

ロッキング橋脚の地震時の損傷形態について

幸左賢二¹・佐藤崇²・鈴木威³

¹正会員 Ph.D 九州工業大学工学部建設社会工学科（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）

²正会員 工修（株）長大，福岡構造技術部（〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1）

³正会員 阪神高速道路（株）保全交通部（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

1. はじめに

熊本地震においては高速道路を跨ぐロッキング橋脚を中心に，橋軸直角方向への桁移動や移動に伴う落橋が生じている．ロッキング橋脚の柱の上下端にはピボット支承が用いられているが，大規模地震時におけるピボット支承の複雑な挙動については十分考慮する必要がある．そこで本論文では，まず熊本地震におけるロッキング橋脚の代表的損傷例を示し，その損傷メカニズムを明らかにする．ついで，阪神大震災で同様の被害が発生した瓦木西高架橋を紹介するとともに，その類似性に着目した分析を行う．最後に阪神高速道路で実施されたロッキング橋脚の耐震補強例を紹介し，その設計上の課題を明らかにする．

2. 熊本地震によるロッキング橋脚の損傷

ここでは代表的3橋梁の損傷状況について概説する．ロッキング橋脚とは橋脚柱の上下端にピボット支承（球面形状部で鉛直荷重を支持し，全方向の回転に追従可能な固定支承）を設けることにより，橋脚への作用力を軽減する構造であるが，常に上下方向に隙間のない状態で回転できる機構となるため，複雑な挙動となる^{1), 2), 3)}．

(1) 東原橋

写真—1に示す東原橋は熊本ICに位置し，国道57号を跨ぐ橋長約50m，幅員約11mの3径間連続PC中空床版橋で，2基の橋台と2基のロッキング橋脚で橋桁を支えている．ロッキング橋脚は5本の鋼製柱から成っている．桁は橋軸直角方向に約30cm移動し，橋脚も約4°傾いている．両端の橋台は桁かかり長の拡幅と，横方向の変位制限装置が設置され

ている．RCブロックの変位制限装置は変状が見られなかったが橋台部に斜めせん断破壊が認められる．

(2) 神園橋

写真—2に示す神園橋は熊本ICに位置し，高速道路を跨ぐ橋長約40m，幅員約5mの3径間連続PC中空床版橋で，2基の橋台と2基のロッキング橋脚で橋桁を支えている．



写真—1 東原橋損傷状況



写真—2 神園橋損傷状況

ロッキング橋脚は2本の鋼製柱から成っている。桁は橋軸直角方向に約30cm移動し、橋脚も約4°傾いている。両端の橋台は桁かかり長の拡幅が実施されているが、横方向の変位制限装置は設置されていない。

3. 府領第一橋梁

(1) 損傷概要

県道32号小川嘉島線の府領第一橋梁が九州自動車道本線に落橋している。NEXCO担当者の土木学会報告会での説明によると、前震では変位制限装置に損傷が生じ、本震により落橋に至ったとのことである。橋長約60mの3径間連続PC中空床版橋で、2基の橋台と2基のロッキング橋脚で橋桁を支えている。図—1に示すようにロッキング橋脚は3本の鋼製柱から成っている。

写真—3, 4, 図—2に示すように、東側桁端部は6m程度熊本側に、西側端部桁も3m程度熊本側に移動して横たわっている。このことから、斜角構造である桁が回転し、横変位拘束装置に衝突したと考えられる。西側橋台には桁掛り長を確保するための補強はなされているが、橋軸方向の落橋防止装置は設置されていない。一方、東側端部桁は60°の斜橋であることから、東側橋台には橋軸直角方向に2基の変位制限装置が設置されている。

(2) 設計上の課題

管理者から十分なヒヤリングを実施していないので、現地の状況からのみ推定される個人的な設計上の課題について述べる。損傷状況から、橋軸直角方向の変位制限装置が倒壊していることから、地震により桁が衝撃的に変位制限装置に作用し、大幅に作用力が上回り落橋に至ったと考えられる。ここで、実作用力側と設計力側からみたポイントを指摘する。

a) 実作用力：橋脚がロッキング橋脚であることから、L2レベルの作用力は、支承と変位制限装置で受け持ち、 $W(\text{桁重量}) \cdot \alpha$ (桁と変位制限装置間の衝突加速度) / g (重力加速度) が変位制限装置に作用することになる。

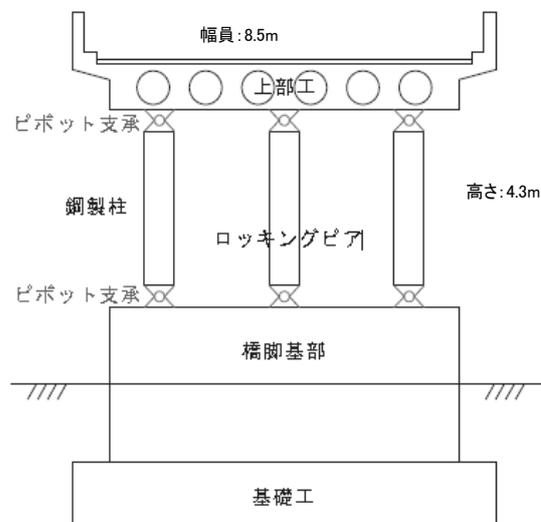
b) 設計作用力：示方書では $3 \cdot kh \cdot Rd$ (ここで kh ：レベル1地震動に相当する設計水平震度、 Rd ：死荷重反力) を考慮することになる。両者を比較するとまず $3kh$ が衝撃的震度 (α/g) に比べて小さい可能性が指摘できる。また、 Rd として端部桁の死荷重反力を採用すると、ロッキング橋脚では W (桁重量) に比べて小さい値となり、安全率が小さく



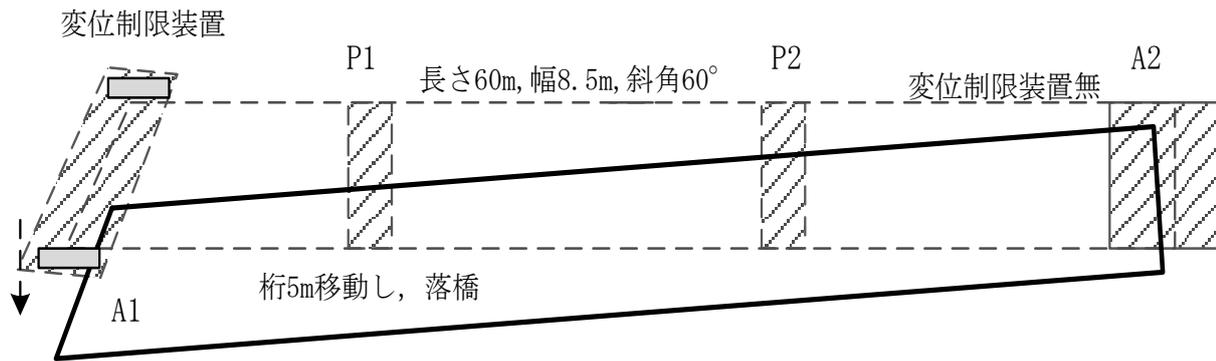
写真—3 府領第一橋梁



写真—4 北側桁端部落橋状況



図—1 府領第一橋梁断面図



図—2 府領第一橋梁平面図

なる可能性が指摘できる。次に桁が変位制限装置を破壊し、桁の変位によるピボット支承の回転角が、上沓と下沓の接触した時点を最大とする回転可能角度を超えると、上沓には折れ曲がる力が作用し、破壊に至る。したがって、図—3に示すように回転可能角度を超えないように桁の移動量を抑える必要がある。

方向の揺れに対して鈍角方向に回転しやすい。落橋状況を見ると、P27の固定端を中心に上部構造が大

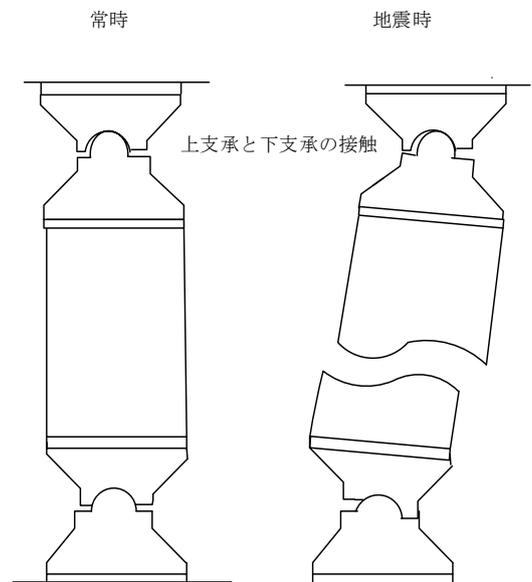
4. 瓦木西高架橋

(1) 損傷状況

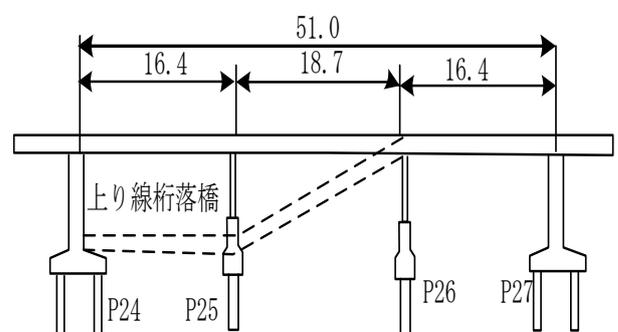
ここでは、参考文献⁴⁾を元に、阪神大震災において落橋した瓦木西高架橋の損傷メカニズムを概説する。名神高速道路の尼崎ICから西宮IC間のうち、武庫川から西に約1.8kmにわたりRC構造の連続高架が2橋続いており、その一つが瓦木西高架橋（橋長922.05m）である。上部構造は図—4に示すように桁長51.5m（支間：16.4+18.7+16.4m）のRC3径間連続中空床版である。下部構造のうち端部のかけ違い橋脚はRC壁式橋脚であるが、図—4に示すように中間の2橋脚はロッキング橋脚となっている。このロッキング橋脚は、脚柱が1脚当たり3本の円柱で構成されている。支承条件は端部のRC壁式橋脚（P27）による1脚固定であり、固定部はX形の鉄筋で構成されるメナーゼヒンジ構造、可動橋脚は鋼製BP支承を用いている。基礎構造は全て場所打ちRC杭であるが、RC壁式橋脚は2列配置、ロッキング橋脚は単杭配置となっている。

(2) 被害に対する考察

上り線の上部工が、可動端の橋脚P24側から外側に回転して落下し、下を走る市道を塞いだ。橋脚P25は完全に倒壊したが、橋脚P26は傾きながらも上部工を支え、橋脚P27はねじれ破壊が発生した。本橋は52°という大きな斜角を有しており、橋軸直角



図—3 ロッキング橋脚変形模式図



図—4 瓦木西高架橋側面図

大きく回転していることから、水平方向の大きな地震動により可動支承のサイドブロックが破壊され、桁が水平方向の力に抵抗しないロッキング橋脚と共に外側へ倒れた推測される。

またP27の固定部においては、拘束力の強いメナーゼヒンジが破断しなかったため、落橋はしなかったものの、上部構造の回転によるねじりモーメントが橋脚に伝わり、破壊が生じたと推察される。

この破壊形式を熊本地震の府領第1橋梁と比較する以下のような共通点を見いだせる。

- 1) 3径間連続桁中空RC床版で、中間の2基はロッキング橋脚である。
- 2) 斜角（瓦木西： 52° ，府領： 60° ）を有しており、桁は回転しながら落橋している。
- 3) 府領第1橋梁では横方向拘束装置に衝突し、装置を破壊し、桁の落橋に至っている。一方瓦木西では前節の説明のとおり、横方向の拘束装置が設置されていないため、横方向の移動に対する抵抗は可動支承のサイドブロックのみであった。

（3）復旧手法

落橋した桁は不安定な状態であったことから、二次災害を防止するためにH鋼で仮支えされた。落橋した桁及び橋脚はコンクリート圧砕機等で取り壊し、撤去された。落橋部は新設橋で構築することになったが、交差道路などの関係で新設橋もスパン割は既設橋と同一とされた。上下部構造の設計は、平成6年道路橋示方書および復旧仕様に従った。交差物の制約から基礎の十分な耐力増加が困難であったため、上部構造はRC中空床版からPC中空床版に変更して死荷重を減少させ、さらに免震支承も採用された。図-7に示すように下部構造は既設のRCロッキング橋脚からRC壁式橋脚に変更され、基礎の増し杭も行い耐力が増強された。

5. 木津川橋梁の耐震補強

（1）橋梁概要

阪神高速道路東大阪線P20～25の木津川橋梁は、5径間連続桁の中間支点にロッキング柱を有する特殊橋梁である。図-8に一般図、図-9に断面図を示すが、耐震設計上の課題を以下に示す。

- 1) 中間橋脚（P21, 22, 23, 24）がロッキング橋脚（柱上下部がピボット支承）で、街路橋梁の橋脚上に設置されている。
- 2) 上り線と下り線が分離構造で、横桁とストラッドで連結した構造である。

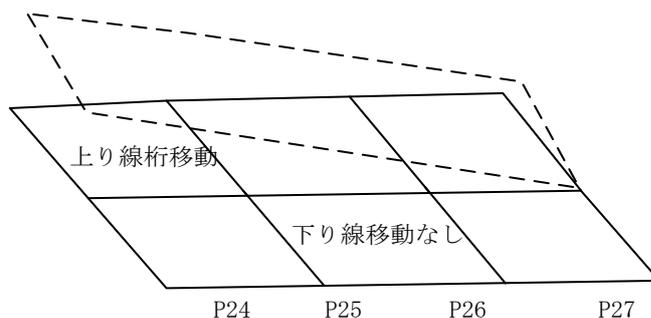


図-5 瓦木西高架橋平面図

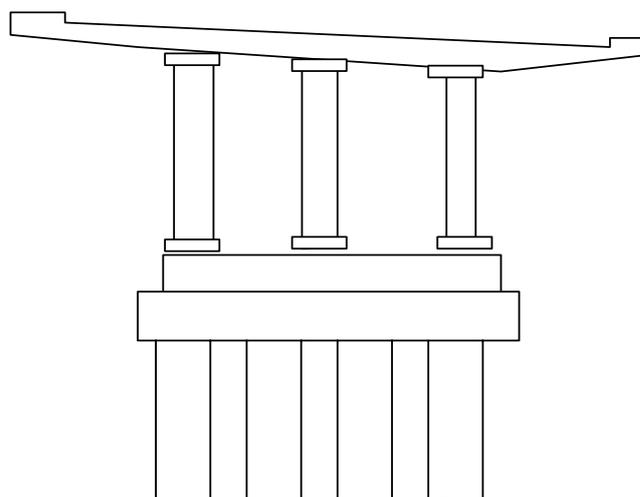


図-6 瓦木西高架橋断面図

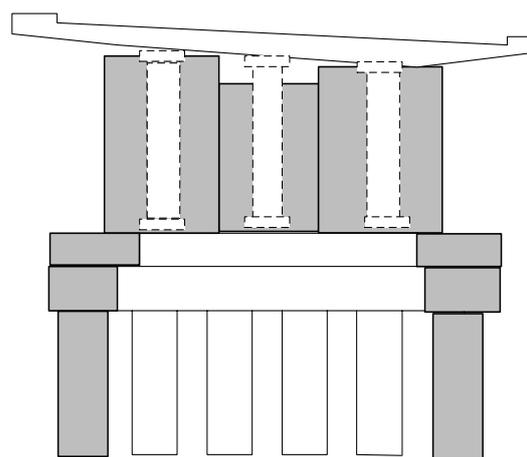


図-7 瓦木西高架橋復旧断面図

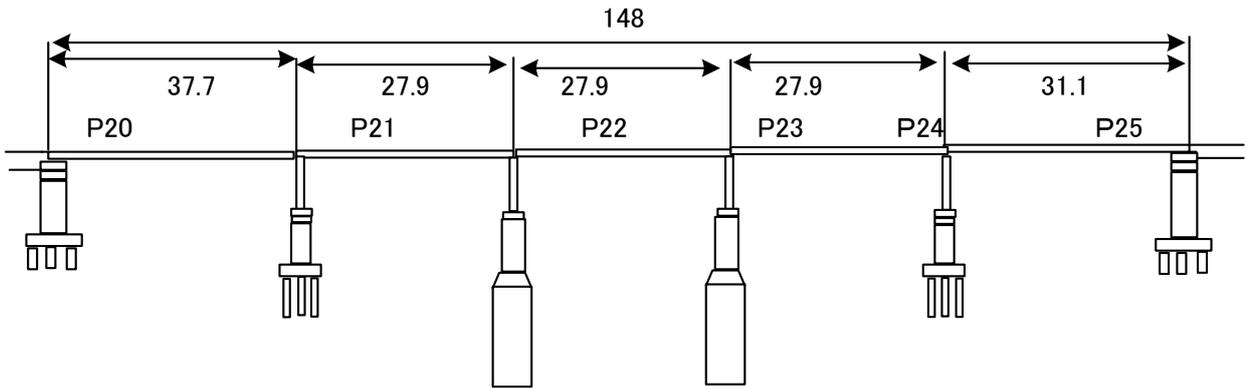


図-8 木津川橋梁一般図

3) ロッキング橋脚は地震時水平力に抵抗しないため、両端橋脚で水平荷重を受け持つ。よって地震時には橋長148mの単純桁である。

(2) 耐震補強設計

前述の図-3に示したように、回転可能角を超えないように桁の移動量を抑える必要がある。また、橋軸直角方向は大阪市管理の街路橋梁の高欄が近接（106～185mm）するため、これに衝突し水平力がかかるとロッキング橋脚が倒壊する可能性が高い。したがって、橋軸、橋軸直角方向とも桁の変位を抑えることが本橋の耐震設計の基本思想となる。

(3) ロッキング橋脚部の橋軸直角方向変位量

街路高欄に接触しない移動量（323mm）以内とする。

(4) 支承

支承の設置スペースが限られるため、支承形状の自由度の高い機能分離支承（スベリ支承と水平荷重分散装置）を採用した。

(5) 落橋防止装置

落橋防止装置の設計荷重は、道示では1.5Rdである。しかし本橋は中間のロッキング橋脚では地震時慣性力を支持できないことから、Rdでなく上部工全重量を端部橋脚基数4で除した値とした。

(6) 変位制限装置

端支点部での橋軸直角方向の変位を確実に抑えるため、設計作用力として $3 \cdot kh \cdot Rd$ でなく動的解析で求められた上部工慣性力を用いて変位制限構造を設計した。これらの装置は端橋脚の梁上いっばいに設置することとなった。端横桁の下と側面に変位制限装置、主桁直下にスベリ支承、端横桁の前に横梁を設け水平荷重分散装置（ゴム支承）を設置している。

(7) ピボット支承改良

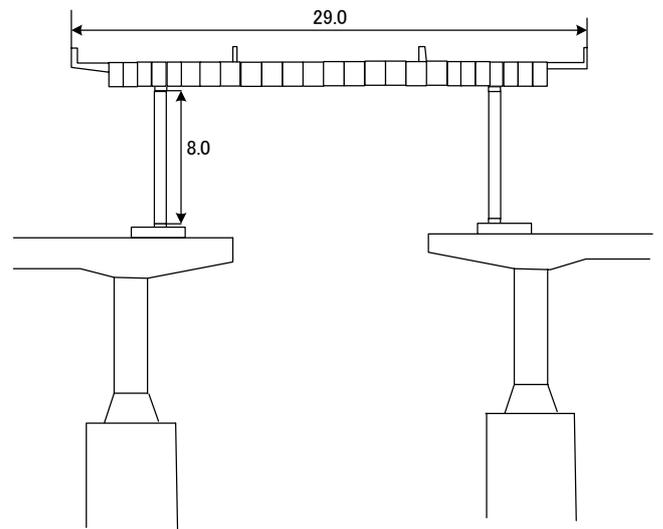


図-9 木津川橋梁断面図

ロッキング橋脚のピボット支承の移動可能量450mmを確保するため、接触面端部を最大6mm削ることとした。

(8) 支承逸脱防止装置

ロッキング橋脚部でピボット支承が逸脱すると、中間支点部での鉛直荷重支持能力が失われることから、ピボット支承の逸脱防止装置として、段差防止機能をもった逸脱防止装置としている。具体的には、ロッキング橋脚部の上揚力に抵抗しつつ、移動制限値を超えると変位制限装置として、支承が損傷した場合は段差防止装置として働く構造とした。

6. まとめ

熊本地震によって被害が発生したロッキング橋脚を対象に分析を実施した。この結果得られた知見を以下に示す。

(1) 熊本地震において高速道路を跨ぐロッキング橋脚を中心に、橋軸直角方向への桁移動や落橋が発

生している。東原橋梁における、両端の橋台では桁かかり長の拡幅と、横方向の変位制限装置が設置されている。地震力の作用によりRCブロックの変位制限装置には変状が見られなかったが橋台部に斜めせん断破壊が認められる。東原橋においては桁は橋軸直角方向に約30cm移動し、橋脚も約4°傾いている。両端の橋台は桁かかり長の拡幅は実施されているが、横方向の変位制限装置は設置されていない。以上のように、同様なロックンク橋脚でも橋軸方向の落橋防止装置や横方向拘束装置の設置の有無などの差異があり、その必要性について今後検討を行う必要がある。

- (2) 落橋した府領第一橋梁においては、東側端部橋台には変位制限装置が設置されていたが、西側端部橋台には変位制限装置は設置されていなかった。東側変位制限装置は桁衝突により破壊され、落橋に至ったと考えられる。このことから、横方向変位制限装置の設計作用力が実作用力に比べて小さかった可能性が指摘できる。
- (3) 阪神大震災において落橋に至った瓦木西高架橋（斜角50°）も、府領第1橋梁（斜角60°）に近い橋梁形式であり、斜角を有するロックンク橋脚に対しては特に横方向の変位制限装置について十分な検討が必要である。
- (4) ロックンク橋脚の耐震補強を実施した、木津川橋梁においては横方向の変位制限装置に対して詳

細な検討が実施されている。その結果落橋防止構造や変位制限装置については、動的解析で求められた慣性力を用いるなどの安全性の向上がはかられている。一方、構造上橋台端部のみで変位を拘束するために、大規模な変位制限構造となりやすく、またその有効性については、十分検討する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会西部支部「2016年熊本地震」地震被害調査報告会資料，2016，5.
- 2) 土木学会熊本地震被害調査結果報告会速報会資料，2016，4.
- 3) 道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，日本道路協会，平成24年3月
- 4) 阪神・淡路大震災調査報告，土木建造物の被害，橋梁，土木学会，1996. 12.
- 5) 甲元克明，米澤康夫，鈴木威，竹井賢二，本田行幸，阪神高速道路木津川橋梁の耐震補強，第28回土木学会地震工学シンポジウム，2008.
- 6) 吉田直人，池田学，芝寛，高野幸宏，斉藤聡，工藤伸司，ピポット支承を有する既設鋼製鉄道橋の耐震性能評価に関する一考察，第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 71-78，2011. 7.
- 7) 池田学，ピポット支承を有する旧式鋼橋の耐震評価法と簡易補強法，鉄道総研月例発表会講演要旨