

# 曲線半径の小さく交差条件の多い ICランプ橋の詳細設計

ばんいつき      さかいともり      はせがわりゆういち      はまなかみのる      なかもとひろふみ  
○伴乙希<sup>1</sup>・酒井友紀<sup>1</sup>・長谷川 隆 一<sup>1</sup>・濱中 実<sup>1</sup>・中元浩富<sup>1</sup>

<sup>1</sup>セントラルコンサルタント株式会社中部支社（〒460-0003 名古屋市中区錦一丁目18番22号）

静岡県的一般国道1号島田金谷バイパスの大代ICに計画されたランプ橋は、河川上に位置するとともに、現況ICランプ、国道、鉄道を跨ぎ、かつ曲線半径が $R=50\sim80\text{m}$ と小さいことが特徴である。

複数の交差条件により、既設堤防への橋脚設置が避けられず、堤体内橋脚の設置による地震時の堤防の安定性、曲線半径が小さい場合の鋼桁とコンクリート床版の合成作用の評価方法、維持管理・施工時の交差物件への配慮等が課題であった。本稿では、課題解決に向けた2次元動的FEM解析による既設堤防への影響検討・対策工法検討、3次元FEM解析による鋼桁とコンクリート床版の合成作用検証、BIM/CIMの維持管理・施工計画への活用について報告する。

**Key Words** : 曲線橋, 2次元動的FEM解析, ピアアバット, 鞘管構造, 合成作用, 簡易式, 3次元FEM解析, BIM/CIM

## 1. はじめに

静岡県島田市野田～同県掛川市左夜鹿を結ぶ一般国道1号島田金谷バイパスは、東西軸の交通需要に対して不足する交通容量を補完し、物流の効率化を図るとともに交通渋滞の解消及び交通安全性の向上・沿道環境の改善を目的に暫定2車線から完成4車線化を図る拡幅事業である。

本業務は、下り線のオンランプであるCランプ橋、オフランプであるDランプ橋、オン・オフランプを兼ねるE-2ランプ橋の詳細設計であり、E-2ランプと隣接するE-1ランプ橋は令和元年に詳細設計済みである(図-1)。

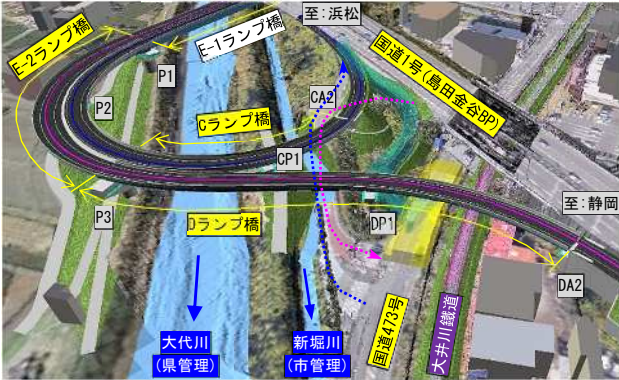


図-1 橋梁概要図

橋梁の特徴としては、表-1に示す通り、曲線半径が $50\sim80\text{m}$ と小さく、また、河川(静岡県管理・島田市管理)・道路(現況下り線ランプ、国道等)・鉄道などの複数の交差物件が存在することにより、設計において多くの制約が発生することが挙げられる。

したがって、これらの制約により既設堤体内への橋脚設置が避けられず、地震時の堤防の安定性を検証するために2次元動的FEM解析を実施した。また、曲線半径が小さく、鋼桁とコンクリート床版の合成作用を適切に評価するため、3次元FEM解析を実施した。さらに、BIM/CIMを用いて維持管理・施工計画を3次元で可視化し、設計、交差物件における関係機関協議への活用を行ったため、これらについて報告する。

表-1 橋梁諸元

| 項 目   | E-2ランプ橋                                                                                          | Cランプ橋                               | Dランプ橋                                                                           |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 橋 長   | 96.000m                                                                                          | 79.000m                             | 138.276m                                                                        |
| 支間長   | 47.000m+47.000m                                                                                  | 42.000m+35.000m                     | 76.326m+60.000m                                                                 |
| 全幅員   | 13.664m～16.589m                                                                                  | 7.996m～7.773m                       | 8.046m～6.496m                                                                   |
| 上部工形式 | 鋼2径間連続<br>非合成箱桁(RC床版)                                                                            | 鋼2径間連続<br>非合成箱桁(RC床版)               | 鋼2径間連続<br>鋼床版箱桁                                                                 |
| 下部工形式 | 張出式橋脚(P1～P3)                                                                                     | 張出式橋脚(CP1),<br>逆T式橋台(CA2)           | 張出式橋脚(DP1),<br>逆T式橋台(DA2)                                                       |
| 基礎工形式 | 直接基礎                                                                                             | 直接基礎                                | 直接基礎                                                                            |
| 平面線形  | Cランプ:<br>$A=52.937\text{m}\sim R=50.0\text{m}$<br>Dランプ:<br>$A=49.225\text{m}\sim R=57.0\text{m}$ | $R=50.0\text{m}\sim A=70.0\text{m}$ | $R=57.0\text{m}\sim A=53.0\text{m}$<br>$\sim R=80.0\text{m}\sim A=60.0\text{m}$ |
| 交差物件  | 市道<br>(右岸堤防道路, 側道)                                                                               | 大代川(静岡県),<br>新堀川(島田市),<br>左岸堤防道路    | 大代川(静岡県),<br>新堀川(島田市),<br>国道473号, 左岸堤防道路,<br>大井川鐵道                              |

## 2. ピアアバットの動的FEM解析及び鞘管計画

### (1) 検討概要

河川管理施設等構造令において、堤防内に橋脚を設置した場合、堤防と橋脚で平常時の交通振動や地震時の振動特性の違いから堤防と橋脚の接触面に隙間ができやすく、漏水の原因となることが懸念されるため、堤防内へ橋脚は設置しないことを原則としている。ただし、鞘管構造等を用いて堤防に悪影響を及ぼさない構造とし、川裏側に構造物の設置幅以上の堤防補強を併用する場合は、この限りではないとされている。河川との交差状況から、対象橋梁のP1橋脚、P3橋脚、CP1橋脚は堤防内に橋脚を設置する必要があったため、堤体内橋脚の設置による既設堤防への影響の検証、対策工の検討を目的とし、堤防と橋脚をモデル化した動的FEM解析を実施した。準拠する基準は、「河川堤防に設置するピアアバットに関するガイドライン(案)」<sup>1)</sup>(以下、ガイドライン)とする。なお、本稿では紙面の都合上、P1橋脚についてのみ示す。

### (2) 解析条件

- ・ 計算方法 : 等価線形化法(複素応答解析)
- ・ モデル : 2次元FEM(梁要素, 平面ひずみ要素, 境界要素使用)
- ・ 解析モデル : 図-2に示す。
- ・ 入力地震波 : 十勝沖地震(1968)において八戸港で観測された八戸港基盤波のNS成分の地震波を用いる。

### (3) 解析結果

#### a) 対策要否の判定

図-3に示す通り、堤体内橋脚は堤防と振動特性が異なり、地震によって堤防と橋脚が別々の挙動を示

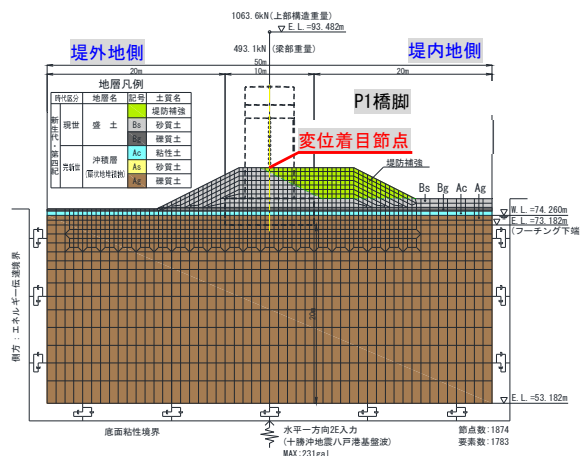


図-2 解析モデル

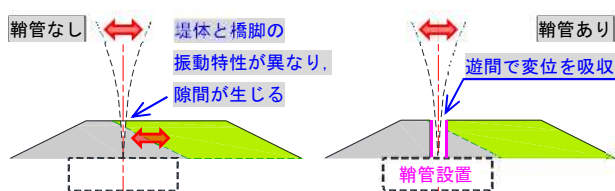


図-3 鞘管設置による挙動概要図

すことで隙間が生じ、前述した漏水等の原因となる。したがって、図-2に示す変位着目節点に着目し、堤防のみのモデルとピアアバットを設置したモデルで相対変位差を算出し、橋脚設置に伴う堤防への影響の有無を検証した。結果、最大相対変位差は2.3cmとなり、ガイドラインに示される許容変位(2.0cm)を超過するため、対策工が必要となった。(図-4, 5)

#### b) 対策効果の判定

対策工として地盤の変形に追従できる鞘管を想定し、図-6のように橋脚の梁要素と鞘管は独立して動くようにモデル化を行った。鞘管の設置により、橋脚の振動を直接堤防に伝えないようにした。

堤防のみのモデルと鞘管を設置したモデルにおいて、a)と同様に着目点の相対変位差を算出した(図-4)。結果、最大相対変位差は0.9cm(<2.0cm)となり、鞘管の設置により堤防の安定性が確保されることが示された。

#### (4) 鞘管計画

鞘管を設置したモデルで算出した結果、鞘管と橋脚の相対変位は約1.5cmであり、鞘管の施工に必要な最小遊間である10cm以下となることを確認した。また、堤体内橋脚、鞘管は非出水期施工となるため、工期短縮の観点より、プレキャストPC製とした。

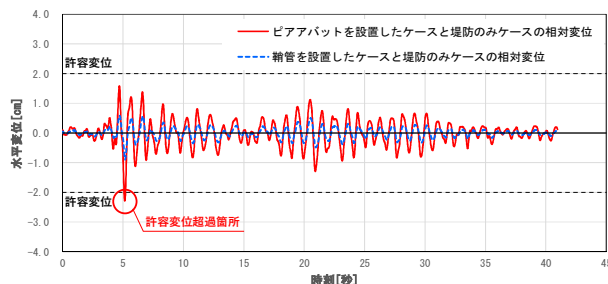


図-4 堤防のみモデルとピアアバットモデル、鞘管設置モデルの着目点の相対変位

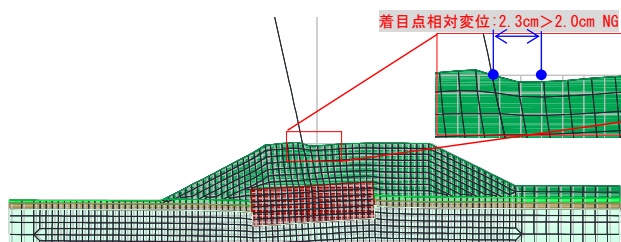


図-5 鞘管なし解析結果(変形図(変形倍率×50))

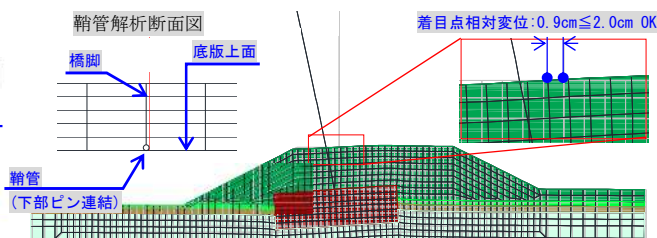


図-6 鞘管あり解析結果(変形図(変形倍率×50))

### 3. 3次元FEM解析による鋼桁とコンクリート床版の合成作用の検証

#### (1) 検証経緯・概要

平成29年に改定された「道路橋示方書・同解説Ⅱ 鋼橋・鋼部材編」<sup>2)</sup>(以下、道示)において、「コンクリート系床版を有する鋼桁の設計にあたっては、床版のコンクリートと鋼桁との合成作用を適切に考慮しなければならない」と規定された。

曲線半径の小さな橋梁を合成桁として設計すると、曲線によるねじりモーメントの影響で床版に付加的なせん断応力が発生し、ひび割れの発生が懸念されることなどから、「曲線桁設計の手引き(案)」<sup>3)</sup>(以下、手引き)において適用限界(図-7)が示されており、従来は非合成桁が採用されてきた。

手引きの適用限界は、床版コンクリートにおける①曲げに伴うせん断応力度と、②ねじりモーメントにより生じるせん断応力度の合計が許容応力度(1.1N/mm<sup>2</sup>)以下となる境界として設定されており、また、スタッドを介して床版コンクリートに伝わるせん断力をせん断流理論に基づく簡易計算(以下、簡易式)(図-8)により算出している。なお、活荷重はS55道示におけるTL-20を前提としている。

連続箱桁橋の曲線半径に応じたねじりの影響を考慮した設計手法は、「鋼道路橋設計便覧」<sup>4)</sup>に記載されており、簡易式により算出したせん断力を用いてスタッドや床版の設計をしてよいこととされている。ただし、この記載の根拠は、簡易式の適用可否について、「検証事例①：鋼単純箱桁(1箱桁, R=220m)」及び「検証事例②：鋼3径間連続細幅箱桁(2箱桁, R=200m)」を対象としたFEM解析により検証した検討結果に基づいており、本業務の対象橋梁とは支間割や曲線半径が異なる。

したがって、RC床版を有する本対象橋梁(Cランプ橋, E-2ランプ橋)に対し、3次元FEM解析にてねじりモーメントによるせん断応力度を算出し、簡易式、許容値との関係性を検証することとした。なお、本稿では紙面の都合上、Cランプ橋についてのみ示す。

Cランプ橋の断面図を図-9、平面図を図-10に示す。

#### (2) 3次元FEM解析手法

図-11に有限解析モデルを示すが、主桁を板要素、RC床版をソリッド要素、スタッドは剛バネ要素でモデル化した。荷重は死荷重とB活荷重を載荷し、解析ケースは4ケース(端支点P3と中間支点CP1のそれぞれせん断力・ねじりモーメント最大時)とした。

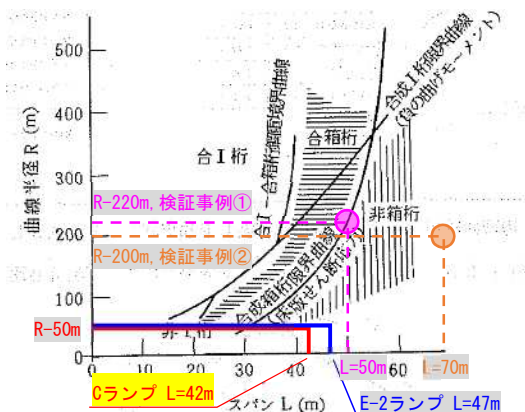


図-7 曲線合成箱桁の使用区分<sup>3)</sup>

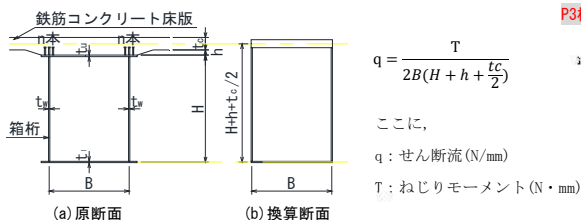


図-8 ねじりモーメントによる水平せん断流の算出

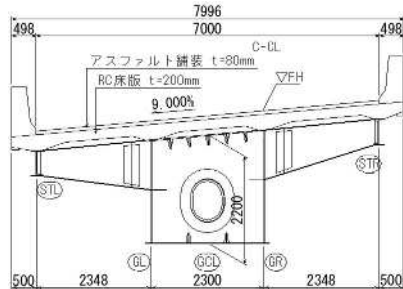


図-9 Cランプ橋断面図

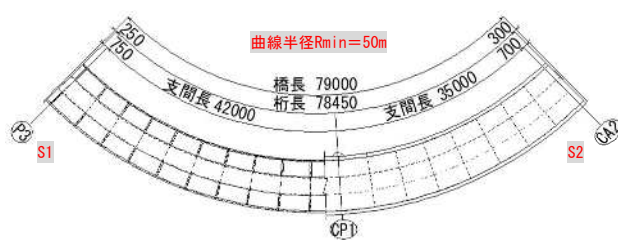


図-10 Cランプ橋平面図

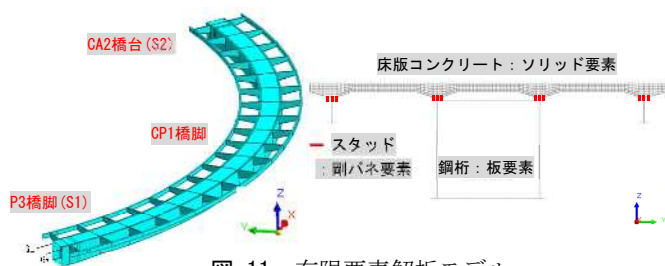


図-11 有限要素解析モデル

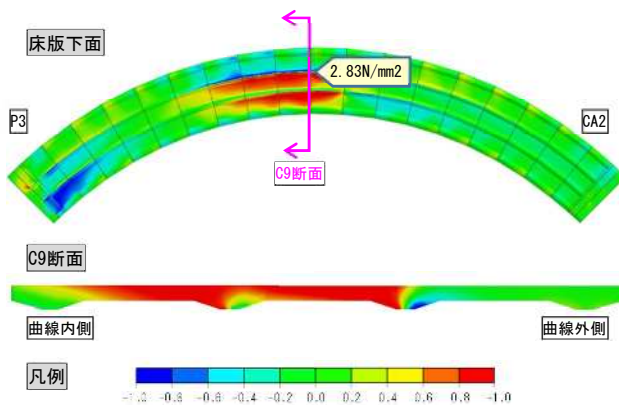


図-12 せん断応力度コンター図(CP1ねじり最大時)

### (3) 検証結果・考察

検証結果を表-2に示す。簡易式、FEM解析ともに、床版に発生するせん断応力度は制限値を超過する結果となった。簡易式にて算出したせん断応力度は床版厚方向の平均的な値であるのに対し、FEM解析にて算出したせん断応力度は局所的な応力度であるため、大きめの値が確認されたものと推測される。また、簡易式とFEM解析の結果の関係性を検証するにあたり、各計算手法において許容値が異なるため、せん断応力度と制限値の比率を整理したが、比率は異なる結果となった(2主箱桁のE-2ランプ橋も同様)。また、FEM解析にて最も大きなせん断応力度が発生した中間支点ねじりモーメント最大時(CASE4)のせん断応力度コンター図を図-12に示すが、支点部分は支点拘束によって床版のせん断応力度が卓越する結果となる。

したがって、本橋のように曲線半径が極端に小さく、手引きの合成桁の適用限界から大きく外れる橋では、床版に発生するせん断応力度の算出には簡易式を用いず、FEM解析等にて検証することが望ましい。また、合成効果の影響が大きく、床版のひび割れ発生等の問題が懸念されるため、床版に合成効果を見込むことは望ましくない。よって、本設計においては、床版への桁作用が働かないよう、スタッド間隔を粗にして合成効果は考慮しない設計とした。ただし、鋼桁の設計は道示<sup>2)</sup>に記載の通り、合成効果を考慮した設計を行っている。

表-2 Cランプ橋 床版せん断応力度の照査

|       |           | 簡易式       |       | 有限要素解析 |      |
|-------|-----------|-----------|-------|--------|------|
|       |           | ①算出値      | ②制限値  | ①解析値   | ②制限値 |
| CASE1 | 端支点せん断最大  | 張出し部 1.37 | 1.4   | 2.16   | 2.0  |
|       | 主桁上       | 2.26      | 0.978 | 1.080  |      |
| CASE2 | 端支点ねじり最大  | 張出し部 1.05 | 1.4   | 2.60   | 2.0  |
|       | 主桁上       | 2.56      | 1.812 | 1.300  |      |
| CASE3 | 中間支点せん断最大 | 張出し部 2.45 | 1.4   | 2.28   | 2.0  |
|       | 主桁上       | 1.98      | 1.829 | 1.140  |      |
| CASE4 | 中間支点ねじり最大 | 張出し部 1.99 | 1.4   | 2.83   | 2.0  |
|       | 主桁上       | 2.32      | 1.753 | 1.415  |      |
|       |           |           | 1.925 |        |      |
|       |           |           | 1.858 |        |      |

※荷重係数 $\gamma_q=1.25$ を考慮。赤字は制限値超過を示す。

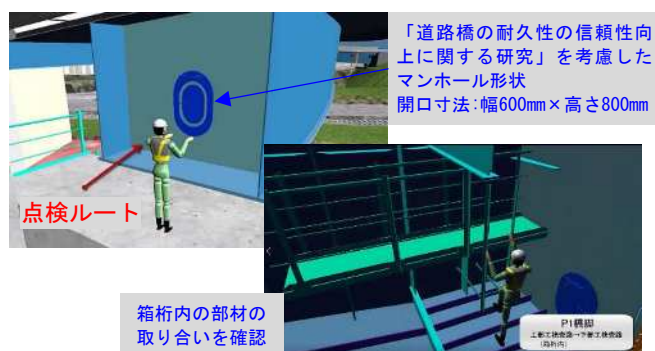


図-13 点検スペース・ルート・取合いの確認

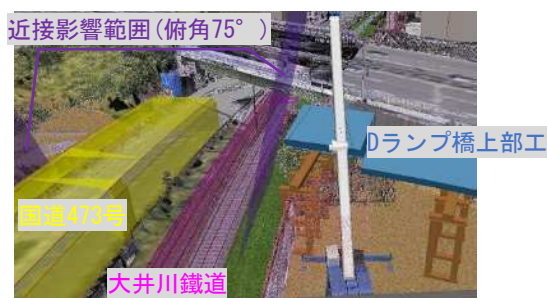


図-14 上部工架設時の近接影響範囲

## 4. BIM/CIMを活用した維持管理手法の検証, 施工計画

### (1) 維持管理手法の検証

維持管理計画として、「橋梁の長寿命化に向けた設計の手引き(案)」<sup>5)</sup>に加え、国土技術政策総合研究所の最新の研究成果である「道路橋の耐久性の信頼性向上に関する研究」<sup>6)</sup>を踏まえた細部構造の設計を行い、耐久性設計の信頼性の向上を図ることとした。具体的には、箱桁のマンホールの開口寸法を従来よりも大きく確保し、維持管理時の箱桁内部への資材搬入等の利便性や、通気性に配慮した構造とすることなどが挙げられる。さらに、これらを3Dモデルに反映し、点検スペースや点検ルート、箱桁内における部材の取合い等の確認を行った(図-13)。

### (2) 施工計画への活用

Dランプ橋は国道473号と大井川鐵道を高架する橋梁であり、施工時・維持管理時の配慮が必要であったため、上部工架設時の近接影響範囲(俯角75°)を示すことで架設ブロックとの取合いや維持管理時の建築限界と取合いについて検証した(図-14)。これにより、各管理者との協議にてBIM/CIMを活用し、早期に合意形成を図ることができた。

## 5. おわりに

本業務では、堤防と橋脚、鋼桁とコンクリート床版など、構造物の相互の特性を考慮した解析手法における解析・検証を行った。また、設計・施工・維持管理計画へのBIM/CIMの活用を行った。

特に、本稿「3.3次元FEM解析による鋼桁とコンクリート床版の合成作用の検証」においては、手引きにおける適用範囲外の条件での鋼桁とコンクリート床版の合成作用の検証を行い、適切な解析の必要性を確認できたため、曲線半径の小さな曲線橋の設計の参考となれば幸いである。

## 6. 参考文献

- 1) 日本道路公団:河川堤防に設置するピアアバットに関するガイドライン(案), 1999.
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, 2019.
- 3) 阪神高速道路公団:曲線桁設計の手引き(案), 1988.
- 4) 日本道路協会:鋼道橋設計便覧, 2020.
- 5) 国土交通省中部地方整備局道路部:橋梁の長寿命化に向けた設計の手引き(案), 2013.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 日本橋梁建設協会, プレストレストコンクリート建設業協会, 建設コンサルタント協会, 国立研究会開発法人士木研究所:共同研究報告書「道路橋の耐久性の信頼性向上に関する研究」, 国土技術政策総合研究所資料第1121号, 2020.