第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

高速道路におけるロッカー橋脚を有する橋梁の耐震補強設計・施工

野田　翼[1]・安里　俊則[2]・佐溝　純一[3]・李　首一[4]・中谷　隆生[5]・伊川　嘉昭[6]

[1]正会員　工修　西日本高速道路(株) 関西支社（〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13）
[2]正会員　西日本高速道路(株) 関西支社（〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13）
[3]正会員　西日本高速道路(株) 関西支社（〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13）
[4]正会員　工修　NEXCO西日本コンサルタンツ(株) 大阪支店（〒532-0002 大阪府大阪市東三国4-13-3）
[5]正会員　NEXCO西日本コンサルタンツ(株) 大阪支店（〒532-0002 大阪府大阪市東三国4-13-3）
[6]正会員　NEXCO西日本コンサルタンツ(株)（〒732-0057 広島県広島市東区双葉の里3-5-7）

1. はじめに

名神高速道路は1963年に開通した日本初の高速道路であり，橋梁に関しては，現在とは異なる特殊な構造形式が数多く採用されている．これらの橋梁群の中で，特に多く採用されている橋梁形式が**図-1** に示すロッカー橋脚を有する橋梁で，名神高速道路栗東 IC～尼崎 IC 間に同形式の橋梁が全 27 橋存在し，ロッカー橋脚の数が 1106 基となっている(**写真-1**).

ロッカー橋脚に関しては，**図-2** に示す通りに中間橋脚が上部構造の鉛直力のみを支持するように薄い壁の上端にアンカーバー，下端にメナーゼヒンジが設けられているため，柱断面に大きな曲げ応力が発生しないように設計されている．しかし，兵庫県南部地震や大阪府北部地震ではロッカー橋脚に建設当時に想定されていなかった被害[1)2)]が見られており，被災のメカニズム並びにメナーゼヒンジ部の耐震性能についてはこれまで研究が多く行われてきた[3)~4)]．本形式の橋梁については，これまで部分的な補修・補強が繰り返し実施されてきたものの，地震時の挙動が複雑になりやすいため，大規模地震時における高速道路の緊急輸送道路としての機能を確保するためには，橋梁全体の耐震性能を確保した抜本的な耐震対策の構築及びその工事の実施が必要とされる．

このような背景から，本稿では過去の被災経験[1)2)]並びに既往研究等[3)~4)]の成果を踏まえ，西日本高速道路株式会社　関西支社管内における本形式の橋梁の耐震補強設計と施工に関する特徴的な取組みについて報告する．

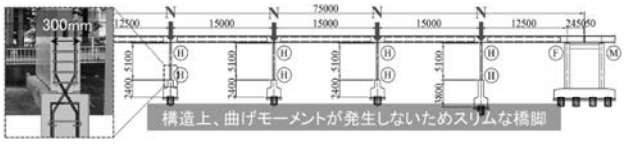


図-1　ロッカー橋脚を有する橋梁の側面図（完成時）

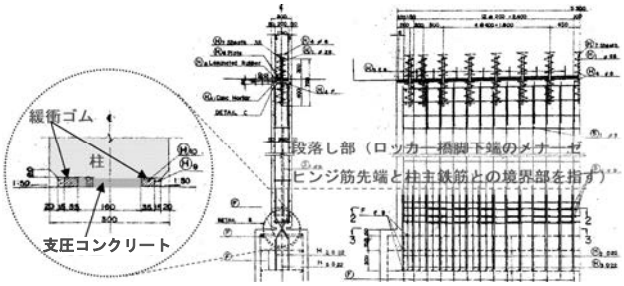


図-2　ロッカー橋脚の構造詳細図



写真-1　ロッカー橋脚を有する橋梁

2. 被災事例から見えた耐震補強にあたっての課題

(1) ロッカー橋脚を有する橋梁の完成時構造的特徴

ロッカー橋脚を有する橋梁は完成時に両端のラーメン式橋台/橋脚あるいは逆T式橋台に固定支承が設置され，もう一方の端部の支点構造は可動支承となっていた．これは，本形式の橋梁は中間のロッカー橋脚が水平力を負担しない設計コンセプトとなっていたことから，全体構造系を成立させるためには必ず端部に固定点を設ける必要があったためである．ただし，このような全体構造系は大規模地震時には上部構造の慣性力が端部の固定点に集中しやすいため，橋梁全体の耐震性能を確保するためには，固定点の損傷は避けなければならない．

(2) 兵庫県南部地震におけるロッカー橋脚を有する橋梁の被害状況

ロッカー橋脚を有する橋梁は兵庫県南部地震で実際被害[1)]を受けており，特に名神高速道路尼崎IC付近を中心に，同形式の橋梁の固定支点側の橋座部に**写真-2**に示すようなせん断破壊が生じていた[1)]．そのため，兵庫県南部地震以降には1点固定点構造の解消と上部構造慣性力の分散化を図るため，**図-3**に示すように両端の既設のBP支承(固定または可動)を撤去し，免震ダンパー(ゴム支承タイプ)とすべり支承を組み合わせた弾性支持構造に更新されている．一方で，ロッカー橋脚の上下端のヒンジ構造は補強されておらず，橋脚単独で自立できない構造は据え置かれた．この時，橋軸方向において両端支承は完全固定ではなく，変位を許容することで地震時エネルギーを吸収する構造となっているため，当初設計を上回る想定以上の地震動が作用した場合，橋軸方向の変位量が過大になるリスクがある．加えて，ロッカー橋脚の上下部はヒンジ構造であるため，一般に回転拘束条件として「回転自由」と考えられるが，**図-4(b)**に示す通りに橋軸方向の変位量が過大になると，メナーゼヒンジは支圧コンクリート及び緩衝ゴムによる回転拘束[1)]の影響で，ロッカー橋脚にひび割れが発生し，耐震性能の低下に繋がる(**写真-2**)．更に，橋軸方向の変位量が過大になるとロッカー橋脚の重心がずれ，鉛直支持機能が保持的なくなるため，橋梁全体の構造安定性が失われてしまうリスクが残されている(**図-4**)．

(3) 大阪府北部地震におけるロッカー橋脚を有する橋梁の被害状況

ロッカー橋脚を有する橋梁は平成30年に発生した大阪府北部地震においても被害[2)]を受けており，代表的な損傷状況として，ロッカー橋脚本体並びにロッカー橋脚の橋座部に生じたひび割れが挙げられる(**図-5**)．李らの研究[2)]ではロッカー橋脚の損傷原因として主に①拡幅側に比べ，橋軸直角方向における上部構造慣性力が既設側のロッカー橋脚に過度に集中したこと，②上部構造慣性力に対し，ロッカー橋脚の上端アンカーバーの本数が足りず，局部的な応力集中が発生したこと，③ロッカー橋脚自体のせん断耐力が不足していたことが挙げられている．

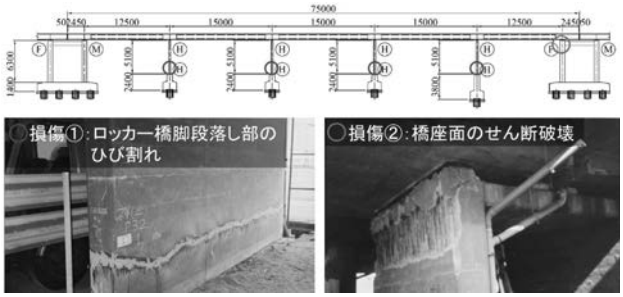


写真-2　兵庫県南部地震時の被災状況[1)]

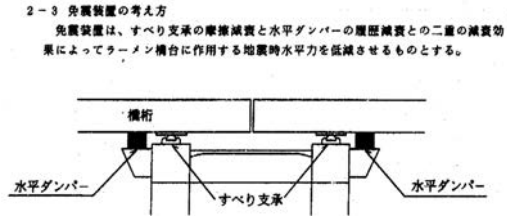
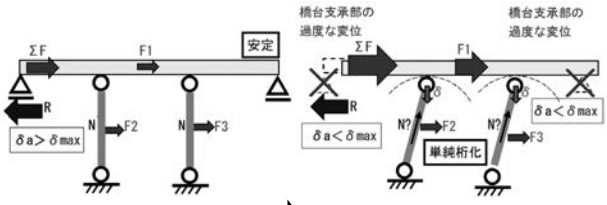


図-3　兵庫県南部地震後に取替えられた両端支承の構造



(a)設計地震動を下回る地震が発生した場合　➡　(b)設計地震動を上回る地震が発生した場合

図-4　ロッカー橋脚を有する橋梁の橋軸方向の不安定化のイメージ

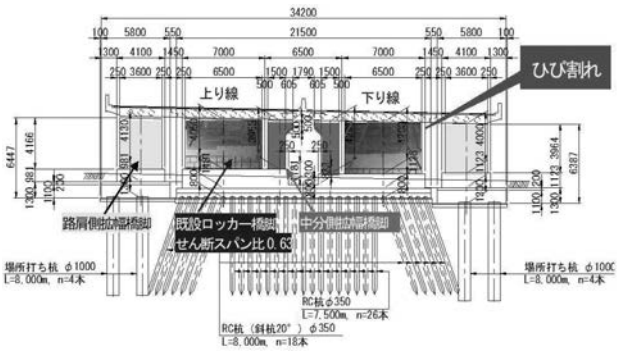


図-5　大阪北部地震時のロッカー橋脚の被災状況[2)]

(4) 被災事例から見えた耐震補強にあたっての課題

ロッカー橋脚を有する橋梁については本節(2)(3)に示す被災事例に加え、熊本地震であったロッキング橋脚を有する橋梁の地震時被害の状況により，上下端にヒンジ構造を有する橋脚の大規模地震時の脆弱さが明らかになった．従って，耐震補強にあたっての課題として以下の 3 点が挙げられる．

①端支点の損傷が橋梁全体系の耐震性能低下への影響を最小限とすること．

②橋梁全体系において過度な変位を生じさせないこと．

③壁厚の薄いロッカー橋脚については上下ヒンジ部を含め，必要な耐力を保有させること．

3. ロッカー橋脚を有する橋梁の耐震補強方針

耐震補強にあたっての課題を踏まえ，ロッカー橋脚を有する橋梁の耐震補強方針は次の通りとした．

(1) 両端固定化による上部構造変位の拘束

図-6 に示す通りに，両端支承の支点構造を解消し，両端を固定化することで，上部構造の水平変位を拘束する．この場合，固定化による上下部構造の部材の耐荷性照査を実施し，耐力が足りない場合は補強を行う．その理由は次の通りである．

①ロッカー橋脚は橋軸方向には自立性を保てない構造で，メナーゼヒンジの過度な回転はロッカー橋脚にひび割れ等損傷をもたらす危険性があるため．

②現橋の端部に設置されているすべり支承+水平ダンパーは橋桁の水平変位を許容する構造となっているが，設計地震動を上回る地震が発生した場合，橋梁全体に過度な水平変位が生じることで，ロッカー橋脚が倒壊するリスクがあるため．

(2) ロッカー橋脚上下端ヒンジ構造の存置

熊本地震で被災したロッキング橋脚を有する橋梁の被災事例から，設計地震動を上回る地震により両端固定部が壊れると，橋脚の上下がピボット沓で回転剛性がないため，中間橋脚自体が回転し，上下沓が**図-7** に示すようにはずれることで，橋脚の脆性的な破壊・落橋に繋がるリスクが確認された．一方で，ロッカー橋脚は橋脚の上下端にコンクリートヒンジ構造が設けられており，メナーゼヒンジは**図-8** に示す通りに既往実験[4]の結果から，緩衝ゴムや支圧コンクリートの拘束の影響で，ヒンジ部は脆性的にな破壊に繋がるリスクが低く，ヒンジ部の回転角の程度さえ制御できれば，橋脚面内方向の耐震性能は確保できることが確認されている．また，コンクリートヒンジ構造をすべてなくすと，ロッカー橋脚の構造が根本的に変わるため，基礎構造を含む耐震補強の規模が過大になり，大規模地震発生確率の高い地域における耐震工事の早期な完成に支障をきたす．従って，ロッカー橋脚の耐震耐震対策は橋脚単体にに拘らず，橋梁全体の耐震性能対策に着眼点をおくことで，橋脚上下端のヒンジ構造は基本的に存置するものとした．

(3) ロッカー橋脚及び上下ヒンジ部の耐力確保

ロッカー橋脚の柱(壁)及びロッカー橋脚上下におけるコンクリートヒンジ構造については耐荷力が確保できるように耐震補強を行う．

具体的に，薄い壁状のロッカー橋脚の柱については橋軸直角方向の耐力が不足することが多いことから，炭素繊維巻立て・鋼板巻立て等により耐震補強を行う．また，橋脚上下端のヒンジ構造についても照査を行い，耐力が不足する場合には水平力分担構造を別途追加するなど対策を講じる．

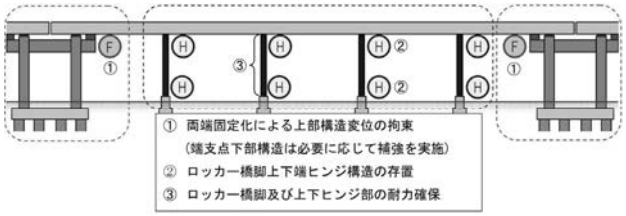


図-6　恒久対策のイメージ図

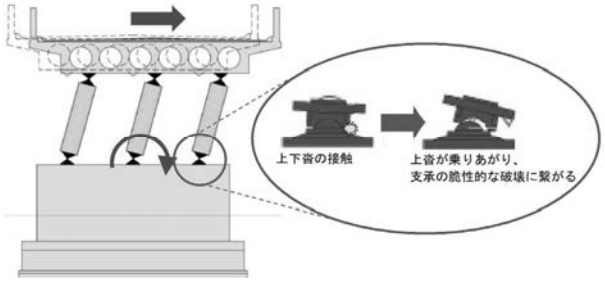
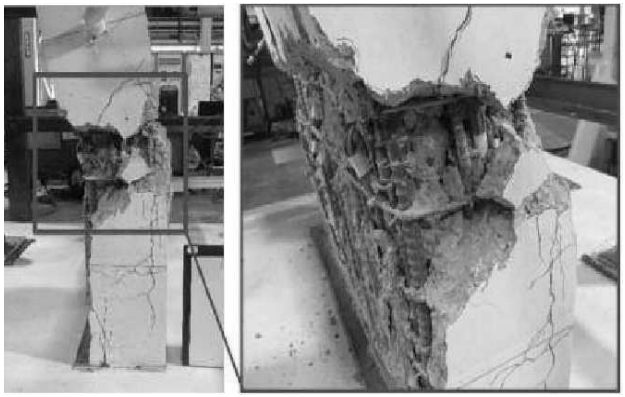


図-7　ロッキング橋脚の地震時破壊のイメージ



(a) 全体　　(b) ヒンジ部拡大図

図-8　メナーゼヒンジの耐震性能に着目した実験結果[4]

4. 耐震補強設計の特徴的な取組み

(1) 上部構造の地震時変位を拘束するための耐震補強設計

1) 両端固定化が可能な場合の耐震補強設計

両端がラーメン式橋台/橋脚の場合のロッカー橋脚を有する橋梁については兵庫県南部地震後に実施した耐震補強の際に免震ダンパー(ゴム支承タイプ)とすべり支承を組み合わせた弾性支持構造に更新されている．従って，**図-6**，**図-9**[5]に示す通りに，両端に水平力分担構造を新たに追加して固定化を行う際には，水平力分担構造(固定装置)そのもののみならず，取付部並びに受け台と既設梁部の接合部の耐荷安全性を照査して，所要の耐震性能が確保できるように耐震補強設計を行った．

また，固定化に伴う上下部構造への影響を照査し，特にラーメン橋台/橋脚の梁部のせん断耐力が不足する場合は，炭素繊維によるせん断補強を実施することを基本としている．**図-10** に示す通りに，対象橋梁の多くはラーメン橋台/橋脚の梁がスラブと一体となっているため，炭素繊維による全面巻立てが実施できない．そこで，耐震補強工事では梁部の 3 面に炭素繊維シートを貼り付け，スラブの両側に鋼板+アンカーを配置した定着構造としている．ただし，添架物の移設が困難な場合は，炭素繊維を定着するアンカーが設置できないため，スラブの下面から後施工アンカーによるせん断補強を実施する(**図-11**)こととしている．

2) 両端固定化ができない場合の耐震補強設計

図-6 に示す両端固定化の考え方は端部の下部構造が固定化に要される剛性と耐力を保有していることが前提条件となる．一方で，両端が盛りこぼし橋台の場合，橋台を固定化することで，橋台の剛性が大きくなり，杭基礎の耐荷安全性・安定性が橋梁全体構造系における弱点となる．また，盛りこぼし橋台基礎の補強は非常に困難であるため，このようなケースでは**図-12** に示す通りに，中間部のロッカー橋脚の「固定化」を図る．

固定橋脚化の際には，全体構造系が変化するため，耐荷性能が満足できるように設計を実施したうえで，**図-13** に示す通りに橋脚の巻立て・フーチングの増厚及び増杭を行うこととした．ここに，既設の杭はφ400の既製RC杭であるが，増杭の形式は，空頭制限化での施工を考慮して場所打ち杭とした．一方で，フーチングの増厚に際しては，高架下利用に配慮して現地盤から突出しない厚さとした．また，固定化する橋脚については，補強後の全体構造系の中で十分な水平剛性を有するように，巻立て厚を決定しており，橋脚上端の固定化構造として，レベル 2 地震時の上部構造慣性力に耐えうる水平力分担構造を設置した．

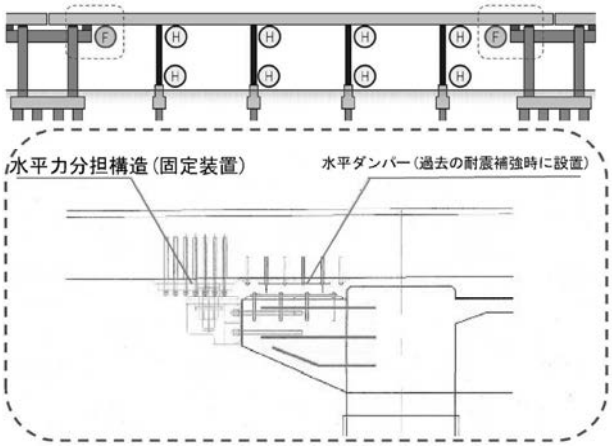


図-9　水平力分担構造(固定装置)[5]

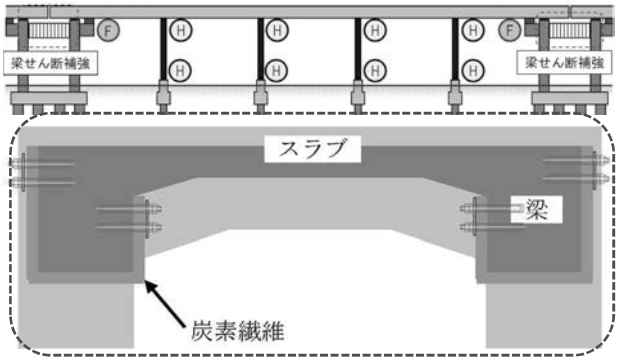


図-10　梁のせん断補強工法(炭素繊維シート 3 面補強)

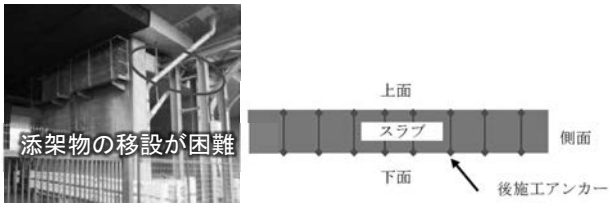


図-11　梁のせん断補強工法(あと施工せん断補強)

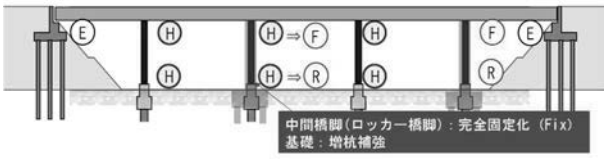


図-12　中間橋脚の固定化による耐震補強計画

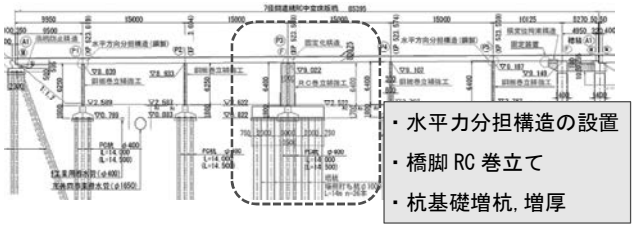


図-13　片側が盛りこぼし橋台の場合の耐震補強事例[9]

(2) ロッカー橋脚及び上下ヒンジ部の耐力確保のための耐震補強設計

固定化を行わないロッカー橋脚については兵庫県南部地震や大阪府北部地震の被災事例を踏まえ，ロッカー橋脚自体の耐力向上並びに上下ヒンジ部の耐力確保が必要である．

橋脚の耐震補強工法として一般に①RC 巻立て補強工法，②炭素繊維巻立て補強工法，③鋼板巻立て補強工法が考えられるが，①の工法を橋脚厚が 300㎜ しかない既設ロッカー橋脚に適用すると，橋脚の厚みが倍以上に増え，既設基礎への負担が大きい．そのため，ロッカー橋脚の耐震補強は②③による工法を基本としている．

また，既往の被災状況[2)]や過去の実験的研究[3)]の成果から，特にロッカー橋脚上端のアンカーバーに局部応力集中が発生しやすいことが分かったため，耐震補強設計では応力分散並びに上下構造接合部の耐力向上のため，ロッカー橋脚の上端に**図-14**に示す水平力分担構造を新たに設けることとした．

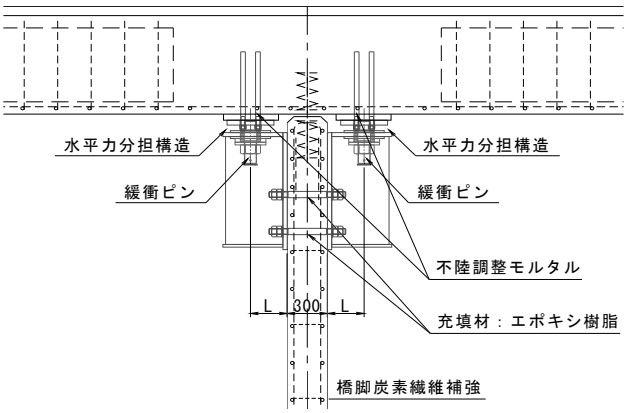


図-14　ロッカー橋脚上端ヒンジ部の耐震補強方法

(3) 耐震補強の全体計画

名神高速道路栗東 IC～尼崎 IC 間にロッカー橋脚を有する橋梁が全27橋存在し，ロッカー橋脚自体の数が1106基となっている．これらの橋梁が置かれている構造条件・環境条件・施工条件は多種多様であるため，耐震補強工事の効率的な実施のために，**図-15** に示す通りに，本節(1)(2)の考え方に基づいて耐震補強設計の全体フローを作成し，計画的な耐震補強設計を実施するなど取り組みを行った．

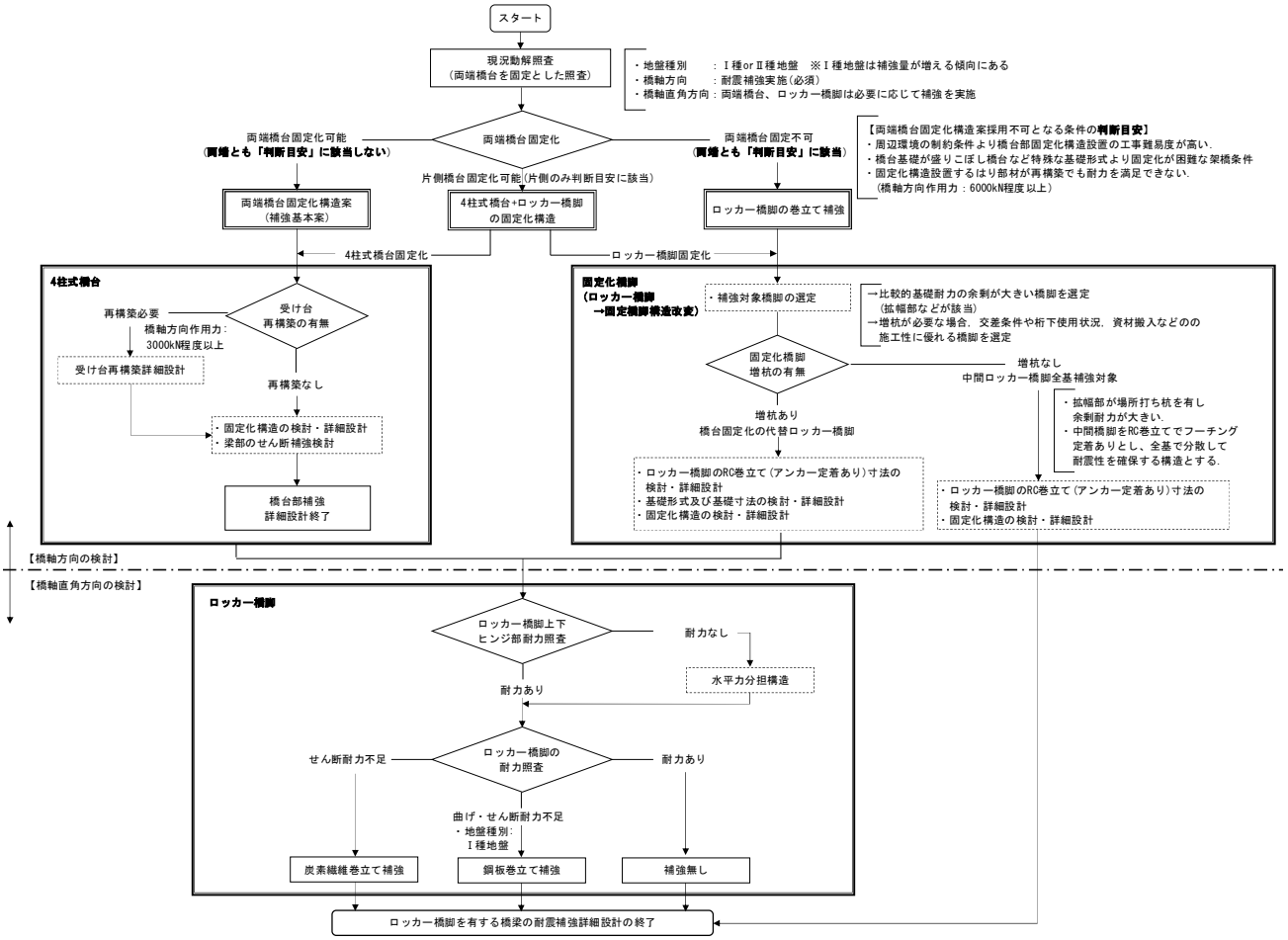


図-15　ロッカー橋脚を有する橋梁の耐震補強対策選定フロー

5. 耐震補強工事の特徴的な取組み

(1) 狭隘な桁下区間での耐震補強工事に実施

中間橋脚を固定化する計画としているロッカー橋脚を有する橋梁の耐震補強工事の中で，場所打ち杭による増杭は，桁下の土地利用において平面範囲や土被りに制約があることや，橋脚に近接する施設，道路，地下埋設物への影響を必要最小限に抑えることが必要がある等から，極力コンパクトに杭配置や底版厚を計画することが求められる．そこで，増杭の杭配置や杭頭接合部の構造細目については設計要領第二集 [6]に準拠し，施工については，対象橋梁の土質の種類が砂質土が主体であったことから，リバース工法またはオールケーシング工法のいずれかの低杭頭施工により行っている（**写真-3**）．

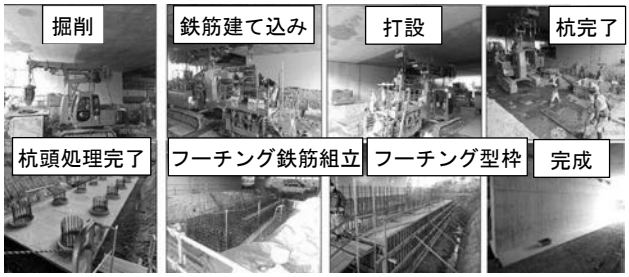


写真-3　増杭の施工状況

(2) 固定化橋脚の RC 巻立て工

固定化が必要なロッカー橋脚については**図-13** に示す通りに RC 巻き立て工を実施する．この際に，ロッカー橋脚は壁厚が 300mm 程度と薄く，コンクリート打設時の品質確保が重要な課題であるため，耐震補強工事では①打設前型枠および既設基礎への散水の実施，②型枠にバイブレーター挿入間隔を明示し，バイブレーターの下層への挿入位置を明示するなど，打設管理を実施した．(**写真-4**)

(3) 耐震補強工事における耐久性確保の取り組み

既設橋梁に制震デバイスを新たに設置する場合には，耐震補強効果を確実に発揮させるための工夫が重要で，耐震補強工事では**写真-5**に示す通りに，ロッカー橋脚の天端付近に水切り板を設置することや，水平力分担構造に水抜き孔を追加し製作するなど耐久性を確保するための取り組みを行っている．

6. おわりに

ロッカー橋脚を有する橋梁は名神高速道路に多数存在し，比較的都市部に位置する立地条件である．耐震補強工事では制約を受ける施工が多くあるが，緊急輸送道路としての機能を確実に確保するために施工方法に留意して耐震補強を計画的進めていく．

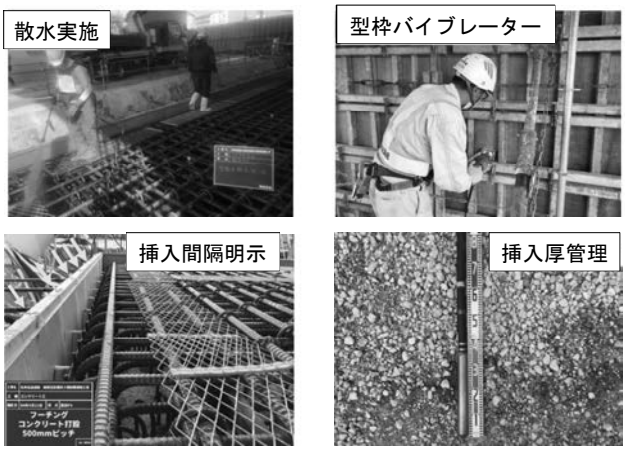


写真-4　コンクリートの打設管理

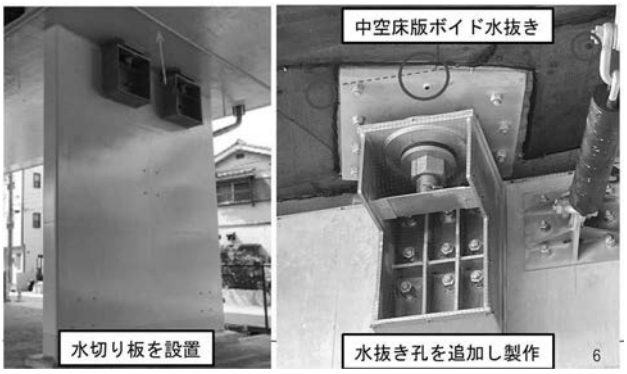


写真-5　耐久性確保のための取り組み

参考文献

1) 李 首一，伊川 嘉昭，高橋 良和，杤木 正喜，桑原 秀明：メナーゼヒンジの回転剛性を考慮したロッカー橋脚を有する橋梁の耐震性能検討，土木学会第70回年次学術講演会，I-123, 2015.
2) 李 首一，中谷 隆生，伊川 嘉昭，佐溝 純一，杤木 正喜：大阪府北部地震で被災したロッカー橋脚の損傷原因推定と復旧対策，土木学会第74回年次学術講演会，I-66，2019.
3) Li,s.,Ikawa,Y.,Ohshiro,T.,Takahashi,Y.,Hashinoki,M.：An examination of the seismic performance of rocker pier bridges in Japans oldest expressway,Proc. of International Conference on Bridge Maintenance, Sefety and Management,2016.
4) 髙原 良太，広瀬 剛，緒方 辰男，武田 篤史：メナーゼヒンジを有する部材の耐震性能，コンクリート工学年次論文集，pp.775-780，Vol.39，No.2，2017.
5) 佐溝 純一，杤木 正喜，中岡 仁志，広瀬 彰則：ロッカー橋脚を有する橋梁の耐震補強，土木学会第75回年次学術講演会，I-284，2020.
6) 西日本高速道路株式会社：設計要領第二集 橋梁建設編，pp.4-30～4-33，2016.