

# メナーゼヒンジを有するロッカー橋脚の UBRC 補強による耐震性能向上に関する検討

植村 佳大<sup>1</sup>・高橋 良和<sup>2</sup>・長崎 裕貴<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)  
E-mail: uemura.keita.35a@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>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)  
E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>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) .

柱基部にメナーゼヒンジ構造を有するロッカー橋脚は、設計上の想定を超える変位が生じると不安定状態となることが知られており、水平・鉛直方向に対する安定性の確保が求められている。そこで本研究では、ロッカー橋脚への耐震補強方策として、柱断面外に配置した PC 鋼棒を治具を介して取り付ける UBRC 補強を提案し、正負交番載荷実験によりその耐震性能向上効果を検討した。その結果、UBRC 補強により抵抗モーメントが増加し、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。また、正負交番載荷実験の再現解析では、標準ロッカー橋脚および UBRC 補強されたロッカー橋脚の実験結果を概ね再現することができた。そして、それらのモデルを用いて動的解析を行った結果、UBRC 補強により柱の動的応答特性が向上することがわかった。

**Key Words:** Rocer pier, Mesnager hinge, Seismic strengthening, Cyclic loading test, Dynamic analysis

## 1. はじめに

名神高速道路は 1963 年 7 月 16 日に開通した我が国で初めての高速道路であり、今日で 50 年以上の月日が経った。名神高速道路は、走行車を安全に、しかも高速で走行させる構造型式でなくてはならないという点を重視して設計が行われたが、それだけでなく常に経済的に、そして路上及び側面からの美観をよくするための努力がなされてきた。継手を少なくした高速道路の連続性や経済性、さらには美観性を満たすものとして、名神初期では支間 15m の 5 径間連続 RC 中空床版橋が採用された。この橋梁は、地震に対する固定を 1 ヶ所の剛なラーメン橋脚に集め、中間橋脚は上下端にヒンジを配置した水平力に抵抗しないロッカー橋脚を採用している点が大きな特徴であり、ロッカー橋脚の柱断面に大きな曲げ応力を発生させない合理的な構造をとっている。その一方で、ロッカー橋脚は、単独では自立できず、変位が生じると不安定状態となる特殊な構造であり、支承部や横変位拘束構造等の部分的な破壊が落橋・倒壊等の致命的な被害につながる可能性が高い点も指摘されている。Li<sup>1)</sup>らに

よって行われた一連の検討の中でも、ロッカー橋脚に大変形が加わると、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- $\Delta$  効果により負の剛性が現れ、柱が不安定化することが確認されている。また、2016 年に発生した熊本地震においても、上下端がヒンジ構造であるという点でロッカー橋脚と同様の構造形式を有するロッキング橋脚に倒壊被害が発生している。

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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>は、既存のロッキング橋脚を対象に、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<sup>4)</sup>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することで、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ことが特長である。さらに UBRC 補強では、PC 鋼棒の弾性的な復元力により、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 PC 鋼棒の固定部に空隙を設けることで、PC 鋼棒が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<sup>9)</sup>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。また、標準ロッカー橋脚および UBRC 補強されたロッカー橋脚の解析モデルを作成し、正負交番載荷実験の再現解析を行うことで、その妥当性を検討した。そして、それらのモデルを用いて動的解析を行い、UBRC 補強による動的応答改善効果を検討した。

## 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-3 に示す。橋脚部は名神高速深草高架橋脚を参考に、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、その位置でメナーゼ筋が交叉している。

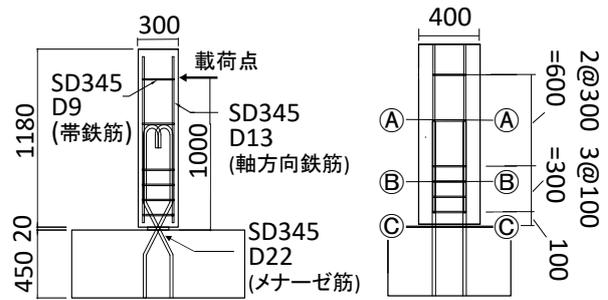


図-1 MH-STD の配筋図 [Unit:mm]

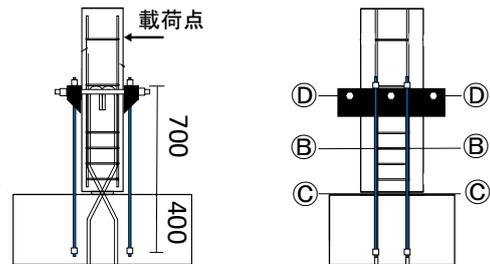


図-2 MH-UBRC の配筋図 [Unit:mm]

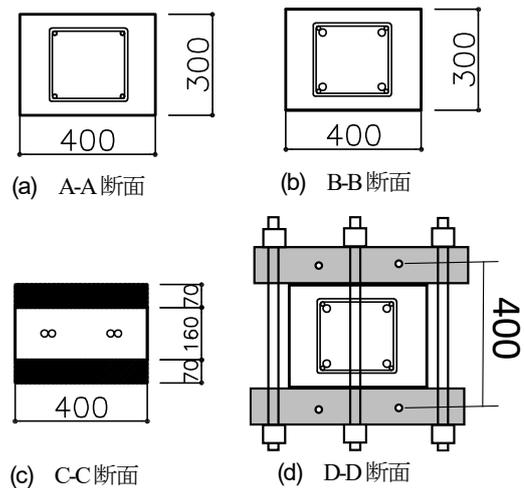


図-3 MH-STD および MH-UBRC の断面図 [Unit:mm]

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。軸方向鉄筋、帯鉄筋およびメナーゼ筋の配筋図と断面図は MH-STD のものと共通である (図-2, 図-3)。また、PC 鋼棒には  $\phi 17\text{mm}$  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の治具を設置した。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、0.020rad以降は0.010radの増分で荷重を行った。MH-UBRCへの荷重は、0.030radの2サイクルまではMH-STDと同様の荷重を行った。しかし、-0.030radの2回目荷重終了後に変位を0mmに戻したところ、PC鋼棒の締め付けに緩みが見られた。これは、3.に述べる治具の緩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。

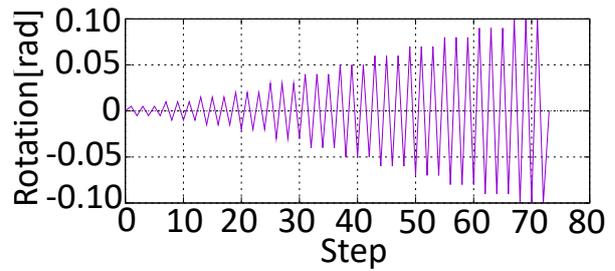
## 3. 実験結果及び考察

### (1) モーメント-回転角関係

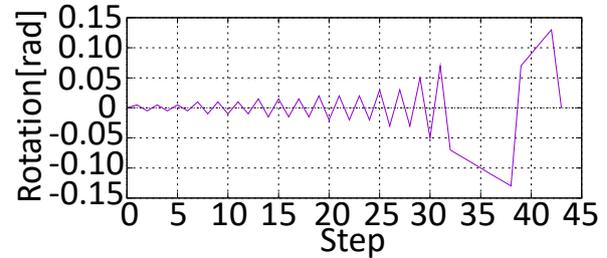
各供試体のモーメント-回転角関係を図5に示す。なお、図中にはP-Δ効果による抵抗モーメント低下を表す補助線を併せて示している。

#### 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ことを、Li<sup>9)</sup>らの実験で確認されて

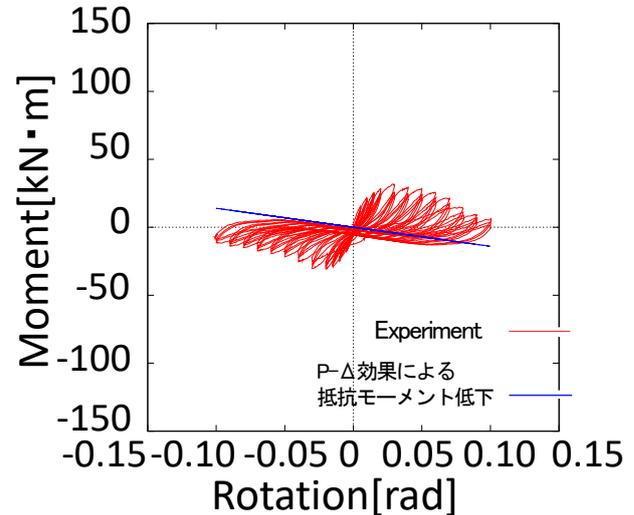


(a) MH-STD

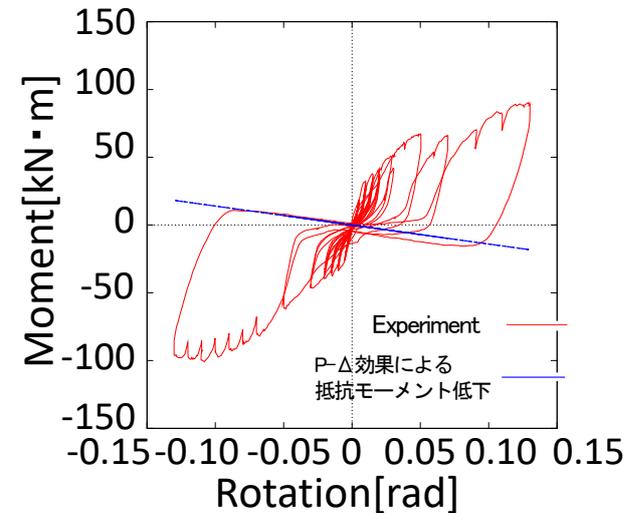


(b) MH-UBRC

図4 荷重パターン



(a) MH-STD



(b) MH-UBRC

図5 モーメント-回転角関係

いる。そのため、本実験でも柱の最大変形時(回転角 0.10 rad)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確認できる(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 0.130 rad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

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示す。ここでのPC鋼棒の引張力とは、1本のPC鋼棒が発揮した引張力であり、データ欠損のなかったひずみゲージの値から算出している。

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発揮開始位置が遅れている様子が確認できる。このことから、大変形領域においては、PC鋼棒が柱の倒壊方向の変形を拘束するストッパーとして機能していたことがわかる。1.において、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はUBRC補強の適用例の一つであると述べた。しかし、本実験において、この挙動は意図していたものではなく、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鋼棒が引張力を発揮する際のギャップとなってしまったことが原因であると考えられる。そのため、PC鋼棒を意図通りに作用させるためには固定用治具の改良が必要であるといえる。

#### (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鋼棒が引張力を発揮することで、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(図-9)。メナーゼヒンジ



(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

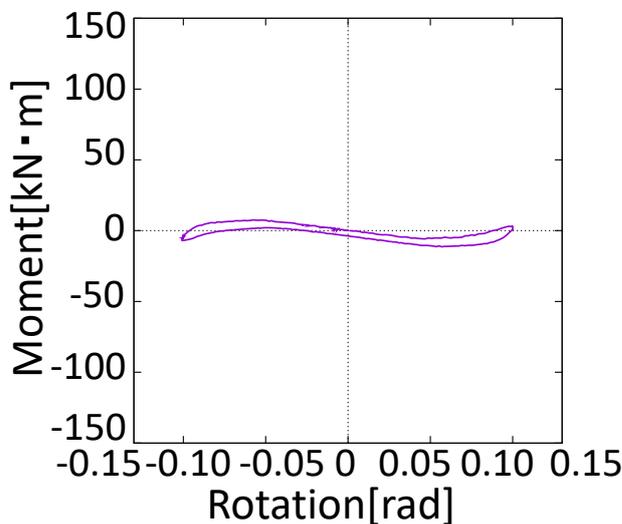


図-7 MH-STDのモーメント-回転角関係(0.10rad)

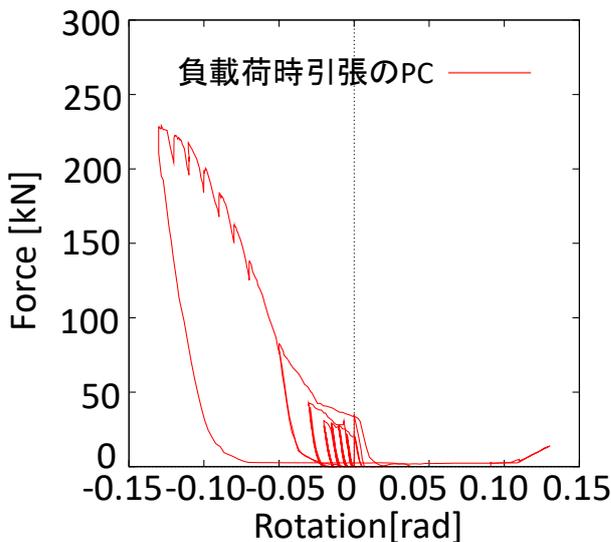


図-8 PC鋼棒が発揮する引張力と回転角の関係

への作用軸力が增大すると、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 $200000\text{N/mm}^2$ 、降伏応力は $345\text{N/mm}^2$ 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。

#### a) コンクリート切り欠き部に作用する力

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 のにおいて、回転角 $-0.03\text{rad}$ 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  $267.3\text{kN}$  となっており、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 $-0.07\text{rad}$ のサイクルでは、MH-UBRC では  $461.6\text{kN}$  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。本実験では、縦方向のひび割れによる MH-UBRC の抵抗モーメント低下は発生しなかったものの、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必要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

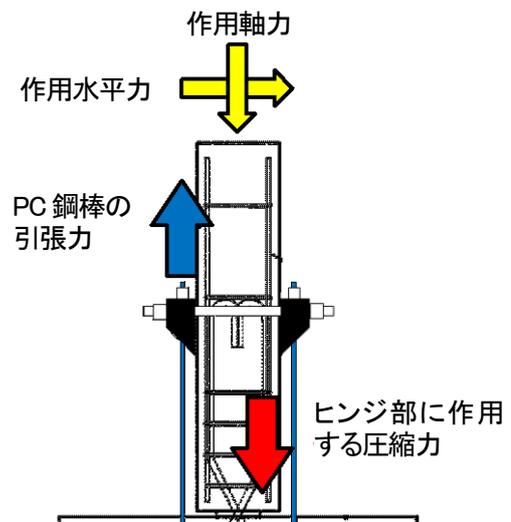


図-9 UBRC 補強によるヒンジ部への作用圧縮力の増大

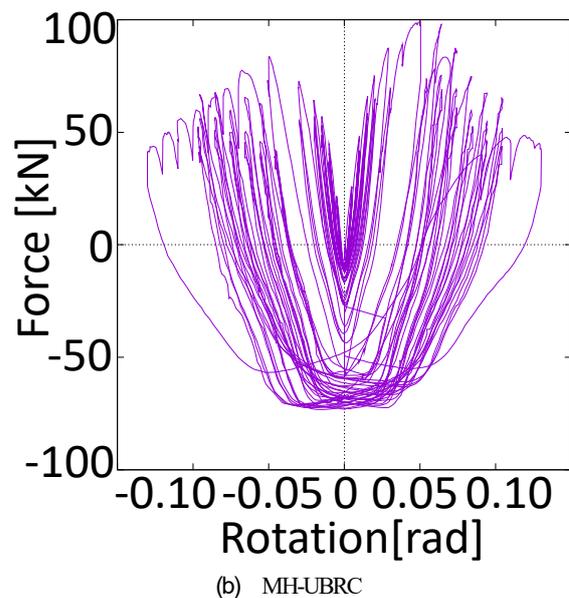
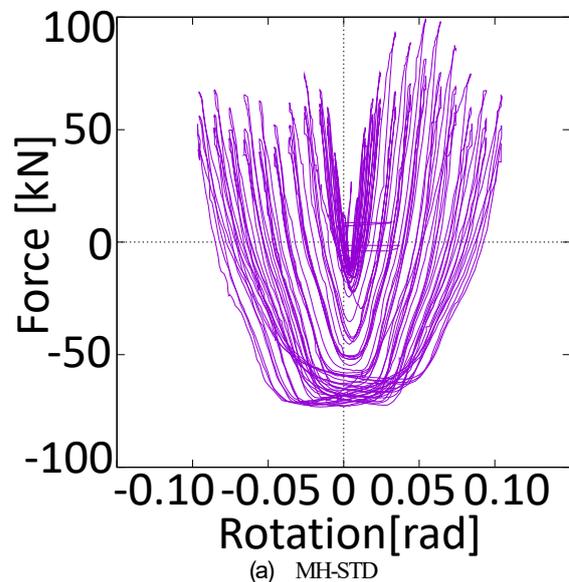


図-10 メナーゼ筋交叉部への作用軸力

表-1 コンクリートヒンジ部への作用軸力

回転角 $\theta$ [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

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, すべての载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ていった一方で, ヒンジ部以外では塑性変形が確認されなかった. そのため, MH-STD では, 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~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な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.

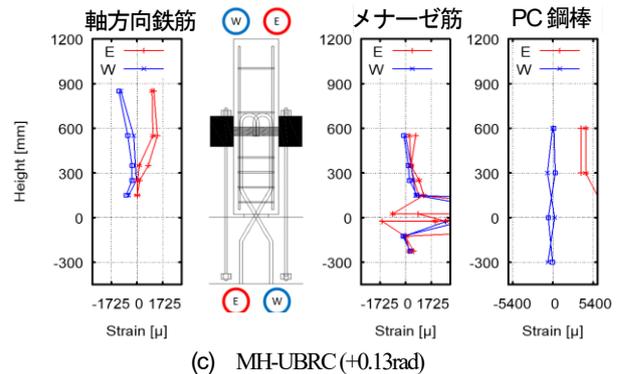
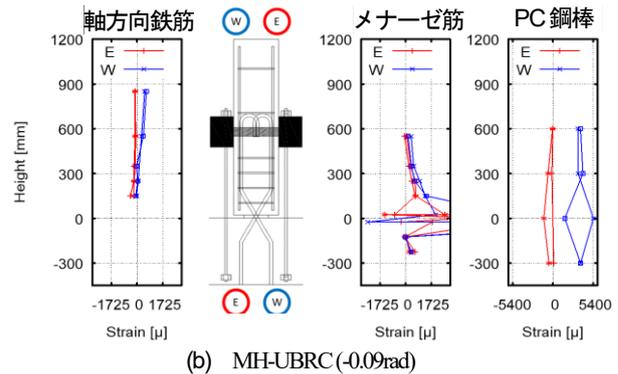
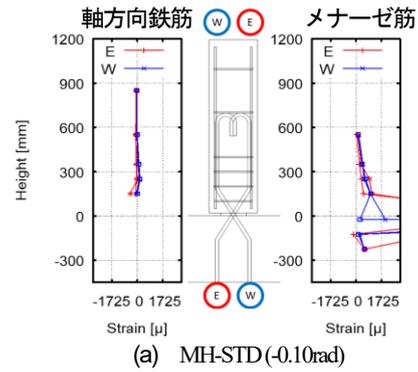


図-11 鉄筋ひずみの高さ方向分布

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,

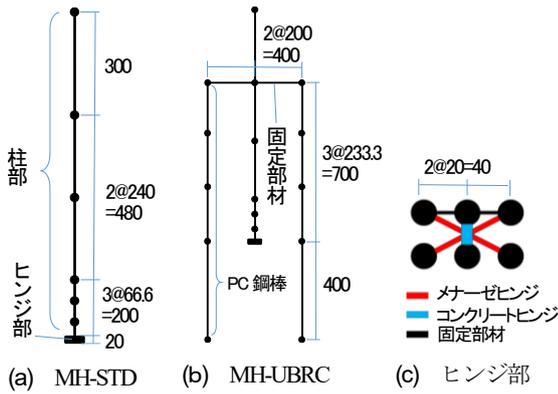


図-12 解析モデル [Unit:mm]

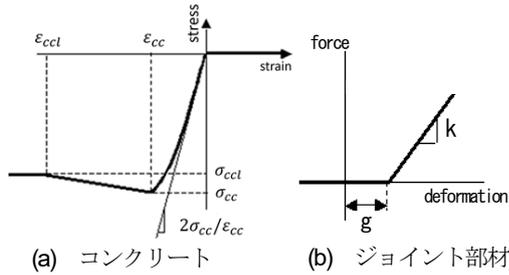


図-13 材料モデル

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 <sup>2</sup> ]	34.3	30.1
限界圧縮応力 [kN/mm <sup>2</sup> ]	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	

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、節点同士を連結させた。

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/mm<sup>2</sup>)、ヤング率は 200000 (kN/mm<sup>2</sup>)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、 $\sigma_{cc}$  は最大圧縮応力、 $\sigma_{ccl}$  は限界圧縮応力、 $\epsilon_{cc}$  は最大圧縮応力時のひずみ、 $\epsilon_{ccl}$  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<sup>9)</sup>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/mm<sup>2</sup>)、ヤング率は 200000 (kN/mm<sup>2</sup>)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  $k$  と引張力の作用開始位置  $g$  であり、PC 鋼棒固定部での治具の緩みを  $k$  で、PC 鋼棒の引張力の作用開始位置の遅れを  $g$  で表現できると考えた。

そこで本検討では、「治具の緩みあり ( $k <$  PC 鋼棒の剛性)、かつ PC 鋼棒の作用開始遅れなし ( $g=0$ )」の場合と「治具の緩みなし ( $k >$  PC 鋼棒の剛性)、かつ PC 鋼棒の作用開始遅れあり ( $g > 0$ )」の 2 種類のモデルを作成し、MH-UBRC の検討を行った。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。

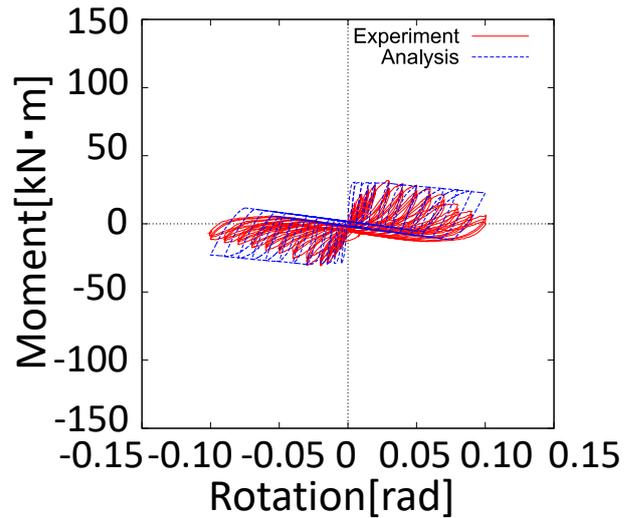
しかし一方で、解析により算出したモーメント-回転角関係において、実験で確認された P-Δ 効果による影響以上の抵抗モーメント低下は再現できていないことがわかる。これは、本検討で用いたコンクリートヒンジ部の材料モデルにおいて、コンクリートの応力低下を考慮していないことが原因であると考えられる。そのため、実験で発生した P-Δ 効果による影響以上の抵抗モーメント低下を再現するためには、コンクリートの割裂ひび割れによる応力低下を反映できる材料モデルをコンクリートヒンジ部に用いる必要があるといえる。

b) MH-UBRC

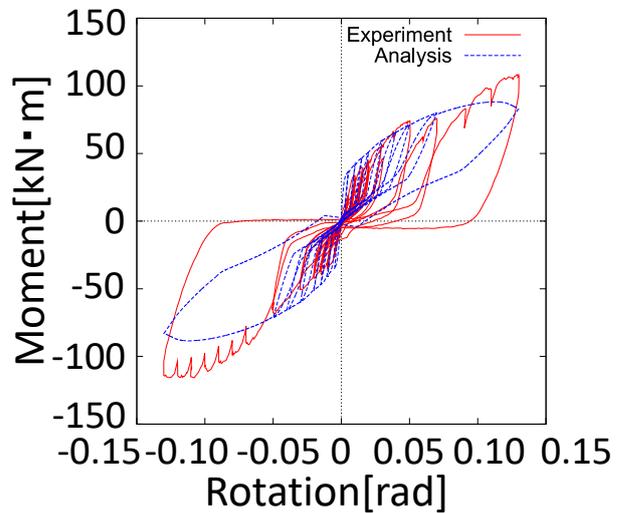
「治具の緩みあり( $k < \text{PC 鋼棒の剛性}$ ), かつ PC 鋼棒の作用開始遅れなし( $g=0$ )」とした場合のモーメント-回転角関係, およびその比較として MH-UBRC の実験結果を 図-14(b) に示す. なお解析では, 柱の最大抵抗モーメントの値が実験で計測された値と概ね等しくなるようにジョイント部材の  $k$  を設定することとし,  $k=3000$  (kN/mm) としている. 図-14(b)を見ると, 回転角 0.07rad から回転角 0.13rad までの領域では, 包絡線および履歴形状に実験との差異が確認できるものの, 回転角 0.07rad 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. 次に「治具の緩みなし( $k \gg \text{PC 鋼棒の剛性}$ ), かつ PC 鋼棒の作用開始遅れあり( $g > 0$ )」の場合のモーメント-回転角関係を 図-14(c) に示す. なお本ケースにおいても, 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  $g$  と  $k$  を設定することとし,  $g=15\text{mm}$ ,  $k=1.0 \times 10^{10}$  (kN/mm) としている. 図-14(c)を見ると, 回転角が大きい変形領域 (回転角 0.07rad から回転角 0.13rad までの領域) において実験の履歴形状を表現できていることがわかる. 以上の検討から, 本実験での MH-UBRC の挙動では大きな変形になると PC 鋼棒の作用開始位置の遅れの影響が健在しているため, モーメント-回転角関係の履歴特性の再現には, PC 鋼棒の作用開始位置の遅れを考慮したモデル化が必要である一方で, 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) においては, 治具の緩みのみを考慮したモデル化により, 履歴特性の再現が可能であることがわかった.

また, 鉄筋ひずみ (図-15(b), (c)) に関しては, 両ケースともに PC 鋼棒の引張力の伝達により PC 固定部の高さの軸方向鉄筋にひずみが発生しており, メナーゼ筋に関しては, ヒンジ部のみ大きく塑性化している. これは, 3.(4)b) で示した実験結果と同様であり, 実験結果を再現できているといえる.

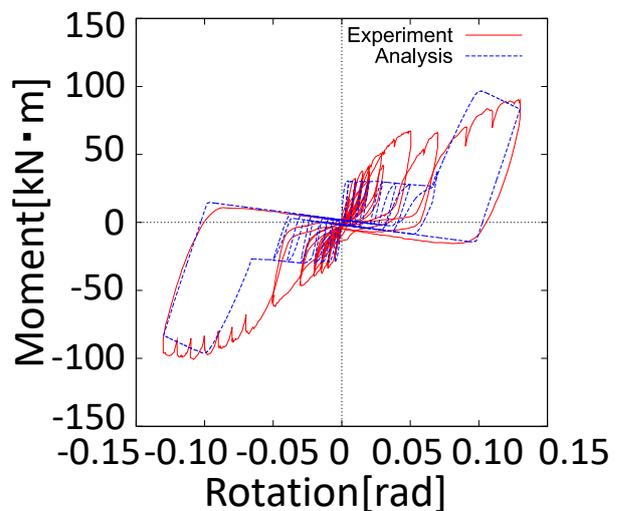
次に, 両ケースにおいて PC 鋼棒が発揮した引張力と回転角の関係を 図-16 に示す. 図-16 を見ると, 両ケースとも引張力の大きさを過大評価していることがわかる. これは, 解析では PC 鋼棒固定部の緩みと PC 鋼棒の作用開始位置の遅れのどちらか一方のみをモデル化しているためであると考えられる. また, 本解析では载荷の中で PC 鋼棒の作用開始位置の遅れは変化させていないが, 実験では载荷が進行するにつれて PC 鋼棒の作用開始位置の遅れが大きくなっている. そのため, 本実験における MH-UBRC の挙動をより正確にモデル化するためには, PC 鋼棒の固定部の緩みおよび PC 鋼棒の作用開始位置の遅れをより詳細にモデルに反映させる必要があるといえる.



(a) MH-STD

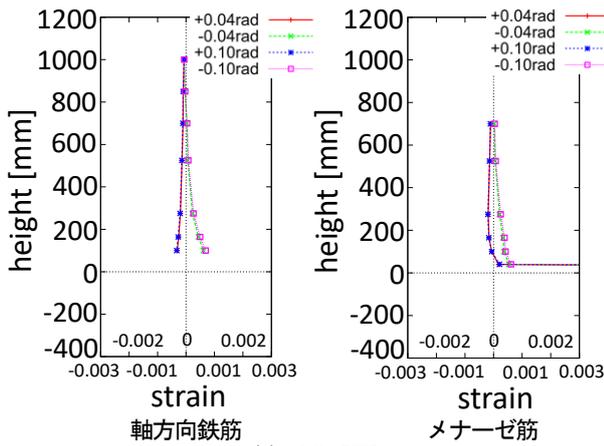


(b) MH-UBRC ( $k=3000$  kN/mm,  $g=0$  mm)

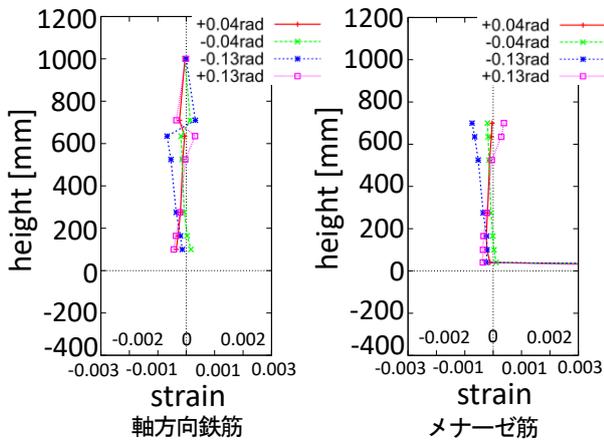


(c) MH-UBRC ( $k=1.0 \times 10^{10}$  kN/mm,  $g=15$  mm)

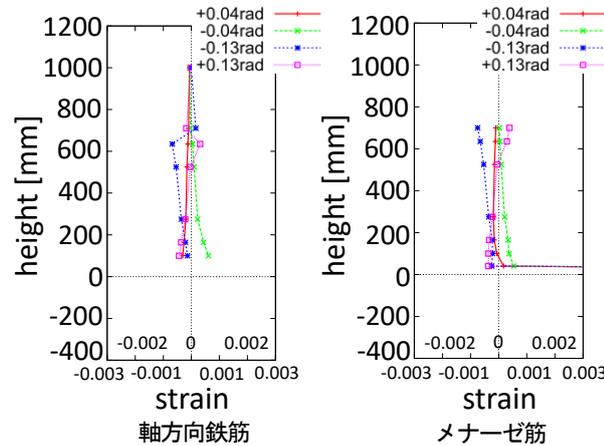
図-14 モーメント-回転角関係



(a) MH-STD



(b) MH-UBRC ( $k=3000$  kN/mm,  $g=0$  mm)



(c) MH-UBRC ( $k=1.0 \times 10^{10}$  kN/mm,  $g=15$  mm)

図-15 鉄筋ひずみ

### (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。なお、UBRC 補強したロッカー橋脚を想定したモデルのうち、「治具の緩みあり、かつ PC 鋼棒の作用開始遅れなし」のモデルでは

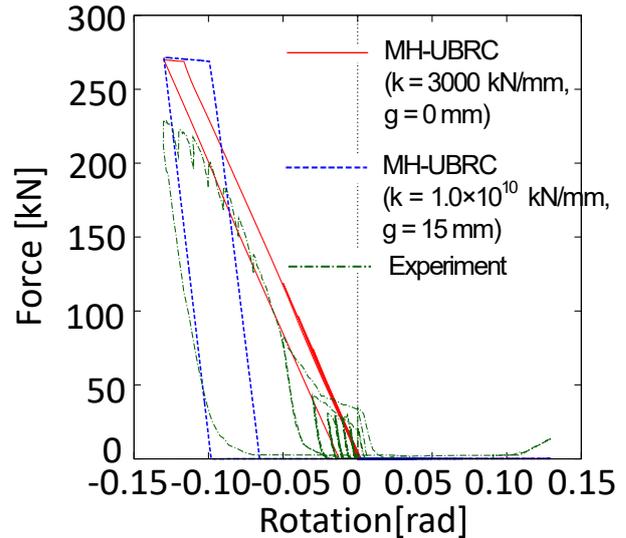


図-16 PC 鋼棒が発揮する引張力の比較

UBRC 補強による原点志向型の挙動の発現を狙った場合を、「治具の緩みなし、かつ PC 鋼棒の作用開始遅れあり」のモデルでは PC 鋼棒が大変形時のみ作用するストッパーとして機能することを期待した場合を想定しており、両ケースにおける UBRC 補強の動的応答改善効果を検討することとした。

#### a) 入力地震動

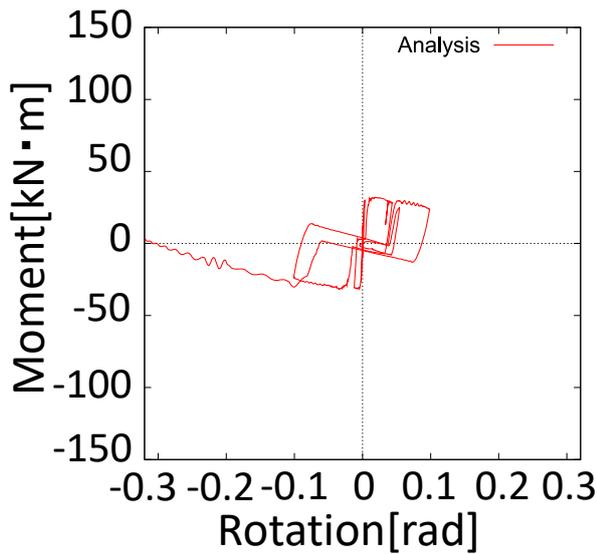
入力地震動として 1995 年兵庫県南部地震 JR 鷹取記録の EW 成分を 0.5 倍したものをを用い、水平方向に入力した。

#### b) 解析結果

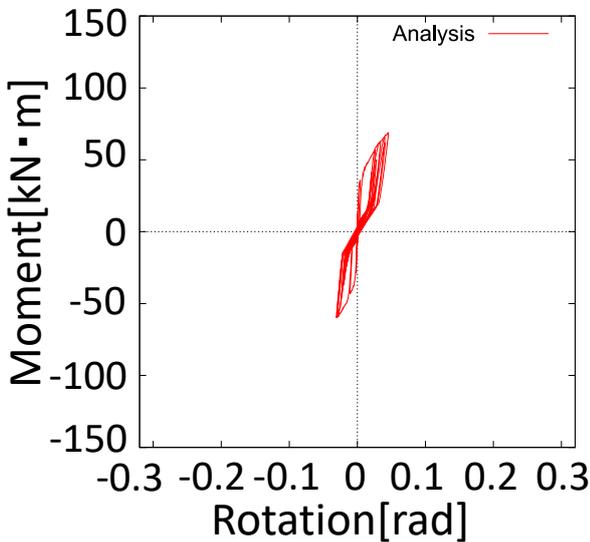
図-17 に動的解析により算出したモーメント-回転角関係を、図-18 に回転角の時刻歴を示す。MH-STD では、P- $\Delta$  効果により履歴に負の剛性が表れることで復元力を喪失し、柱が倒壊する現象が確認された。

一方、MH-UBRC の  $k=3000$  kN/mm,  $g=0$  mm としたケースでは、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り、残留変位が大きく低減していることがわかる。また、MH-UBRC の  $k=1.0 \times 10^{10}$  (kN/mm),  $g=15$  mm としたケースでは、回転角約 0.06 rad までの挙動は MH-STD の解析結果と同様である一方で、回転角約 0.06 rad 以降の挙動においては PC 鋼棒の引張力が作用し、柱の抵抗モーメントが増加していることがわかる。その結果、PC 鋼棒が大変形領域における変形を拘束するストッパーとして機能することで、柱の変形を抑制して倒壊を防いでいることがわかる。

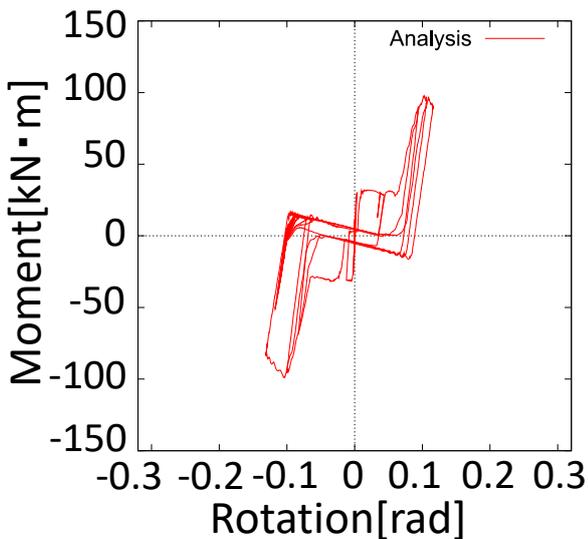
以上から、UBRC 補強を想定した両ケースとも狙いとしていた耐震性能向上効果が表れており、UBRC 補強により柱の動的応答特性が向上することがわかった。



(a) MH-STD



(b) MH-UBRC ( $k=3000 \text{ kN/mm}$ ,  $g=0 \text{ mm}$ )



(c) MH-UBRC ( $k=1.0 \times 10^{10} \text{ kN/mm}$ ,  $g=15 \text{ mm}$ )

図-17 動的解析によるモーメント-回転角関係

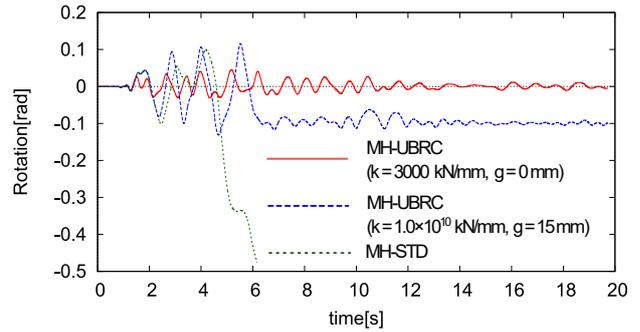


図-18 動的解析による回転角時刻歴

## 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および現状の課題を示す。

- 無対策の供試体では、柱の P- $\Delta$  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 補強した供試体において、PC 鋼棒固定部の緩みを確認され、PC 鋼棒が大変形時のみ作用するストッパーとして機能していた。PC 鋼棒を変形のストッパーとして機能させることは、UBRC補強の適用例の一つであるものの、本実験においては意図していなかった挙動であった。そのため、PC 鋼棒を意図通りに作用させるために固定用治具の改良が必要であるといえる。
- 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、残留変位の低減や柱の変形を抑制して倒壊を防ぐ効果が確認された。この結果から、UBRC補強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および科学研究費補助金基盤研究(A)16H02357 の助成を受けて実施した。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 voutes en Béton armé, Annales de Ponts de Chaussées, 2, pp.180-201, 1907.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2017.11

## SEISMIC STRENGTHENING BY UNBONDED BAR REINFORCED CONCRETE STRUCTURE FOR ROCER PIERS WITH MESNAGER HINGES

Keita UEMURA, Yoshikazu TAKAHASHI and Hiroki NAGASAKI

The rocker piers with the mesnager hinges are known to become unstable when large displacement occurs, and it is necessary to secure the stability in the horizontal and vertical directions. Therefore, in this research, a unbonded bar reinforced concrete reinforcement (UBRC reinforcement) for rocker piers was proposed, and the effect of improving seismic performance was examined by cyclic loading test. As a result, it was found that resistance moment was increased by UBRC reinforcement and stability of the rocker piers in the horizontal direction was secured. Moreover, in the static analysis of the cyclic loading test, the experimental results of the test specimens could be reproduced. By dynamic analysis with these models, UBRC reinforcement was found to improve dynamic response characteristics of rocker piers.