm)。C 中空\_NR 以外の供試体では、参考文献 12 をもとに、実験で確認された最外縁の軸方向鉄筋が初めて降伏した変位 ( $\delta y_0$ ) を用いてバイリニア型弾塑性モデル上の弾性限界点に達した時の水平変位に換算することで  $\delta y$  を求めている。一方で、C 中空\_NR の  $\delta y$  は  $\delta y_0$  そのものである。この違いによって、C 中空\_NR と C 中空\_SPL との  $\delta y$  における違いが生じており、C 中空\_NR の  $\delta y$  を他の供試体の  $\delta y$  に換算すれば、約 20mm 程度となり、C 中空\_SPL と同程度であることから、C 中空\_NR と C 中空\_SPL は同程度の初期剛性を有していたと考えられる。一方、C 中空\_RCR は、C 中空\_SPL よりも巻立て高が 2 倍程度あるため、初期剛性が大きくなり、 $\delta y$  が半分程度 (23mm に対して 9mm) となったと考えられる。

図-6 に、横軸を降伏変位で無次元化した荷重変位関係の比較結果を示す。なお、C 中空\_NR の  $\delta y$  は上述のとおり、他の供試体と合わせるため、換算後の値を 20mm と仮定し無次元化した。図-6 a) より、じん性率は無補強の場合に比べ、3 程度 (無補強 6, 補強後 9) 増加した。また、C 中空\_SPL と比較すると、図-6 b) より、C 中空\_RCRの方がじん性率は大きくなった。

C 中空\_RCR では、 $4\delta y$  の 3 サイクル目で中空内面に水平方向ひび割れが発生し、 $6\delta y$  の 2 サイクル目で巻立て部圧縮側のコンクリートが圧壊し、 $7\delta y$  の 2 サイクル目で柱巻立て部の隅角部が崩れ始めた。その後、 $9\delta y$  の 2 サイクル目に中空内面がかぶりコンクリートの剥離が生じた。C 中空\_SPL では、 $4\delta y$  の 3 サイクル目から鋼板が徐々にはらみ出し始めた。その後、鉄筋の破断音を生じながら、鋼板で巻立てられたコンクリートが砂利のように破碎し、荷重が緩やかに低下していった。3.3 で詳述するが、 $360^\circ$  カメラで確認した限りでは、充填部天端付



a) RC 巻立て補強と無補強との比較



b) RC 巻立て補強と充填+鋼板巻立て補強との比較

図-6 荷重変位関係の比較

近における中空内面でののはらみ出しは確認されなかった。

荷重変位関係の比較では、C 中空\_RCR は C 中空\_SPL に比べて変形性能が優れていると思われるが、C 中空\_RCR では中空内面でののはらみ出しによる損傷を防止することはできなかったことから、中空内部を充填せず RC 巻立て補強する場合には、適用条件を検討した上で、地震発生後の中空内面の損傷状況を点検する方法を整備しておく等の配慮が必要であることが示唆される。

### 3.2 鉛直変位－水平変位関係

図-7 に鉛直変位－水平変位関係を示す。縦軸の鉛直変位は正が鉛直方向の伸びを、負が鉛直方向の沈下 (以降、軸沈下という) を意味する。C 中空\_NR と比較し、C 中空\_RCR では軸沈下が抑制されており、軸耐荷力の

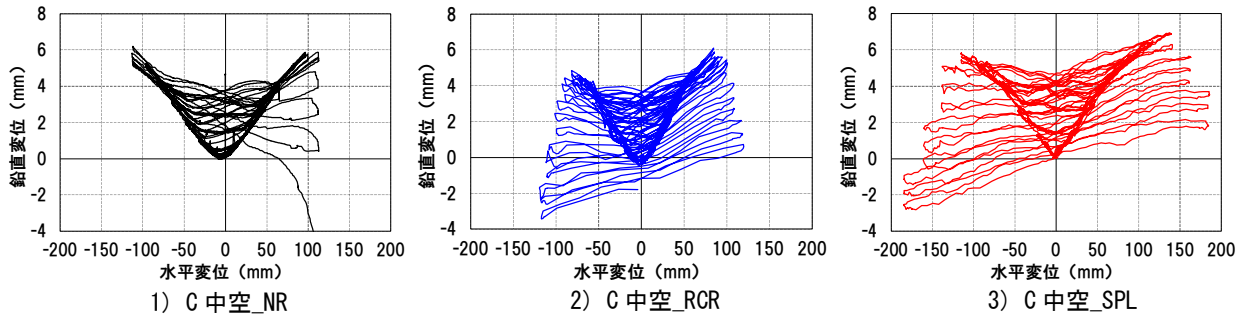


図-7 鉛直変位—水平変位関係

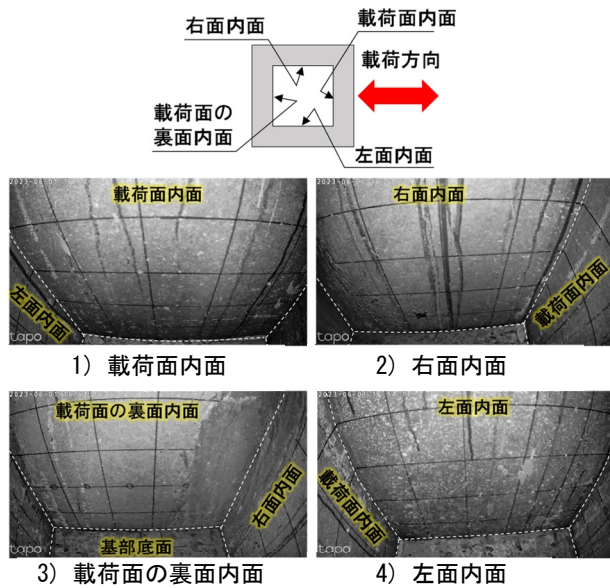


図-8 C 中空\_SPL の中空内面の損傷状況

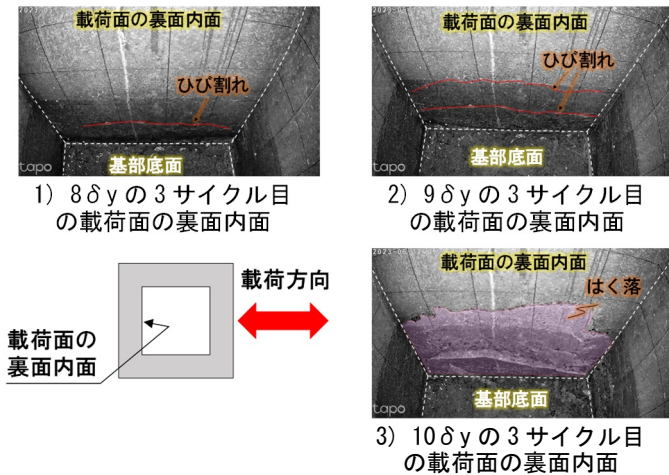
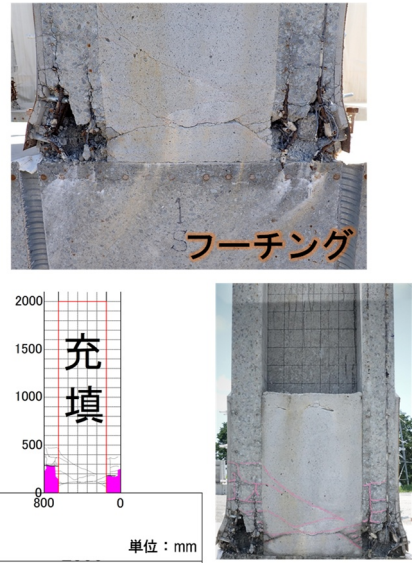
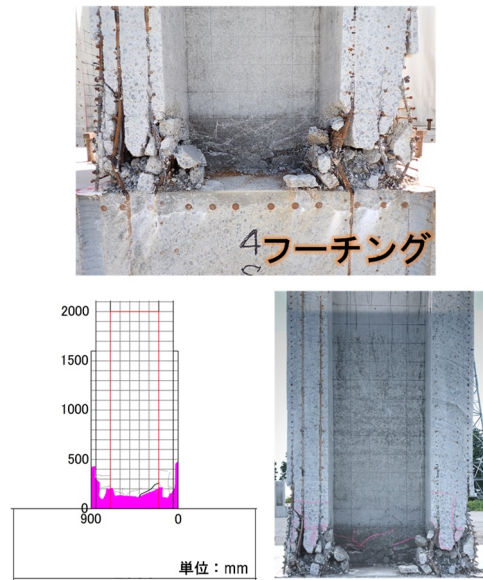


図-9 C 中空\_RCR の中空内面の損傷状況



a) C 中空\_SPL



b) C 中空\_RCR

図-10 供試体切断面の損傷状況

喪失は防止されていることから、一定の軸沈下抑制効果があると考えられる。補強供試体どうしの軸沈下挙動を比較すると、C 中空\_RCR の軸沈下挙動は C 中空\_SPL と最大軸沈下量の点では 3mm 程度とほぼ同様であった一方で、水平変位 0mm 時点での残留軸沈下量には違いがあり、C 中空\_RCR では C 中空\_SPL に比べ残留軸沈下量が 2mm 程度であった (C 中空\_SPL は水平変位 0mm 時

点では残留軸沈下量はゼロ)。

### 3.3 中空内面及び供試体切断面の損傷状況

図-8、図-9 に中空内面の損傷状況を示す。C 中空\_SPL の写真は  $8\delta y$  の 3 サイクル目の中空内面の損傷状

況を 360° カメラで撮影したものである。C 中空\_RCR の中空内面の損傷状況については、8~10δy の中空内面がかぶりコンクリートがはく落した時点抽出した。

図-8 より、C 中空\_SPL では中空内面の損傷は確認されなかった一方で、図-9 より、C 中空\_RCR では 10δy の 3 サイクル目の時点で中空内面のかぶりコンクリートが急激にはく落した。この振幅は、荷重変位関係における荷重低下の開始のタイミングと一致していた。このことから、中空内部を充填せず補強した場合、無補強と比べて、中空内面の損傷を遅らせることはできるものの、損傷が進行し、中空内面に到達した時点で、無補強同様、耐力低下が生じるものと考えられる。

図-10 に供試体切断面の損傷状況を示す。図-10 の a), b) それぞれの上段の写真は、下段の切断面の基部を拡大したものである。図-10 より、C 中空\_RCR では中空内面が 4 面とも損傷が進行し、かぶりコンクリートがはく落した。内面側の軸方向鉄筋が中空内面側へはらみ出す損傷状況は C 中空\_NR と同様であるが、ウェブ部(図-8 の右面内面、左面内面の部分) の中空内面の損傷が C 中空\_NR より軽微であったため、ウェブ部の未損傷部が荷重を受け持つことによって、C 中空\_NR のように軸耐荷力の急激な喪失が生じなかったものと考えられる。

#### 4. まとめ

中空断面 RC 橋脚を対象として、中空内部を充填せず基部から塑性ヒンジ長の 4 倍の区間を RC 巻立て補強した場合の耐震補強効果を検証することを目的に、縮小供試体を用いて正負交番載荷実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 中空内部を充填せず部分的に RC 巻立て補強すると、中空内部を充填し鋼板巻立てした場合に比べ、初期剛性が大きくなることで降伏変位が小さくなった。また、RC 巻立て補強により、じん性率が上昇し、軸沈下も抑制されることから、一定の耐震補強効果が確保できる可能性が示されたと考えられる。
- (2) RC 巻立て補強により中空内面の損傷進行が抑制されウェブ部の未損傷部が荷重を受け持つため、中空断面 RC 柱部材のように急激な軸耐荷力の喪失することなく、じん性率が上昇したものと考えられる。
- (3) 一方で、中空内部を充填しないと、中空内面でのはらみ出しによる損傷を防止することができなかった。これを踏まえ、中空内部を充填せず RC 巻立て補強する場合には、適用条件を検討した上で、地震発生後の中空内面の損傷状況を点検する方法を整備しておく等の配慮が必要であることが示唆される。

#### 謝辞

京都大学植村佳大助教、門谷晃太氏には補強前供試体

の製作方法に関しご意見頂いた。ここに謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 松田哲夫, 石原重孝, 湯川保之, 須田久美子, 安松敏雄: 中空断面を有する RC 橋脚の耐震性に関する模型実験 徳島自動車道池田湖橋, 橋梁と基礎, Vol.30, No.11, pp.25-30, 1996.11
- 2) 高原良太, 青木圭一: RC 中空断面橋脚の耐震性能に関する実験的検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, I-118, pp.235-236, 2015.9
- 3) 門谷晃太, 植村佳大, 綾城威歩生, 高橋良和: 大型中空断面 RC 橋脚模型を用いたコンクリート充填補強に関する実験的検討, 第 42 回地震工学研究発表会論文集, C14-16, pp.1-13, 2022.10
- 4) 松尾良平, 植村佳大, 高橋良和: コンクリート充填補強部と既設部をアンカー結合した大型中空断面 RC 橋脚模型の正負交番載荷実験, 第 26 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.57-64, 2023.7
- 5) 松尾良平, 植村佳大, 高橋良和: コンクリート充填補強部をアンカー結合した中空断面 RC 橋脚の大型正負交番載荷実験, 第 16 回日本地震工学シンポジウム論文集, Day3-G416-09, 2023.11
- 6) 野村一貴, 植村佳大, 高橋良和: コンクリート充填と炭素繊維巻立補強を併用した中空断面 RC 橋脚の大型正負交番載荷実験, 第 16 回日本地震工学シンポジウム論文集, Day2-G419-09, 2023.11
- 7) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 設計要領第二集橋梁保全編, 2023
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料, pp.210-213, 2015
- 9) 既設 RC 中空断面橋脚の破壊挙動に中立軸の位置が与える影響に関する実験的検討, 第 16 回日本地震工学シンポジウム論文集, Day2-G419-10, 2023.11
- 10) 後藤源太, 飛田一彬, 高原良太, 植村佳大, 高橋良和: エアモルタル充填補強及び基部巻立てを用いた大型中空断面 RC 橋脚模型の正負交番載荷実験, 第 43 回地震工学研究発表会論文集, B24-159, pp.1-6, 2023.9
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編平成 14 年 3 月, 2002
- 12) 西田秀明, 運上茂樹, 星隈順一: 道路橋橋脚の耐震性能評価に用いる実験に関するガイドライン (案) (橋脚の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法), 土木研究所資料第 4023 号, p.26, 2006