

メナーゼヒンジ構造を有する柱構造の UBRC補強による耐震性能向上効果

植村 佳大¹・高橋 良和²・長崎 裕貴³

¹学生会員 工修 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）

²正会員 工博 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）

³正会員 工修 株式会社小松製作所（〒107-8414 東京都港区赤坂2丁目3-6）

1. はじめに

2016年に発生した熊本地震では、二度の大きな地震が連続し、本震において3径間PC中空床板橋（橋長約61m）である府領第一橋が落橋する被害が発生した。この府領第一橋の中間橋脚には、上下端がヒンジ構造の複数の橋で構成されたロッカー橋脚が用いられていた。ロッカー橋脚は、水平・回転方向には抵抗せず、軸力のみ支持力を有する合理的な構造形式を有しているものの、設計上の想定を超える水平変位が加わると、柱の挙動が不安定化する問題点が指摘されている。また、Li¹⁾らは、基部にメナーゼヒンジを有するロッカー橋脚の回転剛性や破壊メカニズムに関する一連の検討の中で、ロッカー橋脚は大変形が加わると、柱基部のヒンジ部周辺のコンクリートに発生する縦方向のひび割れ、及び柱のP-Δ効果により負の剛性が現れ、柱が不安定化することを確認している。

これらの状況を踏まえて、コンクリート橋大規模地震対策検討委員会 報告書²⁾では、ロッカー橋脚の水平・鉛直方向に対する必要な安定性の確保が必要であるとし、ロッカー橋脚に対し、RC巻き立てや上部工・基礎との剛結などの耐震補強案を提案している。また安積ら³⁾は、既存のロッカー橋脚を対象に、現況のロッキング橋脚を上端すべり支承・下端剛結とする構造改良に対して動的解析を行うことで、その耐震補強効果を検討し、現状の耐震性能を損なうことなく構造改良できることを確認している。

そのよう中、筆者らはロッカー橋脚の新たな耐震補強法として、家村ら⁴⁾が提案したUBRC橋脚構造に着目した。UBRC橋脚構造では、柱断面内に配置

されたアンボンド高強度芯材（PC鋼棒）が、柱が大変形を起こした時でも弾性挙動を示すことで、柱の復元力特性に安定した正の二次剛性を付与することができる。PC鋼棒を柱断面内に配置する家村らの手法は、新設のRC橋脚を対象としたものであるが、筆者らは、PC鋼棒を柱断面外に配置し、橋脚に治具を介して取り付けることで、既存のロッカー橋脚への耐震補強対策にも応用することができると考えた。この手法（以下、UBRC補強とする）では、PC鋼棒の取付幅や取付高さを変化させることで、PC鋼棒の作用を制御することができる。さらに UBRC補強では、PC鋼棒の弾力的な復元力により、ロッカー橋脚に原点志向型の挙動を発現させることが可能であり、またでPC鋼棒の固定部に空隙を設けることで、PC鋼棒を大変形時のみ作用するストッパーとして機能させることも可能である。このように、要求される耐震補強効果に応じて、柱に作用する水平復元力を制御することが可能であるため、ロッカー橋脚の耐震補強対策として有効であるといえる。

そこで本研究では、柱基部にメナーゼヒンジ⁵⁾を有するロッカー橋脚に対しUBRC補強を行い、P-Δ効果により負の剛性が発生する構造に対し、UBRC補強による正の二次剛性を付加する効果を正負交番載荷実験により検討した。

2. 正負交番載荷実験概要

(1) 実験供試体

本実験では、既存のロッカー橋脚を模した供試体（MH-STD）、およびUBRC補強を行った供試体（MH-

UBRC) の、計2体の供試体を作製した。コンクリートには、セメントの種類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、コンクリートの圧縮強度は、テストピースによる圧縮試験によりフーチング部が41.6MPa、柱部が30.1MPaと算出した。以下、各供試体の詳細を示す。

a) MH-STD (標準構造供試体)

MH-STD (標準構造供試体)の配筋図を図-1に、断面図を図-2に示す。橋脚部は名神高速深草高架橋橋脚を参考に、実橋脚の一部を取り出した形状とした。柱部は400mm×300mmの矩形断面であり高さは1150mm、ヒンジ部は400mm×160mmの矩形コンクリート断面、高さは20mmであり、その位置でメナーク筋が交叉している。また、橋脚部の軸方向鉄筋にはSD345-D13を使用し、帯鉄筋として、SD345-D10を使用した。なお、せん断スパンは1000mmとした。

b) MH-UBRC (UBRC補強供試体)

MH-UBRC (UBRC補強供試体) はMH-STDにPC鋼棒によるUBRC補強を施した供試体である。そのため、軸方向鉄筋、帯鉄筋およびメナーク筋の配筋図と断面図はMH-STDのものと共通である(図-1、図-2)。PC鋼棒にはφ17mmのC種PC鋼棒を用いた。PC鋼棒の固定位置は柱高さ400mm(フーチング内部)と柱高さ700mmとなっている。また、UBRC補強を実施するにあたって、PC鋼棒による引張力を柱部に伝達するため、図-3に示す治具を設置した。治具は、中央および左右に固定用のPC鋼棒を通し、それらを締め付ける形で固定している。なお、PC鋼棒には引張力のみを作用させることを狙いとし、PCが圧縮変形する際に作用する側のナットは取り付けなかった。また、1. で述べたように、UBRC補強では、PC鋼棒の固定部に空隙を設けることで、PC鋼棒が作用する変形領域を調節することが可能であるが、本実験ではPC鋼棒の固定部に空隙は設けなかった。

(2) 荷重パターン

荷重パターンは正負交番変位漸増方式を採用し、MH-STDへの荷重では、0.020radまでは0.005radずつ変位を増加させ、0.020 rad以降は0.010 radの増分で荷重を行った。MH-UBRCへの荷重は、0.030 radの2サイクルまではMH-STDと同様の荷重を行った。しかし、-0.030 radの2回目荷重終了後に変位を0mmに戻したところ、PC鋼棒の締め付けにゆりみが見られた。これは、3. に述べる治具のゆりみによるものと判断し、以降は適宜変位を設定し、荷重を行った。

ここで、各供試体の荷重パターンを図-4に示す。また荷重軸応力は1.2MPaとした。

3. 実験結果及び考察

(1) モーメント-回転角関係

各供試体のモーメント-回転角関係を図-5に示す。なお、図中にはP-Δ効果による抵抗モーメント低下を表す補助線を併せて示している。

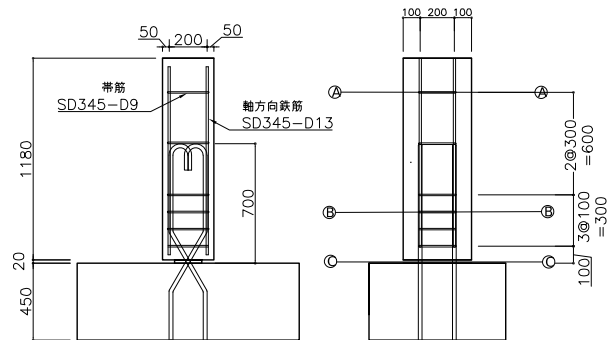


図-1 MH-STD および MH-UBRC の配筋図

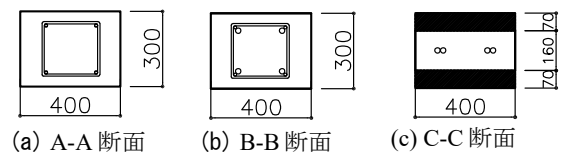


図-2 MH-STD および MH-UBRC の断面図

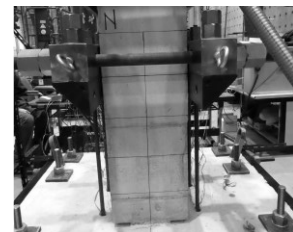
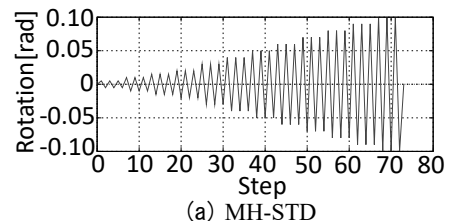
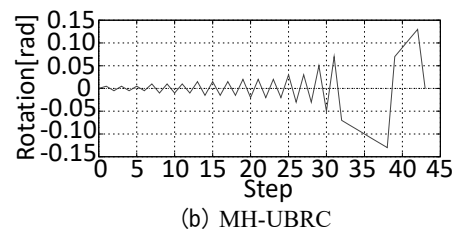


図-3 PC 鋼棒固定用治具



(a) MH-STD



(b) MH-UBRC

図-4 荷重パターン

a) MH-STD

図-5(a)を見ると、正負どちらの荷重方向に対しても、回転角 0.030rad までは抵抗モーメントが増加し、それ以降は抵抗モーメントが低下する様子が確認できる。また、1.でも述べたように、ロッカー橋脚では大きな水平変形が生じると、P- Δ 効果によって履歴曲線に負の剛性が現れ、柱の挙動が不安定になることが知られている。本実験においても、MH-STDのモーメント-回転角関係において、回転角 0.040rad 以降のサイクルにおいて履歴曲線の剛性が負になる現象が確認でき、P- Δ 効果の影響がロッカー橋脚の挙動を不安定化させていることがわかる。

またMH-STDでは、変形が進行するにつれて、P- Δ 効果による影響以上の抵抗モーメント低下が発生した。ここで、回転角 -0.04rad におけるMH-STDの荷重面側面の破壊性状を見てみると、コンクリートの切り欠き部から縦方向のひび割れが発生していることがわかる(図-6(a))。通常、本供試体のような柱基部にコンクリートヒンジを有する柱では、変形時にヒンジ部のコンクリートの圧縮力により水平方向の抵抗力が発揮される。しかし、図-6(a)のような縦ひび割れが発生すると、ヒンジ部のコンクリートによる圧縮力が低下するため、柱の抵抗モーメント低下につながる。Li¹⁾らの実験で確認されている。本実験でも、柱の最大変形時(回転角 0.10rad)において、柱の抵抗モーメントがほとんど発揮されていないことがわかる(図-7)。

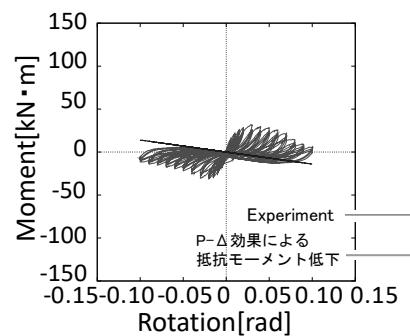
以上から、MH-STDでは、柱のP- Δ 効果およびコンクリートの切り欠き部からの縦ひび割れにより、柱が不安定化していることがわかった。

b) MH-UBRC

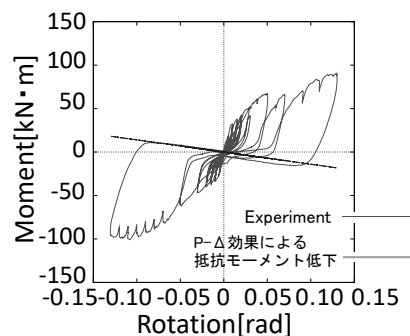
図-5(b)を見ると、MH-STDで見られたような抵抗モーメント低下が確認されず、最大回転角 0.130rad の変形領域においても抵抗モーメントが増加していることがわかる。また、MH-STDと同様、MH-UBRCにおいてもコンクリートの切り欠き部から縦方向のひび割れが発生したが(図-6(b))、縦ひび割れ発生以降も、柱の抵抗モーメント低下は確認されず、柱の変形が進行するにつれて、抵抗モーメントが増加する様子が確認できた。この結果からMH-UBRCでは、大変形領域においても、UBRC補強による正の復元力が付加されたことで、ロッカー橋脚の水平方向に対する安定性が確保が実現されたといえる。

(2) PC鋼棒が発揮した引張力について

2. (1)で確認されたMH-UBRCにおける荷重増加は、

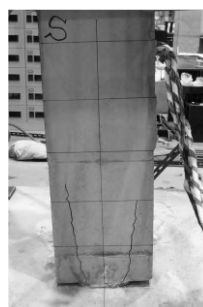


(a) MH-STD



(b) MH-UBRC

図-5 モーメント-回転角関係



(a) MH-STD (0.04rad)



(b) MH-UBRC(0.03rad)

図-6 コンクリート切り欠き部に発生した縦方向のひび割れ

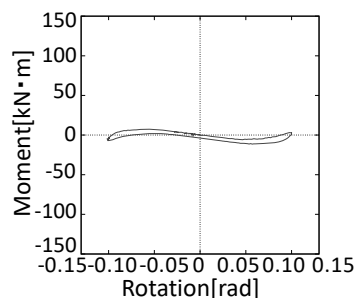


図-7 MH-STD のモーメント-回転角関係 (0.10 rad)

PC鋼棒による漸増抵抗モーメントの効果であると考えられる。そこで本節では、本実験でのPC鋼棒による漸増抵抗モーメントの効果が、MH-UBRC挙動にどの程度寄与したかを検証する。

図-8にPC鋼棒の計測ひずみから算出したPC鋼棒

の引張力と水平変位の関係を、図-9に引張力から算出したPC鋼棒の漸増抵抗モーメントの効果を除去したMH-UBRCのモーメント-回転角関係、およびその比較としてMH-STDのモーメント-回転角関係を示す。図-9を見ると、漸増抵抗モーメントによる効果を除去したMH-UBRCの履歴関係が、MH-STDの履歴関係と概ね近い値を示していることがわかる。これより、本研究におけるUBRC補強策による抵抗モーメント増加の効果は、当初の想定通り、その大部分がPC鋼棒の漸増抵抗モーメントによるものであると考えられる。

その一方で、図-8を見ると、繰返し载荷の進行に伴い、PC鋼棒による引張力の發揮開始位置が遅れている様子が確認できる。これは、繰返し载荷の中でPC鋼棒へ引張力が伝達した際に、その伝達力に押し負ける形でPC鋼棒固定用の治具が下方に移動してしまい、その移動分が再度PC鋼棒が引張力を發揮する際のギャップとなってしまうことが原因であると考えられる。そのため、大変形領域での更なる剛性の付加を期待する場合は、PC鋼棒固定用の治具を改良する必要があるといえる。

(3) PC鋼棒による復元力付加に伴うヒンジ部への作用軸力増大

これまでの検討により、ロッカー橋脚にPC鋼棒を取り付けることで柱の抵抗モーメントが増加することがわかった。しかしその一方で、PC鋼棒が引張力を發揮することで、PC鋼棒固定用の治具を介して柱基部に軸力が作用するため、メナーゼヒンジに多大な圧縮力が作用してしまう可能性が考えられる。メナーゼヒンジへの作用軸力が増大すると、メナーゼヒンジによる安定したヒンジ機構発現が保証できなくなり、耐震安全性上かえって危険側の挙動となってしまう。そこで本節では、PC鋼棒を設置することによる柱基部への作用軸力増大がロッカー橋脚に与えた影響について、メナーゼ筋交叉部及びコンクリート切り欠き部に作用した力に着目して検討を行う。

a) メナーゼ筋交叉部に作用した力

本項では、測定したひずみデータから、メナーゼ筋交叉部にかかる軸力を算出し、検討を行う。その際、鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性バイリニアと仮定し、ヤング係数は 200000N/mm^2 、降伏応力は 345N/mm^2 とした。なお、軸力に関しては、引張を正として算出している。

図-10に各供試体のメナーゼ筋にかかる軸力の合力を示す。図-10を見ると、メナーゼ筋における軸力の合力は、MH-STDとMH-UBRCで概ね等しい値

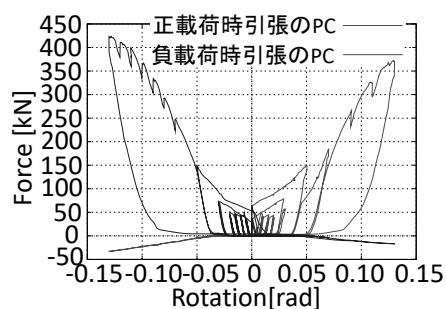


図-8 PC鋼棒が受ける引張力と回転角の関係

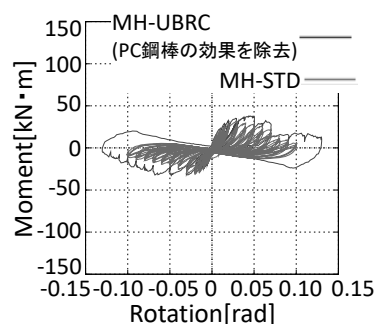


図-9 PC鋼棒の漸増抵抗モーメントの効果を除去したMH-UBRCのモーメント-回転角関係

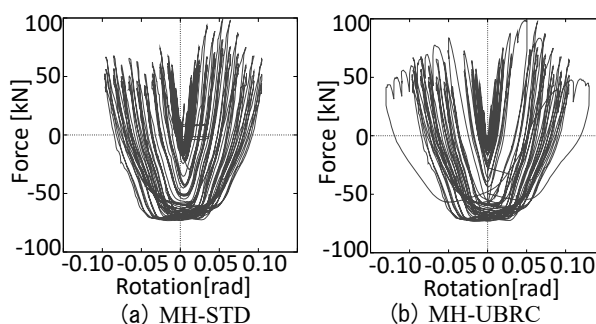


図-10 メナーゼ筋交叉部への作用軸力

を示していることが分かる。よって、PC鋼棒配置により基部へ作用する軸力が増大したとしても、メナーゼ筋に作用する軸力は大きく変化しないことがわかった。

b) コンクリート切り欠き部に作用する力

そして、3. (2) a)での検討から、PC鋼棒配置により基部へ作用する軸力が増大したとしても、メナーゼ筋に作用する軸鉛直力は大きく変化しないことがわかった。そのため、PC鋼棒配置に伴う柱基部への作用軸力の増大は、コンクリート切り欠き部に作用する力に影響を与えられられる。そこで、コンクリート切り欠き部への作用軸力を、柱に作用している軸力、PC鋼棒およびメナーゼ筋の引張力の合力として算出し検討を行う(表-1)。表-1を見ると、MH-UBRCにおいて、回転角-0.03radのサイクルでコンクリート切り欠き部にかかる圧縮力は 267.3kN と

表-1 コンクリートヒンジ部への作用軸力

回転角 θ [rad]	作用軸力 [kN]	
	MH-STD	MH-UBRC
-0.010	179.6	220.7
-0.030	197.7	267.3
-0.050	179.2	371.0
-0.070	185.6	461.6

なっており，MH-STDと比べて約1.4倍の圧縮力を受けていることがわかる．また，回転角-0.07radのサイクルでは，MH-UBRCでは461.6kNとなり，MH-STDと比べて，約2.5倍の圧縮力がコンクリート切り欠き部にがかかっていることがわかる．また，実験中の観察により，MH-UBRCではコンクリート切り欠き部の縦方向のひび割れが，MH-STDに比べて早期に発生する様子が確認されている．これは，コンクリート切り欠き部にかかる圧縮力増大が原因であると考えられる．そのため，PC鋼棒配置に伴う柱基部への作用軸力増大に対しては，縦方向のひび割れが発生しないよう炭素繊維や鋼板により側面から拘束力を加えるなどの補強を併せて行うことが有効であると考えられる．

(4) 鉄筋ひずみの高さ方向分布

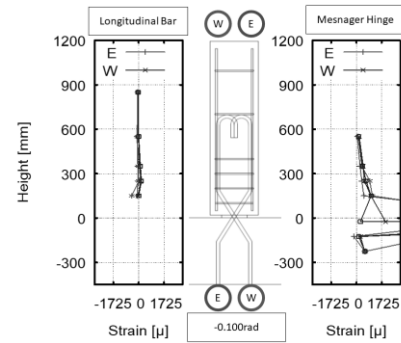
各供試体の軸方向鉄筋およびメナーゼ筋のひずみの高さ方向分布を図-11に示す(Wは載荷面，Eは載荷面裏側の鉄筋ひずみを表す)．なお，MH-UBRCにおいては，PC鋼棒のひずみ分布も併せて示した．以下，各供試体の鉄筋ひずみの高さ方向分布について述べる．

a) MH-STD

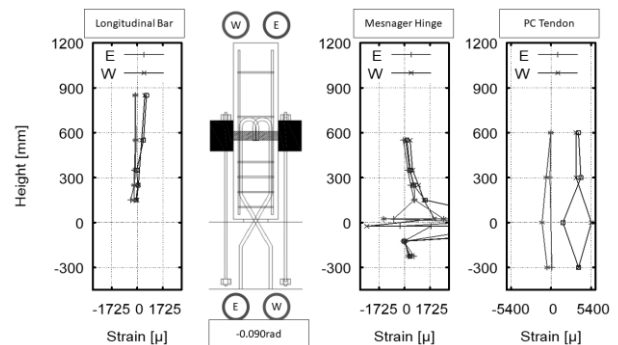
軸方向鉄筋に関しては，すべての載荷サイクルにおいて鉄筋の降伏は発生しなかった．このことから，橋脚が切り欠き部を支点とした剛体変形に近い挙動を示していると判断することができる．メナーゼ筋に関しては，ヒンジ部においてひずみは増大したが，ヒンジ部以外では塑性変形が確認されず，大変形時においても柱基部を支点としたヒンジ構造が維持されていたと判断できる．

b) MH-UBRC

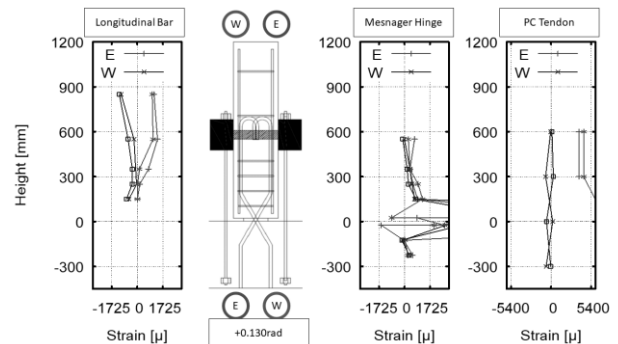
回転角0.090radのサイクルまでは，MH-STD同様，軸方向鉄筋は確認されなかった．PC鋼棒のひずみは柱高さ方向に平滑化されており，弾性的な挙動を示していることがわかる．しかし，回転角0.090rad以降のサイクルになると，軸方向鉄筋の柱高さ550mm



(a) MH-STD (-0.10rad)



(b) MH-UBRC (-0.09rad)



(c) MH-UBRC (+0.13rad)

図-11 鉄筋ひずみの高さ方向分布

～850mmの区間のひずみが降伏ひずみに近い値を示した．図-11(c)に柱の最大変形時(回転角0.13rad)の鉄筋ひずみの高さ分布を示す．図-11(c)を見ると，柱高さ550mm～850mmの位置は，ちょうどPC鋼棒固定用の治具取り付け位置と一致することから，この位置でのひずみ増大は，PC鋼棒が発揮した引張力が治具に伝達されて，柱部に集中モーメント荷重として作用したためであると考えられる．また，PC鋼棒に関しても，フーチング上縁を支点とした曲げ変形が生じ，柱高さ0mmにおいて大きく塑性化していることがわかる．そのため，PC鋼棒の弾性的な挙動を維持するためには，フーチングの貫通穴を大きくし，PC鋼棒との間に緩衝材を挿入するなど，フーチ

ングの貫通穴上縁を支点とした曲げ変形がPC鋼棒に生じないように工夫が必要であるといえる。なお、メナーゼ筋に関しては、MH-STDと同様、ヒンジ部以外では塑性変形が確認されなかった。

4. 解析的検討

MH-STDおよびMH-UBRCの解析モデルを作成し、実験結果と比較することで、そのモデルの妥当性を検討した。そして、そのモデルを用いて動的解析を行うことで、UBRC補強による抵抗モーメント増加効果が柱の動的応答特性に与える影響を考察した。以下にその詳細について述べる。

(1) 解析モデル

a) MH-STD

供試体をヒンジ部および柱部に分けてモデル化を行った。解析モデルの全体図を図-12に示す。図-12のように、メナーゼヒンジ部は、メナーゼ筋にあたる部材を高さ0mmから20mmにクロスするように配置した。また、メナーゼ筋、コンクリートヒンジ部および柱部はファイバーモデルでモデル化し、節点どうしを連結させた。

また、鉄筋の材料モデルはMenegotto-Pintoモデルを採用し、鉄筋の降伏強度は345 (kN/mm²)、ヤング率は200000 (kN/mm²)とした。柱部のコンクリートの材料モデルには、図-13(a)に示すモデルを採用した。図中において、 σ_{cc} は最大圧縮応力、 σ_{ccl} は限界圧縮応力、 ϵ_{cc} は最大圧縮応力時のひずみ、 ϵ_{ccl} は限界圧縮応力に達するときのひずみである。なお、帯鉄筋による拘束効果は道路橋示方書を参考に算出し、かぶりコンクリート及びコアコンクリートそれぞれに対してパラメータを設定した。また、コンクリートヒンジ部のコンクリートには、圧縮強度に達したら応力が一定になる材料モデルを用いた。ここで、コンクリートの材料モデルにおける各パラメータの値を表-2に示す。

b) MH-UBRC

MH-UBRCの解析モデルの全体図を図-12に示す。解析モデルにおいて、ロッカー橋脚部はMH-STDと同様のモデル化を行った。UBRC補強に用いたPC鋼棒は、材料モデルとしてMenegotto-Pintoモデルを採用し、降伏強度は1185 (kN/mm²)、ヤング率は200000 (kN/mm²)として、円形断面のファイバーモデルでモデル化した。

また、本実験で確認されたPC鋼棒固定用の治具の

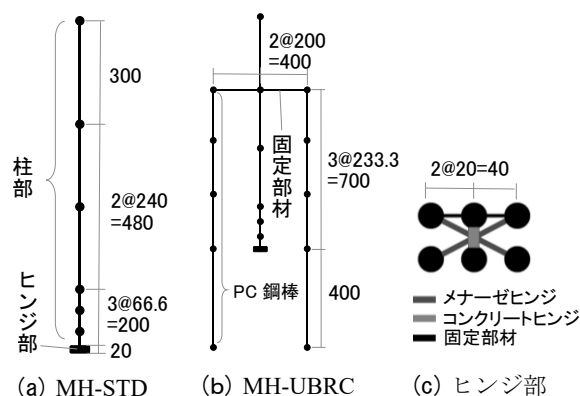


図-12 解析モデル [Unit:mm]

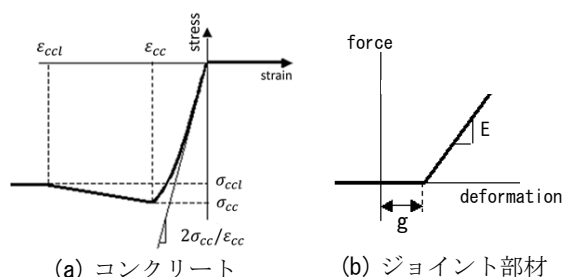


図-13 材料モデル

表-2 コンクリートヒンジ部への作用軸力

	柱部	コンクリートヒンジ部
最大圧縮応力 [kN/mm ²]	34.3	30.1
限界圧縮応力 [kN/mm ²]	8.33	
最大圧縮応力時のひずみ	0.0024	0.002
限界圧縮応力に達するときのひずみ	0.017	

緩み、およびその緩みによるPC鋼棒の作用開始位置の遅れがUBRC補強効果に与えた影響を考察するため、PC鋼棒の上部の節点と柱部との連結用部材の節点との間に、図-13(b)の挙動を示す部材(以下、ジョイント部材とする)を挿入した。図-13(b)に示すように、ジョイント部材のパラメータは、ジョイント部材の剛性Eと引張力の作用開始位置gであり、PC鋼棒固定用の治具の緩みをEで、PC鋼棒の作用開始位置の遅れをgで再現できると考えた。そこで本検討では、治具の緩みがあり、かつPC鋼棒の作用開始遅れがない場合を想定して、 $E < (PC鋼棒のヤング率)$ かつ $g=0$ としてMH-UBRCのモデル化を行った。なお、ジョイント部材は圧縮力を伝達しないため、ジョイント部材と連結したPC鋼棒は、実験と同様に引張力のみ発揮するモデル化となっている。

(2) 正負交番載荷実験の再現解析

4. (1)で作成した解析モデルの妥当性を検証するため、正負交番載荷実験の再現解析を行った。以下

にその詳細を示す。

a) MH-STD

解析により算出したモーメント-回転角関係、およびその比較として実験でのモーメント-回転角関係を図-14(a)に示す。図-14(a)を見ると、最大抵抗モーメントおよび履歴形状が精度よく再現できていることがわかる。また、解析により算出された軸方向鉄筋およびメナーゼ筋のひずみの高さ分布(図-15)を見ると、実験同様、軸方向鉄筋に大きな変形は発生しておらず、メナーゼ筋はヒンジ部のみ塑性化していることがわかる。そのため、本検討における解析モデルは、ロッカー橋脚の挙動を再現する上で妥当であると判断することができる。

しかし一方で、解析により算出したモーメント-回転角関係において、実験で確認されたP-Δ効果による影響以上の抵抗モーメント低下は再現できていないことがわかる。これは、本検討で用いたコンクリートヒンジ部の材料モデルにおいて、コンクリートの応力低下を考慮していないことが原因であると考えられる。そのため、実験で発生したP-Δ効果による影響以上の抵抗モーメント低下を再現するためには、コンクリートの割裂ひび割れによる応力低下を反映できる材料モデルをコンクリートヒンジ部に用いる必要があるといえる。

b) MH-UBRC

解析により算出したモーメント-回転角関係、およびその比較として実験でのモーメント-回転角関係を図-14(b)に示す。なお、解析ではジョイント部材のEを柱の最大抵抗モーメントの値が実験で計測された値と概ね等しくなるように設定した。

図-14(b)を見ると、回転角0.07radまでの領域ではモーメント-回転角関係の包絡線が概ね再現できており、履歴形状も類似していることがわかる。しかし、回転角0.07radから回転角0.13radまでの領域では、包絡線および履歴形状に実験との差異が確認できる。これは、大きな変形になると、PC鋼棒固定用の冶具の緩みによるPC鋼棒の作用開始位置の遅れが健在したために、挙動が再現できなかったからであると考えられる。以上から、本解析モデルを用いることで、PC鋼棒の作用開始位置の遅れが健在しない程度の変形領域(回転角0.07radまでの領域)に限り、挙動を再現することができるといえる。

(3) 動的解析

UBRC補強による抵抗モーメント増加効果が柱の動的応答特性に与える影響について、4.(1)で作成した解析モデルを用いて、動的解析を行った。以下

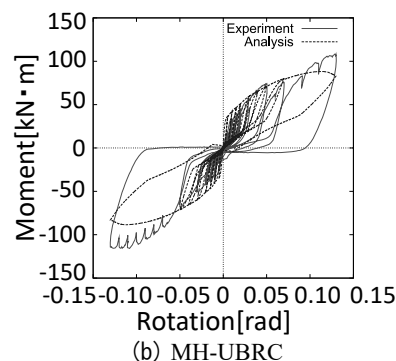
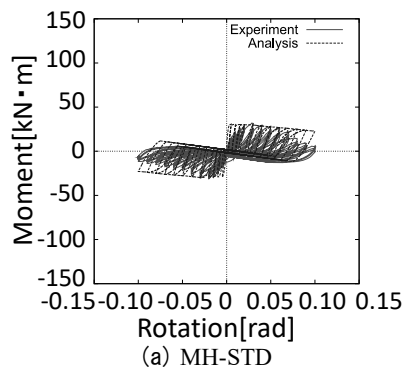


図-14 モーメント-回転角関係

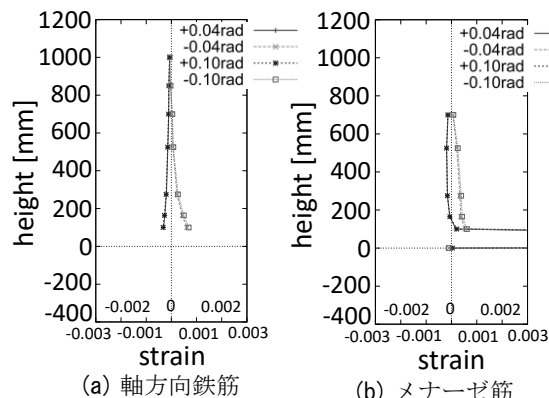


図-15 鉄筋ひずみ

にその詳細について述べる。

a) 入力地震動

入力地震動として1995年兵庫県南部地震JR鷹取記録のEW成分を0.5倍したものをを用い、水平方向に入力した。

b) 解析結果

図-16に動的解析により算出したモーメント-回転角関係を、図-17に回転角の時刻歴を示す。MH-STDでは、P-Δ効果により履歴に負の剛性が表れることで復元力を喪失し、柱が倒壊する現象が確認された。一方、MH-UBRCでは、UBRC補強による抵抗モーメント増加効果により柱の変形が抑制されていることがわかる。また、履歴に常に正の剛性が付加されていることで、原点志向型の挙動を示してお

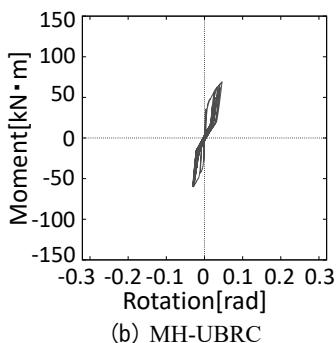
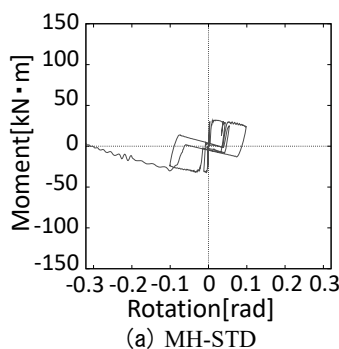


図-16 動的解析によるモーメント-回転角関係

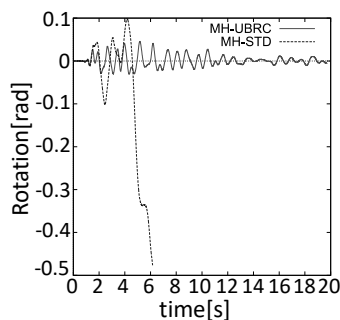


図-17 動的解析による回転角時刻歴

り、残留変位が低減していることがわかる。以上から、UBRC補強による抵抗モーメント増加効果により、柱の動的応答特性が向上することがわかった。

5. まとめ

本研究では、柱基部にメナーゼヒンジ構造を有するロッカー橋脚に対しUBRC補強を行い、その耐震性能向上効果を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 無対策の供試体では、柱のP-Δ効果およびコンクリートの切り欠き部からの縦ひび割れにより、履歴に負の剛性が現れ、柱が不安定化している様子が確認された。
- UBRC補強した供試体では、柱の抵抗モーメントは低下せず、柱の変形が進行するにつれて、抵抗モーメントが増加する様子が確認できた。

この結果から、UBRC補強により、大変形領域におけるロッカー橋脚の水平方向に対する安定性が確保されることがわかった。

- UBRC補強におけるPC鋼棒配置により基部へ作用する軸力が増大する現象が確認され、この軸力の増加により、コンクリート切り欠き部にかかる圧縮力が増大することがわかった。また、PC鋼棒固定部にかかる集中モーメントにより、軸方向鉄筋に無対策供試体では見られなかったひずみが発生することがわかった。そのため、UBRC補強を行う際は、これらに対する照査を併せて行う必要があることがわかった。
- 正負交番載荷実験の再現解析において、無対策試験体である標準ロッカー橋脚の挙動を再現することができた。また、UBRC補強されたロッカー橋脚の再現解析では、PC鋼棒固定部の緩みを考慮したモデル化を行うことで、実験結果を概ね再現することができた。
- 動的解析を行った結果、無対策のロッカー橋脚で柱の倒壊が発生したのに対し、UBRC補強したロッカー橋脚では、抵抗モーメント増加効果により柱の変形が抑制された上、残留変位の低減が確認された。この結果から、UBRC補強による抵抗モーメント増加効果により、柱の動的応答特性が向上することがわかった。

謝辞：本研究の一部は一般財団法人大成学術財団の助成を受けた。謝意を表します。

参考文献

- 1) Li, S., Ikawa, Y., Ohshiro, T., Takahashi, Y. and Hashinoki, M. : An examination of the seismic performance of rocker pier bridges in Japans oldest expressway, Proc. of International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2016.
- 2) 西日本高速道路株式会社 関西支部：名神高速道路 コンクリート橋大規模地震対策検討委員会 報告書，2016.
- 3) 安積恭子，杉岡弘一，光川直宏：ロッキング橋脚を有する橋梁におけるすべり支承を用いた構造改良提案，第37回地震工学研究発表会概要集，2017.
- 4) 家村浩和，高橋良和，曾我部直樹：アンボンド芯材を活用した高耐震性能RC構造の開発，土木学会論文集，No.710，I-60，pp.283-296，2002.
- 5) Mesnager : Experiences sur une semi-articulation pour routes en Béton armé, Annales de Ponts de Chaussees, 2, pp.180-201, 1907.