

ロッキング橋脚の補強事例と課題について

幸左 賢二¹・曾我部 直樹²・河村 圭亮³・後藤 僚一⁴
・中谷 隆生⁵・松原 拓朗⁶・八ツ元 仁⁷

¹正会員 Ph. D 九州工業大学名誉教授（〒658-0032 神戸市東灘区向洋町中3-1-5 2-1210）

²正会員 工博 鹿島建設 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1）

³正会員 大成建設株式会社 技術センター（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1）

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）（〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22）

⁵正会員 NEXCO西日本コンサルタンツ株式会社 構造技術部（〒732-0057 広島市東区二葉の里3-5-7）

⁶正会員 首都高速道路株式会社 東京東局（〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町 43-5）

⁷正会員 工博 阪神高速道路(株) 建設事業本部大阪建設部（〒553-0003 大阪市福島区福島7-15-26）

1. はじめに

熊本地震により数多くのロッキング橋脚が損傷し、特に府領第一橋梁は落橋に至ったことからロッキング橋脚の耐震性の向上が求められている。一方ロッキング橋脚は元来桁下空間の制限のある場合に用いられており、各管理者は構造形式を変更するなどの対応に苦慮している。そこで地震工学委員会性能に基づく橋梁の耐震構造計画・設計法に関する研究小委員会WG3(橋梁等構造物の耐震補強)においてはロッキング橋脚の補強の現状について取りまとめた。本論文ではまず各担当者において実施された補強の現状の概要を述べる。ついで明らかとなった橋脚補強上の課題について述べる。

2. 補強設計の考え方

図-1に示すように一般的な道路橋の橋脚は、上部構造から作用する鉛直力を支持するとともに、地震時に生じる上部構造の水平慣性力が支承を介して伝達され、これに抵抗できるように設計されることから、比較的大きな断面が必要となる。

これに対して、ロッキング橋脚は、上部構造からの曲げモーメントを伝達しない構造とすることで、上載荷重による軸力と水平力（せん断力）のみに抵抗できればよいものである。そのため、橋脚断面や基礎を比較的小さくできる点に特徴があり、下部工を施工可能なスペースが狭い場合でも適用しやすい。

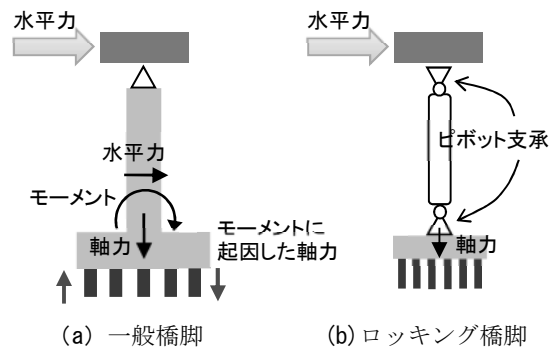


図-1 一般橋脚とロッキング橋脚¹⁾

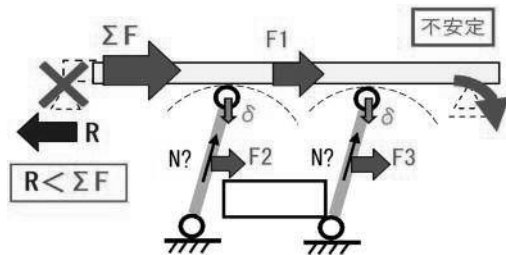


図-2 橋軸方向への移動

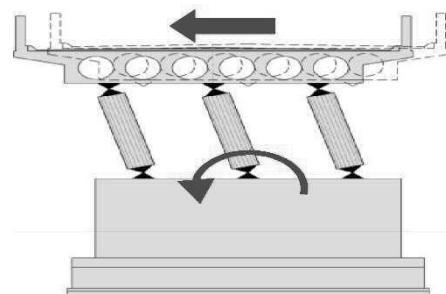


図-3 橋軸直角方向への移動

ロッキング橋脚は上下端にピボット支承が取り付けられた両端ヒンジ構造の橋脚である。ピボット支承は鉛直力を支持する機能と回転機能を有する構造のものであり、ロッキング橋脚は単独では自立せず、水平方向の上部慣性力を支持することができない構造である。そのため、ロッキング橋脚を有する橋梁は、地震時安定性を橋台固定部に依存した構造となっている。

図-2、-3に示すように大地震時に横変位拘束構造の破壊などに伴って、設計時に想定した以上に上部構造が水平方向へ移動する変位が生じると、ロッキング橋脚は不安定になる構造特性を有し、転倒する可能性がある。熊本地震における府領第一橋の事例のように、ロッキング橋脚は大地震時に落橋を招く可能性があるため、適切な補強または撤去を行うことが必要とされている。ロッキング橋脚の補強を行う場合は、部分的な破壊が落橋に繋がることを防止して、速やかな機能回復を可能とする構造系への転換することが必要である。

国土交通省からは、補強設計の考え方として図-4、5に示すように完全自立構造とする補強と半自立構造とする補強の2つの考え方が提示されている^{1), 2), 3)}。

a) 完全自立構造とする補強

ロッキング橋脚を補強して単独で自立可能な構造とすることを基本とする。橋軸直角方向に配置されている複数のロッキング橋脚の全体をまとめて RC 巻き立てを行うことによって壁化し、上下部も剛結する方法、または、上部もしくは下部を剛結して一方の支承のみを存置する方法である。

なお、完全自立構造とする補強を行う場合は、地震時の慣性力が基礎に作用することになるため、杭基礎構造の場合には増杭などの追加対策が必要になることもある。

b) 半自立構造とする補強

施工上の制約条件によって完全自立構造とする補強を行うことが困難な場合には、橋軸方向には単独で自立できないが、橋軸直角方向には自立する構造とする方法を次善策としている。これは、橋脚全体をまとめて RC 巻き立てを行うか、ブレース材によって連結する一方で、上下端のピボット支承については逸脱防止構造を設置した上で存置する方法である。この場合、ロッキング橋脚が倒れないように橋台が支持するなど橋軸方向の抵抗力は別途確保することが必要となる。

ここでは各道路管理者の代表例として NEXCO の補強の考え方を示す。NEXCO では図-6 に示すようにロッキング橋脚を有する橋梁の耐震補強として橋



図-4 完全自立構造とする補強例



図-5 半自立構造とする補強例

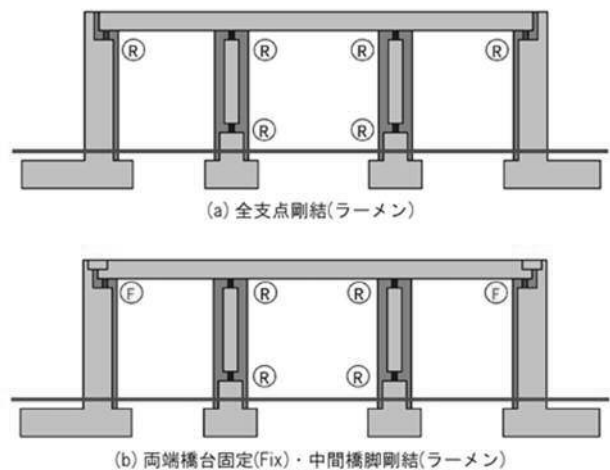


図-6 ロッキング橋脚を有する橋梁の耐震補強の基本構造

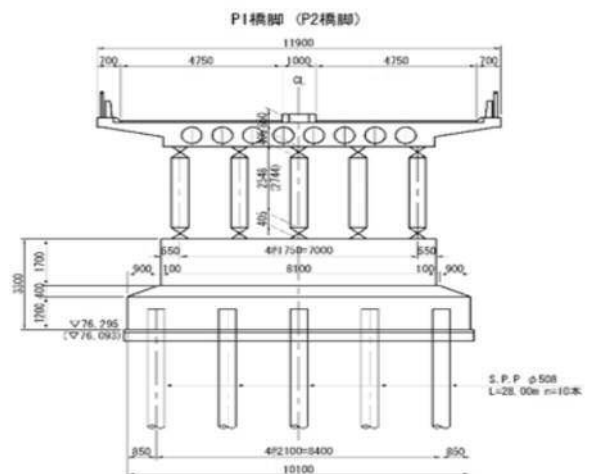


図-7 熊本 IC ランプ橋梁断面図

台固定部の強化を最優先とし、想定以上の地震力が作用した場合でも冗長性を有する全支点剛結構造とすることを基本としている。ただし、交通規制等の制約条件から両端橋台の剛結化が困難となる場合は、橋台固定支承部にレベル2地震動以上の耐力を持たせた両端橋台固定・中間橋脚剛結構造を採用してもよいこととしている。

また、一般に地震時に不安定となる地盤上の橋台を除き、橋台の設計においてはレベル2地震動に対する照査は行っていないが、高速道路におけるロッキング橋脚を有する橋梁の耐震補強については、下記2つの理由から、レベル1地震動に加え、レベル2地震動に対する橋台の照査を行うものとしている。

- a) 高速道路は震災時に緊急交通路としての機能が求められる、重要な社会的役割を担っていることから、レベル2地震動に対する安全性を確実に担保する必要があること。
- b) ロッキング橋脚を有する橋梁は、レベル2地震動に対する橋台への慣性力の分担比率が大きく、地震時安定性を橋台に依存した構造であること。

3. NEXCOの補強事例

対象橋梁は国道57号と交差する熊本ICのランプ橋で、ロッキング橋脚を有するRC3径間連続中空床版橋(橋長47.33 m, 斜角83°)である^{4), 5)}。図-7に橋梁断面図を示す。熊本地震によりロッキング橋脚が西側に最大3.9°傾斜(回転可能角度2.3°)し、A2橋台に設置された横方向変位拘束構造に押し抜きせん断破壊が生じた他、写真-1に示すように上部構造ではA1橋台(固定支点)を中心にA2橋台側(可動支点)の床版が西側に約350mm回転移動した。

本橋の復旧・耐震補強方針は、1)復旧に際しランプの通行止めは可能であるものの、国道に横架・接続するランプ橋であるため早期に開通する必要があったこと、2)傾斜したロッキング橋脚の更なる傾斜防止対策が必要であったこと、3)短期間のうちに上部工を安全に元の位置に復旧することが困難であったこと、から図-8に示すとおり、上部構造と橋台は張出床版下面に横桁を増設してパラペットと横桁をPC鋼材により緊張して剛結化し、中間のロッキング橋脚はRC巻立てによりロッキングカラムを壁化し、写真-2に示すように補強主鉄筋を上部構造とフーチングにアンカー定着させて剛結化したRC3径間中空床版ラーメン橋に構造変更した。写真-3には工事完了状況を示す。

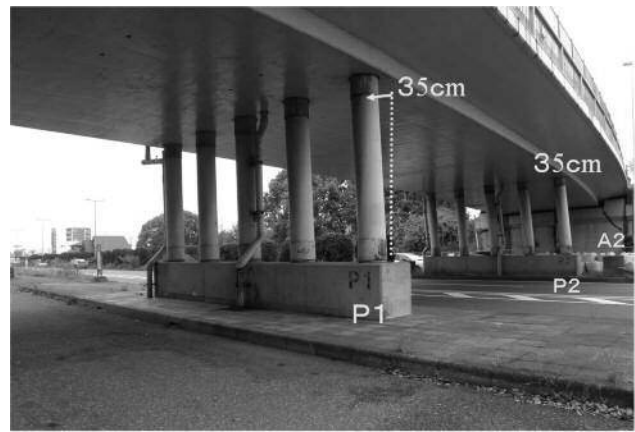


写真-1 熊本ICランプ損傷状況

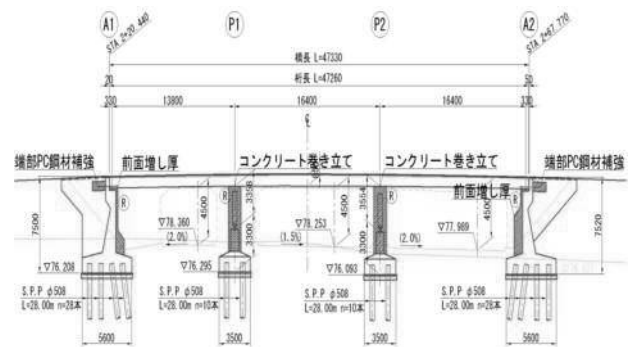


図-8 熊本ICランプ橋耐震補強図



写真-2 アンカー削孔・定着(床版)



写真-3 工事完了状況

4. 首都高速の補強事例

首都高速道路において、補強対象としたロッキング橋脚を有する橋梁は浜崎橋付近、赤羽橋付近、芝浦付近、浜川崎付近の4箇所の橋梁である。浜崎橋付近および赤羽橋付近は、一支承線の全ての柱が上下端にヒンジ支承を有するロッキング構造であるのに対し、芝浦付近および浜川崎付近は、ラーメン橋脚の梁の端部の柱のみがロッキング構造である。首都高速道路ではこれらの橋脚をロッキング橋脚としている。ロッキング橋脚の基数は、浜崎橋付近、赤羽橋付近、浜川崎付近で各1基、芝浦付近で12基である(6, 7, 8)。

都市内の狭隘な空間に建設された首都高速道路では、ロッキング構造とした柱が自立可能な構造となる補強は困難である箇所が多いため、耐震補強は、支承が損傷した場合に橋脚の倒壊を防止する逸脱防止構造の設置を基本とし、それぞれの橋梁の構造条件、周辺条件、施工条件を考慮し、補強方法を選定した。代表的ロッキング橋脚の構造図および写真を図-9、-10に示す。

以下に示すように、赤羽橋付近街路側を除く箇所で、ロッキング構造とした橋脚柱を自立可能な構造とするように直接的に補強することは困難であった。

- a) 浜崎橋付近は、橋脚に隣接して東海道新幹線が位置しており、東海道新幹線の河川内橋脚でロッキング構造とした橋脚柱を支持している。
- b) 赤羽橋付近は、高架下は河川であり、河川側の橋脚柱は、周囲を護岸と民地に囲まれている(街路側の橋脚柱は歩道に隣接しているが補強するスペースは確保できる)。
- c) 芝浦付近は、JCTの新設のため、高速1号羽田線に高速11号台場線を接続するための拡幅部を支持する横梁の端部の柱が歩道に位置するため、ロッキング構造とし、歩道幅員を確保している。
- d) 浜川崎付近は、上下線に離隔がある箇所であり、街路の交差点形状との関係から、長い横梁の端部の柱が歩道に位置するため、ロッキング構造とし、歩道幅員を確保している。

そこで、ロッキング構造とした橋脚柱を直接補強できない箇所は、制震デバイスを用いて上部構造の変位を小さくすることで、上下端に設置された支承部に生じる回転角を抑制し、かつ図-11に示すような逸脱防止構造を設置することを基本とした。その他、それぞれの箇所で以下に示す補強方針とした。

- a) 浜崎橋付近は、交差物件として東海道新幹線の他、東海道線や山手線等、特に重要な路線があること、橋脚を新設するスペースが確保できたことから、

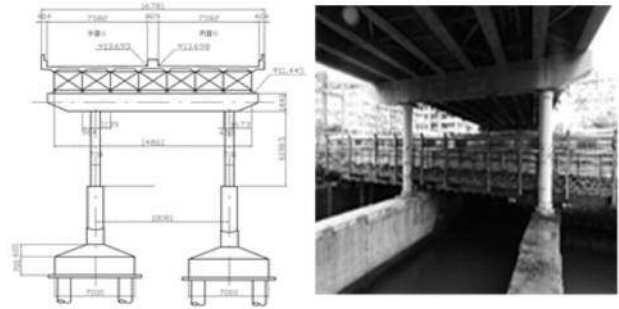


図-9 浜崎橋付近のロッキング橋脚

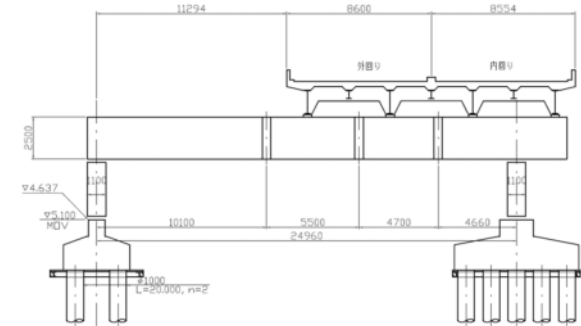


図-10 赤羽橋付近のロッキング橋脚

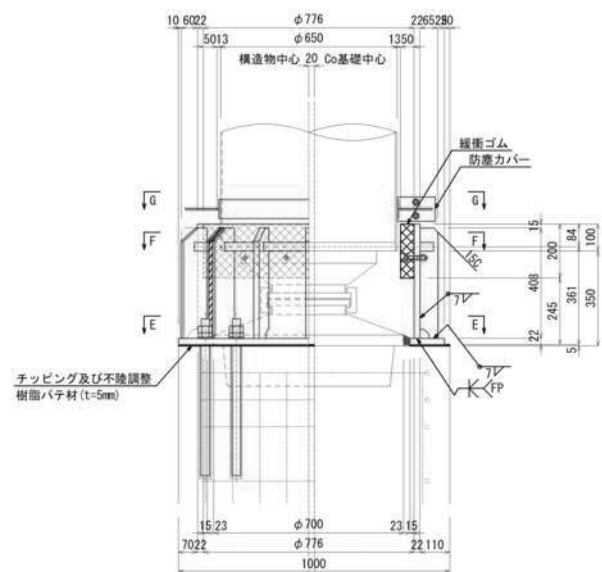


図-11 逸脱防止構造

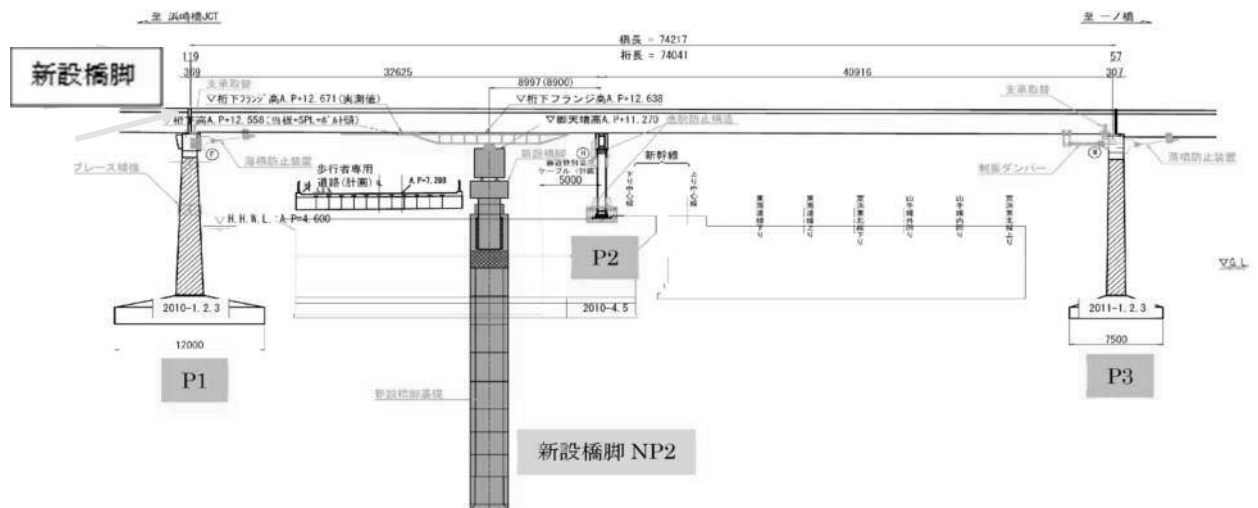


図-12 浜崎橋付近のロッキング橋脚補強



写真-4 新設橋脚

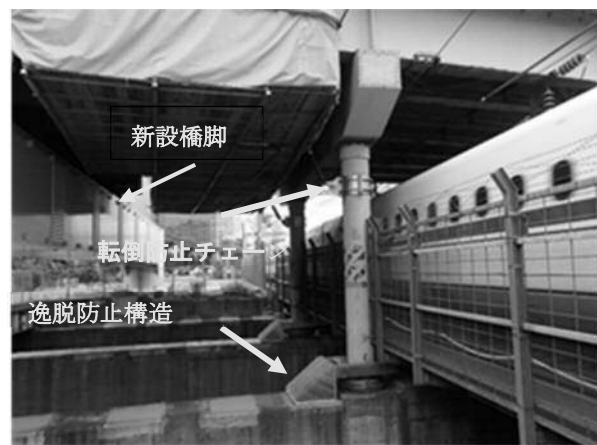


写真-5 転倒防止対策

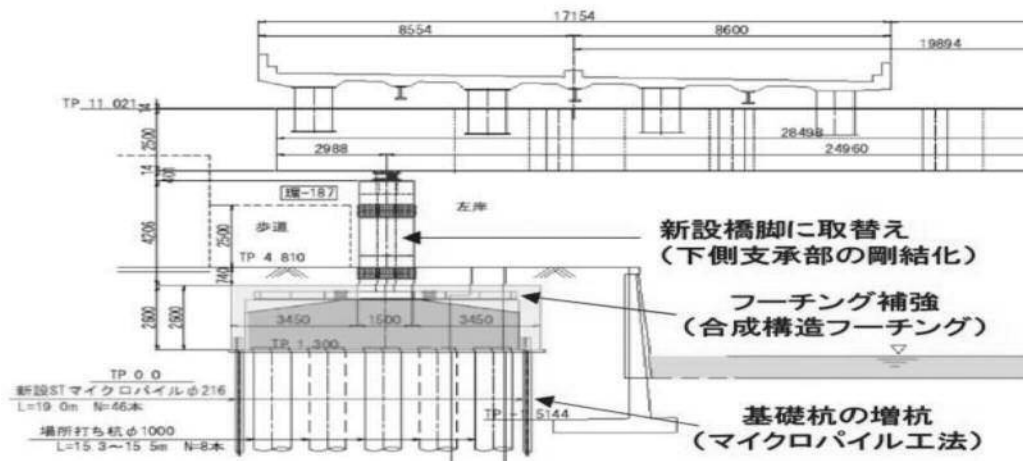


図-13 赤羽橋付近のロッキング橋脚補強構造

橋脚を新設し、ロッキング橋脚が損傷した場合、新設橋脚での受け替えることが可能な構造とする。
 b)赤羽橋付近は、スペースがある歩道側のみ基部を剛結した橋脚柱に更新する。
 c)芝浦付近および浜川崎付近は、基本方針に従い、支承の回転角を抑制し、逸脱防止構造を設置する。浜崎橋付近のロッキング橋脚の周辺は、前述した

鉄道の他、都市計画道路や歩行者専用道路の建設計画があり、新設橋脚が設置できるスペースは限られていた。そこで、図-12、写真-4に示すように、新設橋脚の基礎は、平面形状を小さくするため、PC ウェルを用いた柱状基礎とし、柱および横梁は鋼製とした。横梁の長さが約42mと長いことから、北側の梁端部は温度変化により生じる応力を緩和するため

支承により横梁を支持した。また、柱と基礎構造の接合部は、アンカーフレームを設置する空間が確保できないため、孔開き鋼板ジベルを用い接合した。ロッキング橋脚は存置されるため、その支承が損傷した場合でも東海道新幹線側に倒壊することを避ける必要がある。そのため写真-5に示すように、柱下端の支承には逸脱防止構造、柱上端部には東海道新幹線側に倒れこまないよう、上部にチェーンを設置した。

赤羽橋付近は、3径間連続非合成RC床版鋼箱桁橋であり、可動支承で支持された端支点部に粘性ダンパーを設置し、上部構造の変位を抑制し、逸脱防止構造を設置した。歩道側の橋脚部には、ライフラインが多数埋設されていることから、埋設物を移設後に橋脚の更新工事に着手している。橋脚は鋼製橋脚とし、既設基礎構造は増し杭により補強する。橋脚柱基部は、限られた土被り内でフーチングと接続するため、図-13に示すように合成構造フーチングを用いた。

芝浦付近では、制震デバイスとして、橋軸方向に粘性ダンパーを設置した他、ロッキング橋脚で支持された横梁上のT型橋脚の基部の応答低減のため、摩擦ダンパーDRF-DPを用いた。

5. 阪神高速の補強事例 ^{1), 10)}

阪神高速では、国土交通省のロッキング橋脚に対する耐震補強の考え方 ³⁾を踏襲し作成した図-14に示す耐震補強フローに基づき、対象となるロッキング橋梁の耐震補強に着手している。ここでは湾 P88の耐震補強の詳細について記述する。

対象となる湾 P88の一般構造図を図-15に示す。耐震補強は図-14に示す耐震補強フローに従い検討を進めた。図中に示すように、当該橋梁はロッキング橋梁の中でも構造的に冗長性が確保されているものとして、ロッキング柱がその他の部材に先行して終局状態に至るかどうかの判定をプッシュオーバー解析により確認を行った。解析モデルの概要を図-16に示す。数値解析は骨組み解析として、塑性ヒンジ部に非線形要素を用いる道示に示す一般的なモデル化を行った。図-17には作用力のイメージを示す。水平方法の外力は橋軸1方向、橋軸直角については非対称橋脚であることから2方向、にそれぞれ漸増荷重を与えた。

図-18, -19, -20, -21にプッシュオーバー解析の結果を示す。橋軸方向はロッキング柱の下端部のロッキング橋脚支承が他の部位に先行して損傷（許容回転角を超過）することが明らかとなった。橋軸直角

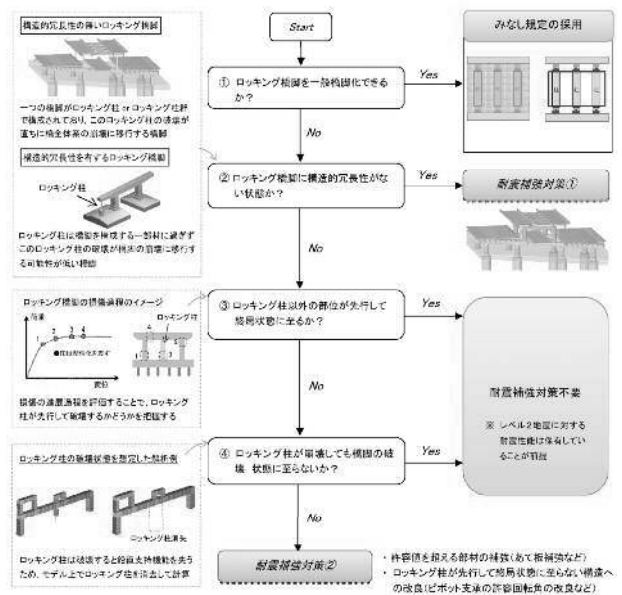


図-14 ロッキング橋梁の耐震補強フロー

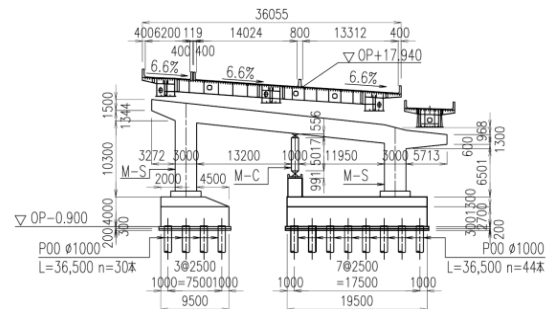


図-15 対象橋梁の断面図

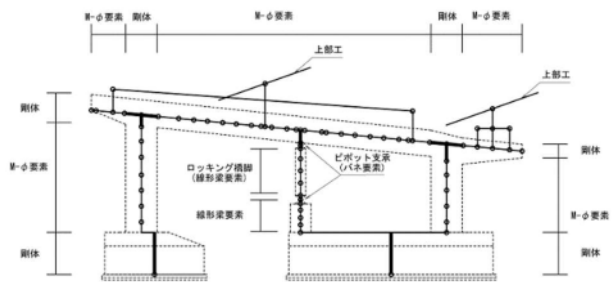


図-16 対象橋梁の解析モデル

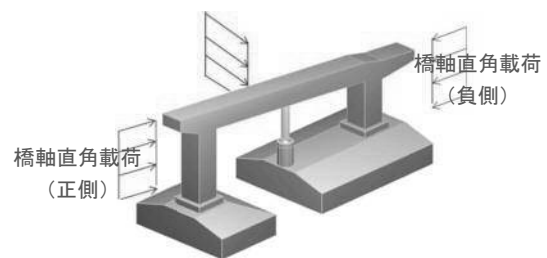


図-17 プッシュオーバー解析の作用力

方向については、正側、負側ともにロッキング柱の両端部支承よりも他の部材が先行して損傷することがわかった。これらのことより、橋軸方向に関してはロッキング柱が先行して損傷する可能性があり、上載荷重を支持できない状態に陥る可能性があることが明らかとなった。そこで、図-14 に示す耐震補強フローに従い、ロッキング柱が損傷し鉛直荷重を支持できない状況下での橋梁全体系の安全性の確認を同じく骨組み解析モデルにより検証を行った。具体的にはプッシュオーバー解析の解析モデルからロッキング柱を控除した状態で上部工荷重を作用させる自重解析を実施した。解析の結果、ラーメン隅角部において圧縮応力度の超過や局部座屈照査が満足しないことが明らかとなった。この結果より、ロッキング柱が先行して損傷し、鉛直荷重支持する能力を消失すれば、ロッキング橋脚全体系の安全性が確保できないことを確認した。

これらの結果を踏まえて、当該橋脚については地震時の安全性を確保するため、耐震補強対策を実施することとした。プッシュオーバー解析からもわかるように、橋軸方向に水平荷重が作用した際に、ロッキング橋の下端部が先行して損傷することがわかったため、この下端部の損傷をその他の部材の損傷より遅れて発生するような対応を行うこととした。

具体的な対策として、ロッキング柱の下端部の許容回転角を大きくすることを目的に、支承逸脱装置の構造改良を行うこととした。プッシュオーバー解析の結果から、ロッキング柱下端のロッキング杵（支承逸脱装置も含む）の許容回転角が 37.2mmrad 以上となれば、他の部材に先行して損傷することがないことがわかった。この値を上回る許容回転角を確保するには図-22 の支承逸脱装置の模擬図に示すように遊間を拡大すればよいことが分かる。具体的には 30.5mm である遊間を 40mm まで拡大することで前述の許容回転角を増加させることができるため、支承逸脱装置のコンクリート部材の上端の切削を行った。コンクリート部材の切削についてはコア抜きをして工具による削りとばしという、一般的に行われる工法により施工を実施した。切削後は無収縮モルタルを打設し、遊間 40mm が確実に確保されるような調整を行った。

6. ロッキング橋脚の補強の課題

各章においては各管理者の取り組み状況を紹介した。ここでは取り組むべき課題を列記し、具体的検討方法について述べる。

1) ロッキング橋脚の基礎補強の必要性

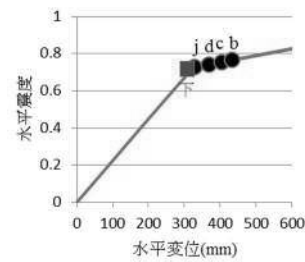


図-18 橋軸方向解析結果

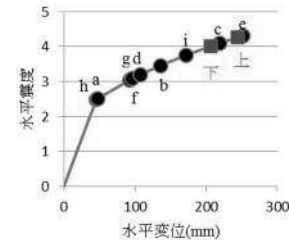


図-19 橋軸直角方向(正側)解析結果

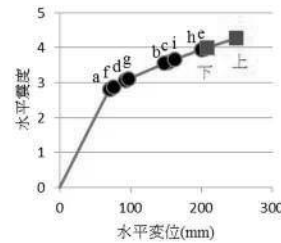


図-20 橋軸直角方向(負側)解析結果

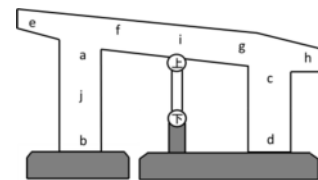


図-21 着目部材の呼称

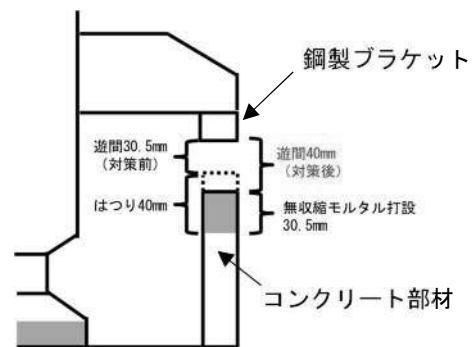


図-22 ロッキング橋脚支承改良の概要

図-23の補強例に示すように剛構造とすることにより基部にモーメントが生じることやL2レベルの地震動に対して基礎を照査すると大規模な補強が必要となる場合が多い⁹⁾。

一方基礎構造の耐力不足のために神戸地震や東日

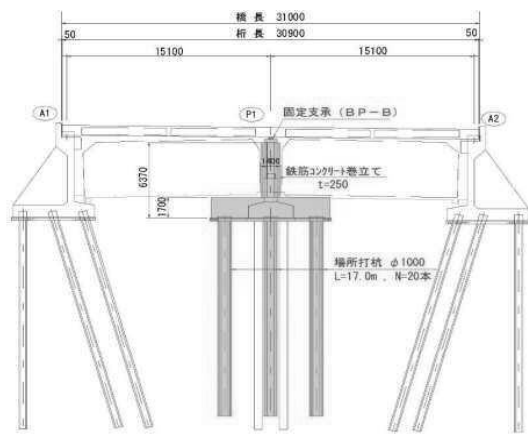


図-23 ロッキング橋脚基礎補強例

本大震災において落橋などの大規模な損傷に至った例は極めて少ない。またL2レベル地震動に対する現況基礎の保有耐力評価の限界値は実構造物の損傷度と必ずしも一致していない。以上のことから現在のところ橋脚基礎の補強の優先度はそれほど高くはないとも考えられる。

2) 横変位拘束構造・落橋防止システムについて

ロッキング橋脚を補強せず、横変位拘束構造に十分な抵抗力を受け持たせることは極めて有効な補強方法と考えられる。一方桁が横方向変位拘束構造に作用力する動的衝突力の評価は極めて複雑である。

例えば著者らの解析的検討では、地震力、桁と変位制限構造の遊間によって大きく作用力が異なること、横方向変位拘束構造を大規模にすることによって拘束効果が期待できることも明らかにされている。

また抵抗側の押し抜きせん断抵抗についても現行の橋座式の適用性について実験的に検討を加えている。これらの検討結果を基に動的な押し抜きせん断特性についても十分検討し、所定の安全率が確保できれば極めて有効な対策と考えられる。

3) 逸脱防止効果について

L2レベルの地震に対してロッキング橋脚の回転変形角を増加させることや逸脱防止構造により支承の損傷を制御する方法は極めて有効であると考えられる。一方動的作用力に対してどのような効果があるかについても実験や解析的に十分検討する必要がある。

7. まとめ

各道路管理者において実施されたロッキング橋脚補強の現状と課題を取りまとめると以下ようになる。

1) NEXCO では、ロッキング橋脚を有する橋梁の耐震補強として橋台固定部の強化を最優先とし、想

定以上の地震力が作用した場合でも冗長性を有する全支点剛構造とすることを基本としている。

- 2) 首都高速道路では、ロッキング構造とした柱が自立可能な構造となる補強は困難である箇所が多いため、耐震補強は、支承が損傷した場合に橋脚の倒壊を防止する逸脱防止構造の設置を基本とし、それぞれの橋梁の構造条件、周辺条件、施工条件を考慮し、補強方法を選定している。
- 3) 阪神高速道路ではロッキング橋梁の耐震補強の考え方について整理を行い、その考え方に基づきロッキング橋梁の耐震補強に着手している。
- 4) ロッキング橋脚を補強せず、横変位拘束構造に十分な抵抗力を受け持たせる工法は押し抜きせん断特性について十分検討し、所定の安全率が確保できれば極めて有効な対策と考えられる。

参考文献

- 1) 八ツ元仁, 桐間幸啓, 安積恭子: 阪神高速におけるロッキング橋梁の耐震補強コンセプトとその具体的対策, 阪神高速道路第 51 回技術研究発表会論文集, 2019.
- 2) 西日本高速道路株式会社: ロッキング橋脚を有する橋梁の耐震補強に関する参考資料【改定版】, 2017.
- 3) 国土交通省: 社会資本整備審議会 道路分科会 第 5 回道路技術小委員会 資料 4-1 課題・論点に対する今後の対応 (橋梁分野), 2016.
- 4) 西谷朋晃, 岩尾省吾, 工藤昌生: 平成 28 年熊本地震で被災したロッキング橋脚を有する橋梁の構造変更について, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, 2017.
- 5) 柘木正喜, 高原良太: ロッキング橋脚を有する橋梁の耐震補強, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, 2017.
- 6) 中溝翔, 副島直史, 久保田成是: 浜崎橋ロッキング橋脚の耐震補強設計概要, 第 34 回日本道路会議, 論文_5029, 2021.
- 7) 磯部龍太郎, 斎藤遼, 真木有岳: 首都高速台場線におけるロッキングピアを有する橋梁の耐震補強構造, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I-381, pp. 761-762, 2018.
- 8) 梶原仁, 藪本篤, 大嶋健太: 横羽線浜川崎付近のロッキング橋脚を有する橋梁の耐震対策, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-1007, 2019.
- 9) 渡邊英, 堤史尚, 高木信治, 中谷武弘: ロッキング橋脚を有する 2 径間跨道橋の耐震補強設計, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I-185, 2017.
- 10) 平野翔也, 福嶋孝啓, 野崎悟: ロッキング柱を有する鋼製ラーメン橋脚の耐震性評価及び耐震改良工事報告, 阪神高速道路第 51 回技術研究発表会論文集, 2019.