

# 死荷重支持機構を埋め込んだ RC 単柱の正負交番載荷実験

西根 幸輝<sup>1</sup>・植村 佳大<sup>2</sup>・高橋 良和<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: nishine.koki.46c@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学助教 京都大学工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学教授 京都大学工学研究科 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

橋梁構造の危機耐性実現に向けて、地震時の人命確保や復旧性向上につながる構造技術が求められている。そこで本研究では、死荷重支持機能を有する鋼管拘束コンクリート柱を埋め込んだ RC 単柱を提案し、正負交番載荷実験により、その性能を検証した。その結果、鋼管底面とフーチング上面が一致するよう鋼管拘束コンクリート柱を配置することで、鋼管拘束コンクリート柱へ引張力が伝達されず、RC 柱変形時の鋼管拘束コンクリート柱の損傷が軽減されることがわかった。また提案構造は、通常の RC 柱と類似した復元力特性および終局モードを示すことがわかった。そして実験終了後、RC 柱の軸方向鉄筋および鋼管周囲のコンクリートを撤去した結果、鋼管拘束コンクリート柱のみで作用軸力を支持できることが確認でき、復旧性に富む構造であることがわかった。

**Key Words:** *anti-catastrophe, RC column, dead weight support, recoverability, cyclic loading test*

## 1. 背景

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震以降、設計基準外事象 (Beyond Design Basis Events) に対して、確保されるべき安全性がたとえ損なわれた場合でも直ちに危機的な状況に陥らないようにするべきとされる危機耐性<sup>1)</sup>の概念が提唱された。そして近年、RC 柱の危機耐性の実現に向けた構造技術の検討がいくつかなされている。

例えば、豊岡ら<sup>2,3)</sup>は一連の検討の中で、橋梁構造物の倒壊方向を制御する「倒壊方向制御構造」を提案し、その構造が設計基準事象に対する人命損失の回避や復旧性を考える上で有利であることを示している。菅野ら<sup>4)</sup>は、大変形領域における RC 柱の耐震性能向上を目的として、内巻きスパイラル構造を提案し、コアコンクリートの拘束効果を高めることで、大変形領域での柱の復元力維持を実現している。また筆者ら<sup>5)</sup>は、RC 柱基部に X 字状に配筋した鉄筋 (メナーゼヒンジ) を埋め込んだ埋込メナーゼヒンジ RC 構造を提案し、大変形領域における柱基部の構造ヒンジ機能を維持させて柱の挙動の不確定性を低下させることで、設計基準外事象に対する挙動の定性的な予測を可能としている。以上のように、橋梁構

造物の危機耐性を実現するため、設計基準外事象に対して要求する構造物の最低限の性能を確保するための構造技術が開発されている。また西村ら<sup>6)</sup>は、通常的设计基準を満たす橋梁に対して、慣性力に抵抗せず、鉛直力のみを支持する自重補償柱を加えることで、通常の柱が鉛直支持力を失った場合でも、鉛直支持性能を維持することができる自重補償機構を提案している。しかしながら、危機耐性実現に向けた構造術開発の例は少ない上、それらの多くは未だ検討段階であるため、より活発な技術開発が望まれている<sup>7)</sup>。

そこで本研究では、西村らが提案した自重補償構造が、大地震時に人命確保および地震後の復旧性向上につながる点に着目し、RC 柱単体で地震後の上部構の死荷重支持を確実に保証できる構造を開発する。具体的には、死荷重支持機能を有する鋼管拘束コンクリート柱を柱内部に埋め込んだ RC 柱構造を提案し、正負交番載荷実験により提案構造の性能を検証する。

## 2. 提案構造について

### (1) 鋼管拘束コンクリート柱の配置

本提案構造では、RC 柱の内部に死荷重支持機能を有する鋼管拘束コンクリート柱を埋め込む(図-1(a)). 本構造のように、柱内部に鋼管を埋め込んだ構造は、過去に藤倉ら<sup>9)</sup>が提案している(図-1(b)). この構造では、鋼管拘束コンクリート柱(文献では CFT 柱)の底面がフーチング内部(柱高さ 0mm より下部)になるように配置されており、RC 柱の変形時に鋼管拘束コンクリート柱の鋼管が引張力を発揮し、復元力に寄与することが確認された。しかし、引張力が作用することで、内部鋼管が塑性化し、柱基部で早期に座屈・破断したことが確認されている。設計基準事象に対して鋼管が座屈すると、鋼管のコンクリート拘束効果を喪失するため、鋼管拘束コンクリート柱が死荷重支持機能を発揮できない恐れがある。そのため、本研究での提案構造では、設計基準事象に対して鋼管が塑性化して座屈しないよう、鋼管拘束コンクリート柱をフーチング内部には配置せず、鋼管の底面とフーチングの上面が一致するよう配置することとした。

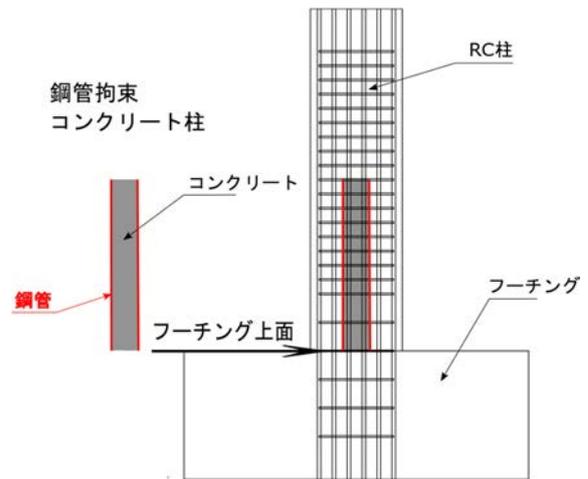
また、鋼管拘束コンクリート柱を柱内部に配置した際、鋼管拘束コンクリート柱が剛体変形することで、RC 柱の変形が拘束され、RC 柱の柱高さ 0mm の位置に変形が集中してしまう恐れがある。そのため、本提案構造では、鋼管拘束コンクリートと周囲の RC 柱は鋼管上端のみで結合し、鋼管周りとは RC 柱との付着補強は行わず、鋼管拘束コンクリート柱と RC 柱を分離して挙動させることで、RC 柱が剛体変形しないような構造としている。

### (2) 鋼管拘束コンクリート柱への要求性能と設計

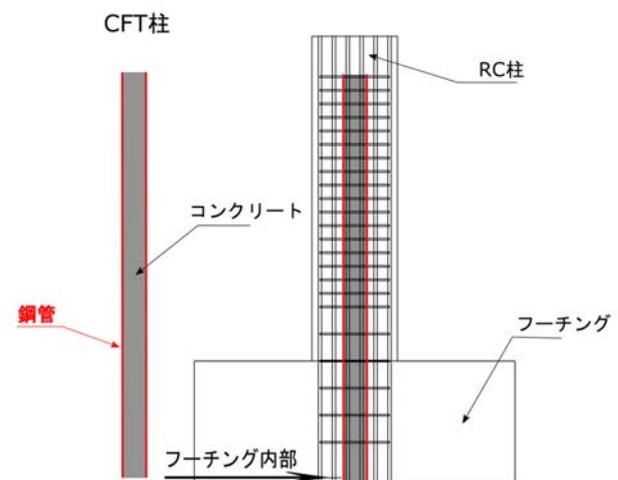
筆者らは、過去の研究<sup>9)</sup>で、現行の耐震設計を満たす RC 橋脚の模型試験体に対して正負交番載荷実験を行い、軸方向鉄筋の座屈発生後に塑性ヒンジの損傷が顕著になると、柱基部でせん断変形が発生することを確認した。塑性ヒンジ部におけるせん断変形は、不確定性の高い現象であり、設計基準外事象に対する RC 柱の挙動予測を困難にすると考えられる。そこで提案構造では、鋼管拘束コンクリート柱に上部構の死荷重支持機能と柱基部でのせん断変形防止性能を要求する。ここで、各要求性能に対する鋼管拘束コンクリート柱の設計について以下に示す。

#### a) 死荷重支持機能

鋼管拘束コンクリート柱の死荷重支持機能とは、「大地震により柱基部に著しい損傷が発生し、柱基部で鋼管拘束コンクリート柱のみが残存した場合でも、上部構死荷重を支持できる性能」を意味する。鋼管拘束コンクリート柱では、鋼管内部の充填コンクリートに死荷重支持



(a) 鋼管拘束コンクリート柱の配置位置



(b) 藤倉らが提案した CFT 柱の配置位置

図-1 提案構造における鋼管拘束コンクリート柱の配置位置

を期待するため、死荷重支持に十分なコンクリート面積が確保できる鋼管径を設定する必要がある。

また、鋼管拘束コンクリートの断面積によっては、死荷重支持した際に、フーチングコンクリートが支圧破壊する恐れがある。そこで、フーチングコンクリートの軸方向における支圧強度を、道路橋示方書・同解説-コンクリート橋・コンクリート部材編(平成 29 年)による規定(以下規定 1)、およびコンクリート標準示方書[設計編](2017 年制定)による規定(規定 2)を用いて算定し、フーチングコンクリートが支圧破壊しない鋼管径を設定する。

規定 1 は以下の(1)~(3)式、規定 2 は(4)、(5)式で表される。

$$\sigma_{bad} = \xi_1 \xi_2 \phi_{ba} \sigma_{ba} \quad (1)$$

$$\sigma_{ba} = k(0.25 + 0.05A_c/A_b)\sigma_{ck} \quad (2)$$

$$\sigma_{ba} \leq 0.5k\sigma_{ck} \quad (3)$$

$$f'_{ak} = \eta f'_{ck} \quad (4)$$

$$\eta = \sqrt{A/A_a} \leq 2 \quad (5)$$

ここで $\sigma_{bad}$ 、 $f'_{ak}$ は支圧破壊に対する支圧応力度の制

表-1 鉄筋の材料特性

供試体	用途	規格	材質	降伏点(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )
C50-ST	帯鉄筋	D6	SD345	454.7	620.2	2.056×10 <sup>6</sup>
	軸方向鉄筋	D13	SD345	390.5	580.0	1.951×10 <sup>6</sup>
φ100-RC	帯鉄筋	D6	SD345	413.9	592.7	2.012×10 <sup>6</sup>
	軸方向鉄筋	D13	SD345	405.9	580.4	1.980×10 <sup>6</sup>
	ずれ止めせん断キ	D13	SD345	405.9	580.4	1.980×10 <sup>6</sup>

限值(N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_{ba}$  はコンクリートの支圧強度の特性値(N/mm<sup>2</sup>),  $\sigma_{ck}$ ,  $f'_{ck}$  はコンクリートの設計基準強度(N/mm<sup>2</sup>)である。また,  $A_c$ ,  $A$  は局部載荷の場合のコンクリート面の有効支圧面の面積(mm<sup>2</sup>),  $A_b$ ,  $A_a$  は局部載荷の場合の支圧を受けるコンクリート面の面積(mm<sup>2</sup>)であり,  $k$ ,  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\phi_{ba}$  はそれぞれ, 補正係数, 調査・解析係数, 部材・構造係数, 抵抗係数である。

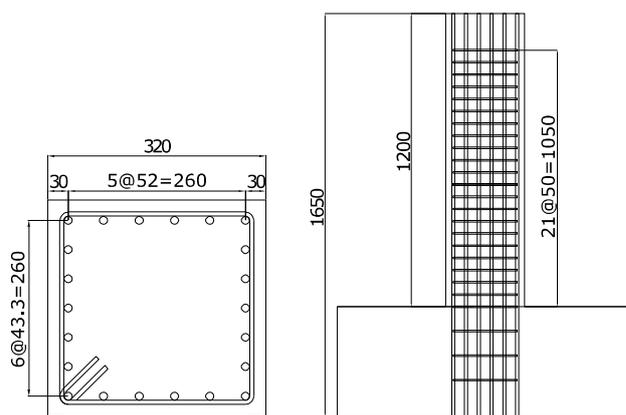
**b) 柱基部でのせん断変形防止性能**

本提案構造では, 大変形時における柱基部でのせん断変形の防止が, 設計基準外事象に対する RC 柱の挙動の不確定性低下につながると考え, 鋼管拘束コンクリート柱の鋼管下端にずれ止めせん断キを接合することで, RC 柱基部でのせん断変形防止性能を期待する(図-2)。

その際, せん断キに作用するせん断力に応じて, 必要となるせん断キの本数・径を決定する。また, せん断キがせん断抵抗力を発揮する際, せん断キ前面のフーチングコンクリートが支圧破壊しないよう, コンクリートの水平方向の支圧強度を先述した2つの規定から算出し, 根入れ深さを決定する。また, 設計基準事象においてせん断キに引張力が作用することで, 鋼管へ引張力を伝達し, 鋼管の塑性化を引き起こす可能性があるため, せん断キにはアンボンド処理を施すこととする。



図-2 鋼管下端に接合するずれ止めせん断キ



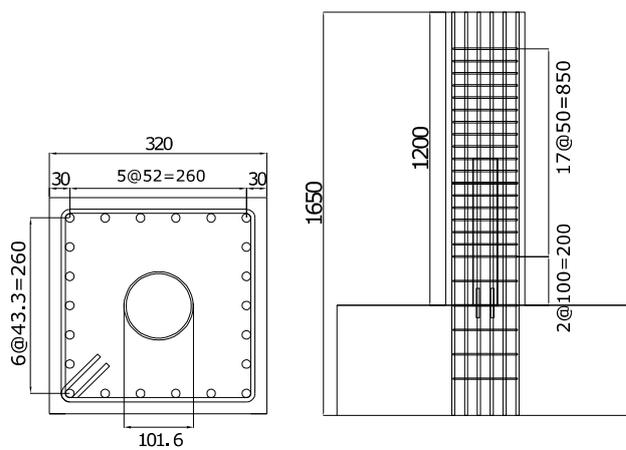
(a) C50-ST

**3. 鋼管拘束コンクリート柱を埋め込んだ RC 柱に対する正負交番載荷実験の概要**

**(1) 実験供試体**

本論文で検討対象とする実験供試体は, 筆者らの既往研究で用いられた従来型 RC 柱である C50-ST と, 鋼管拘束コンクリート柱を埋め込んだ RC 柱である φ100-RC の計2体である。図-3 に各供試体の断面図および配筋図を示す。断面はいずれも一辺が 320mm の正方形であり, 基部から載荷点の高さは 1050mm, フーチングの厚さは 450mm である。軸方向鉄筋の配筋は全供試体で共通であり, 軸方向鉄筋比は, 各供試体とも 2.72% である。

コンクリートには, セメントが早強ポルトランドセメント, スランプ 18cm, 粗骨材の最大寸法 15mm のものを用いた。コンクリートの圧縮強度は, テストピースに



(b) φ100-RC

図-3 断面図および配筋図

よる材料試験の結果、C50-ST で 33.3MPa、 $\phi 100$ -RC で 35.4MPa であった。また、使用した鉄筋の材料特性を表-1 に、各供試体の詳細を以下に示す。

#### a) C50-ST

C50-ST は、筆者らが過去に実施した実験<sup>9)</sup>の標準供試体で、軸方向鉄筋の座屈による曲げ破壊で終局を迎えるよう設計された RC 柱供試体である。帯鉄筋間隔は 50mm、帯鉄筋比は 0.8% となっている。

#### b) $\phi 100$ -RC

$\phi 100$ -RC は、死荷重支持機能および基部のせん断変形防止性能を有する鋼管拘束コンクリート柱を断面中央に埋め込んだ RC 柱供試体である。

鋼管には SS400 を使用し、鋼管厚は 4.2mm、直径は鋼管内部に充填されたコンクリートのみで軸力を負担できるような直径 101.6mm とした。その際、鋼管拘束コンクリート柱の鉛直方向の支圧によりフーチングが破壊されないことを確認している。また、鋼管の配置高さは、鋼管の上端が RC 断面の曲げ耐力が急変する段落としとなり、損傷が集中する恐れを考慮し、高さ 600mm とした。また、鋼管拘束コンクリート底面は、柱高さ 0mm の位置と一致させている。また、2.(1) で述べたように、鋼管拘束コンクリート柱と RC 柱は鋼管上端のみで結合し、鋼管拘束コンクリートと RC 柱の付着補強は行っていない。

また せん断キーについてはせん断力により損傷せず、水平方向の支圧によりフーチングが破壊されないような材料として SD345 の異形鉄筋を 4 本使用し、根入れ深さを 50mm とした。また、図-4 に示す通り、せん断キーにはアンボンド処理を施している。

また、帯鉄筋の配筋については、石橋ら<sup>9)</sup>が提案した内巻きスパイラル構造に倣い、軸方向鉄筋の座屈発生位置および座屈長を制御することを目的として、柱高さ 0mm から 200mm までの区間で 100mm 間隔、柱高さ 200mm 以上の区間で 50mm 間隔とした。また、柱高さ 100mm の帯鉄筋のみ 90° フックを有する帯鉄筋を使用し、それ以外は C50-ST と同様鋭角フックを有する帯鉄筋を使用した。

### (2) 載荷方法

載荷は正負交番漸増で行った。柱基部の軸方向鉄筋の



図-4 せん断キーへのアンボンド処理

ひずみをモニターしながら載荷を行い、軸方向鉄筋の降伏した点を降伏変位  $\delta_y (=5.0\text{mm})$  とし、それを基準として、その整数倍の変位振幅での繰り返し載荷を行った。載荷回数 は、繰り返し回数を 3 回とした。また載荷軸応力は約 1.0MPa とした。

### (3) 測定データ

供試体の各変形状態における復元力を得るため、アクチュエータに設置されているロードセルにより供試体の載荷位置における復元力及び軸力を測定した。また、供試体の載荷位置における水平変位を計測するため、供試体の載荷位置にワイヤ式変位計を設置した。

### (4) $\phi 100$ -RC における鋼管拘束コンクリート柱の死荷重支持機構の確認

$\phi 100$ -RC では、柱内部に埋め込んだ鋼管拘束コンクリート柱が、地震被害後において死荷重支持機能を発揮することを期待している。そこで本研究では、正負交番載荷実験終了後、軸力約 100kN を作用させた状態で、鋼管周囲のコンクリートおよび軸方向鉄筋の撤去作業を行い、地震被害後における鋼管拘束コンクリートの死荷重支持機能について検証した。手順としては、水平アクチュエータにより水平変位が 0mm になるよう調節しながら、まず柱の四隅 4 本以外の軸方向鉄筋を切断、撤去し、次に鋼管周囲のコンクリートを撤去した。最後に、柱四隅 4 本の軸方向鉄筋を切断、撤去した。

## 4. 鋼管拘束コンクリート柱を埋め込んだ RC 柱に対する正負交番載荷実験の結果と考察

### (1) 荷重-変位関係

両供試体の各供試体の荷重-変位関係を図-5 に示す。ここで、アクチュエータが供試体を引いている時の荷重を正、押している時の荷重を負としている。なお、図中の点線は軸方向鉄筋の座屈が発生したタイミングである。

#### a) C50-ST

C50-ST では、軸方向鉄筋座屈発生前までは履歴ループが紡錘型になっており、典型的な曲げ挙動を示している。軸方向鉄筋の座屈を迎えると、これを機に履歴ループが逆 S 字型に変化、さらに剛性が低下し、変位振幅 40mm 以降では著しい荷重低下が見られた。また、荷重は正負共に変位振幅 20mm の 1 サイクル目で最大となり、正最大荷重は 154kN、負最大荷重は -140kN であった。

#### b) $\phi 100$ -RC

$\phi 100$ -RC では、軸方向鉄筋座屈発生前までは、C50-ST と同様に履歴ループが紡錘型で、典型的な曲げ挙動を示していた。軸方向鉄筋座屈発生後は、履歴ループが逆 S

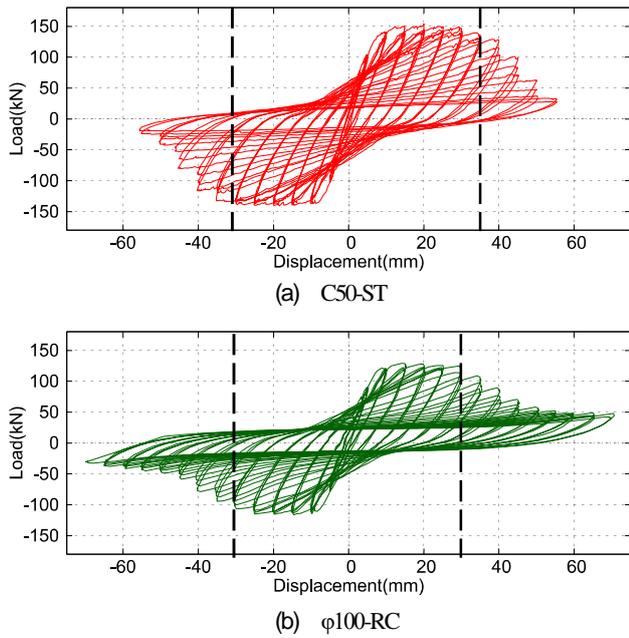


図-5 荷重-変位関係

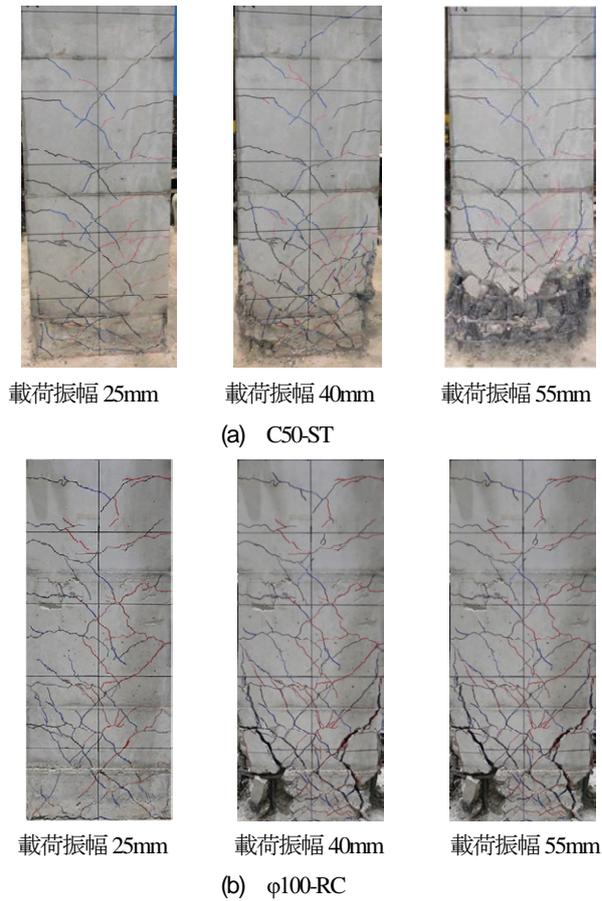


図-6 荷重側面のひび割れ性状

字型に移行し、剛性の低下がみられるものの、変位振幅40mm以降では緩やかな荷重低下を示した。また、荷重は正負ともに変位振幅15mmの1サイクル目で最大となり、正最大荷重は129kN、負最大荷重は-116kNとなった。

以上のように、最大荷重および荷重低下挙動において、各供試体で異なる結果が得られた。これらの要因は、以降の検討の中で考察する。

## (2) 鋼管拘束コンクリート柱の配置が柱のひび割れ性状に与えた影響

図-6に各供試体の変位振幅25mm、40mm、55mmにおける荷重側面のひび割れ性状を示す。図-6より、φ100-RCでの鋼管拘束コンクリート柱配置位置において、C50-STと比較して多数の斜めひび割れが確認された。しかしながら、発生した斜めひび割れのひび割れ幅は増大することなく、柱の挙動に大きな影響は与えなかったといえる。

ここで、φ100-RCで斜めひび割れが多数発生した要因は以下のように推測できる。3.(1)で述べたように、φ100-RCでは、RC柱が剛体変形しないよう、鋼管拘束コンクリート柱と周囲コンクリートの付着補強を行わなかった。その結果、柱高さ0mmの位置に変形が集中することなく、ひび割れを柱高さ方向に分散させることができたが、その反面、鋼管拘束コンクリート柱とRC柱が

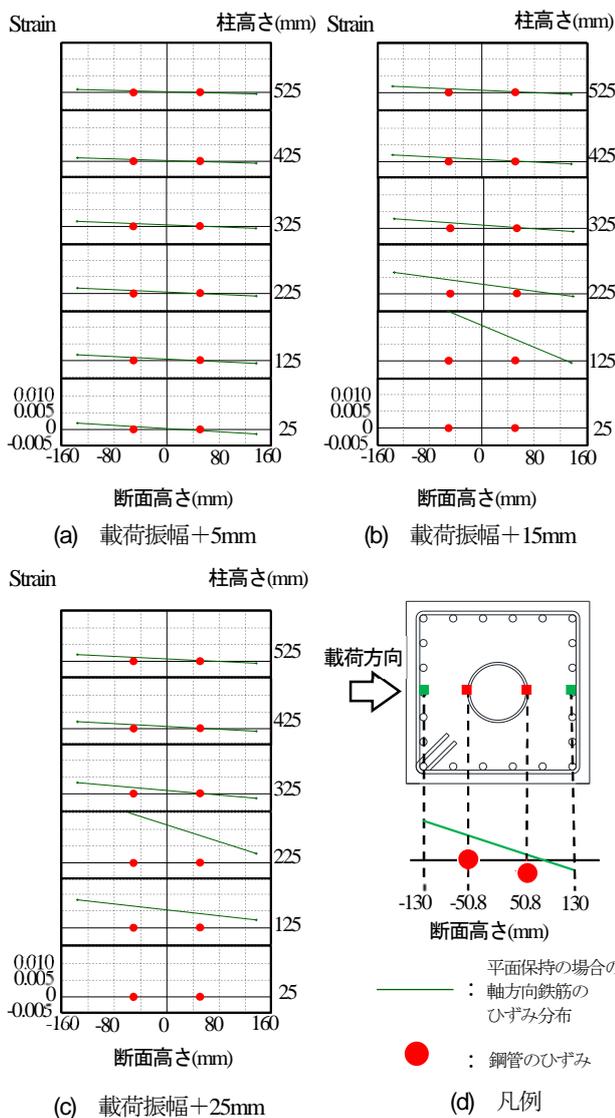


図-7 各柱高さにおける断面のひずみ分布

分離して挙動したことで、せん断耐力に抵抗する断面積が減少し、柱のせん断耐力が減少した可能性が考えられる。

そこで、図-7 に変位振幅 5mm, 15mm, 25mm 時の各柱高さにおける鋼管と軸方向鉄筋のひずみを縦軸に、断面高さを横軸に取ったグラフを示す。鋼管および内部コンクリートと RC 柱が一体となって動いている場合、平面保持の仮定が成立し、図では、鉄筋のひずみから算出できる断面のひずみ分布上に鋼管のひずみがプロットされると考えられる。しかし φ100-RC では、鋼管上部においては鋼管のひずみが平面保持成立時よりも小さい値となっていることがわかる。よって、φ100-RC では、RC 柱部と鋼管拘束コンクリートが分離して挙動していると判断できる。ここで、各供試体の RC 柱部のせん断耐力を算出したところ、全断面でせん断耐力に抵抗できる C50-ST ではせん断耐力は 182.0kN であったのに対し、φ100-RC のせん断耐力は、鋼管拘束コンクリート柱の断面積を差し引いたことで、158.5kN となることがわかった。以上から、RC 柱部の断面積減少により柱部のせん断耐力が減少したことが、鋼管拘束コンクリート柱配置位置にせん断ひび割れが多数発生した要因であると考えられる。

よって、鋼管拘束コンクリート柱を RC 柱断面に配置する際は、RC 柱のせん断耐力の減少を鋼管拘束コンクリート柱直径に応じて考慮し、場合によっては、帯鉄筋量などを増大させる必要があることがわかった。

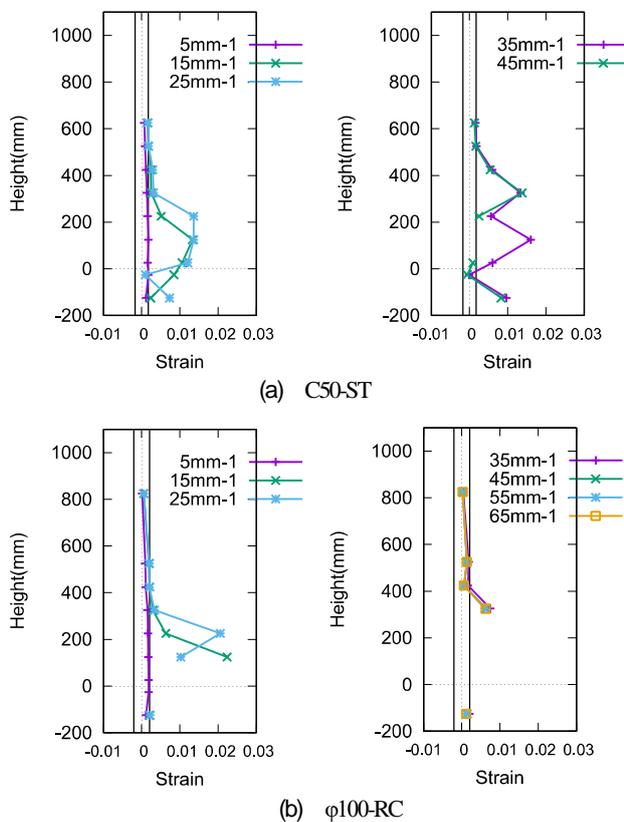


図-8 軸方向鉄筋の高さ方向のひずみ分布

### (3) 軸方向鉄筋の高さ方向のひずみ分布

各供試体の軸方向鉄筋高さ方向のひずみ分布を図-8 に示す。なお図中では、各高さに添付したひずみゲージから得られたひずみデータの平均を示している。また、図中の縦線は軸方向鉄筋の降伏ひずみ  $\epsilon_y$  の値を表しており、鉄筋の引張試験結果より、C50-ST で  $\epsilon_y=0.0020$ 、φ100-RC で  $\epsilon_y=0.0021$  と算出した。

2.(1) で述べたように、φ100-RC では RC 柱部と鋼管の間で付着補強は施さず、柱の変形が柱高さ 0mm の位置に集中しないよう配慮していた。図-8 を見ると、C50-ST および φ100-RC では、ともに柱高さ 400mm 程度まで塑性化が進展しており、φ100-RC において、軸方向鉄筋のひずみが柱高さ 0mm の位置に集中することはなかった。以上から、φ100-RC における軸方向鉄筋は、当初の想定通りの挙動を示したことがわかった。

### (4) 軸方向鉄筋の座屈

φ100-RC では、石橋ら<sup>5)</sup>の検討に倣い、柱基部の帯鉄筋間隔を疎にし、柱高さ 100mm の位置に 90° フックを有する帯鉄筋を用いることで、軸方向鉄筋の座屈発生位置および座屈長の制御を狙っていた。

そこで、表-2 に各供試体の軸方向鉄筋の座屈発生点およびその時の座屈長を示す。座屈発生点とは、各供試体の載荷面側、載荷面裏側に対して初めて軸方向鉄筋の座屈が確認されたサイクルを指し、座屈の発生はかぶりコンクリートのはらみだしをもって判定した。

まず、φ100-RC における軸方向鉄筋座屈は、C50-ST に比べて 1, 2 サイクル程度早期に発生し、座屈長さに関しても、載荷面裏側において、C50-ST に比べて 50mm 程度短くなっていることがわかる。これは、柱基部における帯鉄筋の配筋法を変化させたことが要因であると考えられる。軸方向鉄筋の座屈を想定した区間に発生させることは、軸方向鉄筋座屈発生後の RC 柱の挙動を制御する上で重要であるといえ、石橋らが提案した手法は、座屈発生区間の誘導において効果的であるといえる。

### (5) 鋼管拘束コンクリート柱における鋼管のひずみ

鋼管の柱基部における周長方向のひずみ-水平変位関係(図-9) 軸方向鉄筋座屈発生後において引張ひずみが増大していることがわかる。これは内部コンクリートに軸圧縮力が作用し、鋼管が内部コンクリートを拘束してい

表-2 座屈発生点をよび座屈長

供試体	座屈発生点		座屈長(mm)
C50-ST	載荷面	30mm-3cycle	200
	載荷面裏側	35mm-1cycle	250
φ100-RC	載荷面	30mm-2cycle	200
	載荷面裏側	30mm-1cycle	200

るためである。また、鋼管の柱基部における鉛直方向のひずみ-水平変位関係 (図-10) をみると、鋼管には圧縮ひずみしか発生しておらず、鋼管への作用引張力が低減されていることがわかる。4.(2)で示した図-7を見ても、鋼管に引張力が伝達していない状況が確認できる。これは、鋼管とフーチングの縁が切れていることで、鋼管に引張力が伝達しないことが要因であると考えられる。よって、鋼管拘束コンクリート柱底面を柱高さ 0mm に配置したことにより、鋼管の変形を軽減できたことがわかった。

(6) 柱基部における軸沈下およびせん断変形

a) C50-ST

C50-ST では、軸方向鉄筋の座屈発生後、載荷振幅 40mm 以降の挙動で柱基部でのせん断変形が生じた。こ

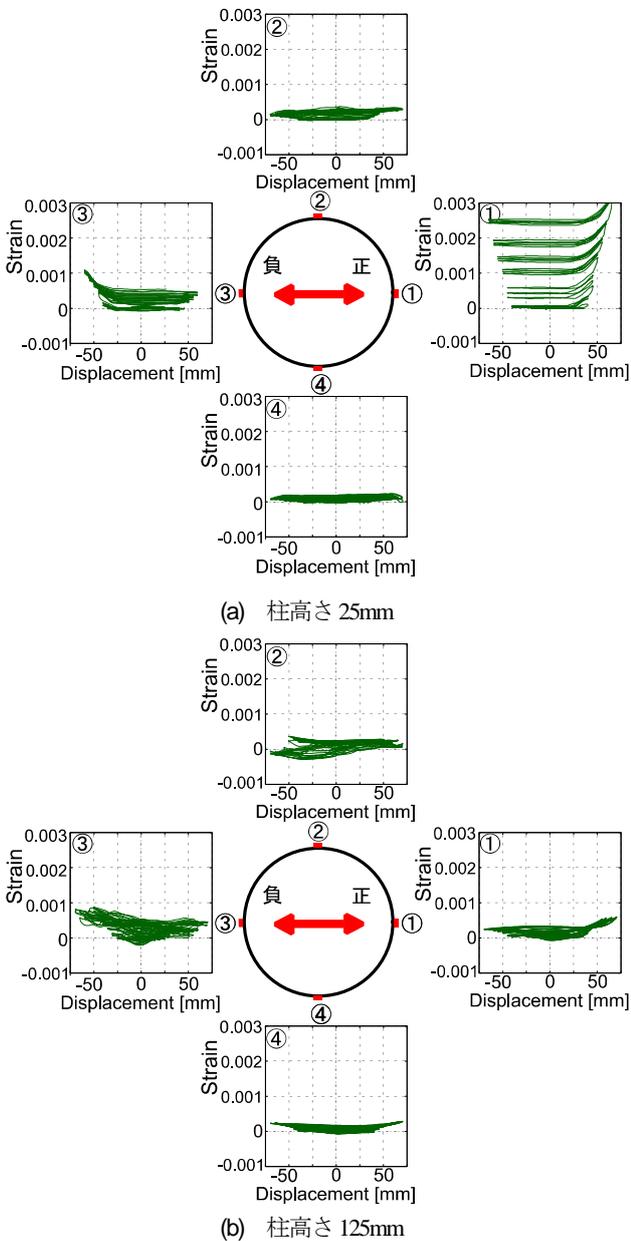


図-9 鋼管の周長方向のひずみ-水平変位関係

のせん断変形は載荷振幅が大きくなるにつれて増加し、載荷振幅 55mm 終了時には約 40mm のせん断変形が確認された(図-11(a)).

また軸変形についても、載荷振幅 45mm 以降で大幅な増加がみられ、載荷振幅 55mm 終了時には 21.6mm の沈下が確認された(図-11(b)). これは、軸方向鉄筋の座屈発生およびコアコンクリートの損傷の進行によって、柱基部の変形に対する抵抗が低下しているため、このような変形が発生したと考えられる。

b) φ100-RC

φ100-RC では、軸方向鉄筋座屈発生後、かぶりコンクリートが剥落し、コアコンクリートの損傷が進行した状態でも、柱基部のせん断変形は確認されなかった(図-12(a)). これは、鋼管拘束コンクリート下端に接合したせん断キーによる効果であると考えられる。

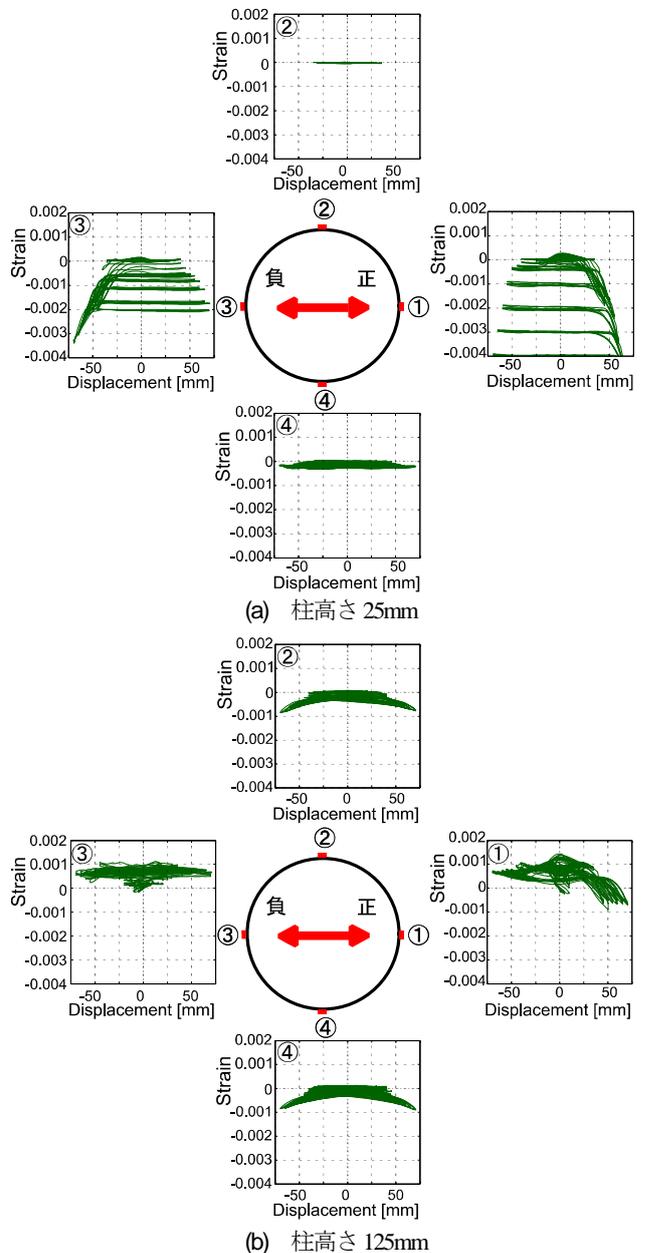


図-10 鋼管の鉛直方向のひずみ-水平変位関係

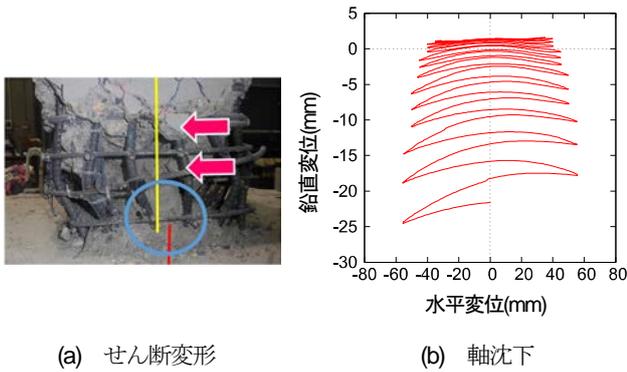


図-11 柱基部における軸沈下およびせん断変形

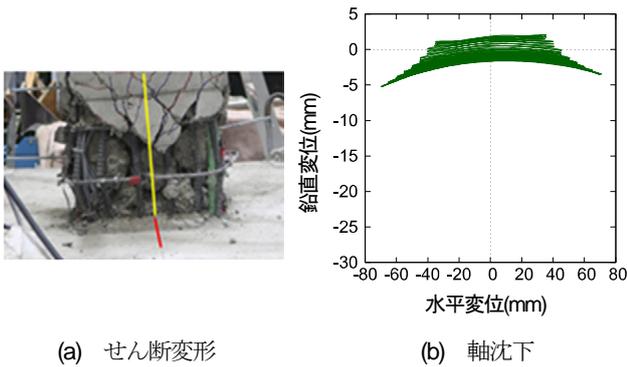


図-12 柱基部における軸沈下およびせん断変形

また、軸変形についても、C50-STで軸変位の増大が起こった荷重振幅45mm以降も大きな変化は見られず、沈下量は変位振幅70mmの荷重終了時においても3mm以下にとどまった。(図-12(b)). 6.(5)で述べたように、軸方向鉄筋座屈後に鋼管の周長方向のひずみは増大していた。そのため、軸方向鉄筋の座屈後、鋼管内部のコンクリートが圧縮抵抗力を示すことで、柱の軸沈下が防止されたと考えられる。

d) まとめ

2.(2) b) で述べたように、C50-STで確認された塑性ヒンジ部における軸変形やせん断変形といった挙動は、不確定性の高い現象であり、RC柱の挙動予測を困難にする。一方、鋼管拘束コンクリート柱を柱内部に埋め込むことで、柱基部に形成された塑性ヒンジの損傷が進行したとしても、鋼管拘束コンクリート柱に接合されたせん断キーおよび内部のコンクリートにより、柱基部でのせん断変形および軸沈下が抑制されることがわかった。

(6) 鋼管拘束コンクリート柱の配置によるRC柱の荷重低下挙動改善メカニズム

4.(1)で述べたように、C50-STでは、軸方向鉄筋座屈発生後、著しい荷重低下が見られたのに対し、phi100-RCでは荷重低下が緩やかであった。筆者らは、過去の研究において、柱基部のせん断変形および軸沈下を防止す

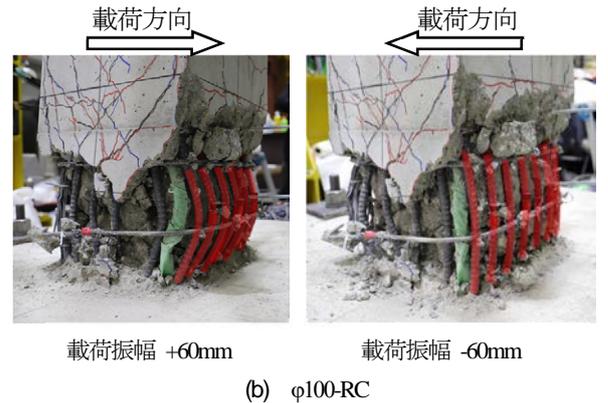
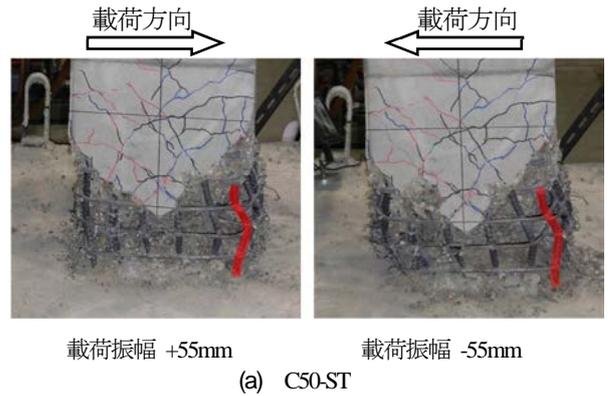


図-13 軸方向鉄筋の高さ方向のひずみ分布

ることで、座屈した軸方向鉄筋が再度、引張抵抗力を発揮しやすくなり、座屈後の柱の荷重低下が緩やかになることを示している。ここで、座屈発生後のC50-STおよびphi100-RCの軸方向鉄筋の変形の様子を見ると(図-13)、C50-STでは基部のせん断変形および軸沈下の影響で、座屈した軸方向鉄筋が引張時に伸びきっていないのに対し、phi100-RCでは基部のせん断変形および軸沈下が抑制されたことにより、引張時において再び伸び切り切ることがわかる。以上から、phi100-RCでは、鋼管拘束コンクリートの配置により、柱基部のせん断ずれおよび軸沈下が抑制されたことで、座屈後の軸方向鉄筋の引張抵抗力がより顕著に発揮され、軸方向鉄筋座屈終了後の荷重低下改善につながったと推測される。

なお、C50-STとphi100-RCで最大荷重に差異が生じたのは鋼管拘束コンクリート柱を柱内部に埋め込んだ影響であると考えられる。しかしながら、その詳細な理由については解明には至らず、今後の課題であるといえる。

(4) phi100-RCにおける鋼管拘束コンクリート柱の自重支持性能

3.(4)で述べたように、phi100-RCでは、正負交番荷重実験終了後、軸力約100kNを作用させた状態で、鋼管周囲のコンクリートおよび軸方向鉄筋の撤去作業を行い、地震被害後における鋼管拘束コンクリートの死荷重支持機

表-3 撤去作業工程

工程	作業内容
A	作業開始(柱の水平変位-60mm)
↓	柱基部の帯鉄筋撤去
↓	切断により柱の水平変位が0mm に戻るような軸方向鉄筋切断を試みる
B	柱の水平変位が0mm となるよう外力を作用させる
↓	軸方向鉄筋切断鉄筋
C	柱四隅を除く軸方向鉄筋切断終了
↓	鋼管周囲のコンクリート撤去
D	コンクリート撤去作業終了
↓	柱四隅の軸方向鉄筋切断
E	作業終了

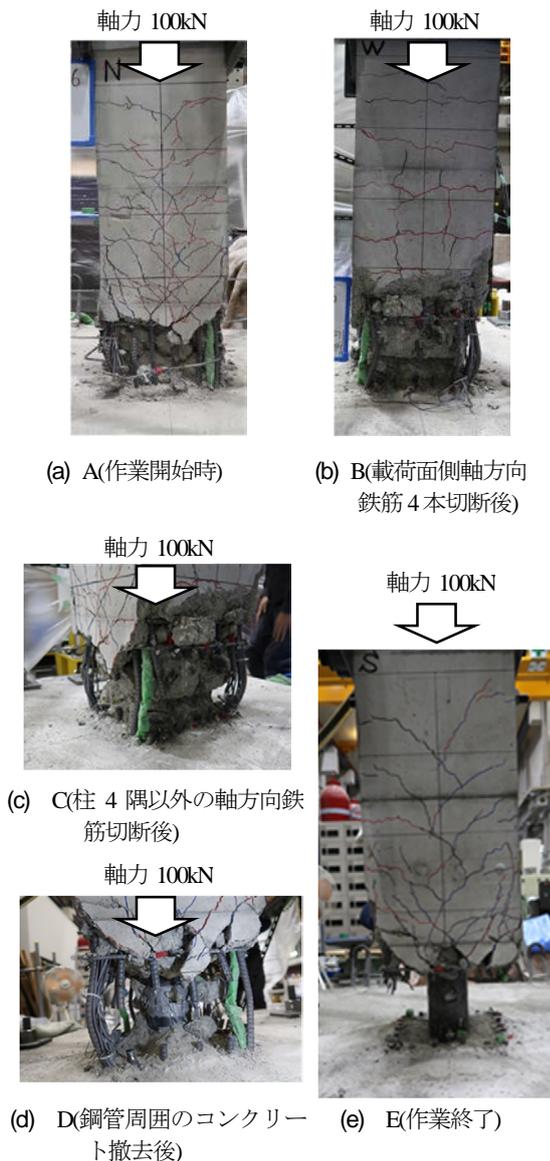


図-14 撤去作業の様子

能について検証した。そこで、表-3に鋼管拘束コンクリート周囲のコンクリート及び軸方向鉄筋を撤去する作業工程を示す。

A(柱の水平変位-60mm の状態)(図-14(a))から撤去作業を開始したが、圧縮側(載荷面)の軸方向鉄筋を切断して

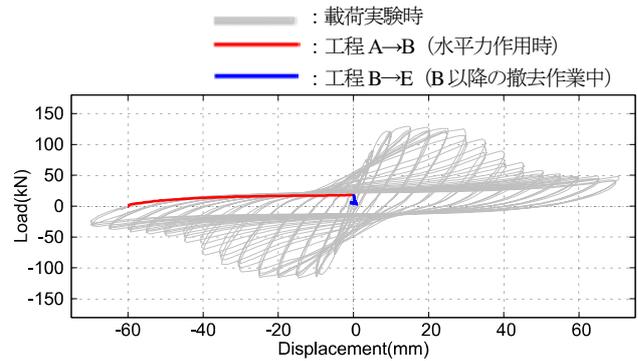
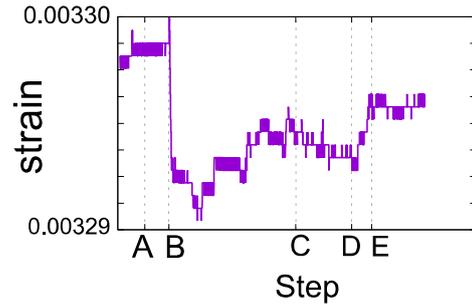
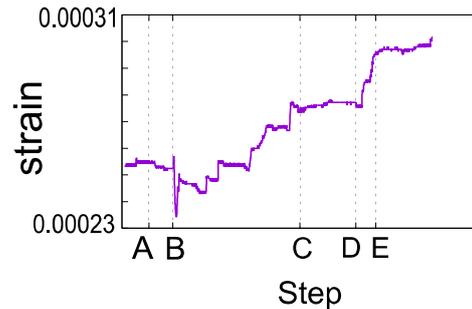


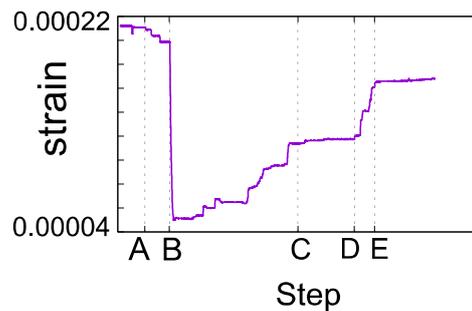
図-15 撤去作業中の荷重一変位曲線



(a) 柱高さ 25mm



(b) 柱高さ 125mm



(c) 柱高さ 325mm

図-16 載荷面における鋼管の周長方向ひずみステップ歴

も柱の水平変位が 0mm に戻る方向に動くことはなく、このまま作業を続けると、P-Δ効果により柱が倒壊する危険性があると判断したため、B(図-14(b))において柱の水平変位が 0mm となるよう水平力を作用させた。この時必要な水平力は約 14.5kNであった。この後の撤去作業中も柱の水平変位が 0mm となるよう、水平力を作用させながら作業を行った。また、C(図-14(c))において軸方向鉄筋が柱の四隅4本以外軸方向鉄筋が切断された状態

となり、この点Cから鋼管周囲のコンクリートの撤去作業を開始した。D(図-14(d))では鋼管周囲のコンクリート撤去作業が終了し、残り4本となった軸方向鉄筋の切断を開始した。E(図-14(e))にて作業を終了した。なお、図-15にBにおいて水平力を作用させた際の荷重変位関係を赤線で、その後の作業中の荷重変位関係を青線で示した。

図-16に鋼管の周長方向のひずみ-ステップ歴を示す。鉄筋の切断やコンクリートの撤去に伴い、引張ひずみが増加している。ゆえに、鋼管内部のコンクリートの軸力負担が徐々に増加していき、最終的に、鋼管に拘束されたコンクリートが軸力を負担していると言える。また、点B以降の水位変位0mmにおける鉛直変位を見ると、軸沈下は1mm以下であり非常に小さい値であった。以上より、本構造は大地震時でも死荷重支持機能を有しており、人命を確保し、地震後の復旧性の高い構造であると言える。

## 5. まとめ

本研究では、地震後の復旧性向上を目的として、死荷重支持機能を有する鋼管拘束コンクリート柱を柱内部に埋め込んだRC柱構造を提案し、正負交番載荷実験により提案構造の性能を検証した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 従来のRC柱では、軸方向鉄筋座屈後に柱基部のせん断変形および軸沈下が発生した。それに対し、
- 提案構造では、柱内部に埋め込んだ鋼管拘束コンクリートが圧縮抵抗力を示すことで、柱基部での軸沈下が抑制された。また、鋼管下端に接合したせん断キーにより、柱基部でのせん断変形が防止された。
- 提案構造では、従来のRC柱と比較して、軸方向鉄筋座屈後の荷重低下が緩やかになることがわかった。これは、上述した柱基部での軸沈下およびせん断変形防止により、座屈した軸方向鉄筋が、再度引張を受けた際に、引張抵抗力を発揮しやすくなったためであると考えられる。
- 提案構造では、鋼管の底面とフーチングの上面が一致するように配置し、さらに鋼管と周囲のRC柱部での付着補強を行わなかった。そのため、柱内部の鋼管拘束コンクリート柱への引張力の伝達を防ぐことができ、RC柱の変形に伴う鋼管拘束コンクリート柱の損傷を防止することができた。

- 提案構造では、上述したように、RC柱部と鋼管拘束コンクリート柱の付着補強を行わなかったこと。そのため、RC柱部の変形が内部の鋼管拘束コンクリート柱の剛体変形に拘束されることなく、通常のRC柱同様、柱基部に塑性ヒンジを形成させることができた。
- 載荷終了後、RC柱の軸方向鉄筋および鋼管周囲のコンクリートを撤去した結果、鋼管拘束コンクリートのみで柱への作用軸力を支持できることが確認できた。以上から、提案構造は、設計の想定を超えた地震動が発生した場合でも、橋脚の最低限の機能である死荷重支持機能を確保することができるため、復旧性に富む構造であるといえる。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(B)18H01522の助成を受けて実施した。謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 本田利器, 秋山充良, 片岡正次郎, 高橋良和, 野津厚, 室野剛隆: 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系-試案構築にむけての考察-, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 4, pp. I\_459-I\_472, 2016.
- 2) 豊岡亮洋, 布川博一, 小野寺周, 室野剛隆: ブロック型倒壊方向制御構造を有するラーメン高架橋柱の静的載荷試験, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, pp.I\_408-I\_415, 2019.
- 3) 布川博一, 豊岡亮洋, 小野寺周, 室野剛隆: 柱との接触条件をパラメータとしたブロック型倒壊方向制御構造の解析, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, pp.I\_520-I\_528, 2019.
- 4) 石橋忠良, 菅野貴浩, 木野淳一, 小林薫, 小原和宏: 軸方向鉄筋の内側に円形帯鉄筋を配置した鉄筋コンクリート柱の正負交番載荷実験, 土木学会論文集, No.795/V-68, pp.95-110, 2005.
- 5) 五島健斗, 植村佳大, 高橋良和: 設計基準外事象に対する挙動が定性的に予測可能な埋め込みメナーゼヒンジRC構造の開発, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, pp.I\_506-I\_519, 2019.
- 6) 西村隆義, 室野剛隆, 豊岡亮洋, 五十嵐晃: 危機耐性を向上させる自重補償機構の大変形時における鉛直支持機能に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, pp.I\_569-I\_578, 2019.
- 7) 武田篤史, 西村隆義: 橋梁耐震への危機耐性導入に関する一考察, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, pp.I\_688-I\_700, 2019.
- 8) 藤倉修一, 山口敬也, 野口大智, NGUYEN Minh Hai, 中島章典, 浦川洋介: 断面コア部にCFTを有するSRC橋脚の耐震性能に関する研究, 地震工学研究発表会論文集, No.1495, 2019.

## CYCLIC LOADING TEST OF SINGLE RC COLUMN WITH EMBEDDED DEAD WEIGHT SUPPORT MECHANISM

Koki NISHINE, Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

In order to realize anti-catastrophe of bridge structures, the structural technology to secure human life and improve the recoverability is required. In this study, a RC column with an embedded concrete filled steel tube with dead weight support capacity was proposed, and its performance was evaluated by cyclic loading tests. In the proposed structure, the embedded concrete filled steel tube was placed so that the bottom of the steel tube and the top of the footing were aligned. As a result, it was possible to prevent the tensile force from being transmitted to the embedded concrete filled steel tube and reduce damage to it. It was also found that the proposed structure exhibits restoring force characteristics and ultimate modes similar to those of ordinary RC columns. After the experiment, the longitudinal bars and the concrete surrounding the embedded concrete filled steel tube were removed. From the results, it was confirmed that the acting axial load could be supported only by the remaining concrete filled steel tube.