

ロッキング橋脚を有する鋼2径間連続橋の耐震補強設計

全日本コンサルタント(株) ○ 中野 誠 嗣
木村 泰 三
田淵 智 之
松下 逸 雄

論文要旨

ロッキング橋脚は、自立することができない構造であるため、設定量を超える変位が生じた場合に転倒する可能性がある。近年の大地震により落橋した事例もあり、耐震対策として早急な対応が求められており、国土交通省HPでは「ロッキングピアの橋は3年間で耐震化を終えることを目指す」「熊本地震対応としてロッキング橋脚は完全自立構造を基本とした耐震補強」「速やかな機能回復が期待できる耐震補強を加速化へ」等と記載されている。しかし、ロッキング橋脚の様な構造が採用されている箇所は概して道路や鉄道に挟まれる等、橋脚を設置するための十分な用地が無いケースがほとんどであり、総合的な知見で対策工を検討する必要がある。本稿では、駅や線路に近接した条件の下で落橋防止システムの構築を行った例を報告する。

キーワード：ロッキングピア、ロッキング橋脚、ピボット支承、逸脱防止、鉄道近接、落橋防止

まえがき

金山駅は、愛知県名古屋市熱田区・中区にある、名古屋鉄道・東海旅客鉄道・名古屋市交通局の合計3社局5路線が乗入れる1日あたり総乗降人数38.8万人のターミナル駅である。金山総合駅東側に位置する大津町線に今回対象の跨線橋「高座橋」がある。大津町線は重要路線であること、橋梁はJRと名鉄を交差していることから、施工計画に配慮した耐震補強計画が必要とされた。また、橋梁の中間支点構造は異なる鉄道事業者に挟まれた箇所に設置されたロッキング橋脚であり、列車運行に支障しない施工法が求められた。



写真-1 金山駅及び高座橋周辺

(2) 上部構造

2径間連続鋼床版I桁橋(8主桁×2)
橋長 40.8m, 幅員 15.35m(全幅員30.8m)
斜角 62°

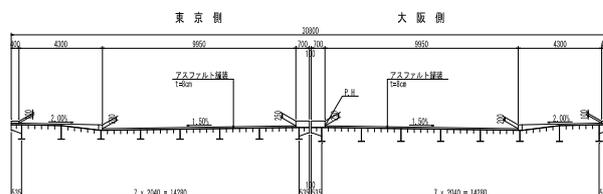


図-1 上部工断面図

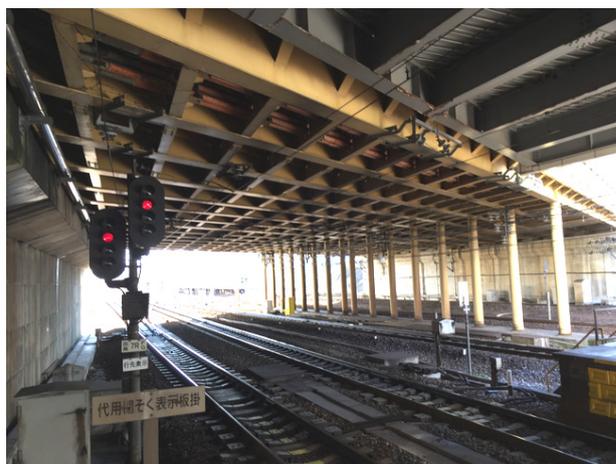


写真-2 橋梁全景(桁下)

1. 条件

(1) 道路構造

- ・道路規格 第4種1級相当
- ・幅員構成 歩道:4.3m両側 車道:9.95m片側3車線

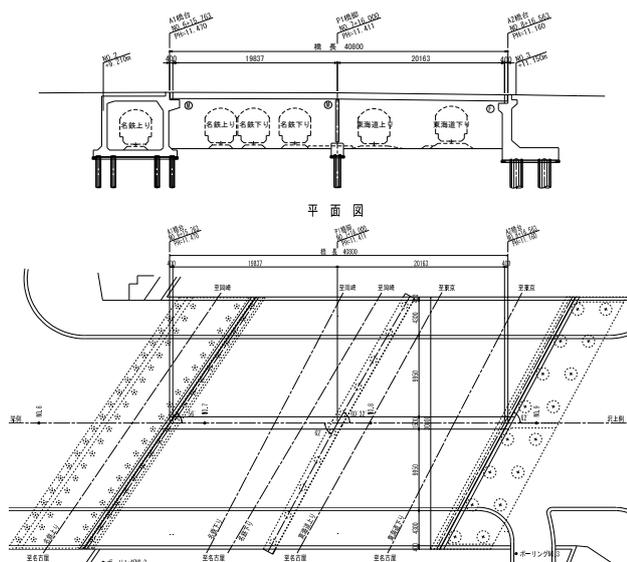


図-2 橋梁側面図及び平面図

(3) 下部構造・基礎構造

- A1 : ラーメン式橋台 (φ600 場所打ち杭 80本)
- P1 : 円柱式橋脚 (φ400 鋼管×16本, φ800 場所打ち杭 10本)
- A2 : 逆T式橋台 (φ1500 場所打ち杭 16本)

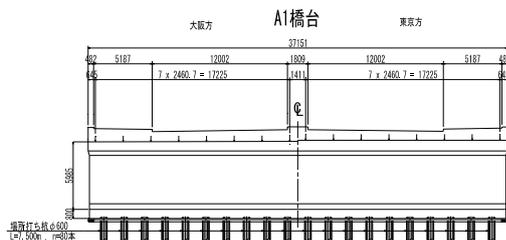


図-3 A1橋台断面図

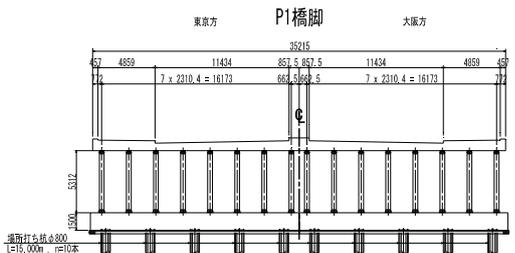


図-4 P1橋脚断面図

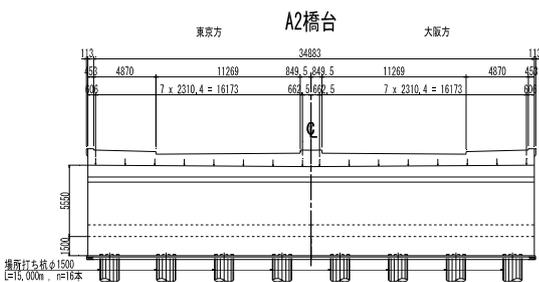


図-5 A2橋台断面図

(4) 支承条件

- A1橋台 : 可動 (鋼製支承Aタイプ)
- P1橋脚 : 可動 (ピボット支承)
- A2橋台 : 固定 (鋼製支承Aタイプ)

2. 交差条件

- ・名鉄名古屋本線
- ・JR東海道本線

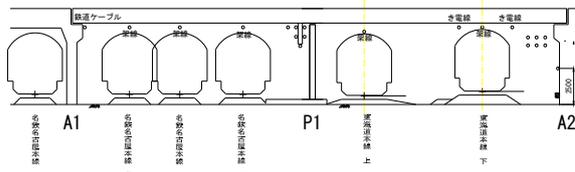


図-6 鉄道横断面図

3. 目標とする耐震性能レベル

本橋は跨線橋であり、地域利用性の高い路線であることから、「レベル2地震動による損傷が生じる部位があり、その恒久復旧は容易ではないが、橋としての機能の回復は速やかに行い得る状態が確保されるとみなせる耐震性能レベル」を目標とした。

4. 設計方針

現況は落橋防止システムが未対策である。また既設の支承部はレベル2地震動に対する耐震性能が確保されていないことが前提であった。施工条件として、鉄道内工事は夜間3時間に限定されること、6車線を有する大津町線の通行止めは周辺への影響が甚大であると予測されたこと等があった。

これらの条件を基に「支承構造のレベル2地震動への対応」「落橋防止システム」「ロッキング橋脚の耐震補強」の3点に対して、それぞれの方針を決定し、橋梁全体としての耐震補強対策を検討することとした。

5. 支承構造のレベル2地震動への対応

本橋は昭和58年に竣工されており、設計当時の道路橋示方書(S55)にはレベル2地震動は考慮されていない。しかし、支承取替には通行止めを伴うため、本設計においては、既存の支承には常時及びレベル1地震動により生じる水平力及び鉛直力のみ機能させ、レベル1地震時以上の地震動(レベル2地震動)によって生じる水平力を分担する構造を別途追加設置することとした。

中間橋脚(ロッキング橋脚)のピボット支承については、後述の「8. ロッキング橋脚に対する対策」にて述べることとする。

6. 落橋防止システム

本橋梁は両側橋台による掘り込まれた地盤に鉄道が敷かれ、跨線する形で橋梁が架けられている。上部構造は連続桁であり、"橋軸方向に大きな変位が生じにくい橋"に該当する。よって、落橋防止構造は省略可能である。

橋台支承部においては桁かかり長、横変位拘束構造(幾何学条件の判定により必要)の設置によりレベル2地震動以上の力を受け、支承が破壊した際に上部構造が下部構造から落下しない対策とした。横変位拘束構造については、熊本地震により落橋した橋梁(ロッキングピアを有する)は、横変位拘束構造が左右一ヶ所づつ追加設置されていたが、地震により破壊され上部構造の水平変位を制限することができなくなり落橋に至った(図-7)。通常、地震時に橋梁が回転し、抜け出す側に各々一箇所変位拘束構造を設置することで、横方向の変位を制限できると考えられているが、応力が一点集中することは、想定外の外力や挙動に対し破壊のリスクが高いと考えられる。このことより本橋梁における横変位拘束構造は、設置箇所を複数増やすことで応力を分散させ、破壊リスクを低減する構造とした。また、支承周りが煩雑にならないよう構造選定には配慮した。

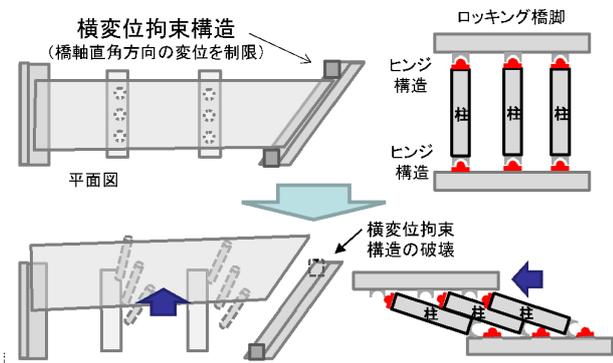


図-7 熊本地震の想定落橋メカニズム『国土交通省 HP』

7. ロッキング橋脚の耐震補強

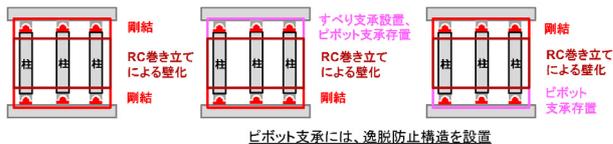
本橋の中間橋脚は、上下端がヒンジ構造の複数の柱で構成され鉛直支持機能と回転機能を有するロッキング構造である。ロッキング橋脚は単独では自立せず、水平方向の上部工慣性力を支持することができない構造であり、設定量を超える変位が生じた場合、転倒する可能性がある。

耐震補強対策としては、複数の柱を RC 巻き立てにより壁化し、支承を剛結若しくは上下いずれかを剛結し、単独自立することにより上部工を支える構造とする『完全自立構造』、上下ピボット支承は逸脱防止構造を追加した上で存置し、複数の柱のみを RC 巻き立て若しくはブレース材により連結し橋軸直角方向の動きを制限し上部工を支える構造とする『半自立構造』等の考え方が国土交通省から示されている。

【対策の考え方】

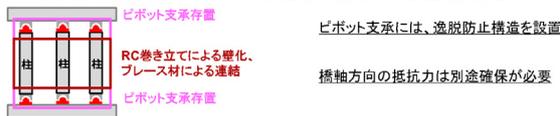
○ロッキング橋脚の安定性を確保するための構造とする

① 単独で自立可能な構造(完全自立構造)を基本とする



ピボット支承には、逸脱防止構造を設置

② 施工上の制約がある場合等には、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(半自立構造)とする



ピボット支承には、逸脱防止構造を設置

橋軸方向の抵抗力は別途確保が必要

図-8 ロッキング橋脚の耐震補強の考え方

『国土交通省 HP』

完全自立構造については、地震時に慣性力が基礎に作用することから杭基礎構造の場合、杭列追加等の対策が必要となる。本橋においては、金山駅が近接しており、工事に伴う線路移設には駅改良を含む影響が考えられること、支承取替には通行止めを伴うこと等から実現困難であった。

半自立構造については、複数列の橋脚を壁化、若しくは連結された面に対し直角方向へのロッキングが有効となるが、本橋は斜角を有しているため、橋脚面直角方向と橋軸方向が異なり、橋軸方向への上部構造の挙動に追従できない構造となる。

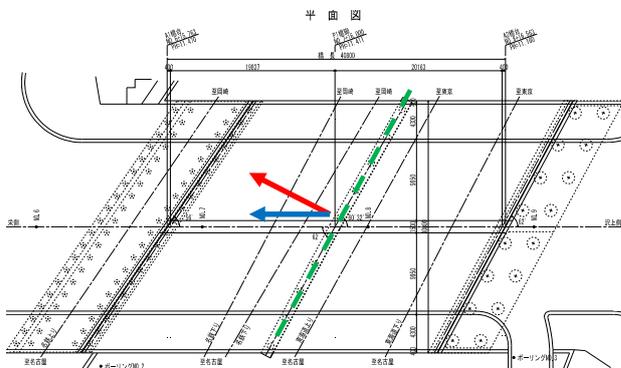


図-9 上部構造と橋脚の挙動方向(半自立構造)

これらの条件から、本橋梁のロッキング橋脚においては上記の耐震補強対策以外の対策が必要となった。

8. ロッキング橋脚に対する対策

(1) 設計思想

両橋台支承部で行う対策(支承補強、落橋防止システム)により上部構造の地震時に発生する水平変位は制限され、中間橋脚は常時及び地震時の水平変位にロッキング構造で追従する。すなわち、ロッキング構造が適正に機能することが前提となる。

水平力を受け持たず、鉛直荷重のみを受け持つロッキング構造にとって避けなければならないのは支承の逸脱で

ある。ピボット支承が逸脱することにより基礎に鉛直荷重を伝達できなくなれば、上部工は落橋に至る。

本設計では、逸脱防止構造をロッキング橋脚に対する対策とした。

(2) ピボット支承逸脱防止構造

一般的な逸脱防止構造として、レベル2地震時の移動量に対し、上下沓が分離するような変位が発生しないようにピボット支承周りに変位制限装置を設置することが考えられる(図-10)。しかし、本橋は両橋台に支持される構造であること、端支点支承補強構造によりレベル2地震動に対応させていること、横変位拘束構造により支承破壊後の移動量も制限していることから、水平方向への落橋に至る様な大きな変位は発生しないと考えた。

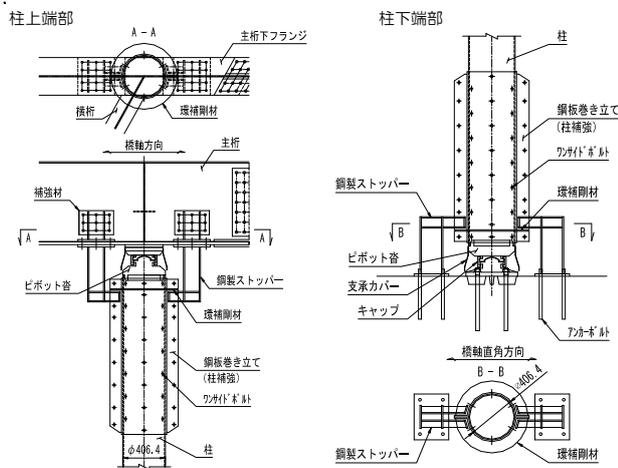


図-10 ピボット支承変位制限構造

そこで本設計では、ロッキング橋脚に対する逸脱防止構造の作用力として上揚力に着目した。本橋におけるピボット支承部では、上下沓を連結するリング状のキャップが設置されており逸脱防止の役割を果たしている(図-11)。しかし、H24道示に対応した設計思想ではないため、別途対策が必要となる。

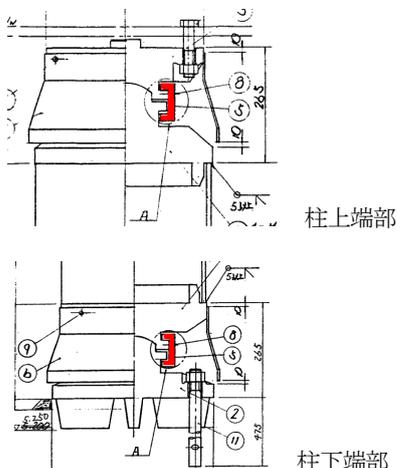


図-11 ピボット支承逸脱防止構造

(3) ピボット支承補強設計

『道路橋示方書V耐震設計編 15.5 支承部の照査』では、「支承部は、鉛直上向き地震力に対する安全性を十分に確保するために、 $-0.3R_D$ の設計鉛直反力に対する照査を行うことと規定している。これは新設する橋に対してはその設計段階において対応できる事項である。一方、既設橋に対する耐震補強では既設橋に固有な構造的な与条件があるため、対応が困難となる場合もある。そのため、既設橋における支承部の耐震補強では、レベル2地震動による水平力分担構造の追加の他に、H24道示Vの式(15.4.2)により算出される R_U を照査項目とし、レベル2地震時に上下沓が分離しないこととしている(国土技術政策総合研究所資料：既設橋の耐震補強設計に関する技術資料)。

一般的な橋台、橋脚にあるような沓座上に据えられた支承であれば、レベル2震動を超える外力を支承部が受け、支承部が破壊されたとしても横変位拘束構造が機能し落橋に至らない。しかし本橋梁の場合、中間橋脚がピボット支承であるため、レベル2地震動を超える外力が作用した場合においてもピボット支承の上下沓が分離するような損傷を受けてはならない。すなわち落橋防止システムとして、支承部の設計鉛直反力 $-0.3R_D$ に対応した支承部の補強が必要となる。

本設計においては地震力に対する安全性を十分に確保するために支承部の設計鉛直反力 $-0.3R_D$ を地震時の上揚力として部材設計を行うこととした。

(4) 逸脱防止構造選定

本設計では鉛直上向き外力作用時に発生する変位を拘束する構造、つまりピボット支承の上下沓が上揚力により分離しないよう、上部工と下部工を連結する「ケーブル連結構造」を提案した(図-12)。また、(図-10)の構造で上揚力に対応する機能を追加することは可能であるが、設置数が多く施工性も劣ること等から本設計では不採用とした。

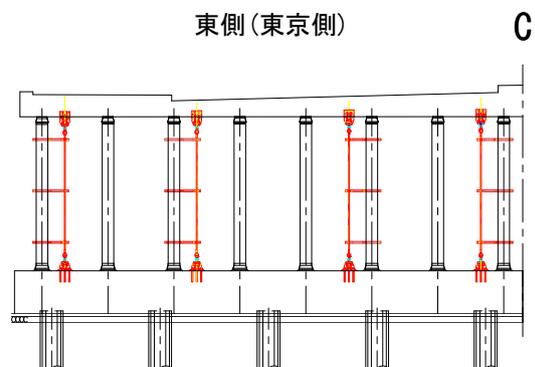


図-12 PCケーブル(逸脱防止構造)配置図

9. PCケーブルの設計

(1) 支承部の照査に用いる設計地震力

設計作用力 $P = -0.3R_D = -863.4 \text{ kN}$

(2) 構造細目

設置箇所については、構造的なバランス(対称)、施工の軽減から箇所数とPCケーブルの径(重量)を軽減することを検討し決定した。

ロックンク橋脚8ヶ所(片側)に対しPCケーブルは4ヶ所とした結果、PCケーブル(G390kN) $\phi 34 \text{ mm}$ で設計を完了した。

また、支承補強構造及び横変位拘束構造についても本設計では上揚力を照査項目として追加している。

10. 施工計画

本橋梁で採用した「PCケーブルによる逸脱防止構造」は、上部工と下部工を連結する装置であることから、橋脚への補強を必要とせず、施工時間に制約を受ける工事に有利である。

- ・軌道内工事は、夜間線路内作業時間(大凡1時~4時)の作業となる。
- ・軌道内に足場工等の仮設備を残置することは認められない。
- ・資材搬入は、橋上からのクレーンによる。

等の条件から施工計画を策定した。

ロックンク橋脚における施工日数は準備・後片付けを除き3か月となった。実際の日数は、これに、鉄道事業者の休電日と、2社の休電日を調整した作業日数となる。このように軌道内での作業を伴う工事では作業日、作業時間に制限を受けるため、構造的、施工性等に配慮した計画を行うことで鉄道事業者との協議が円滑に行えると考える。

あ と が き

ロックンク橋脚は基礎や橋脚をスリム化できるため、周辺制約等により十分な用地が確保できない場合等に採用されてきたと考えられる。そのため、耐震補強等の対策には施工的な制約を受ける。本設計においても橋脚両側を鉄道が通過する等、非常に厳しい施工的制約があった。鉄道内での作業は実質3時間程度であり、施工性を重視すれば単純な構造が望ましい。本設計では、施工性を重視し、合理的な設計を目標とした結果、維持管理性や経済性にも優れた構造を導き出すことができた。

国土交通省等で「完全自立構造」「半自立構造」が提案されているのは、ロックンク橋脚自体に自立性が無いことで地震時に倒壊リスクが高くなると考えられているからである。今回採用した形式は自立性が無い構造であり、国土交通省が推奨する構造とは異なる。採用にあたっては、

周辺条件や構造条件等を考慮した上で、発注者と十分に協議を行うことが必要であると考ええる。

今後、順次行われるロックンク橋脚の耐震補強設計に、本設計が一つの考え方となれば幸いである。

最後に、本稿の作成にあたり、ご指導、ご助言頂きました関係各位に深く感謝の意を示す次第である。

参考文献(または引用文献)

- 1) 国土技術政策総合研究所資料: 既設橋の耐震補強設計に関する技術資料
- 2) 国土交通省: 課題・論点に対する今後の対応(橋梁分野) p4, p5