

軸力支持下で腐食鉄筋取替可能なRC柱の開発

上田 知弥¹・植村 佳大²・高橋 良和³

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

²正会員 工博 京都大学助教 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

³正会員 工博 京都大学教授 工学研究科（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

1. 背景

現在日本では、高度経済成長期以降に作られた大量の土木構造物が更新の段階に来ており、鉄筋コンクリート（以下RC）構造物の経年劣化による性能低下が懸念されている。飛来塩分や路面凍結防止剤の塩分によって引き起こされる塩害は、維持管理上の課題の一つであり、発生するとRC内部の鉄筋腐食が進行し耐荷性能の低下が起きるため、対策が必要である。現在塩害に対する対策には、かぶりコンクリートをはつり断面修復材を埋め戻す断面修復工法が用いられるが、鉄筋腐食が重度の場合鉄筋の取替を伴う大規模更新を行う。柱構造において大規模更新を行う際は、構造性能が著しく低下するため、上部工の交通規制や支保工の設置、工事区間の分割などをする必要があり、社会へ与える影響が大きい。よってこのような大規模更新が不要な維持管理戦略が理想と言えるが、これを実現するためには高度な維持管理が必要となる。開発途上国においてはこのような維持管理を行える技術者が不足、先進国においても少子高齢化の中で今後不足する可能性があり、高度な維持管理技術を必要とせず、かつ社会への影響が小さい維持管理方策の開発が求められている。

著者らは、既往の研究により耐震性能の新陳代謝を目指すメタボリズム耐震橋脚構造を提案している¹⁾²⁾³⁾。この構造は、部材取替を行うことで耐震性能の更新を図るものであり、実験的検討により、部材が取替が可能であること、及び取替により耐震性能が更新できることが確認されている。そこで本研究では、部材の取替が可能であるメタボリズム耐震橋脚構造の考えを柱構造の維持管理方策に応用することを目指す。

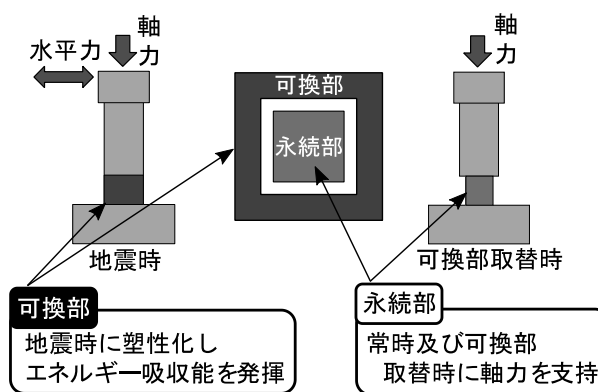


図-1 メタボリズム耐震橋脚構造

2. 提案構造

(1) メタボリズム構造の維持管理方策への応用

著者ら¹⁾²⁾³⁾が提案したメタボリズム耐震橋脚構造の概要を図-1に示す。メタボリズム耐震橋脚構造は地震発生時に塑性化することでエネルギー吸収性能を発揮する可換部と、可換部の取替時に軸力を支持する永続部から成る機能分離式の柱構造である。可換部の取替により耐震性能の更新が可能となる。

一方、維持管理において塩害の原因物質となる水や酸素、塩化物イオンは通常外部から浸透するため、断面外縁部がその影響を受けやすいと予想される。この特徴は予め取替える場所が決まっているメタボリズム構造に適しており、腐食劣化が予想される箇所の取替を前提で設計することで、取替による性能回復、更新を望むことができる。よって本研究では、耐震性能を担保し腐食劣化時に取替により更新を行う可換部と、取替時にも存続し死荷重支持機能を担保する永続部からなるメタボリズムRC柱構造（以下提案構造）を提案し実現可能性を検証する。

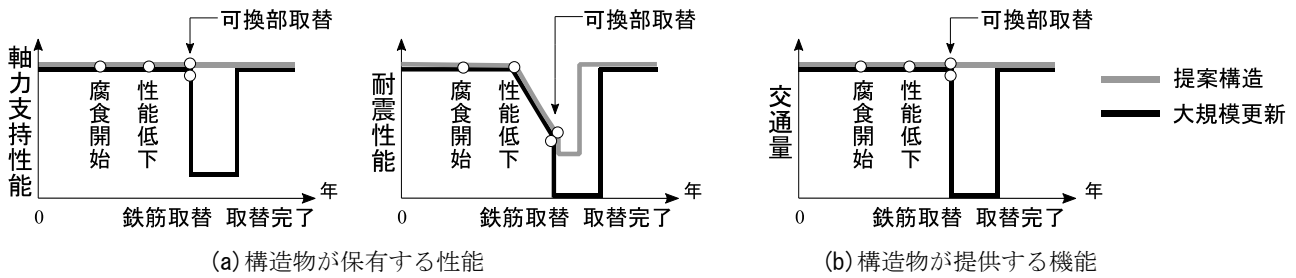


図-3 大規模更新と提案構造の更新による構造物性能及び機能の違い

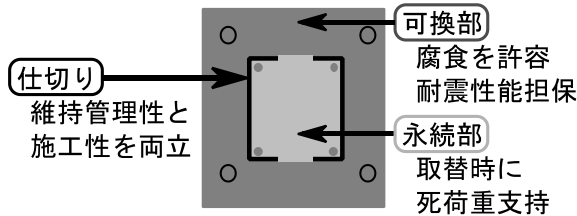


図-2 提案構造の概略図

(2) 提案構造の特徴

提案構造の概略図を図-2に示す。腐食による劣化が進行しやすい外縁部を可換部、腐食の影響を受けにくい柱中心部を永続部とする。軸方向鉄筋の腐食劣化が顕在化した際は、腐食した軸方向鉄筋も含め可換部を撤去し、再度可換部を設置することで性能の回復、更新を図る。永続部については、可換部の取替作業時に死荷重を支持する性能を要求する。

この構造において重要となるのは可換部取替のタイミングである。塩害は発生すると急速に進行することから、現行の設計基準では鋼材腐食を許容していない。しかし、Maらの研究⁴⁾によると、腐食による質量減少率5%では耐力に大きな影響がないとしている。そこで、本提案構造では質量減少率5%程度までの可換部の軸方向鉄筋の腐食を許容し、腐食した軸方向鉄筋を含む可換部の取替を予め想定する。また、鉄筋腐食の進行に伴い表面に腐食ひび割れが現れると、ひび割れから水や空気が侵入しやすくなり、腐食による劣化が加速するため注意が必要である。さらに、力学的観点では問題がない場合でも、腐食ひび割れや錆汁による外観の悪化が利用者に不安感を与える場合があり、その心理的影響を考慮する必要性が示唆されている⁵⁾。そのため、提案構造では、腐食の進行及び利用者への心理的影響を考慮して、可換部取替を行うタイミングは、「表面に腐食ひび割れが目視で観察されたとき」を基本とする。これにより、腐食ひび割れが表面に現れるまでは積極的なメンテナンスを必要としない構造が実現可能となる。

続いて、維持管理において大規模更新と提案構造

による更新の違いを図-3に示す。図-3(a)のように鉄筋の取替を伴う大規模更新では、作業時に軸力支持性能・耐震性能が著しく低下することから、容易には行うことが出来ない。一方提案構造では、取替作業時にも軸力支持性能を維持できるように永続部の設計を行う。設計段階から取替時を見据えた安全設計がなされるため、腐食が顕在化した際は迅速に部材取替の判断を下すことが可能となる。これにより工期短縮が実現でき、耐震性能が低下している期間の短縮化を図ることが可能となる。

その結果、供用しながら施工を行うことが可能であり上部工の交通量を減らす必要が無くなるため(図-3(b))、社会へ与える影響を小さくすることが出来ると考えられる。

(3) 永続部の設計

可換部取替の際、軸力を永続部のみで支持する必要がある。設計時には、このタイミングで軸力により永続部が座屈しないよう照査を行う必要がある。ここでは式(1)に示すオイラー座屈の式を用いて荷重の照査を行うものとする。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \quad (1)$$

ここに、 P_{cr} は座屈荷重、 E はヤング係数、 I は断面二次モーメント、 L_k は座屈長さである。

また、軸力の偏心に備え永続部に引張鉄筋を導入するが、永続部は取替後も継続して利用するため永続部の鉄筋腐食は許容できない。そこで、永続部の引張鉄筋については式(2)に示す塩化物イオン濃度の照査式を用いて、供用年数中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度を超えることがないように適切にかぶりを設計する。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot \left[C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

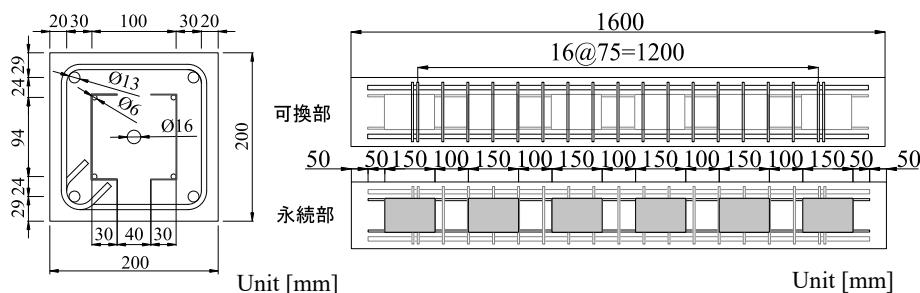


図-4 供試体の断面図及び側面図 [標準型のみ鋼板(色付部)無し]



図-5 仕切りの鋼板

ここに、 $C(x, t)$ はコンクリート表面からの深さ x mm, 時刻 t 年における塩化物イオン濃度, C_0 はコンクリート表面の塩化物イオン濃度, D_{ap} は塩化物イオンのみかけの設計拡散係数, erf は誤差関数, γ_{cl} は予測の精度に対する安全係数である。

(4) 可換性と維持管理性の両立

取替時の施工性を考慮すると、永続部と可換部は分離していることが望ましい。著者ら¹⁾²⁾³⁾が検討したメタボリズム構造も、永続部と可換部の間には空隙が存在するアンボンド型となっている。しかし、その空隙は水や空気の通り道、あるいはたまり場となり鋼材腐食を始め中性化、凍害などを促進する要因となるため、維持管理性を考慮する場合、永続部と可換部は一体型となることが望ましい。

そこで提案構造では、可換性と維持管理性を両立するため、永続部と可換部の境界に、仕切りを配置し、仕切りを埋めたまま打設を行うこととする。この際、間隔を空けて配置することで永続部と可換部が連続となる領域を確保し、通常時は永続部と可換部は一体型として挙動、取替時には仕切りを導入した部分が不連続になることで施工性が向上することを期待する。

3. 実験方法

(1) 本実験の目的

本研究では、実験的検討により提案構造の実現可能性を検証する。具体的には、軸力支持下での可換部取替実験及び正負交番載荷実験を通じて、永続部のみの軸力支持下で可換部の取替が可能であること及び取替作業が耐震性能に与える影響について検討する。また、可換部の軸方向鉄筋腐食の有無による違いと、可換部の付着性状の違いが耐震性能に与える影響について検討する。各供試体の詳細は次節で述べる。

(2) 実験供試体概要

柱を模擬するためPC鋼棒(C種1号, $\phi 13$)を用いて軸力を載荷したRC梁供試体を計4体作成し実験を行う。今回の実験供試体の寸法を図-4に示す。本構造では、中心に位置する100 mm×100 mmの領域を永続部、全断面における永続部以外の箇所を可換部と呼ぶ。取替を行う供試体に関しては、取替前後で断面は同じとしている。永続部中央には、PC鋼棒を導入するためのシースがある。今回は電食による腐食模擬を行っており、腐食進行の形態が暴露による腐食とは異なるため引張鉄筋のかぶりについては具体的な計算は行っていない。

永続部と可換部の仕切りについては、厚さ0.8 mmの鋼板(図-5)を導入し、間隔を空けて配置することで、打設時に永続部にまでコンクリートが流れるように、また耐力に影響が出ないように配慮した。

続いて、各供試体の詳細について述べる。用意した供試体は、標準型、取替型、腐食－取替型、アンボンド型の4体である。すべての供試体に対し、軸力の載荷及び正負交番載荷実験を行う。取替型供試体は、可換部の取替実験を行う供試体である。腐食－取替型供試体は、可換部の軸方向鉄筋の腐食促進を行い、腐食終了後に可換部の取替実験を行う供試体である。標準型と取替型を比較することで、永続部で軸力を支持したまま取替を行うことによる影響を、腐食－取替型と2供試体を比較することで腐食が発生した状態で可換部の取替を行うことによる影響を考察する。アンボンド型供試体は、永続部と可換部の付着を完全に切ったアンボンド型供試体である。初めに永続部のみ打設し、永続部のみに軸力を載荷する。取替時には可換部との付着を切った状態で打設を行う。これにより、永続部と可換部の付着の有無による影響を考察する。

(3) 実験概要

a) 軸力載荷

すべての供試体に対し、PC鋼棒を用いてポステ

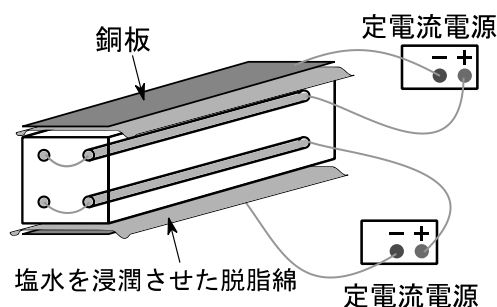


図-6 電食の概略図



(a) 切れ込みを入れる様子



(b) チッパーではつる様子

図-7 取替実験の様子



図-8 アンボンド型のシート及び端部処理



図-9 載荷システム

表-1 コンクリートの材料試験結果

	圧縮強度 [N/mm ²]	
供試体種別	永続部	可換部
標準型	35.0	
取替型	35.0	41.6
腐食－取替型	37.4	46.9
アンボンド型	37.4	49.1

表-2 鉄筋の材料試験結果

	使用場所	規格	材質	降伏強度 [N/mm ²]
D-13(a)	標準型の可換部 軸方向鉄筋	D-13	SD-345	384.3
D-13(b)	標準型以外の可換部 軸方向鉄筋	D-13	SD-345	392.1
D6	すべての帯鉄筋及び 永続部軸方向鉄筋	D-6	SD-345	373.6

ンション方式で軸力を載荷する。載荷軸力は全断面に対して1 MPaとなる40 kNとし、継続的に軸力を計測するためロードセルを入れた状態で載荷を行った。アンボンド型は永続部にのみ載荷を行い、載荷する軸力は他3供試体と同様に40 kNとする。

b) 腐食促進

定電流電源により鉄筋を強制的にアノード溶解させる電食法を用いて、腐食－取替型の可換部軸方向鉄筋の腐食促進を行う。腐食促進の概略図を図-6に示す。供試体上面と下面にそれぞれ電解質溶液(3% NaCl溶液)を浸したシートを銅板で挟み、可換部の軸方向鉄筋をアノード、銅板をカソードとした上で電流密度200 A/cm²、電流値0.21 Aの直流電流を印加する。電食期間はファラデー則に基づき平均質量減少率が6%となるように設定し試験を行う。また、腐食を許容するのは可換部の軸方向鉄筋のみであり永続部の軸方向鉄筋は腐食促進を避ける必要がある。そこで上側の可換部軸方向鉄筋2本は上面の銅板、下側の可換部軸方向鉄筋2本は下側の銅板との間で回路が形成されるようにし、永続部軸方向鉄

筋が回路の一部とならないように配慮する。

c) 取替実験

可換部の撤去は、コンクリートカッターとチッパーを用いる。図-7のように、永続部に到達しない深さの切れ込みをコンクリートカッターで入れ、可換部をチッパーではつる。なお、この間も軸力は載荷し続けている。可換部撤去後、可換部の軸方向鉄筋及び帯鉄筋を再度配筋し、打設を行う。

アンボンド型に関しては、永続部にビニールシートを巻いて打設を行うことで永続部と可換部の付着を完全に切ることとする。ただし、全体としては永続部と可換部が一体となって挙動するよう端部のみ付着を許容する(図-8)。

d) 正負交番載荷実験

載荷システムを図-9に示す。等曲げ区間300 mm、せん断スパン530 mmの2点載荷装置を用いて正負交番載荷実験を行う。載荷パターンは正負交番変位漸増方式で行い、基準振幅(4 mm)の整数倍の変位を繰り返し回数1回で載荷する。

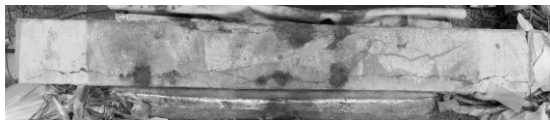


図-10 腐食促進終了の腐食－取替型供試体



図-11 可換部撤去終了後の腐食－取替型供試体

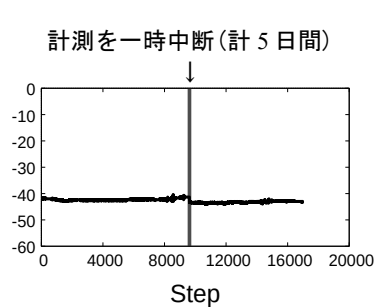


図-12 可換部撤去時の軸力推移

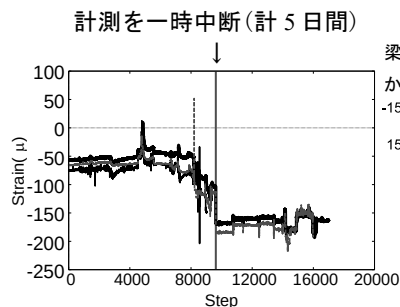
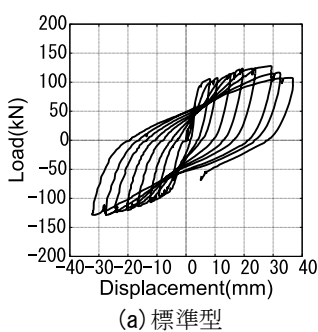


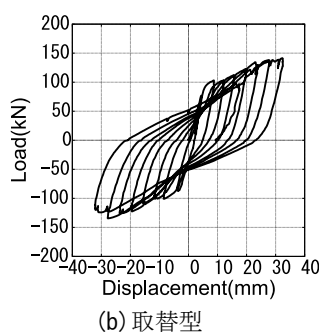
図-13 可換部撤去時の永続部鉄筋ひずみの推移



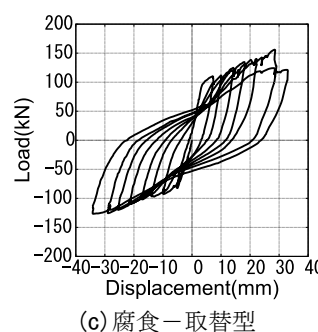
図-14 鋼板位置でのはつり作業の様子



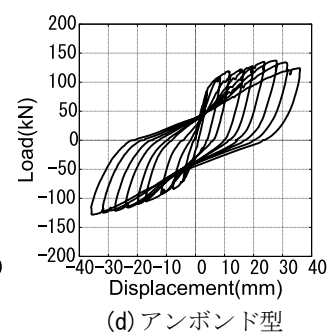
(a) 標準型



(b) 取替型



(c) 腐食－取替型



(d) アンボンド型

図-15 各供試体の荷重－変位関係

(4) 使用材料

表-1に本実験で使用したコンクリートの圧縮強度、表-2に鉄筋の引張強度を示す。圧縮強度、引張強度はそれぞれ3体の平均値を記載している。

4. 腐食促進及び取替実験の結果

(1) 腐食促進

腐食促進終了後の供試体を図-10に示す。腐食させた軸方向鉄筋については、取替実験の際に取り出した後で、10 %クエン酸水素二アンモニウム水溶液 (60 °C) に24時間浸潤させて腐食生成物を除去し、腐食量を測定した。測定結果は平均質量減少率5.7 %であった。

(2) 取替実験

はつり作業終了後の取替型、腐食－取替型の写真を図-11に示す。また、取替作業時の軸力の推移を図-12に、永続部の鉄筋ひずみの推移を図-13に示す。これにより、可換部撤去時に軸力が維持され、永続部に軸力が移行していることが分かる。この結果、永続部のみで軸力を支持したまま可換部の撤去が可

能であることを確認した。また、図-14に示すように鋼板位置では可換部コンクリートと鋼板が外れやすく、鋼板が無い位置に比べ容易に可換部が取り外せたことから、はつり作業の効率化がなされたことが確認できた。また、鋼板を目印にすることではつり作業時の永続部への損傷防止もなされている。よって、可換部と永続部との境界に配置した鋼板に一定の効果があることが確認できた。

本実験により、永続部と可換部との縁を切らずとも、可換部の軸方向鉄筋の取替が可能であることが示された。

5. 正負交番載荷実験の結果と考察

(1) 荷重－変位関係

実験で得られた各供試体の荷重－変位関係を図-15に示す。ここで、アクチュエータがRC梁を押しているときの荷重及び変位を正、引いているときの荷重及び変位を負として示す。また、腐食－取替型の実験の際、使用したアクチュエータの変位計の接続不良のため $+1\delta_y$ 載荷時の荷重データが取れておらず、腐食－取替型の荷重－変位関係は $-1\delta_y$ からの

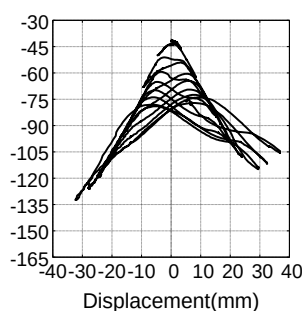
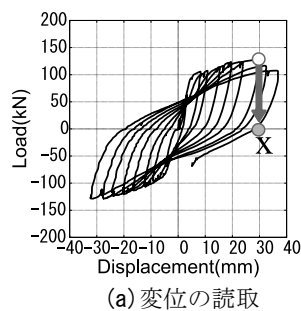
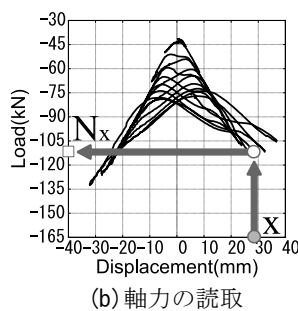


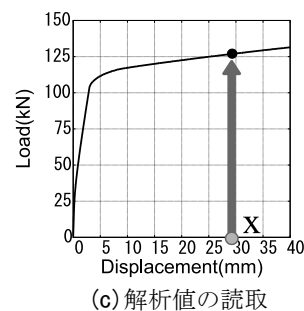
図-16 標準供試体の軸力－変位関係



(a) 変位の読取

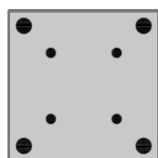


(b) 軸力の読取

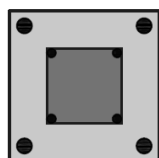


(c) 解析値の読取

図-19 軸力の変化を模擬した解析の手順



(a) 標準型



(b) 取替型，腐食－取替型

図-17 各モデルの断面形状

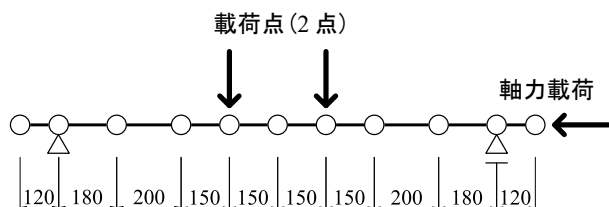


図-18 解析モデルの全体図

記載である。

a) 軸力支持下での取替の影響

今回、すべての供試体において、曲げ破壊の挙動が得られた。初めに可換部の取替そのものが復元力特性に与えた影響について考察する。

取替型及び腐食－取替型では、仕切りの鋼板がない場所で可換部と永続部の付着がなされていることから標準型と同様の復元力特性を示すことが期待される。図-15の標準型と取替型、腐食－取替型の荷重－変位関係を比較すると、各変位での最大荷重が一部異なることが分かる。また、各供試体において、同一振幅での荷重の値が正負で異なっている。そこで、正負交番载荷実験終了後に供試体をコンクリートカッターで切断し断面を確認したところ、供試体断面の上下で軸方向鉄筋のかぶりが異なっており、これが復元力特性の正負の違いに影響を与えたと考えられる。

また、標準型は全断面に軸力が载荷されているのに対し、取替型及び腐食－取替型では、永続部にのみ軸力が载荷されており、実験開始時の初期軸力の作用性状が異なっている。取替型及び腐食－取替型では、正負交番载荷に伴って中立軸が断面外側に寄

ることで、軸力が徐々に可換部に移っていくと考えられるが、初期軸力の作用性状の違いが復元力特性に影響を与えた可能性も考えられる。その他にも復元力特性の違いが出た要因として、取替前後で材料特性が変化したこと、仕切りの鋼板の有無などが考えられる。そこで、プッシュオーバー解析を実施し、各実験供試体の復元力特性について検討した。次項にて、その詳細を述べる。

また、図-15の荷重－変位関係より、各供試体で明確な二次剛性が発現していることが分かる。これは供試体変位の増大に伴い鉄筋が軸方向に塑性化した際、PC鋼棒を留めるナットにより軸方向の変形が拘束されていることで、PC鋼棒による軸力が増大したためであると考えられる。実際、図-16の軸力－変位関係から軸力が増加していることが確認でき、軸力増大に伴い断面耐力が増加したことで二次剛性が発現したと考えられる。なお、二次剛性の大きさは供試体間で異なっているものの、実際の柱構造では死荷重による軸力は一定であり、二次剛性は発現しないと考えられる。

b) プッシュオーバー解析の詳細及び結果

本検討では、実験供試体を対象としたファイバーモデルによる解析を実施した。図-17に各供試体のモデル化した断面を、図-18に解析モデルの全体図を示す。なお、取替型及び腐食－取替型のモデル(図-17(b))では、永続部と可換部で材料特性を変化させているものの、永続部と可換部の付着を考慮し、一体型の断面としてモデル化している。材料特性は、実験で得られたものを使用している。支点及び载荷点については、実験供試体と同じ位置に設定し、端のノードにx方向の力を与えることで軸力载荷を表した。

なお本検討では、鉄筋かぶり及び材料特性のみを変化させて解析を実施しており、先述した初期軸力の作用性状の違いはモデル化しないこととする。これにより、各供試体間での鉄筋かぶりと材料特性の変化が復元力特性に与えた影響に焦点を当てた検討を行った。

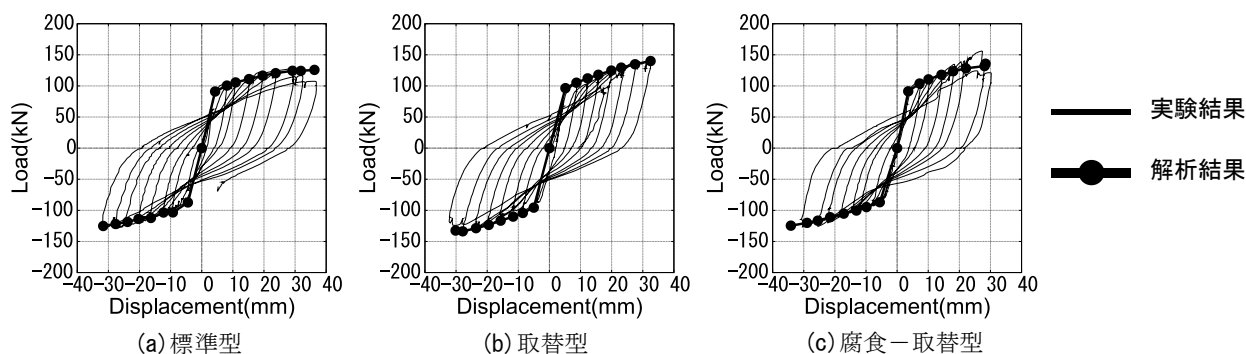


図-20 各供試体の実験結果と解析結果の比較



図-21 終局時の各供試体の荷重側面の様子

また、今回の実験で見られた、載荷に伴う軸力増大の影響を模擬するため、図-19に示す解析手順を取った。まず、各サイクルの最大荷重点の変位 x を読み取る(図-19(a))。次に、軸力-変位関係より当該変位時の軸力を読み取る(図-19(b))。続いて、読み取った軸力を載荷したRC梁のプッシュオーバー解析を行い、変位 x での荷重を読み取る。これらの手順を降伏点及び $+2\delta_y$ 以降のサイクルで行った。

解析結果を図-20に示す。図より各供試体で実験結果を十分に再現できていることが分かる。その結果、本実験で確認された各供試体間の差は、鉄筋かぶり及び材料特性の差に起因するものと考えられる。よって、可換性と維持管理性の両立のために導入した鋼板や、可換部取替により生じた可換部への初期軸力の作用性状の違いが実験結果に与えた影響は小さかったといえる。以上より、軸力支持下での取替そのものは復元力特性に影響を及ぼさないことが分かった。

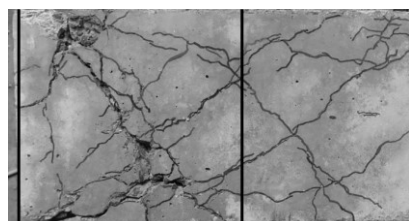
(2) 破壊性状

各供試体の終局時の荷重側面の様子を図-21に示す。各供試体のせん断区間のひび割れを比較すると、アンボンド型でせん断ひび割れが顕著に表れていることが確認できる。ただし、載荷時にせん断ひび割れが開いたものの終局時の破壊形態は曲げ破壊であった。また、取替型及び腐食-取替型においても、

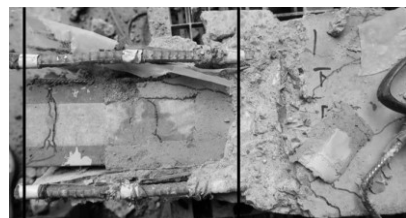
載荷時にせん断ひび割れが開いていることが観察された。以下、永続部と可換部の付着による影響を考察する。

正負交番載荷実験終了後、アンボンド型において、永続部のせん断区間の可換部を撤去し永続部のひび割れ状況を確認した。図-22(a)にアンボンド型の可換部せん断ひび割れ、図-22(b)にアンボンド型の永続部せん断ひび割れの様子を示す。これからわかるように、アンボンド型においては、可換部にせん断ひび割れがあるものの永続部に到達していないことが分かる。これは、永続部と可換部をアンボンド化しており、せん断力が永続部に伝達しなかったことによると考えられる。そして永続部にせん断ひび割れが到達しなかったことで、可換部でせん断ひび割れが発生したものの供試体全体ではせん断ひび割れが貫通せず、せん断力に抵抗できる状態だったためせん断破壊を起こさなかったと考えられる。

次に、各供試体の $+1\delta_y$ 、 $+4\delta_y$ 、 $+8\delta_y$ 時の帯鉄筋ひずみを図-23に示す。図中赤線は鉄筋の降伏ひずみを示す。図-23(d)を見ると、アンボンド型においてせん断区間における帯鉄筋ひずみが帯鉄筋の降伏ひずみを超えており、せん断破壊をする恐れがあったことが分かる。同様にせん断ひび割れが開いた取替型においても、せん断区間の帯鉄筋ひずみが一部降伏ひずみに近づいている(図-23(b))。ただし、アンボンド型と同様供試体全体ではせん断ひび割れ



梁中央から 100mm 梁中央から 300mm
(a) アンボンド型の可換部ひび割れ性状



梁中央から 100mm 梁中央から 300mm
(b) アンボンド型の永続部ひび割れ性状

図-22 アンボンド型供試体のひび割れ性状

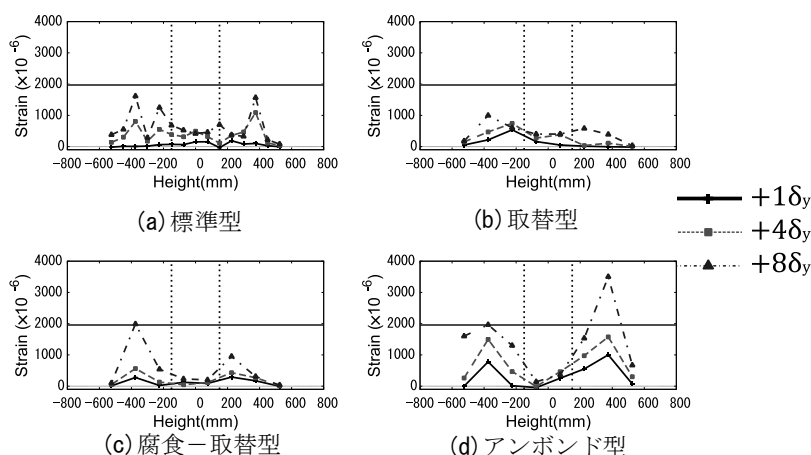


図-23 軸方向の帯鉄筋ひずみ分布

- 永続部と可換部の付着の有無による影響を検討した結果、永続部と可換部の付着方法によりひび割れ性状に変化が見られた。せん断破壊を避ける狙いから、取替時には永続部と可換部の付着を促進することが望ましいといえる。

が貫通せずせん断力に抵抗できる状態であったことから、曲げ破壊の挙動が表れたと考えられる。

また、取替型及び腐食－取替型に見られる各供試体のせん断ひび割れは、鋼板を導入した位置と一致したことを確認している。鋼板の導入箇所では、永続部と可換部の付着が切られている。これにより、せん断力の大半を可換部のみで保持する必要があったため、せん断ひび割れが表れた可能性が考えられる。本実験においては、せん断ひび割れ発生による復元力低下は発生しなかったものの、提案構造におけるせん断ひび割れ発生を抑制したい場合は、永続部と可換部の仕切りの大きさ・間隔の調整や、可換部打設の際は永続部表面の目荒らし等の処理を行うことが望ましいといえる。

6. 結論

本研究では、耐震性能を担保し腐食劣化時に取替により更新を行う可換部と、取替時にも存続し死荷重支持機能を担保する永続部からなるメタボリズムRC柱構造を提案し、実験的検討により実現可能性を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 永続部と可換部一体型のメタボリズム構造において、永続部のみで軸力を支持したまま可換部の撤去が可能であることを確認した。
- 正負交番載荷実験の結果から、永続部で軸力を支持したまま可換部を取替えたことが復元力特性に影響を与えないことが分かった。

謝辞：本研究の一部は国立研究開発法人科学技術振興機構の持続可能開発目標達成支援事業『ミャンマーの地震災害に対する橋梁構造物強靱化へ向けた課題抽出のための大型共同実験』と、科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574の助成のもと行った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 前田紘人，林学，高橋良和：メタボリズム耐震橋脚構造の開発に向けた正負交番載荷及び塑性ヒンジ部取替実験，土木学会論文集A1，76巻4号，pp.I_377-I_392，2020.
- 2) 林学，植村佳大，高橋良和：埋込継手構造を用いた塑性ヒンジ部取替によるRC橋脚の耐震性能回復に関する検討，第40回地震工学研究発表会講演論文集，No.1651，2020.
- 3) 林学，植村佳大，高橋良和：埋込メナーゼヒンジRC橋脚の地震後復旧性に関する実験的検討，第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演概要集，pp.75-82，2021.
- 4) Ying Ma., Yi Che., Jinxin Gong.: Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, Vol 29, p.548-556, 2012.
- 5) 近田康夫，松島学，畦崎成志：心理的影響に基づくコンクリート構造物の補修時期に関する一考察，土木学会論文集，No.682，I-56，pp.289-298，2001.