

## 杭基礎一体型鋼管集成橋脚を適用した連続高架橋の 地震応答特性の評価

篠原聖二<sup>1</sup>・小坂崇<sup>2</sup>・金治英貞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 博（工）阪神高速道路株式会社 技術部（大阪市中央区久太郎町 4-1-3）

<sup>2</sup>正会員 修（工）阪神高速道路株式会社 技術部（同上）

### 1. はじめに

鋼管集成橋脚とは複数本の鋼管柱を橋軸方向および橋軸直角方向に履歴型ダンパー機能を有するせん断パネルで連結した構造を有する橋脚<sup>1)</sup>である。2002 年から開発を開始した鋼管集成橋脚は、既に阪神高速道路の海老江 JCT<sup>2)</sup>や西船場 JCT<sup>3)</sup>で採用され、従来の橋脚に比べて耐震性を向上させながら、経済性や施工性の向上についても実現している。

海老江JCTや西船場JCTでは多径間連続橋を構成する複数の橋脚うちの一部に鋼管集成橋脚を適用したが、多径間連続橋のすべての橋脚に鋼管集成橋脚を適用した場合、設計上の自由度が高まり、構造の最適化による耐震性や経済性等の向上が期待される。さらに、フーチングを有しない杭基礎一体型鋼管集成橋脚<sup>4)</sup>は一般的なフーチングを有する橋脚よりもフレキシブルであり、温度変化による上部構造の伸縮に追従できるため、伸縮継手を省略することで多径間化を図ることができると考えられる。伸縮継手を省略し、連続多径間化を図ることができれば、車両が伸縮継手を通過する際の騒音や振動を無くし、

また、伸縮継手の損傷や漏水に対するメンテナンス費用の削減が期待できる。

そこで、本研究では鋼 5 径間連続橋を対象に、橋脚を RC 橋脚、鋼製橋脚、杭基礎一体型鋼管集成橋脚にした場合のそれぞれの地震応答特性を解析的に評価し耐震性を定量的に評価した。

### 2. 検討条件

一定の設計条件の下、RC橋脚案（第1案）、鋼製橋脚案（第2案）、鋼管集成橋脚案（第3案）における鋼5径間連続合成細幅箱桁橋の設計を行い、地震応答特性の評価を行った。

#### (1) 設計条件

各案のパスを図-1に、構造諸元を表-1に示す。橋梁形式は鋼5径間連続合成細幅箱桁橋、橋長は300m、支間長は5@60mとした。床版は阪神高速道路(株)らが共同研究開発した鋼床版と同等の重量でありながら、耐久性に優れた超高強度繊維補強コン

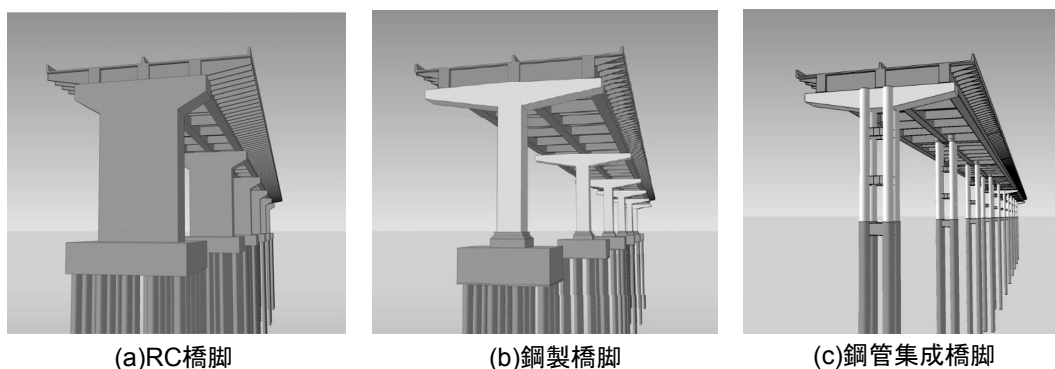


図-1 各案の連続高架橋パス

クリート床版<sup>5)</sup>(以下、UFC床版)を採用した。

支承条件については、RC 橋脚と鋼製橋脚については多点固定を、鋼管集成橋脚については剛結構造とした。ただし、鋼管集成橋脚案の両端支点については、弾性支承を設けた。

地盤条件を表-2 に示す。対象とした地盤は、III 種地盤に該当し、表層 14.6m の埋土層は液状化が生じると判定される土層のため、地盤反力係数の低減係数 DE を考慮した。基礎構造は、RC 橋脚と鋼製橋脚については、フーチングを有する鋼管ソイルセメント杭とし、鋼管集成橋脚では、フーチングを省略した杭基礎一体型鋼管集成橋脚を採用した。杭本数については、RC 橋脚案では 24 本、鋼製橋脚案では 12 本、杭基礎一体型鋼管集成橋脚では 4 本で設計が成立した。常時、レベル 1 地震動、レベル 2 地震動の一連の設計を行った 3 案の橋梁全体系の側面図と正面図を表-3 に示す。

## (2) 解析条件

比較する 3 案の解析条件を表-4 に示す。上部構造は 3 本の主桁を線形はり要素でモデル化した。橋脚は、RC 橋脚及び鋼製橋脚は M-φ 要素で、鋼管集成橋脚は鋼管集成橋脚の設計・製作・架設手引き<sup>6)</sup>(以下、手引き)に従い、材料非線形性と幾何学的

非線形性を考慮できるファイバー要素でモデル化した。基礎は、RC 橋脚及び鋼製橋脚は道路橋示方書に従い S-R ばねで、鋼管集成橋脚は手引きに従い、鋼管をファイバー要素でモデル化し、地盤ばねを分布ばねとして設けた。3 案のうち、RC 橋脚と鋼製橋

表-1 構造諸元

| 条件   | 項目                   | 単位                | 第1案<br>RC橋脚案          | 第2案<br>鋼製橋脚案 | 第3案<br>鋼管集成橋脚案 |
|------|----------------------|-------------------|-----------------------|--------------|----------------|
| 橋梁条件 | 形式                   | —                 | 鋼5径間連続合成細幅箱桁橋         |              |                |
|      | 橋長                   | —                 | 300m (5@60m)          |              |                |
|      | 幅員                   | —                 | 27m (6車線)             |              |                |
| 上部構造 | 床版                   | —                 | 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)床版 |              |                |
| 下部構造 | 支承条件                 | —                 | 固定                    | 固定           | 剛結             |
|      | 橋脚                   | —                 | RC橋脚                  | 鋼製橋脚         | 鋼管集成橋脚         |
|      | コンクリート $\sigma_{ck}$ | N/mm <sup>2</sup> | 24                    | —            | 30(充填Co)       |
| 基礎構造 | 鋼材                   | —                 | SD345                 | SM570        | SM570          |
|      | フーチング                | —                 | フーチング                 | フーチング        | —              |
|      | 杭種類                  | —                 | 鋼管ソイルセメント杭            |              |                |
|      | 杭本数                  | 本                 | 24                    | 12           | 4              |
|      | 杭径                   | mm                | 1200                  | 1200         | 1700           |
|      | 鋼管径                  | mm                | 1000                  | 1000         | 1500           |

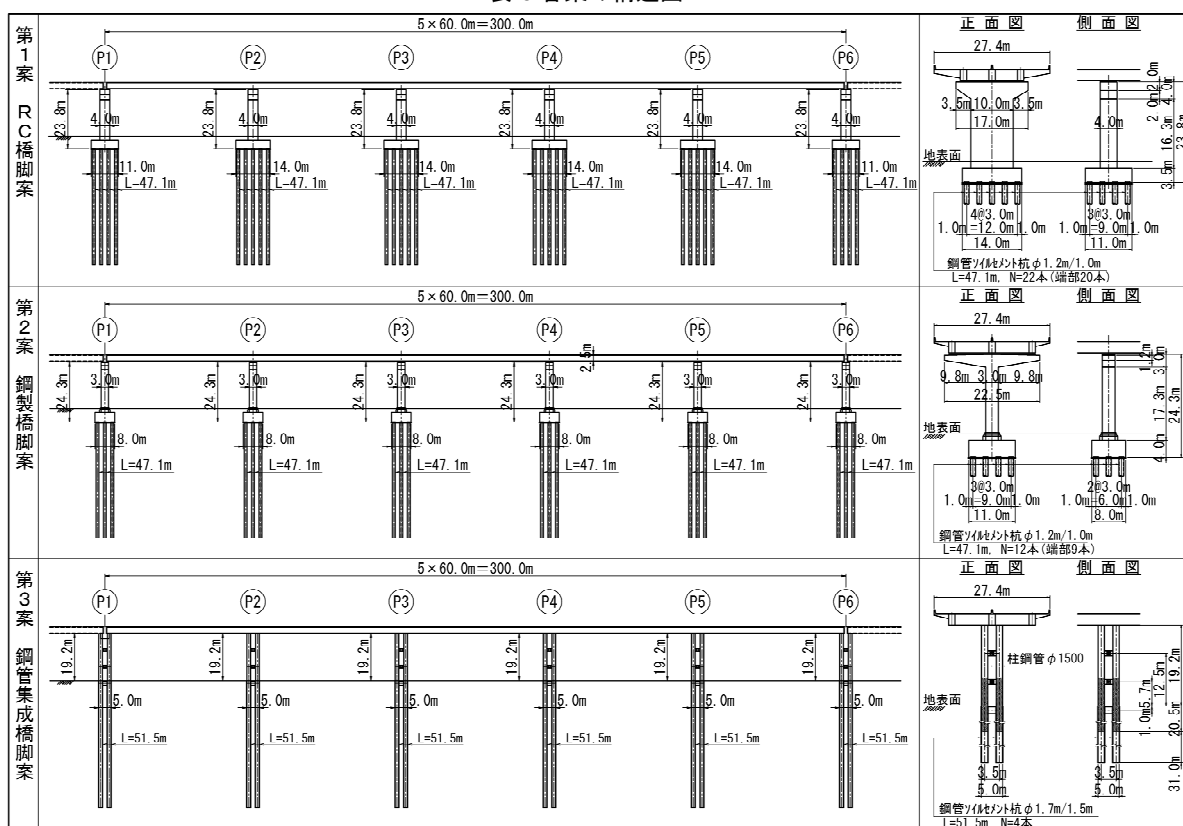
表-2 地盤条件

| 地層名       | 記号   | 層厚<br>(m) | N値<br>(回) | 単位体積重量<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 粘着力<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 内部摩擦角<br>(°) | 変形係数<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | 液状化低減係数 | L1 | L2 |
|-----------|------|-----------|-----------|--------------------------------|-----------------------------|--------------|------------------------------|---------|----|----|
| 埋土層       | B    | 14.6      | 7         | 21                             | 0                           | 38           | 19600                        | 2/3     | —  | —  |
| 粘性土層      | Ac   | 15.0      | 5         | 16                             | 66                          | 0            | 14000                        | —       | —  | —  |
| 砂質土・粘性土互層 | Asc  | 5.5       | 8         | 17                             | 0                           | 29           | 22400                        | —       | —  | —  |
| 上部洪積互層    | Dsgc | 14.6      | 32        | 20                             | 0                           | 32           | 89600                        | —       | —  | —  |

表-4 解析条件

| 構造種別 | 第1案<br>RC橋脚案 | 第2案<br>鋼製橋脚案 | 第3案<br>鋼管集成橋脚案 |
|------|--------------|--------------|----------------|
| 上部構造 | —            | 線形はり         | 線形はり           |
| 橋脚   | M-φ          | M-φ          | ファイバー          |
| 下部構造 | せん断パネル       | —            | ファイバー          |
| 地中梁  | —            | —            | ファイバー          |
| 基礎構造 | S-Rばね        | S-Rばね        | ファイバー          |

表-3 各案の構造図



脚は橋軸方向、橋軸直角方向をそれぞれ 2 次元モデルで、鋼管集成橋脚は橋軸方向、橋軸直角方向を同一の 3 次元モデルで構築した。3 案の代表として鋼管集成橋脚(第 3 案)の解析モデルを図-2 に示す。

### 3. 地震応答特性評価

#### (1) 固有値解析

3 案の振動特性を評価するために固有値解析を実施した。道路橋示方書のⅢ種地盤のレベル 2 タイプⅠ地震動、タイプⅡ地震動の標準加速度スペクトルと RC 橋脚、鋼製橋脚、および鋼管集成橋脚案の橋軸方向、橋軸直角方向のそれぞれの卓越周期を図-3、図-4 に示す。橋軸方向では、RC 橋脚案が 0.96s、鋼製橋脚案が 1.30s、鋼管集成橋脚案が 1.11s となった。鋼管集成橋脚案では、RC 橋脚案よりは卓越周期が長くなったものの、中間橋脚の支点条件が剛結であるため、鋼製橋脚よりは短くなった。

橋軸直角方向では、RC 橋脚案が 0.69s、鋼製橋脚案が 1.36s、鋼管集成橋脚案が 1.43s となった。壁式橋脚となった RC 橋脚案は、橋軸方向の卓越周期よりも短周期化し、鋼製橋脚案では、橋軸方向の固有周期と同等、鋼管集成橋脚案では、橋軸方向の固有

周期よりも長周期化した。また、橋軸直角方向における鋼製橋脚と鋼管集成橋脚の固有周期は同程度であった。

橋軸方向、橋軸直角方向ともに、3 案の卓越周期では、タイプⅡ地震動の加速度スペクトルの方が大きくなるが示された。

#### (2) 時刻歴応答解析

レベル 2 地震動に対して許容値を満足するように設計した各橋脚の荷重-変位関係を図-5 と図-6 に示す。RC 橋脚は変形能に乏しいため、許容値を満足させるために耐力を上げる必要が生じた。鋼製橋脚

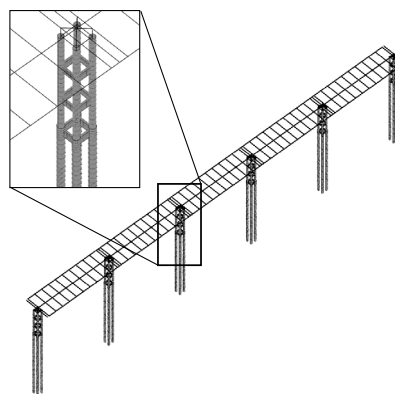


図-2 解析モデル（鋼管集成橋脚案）

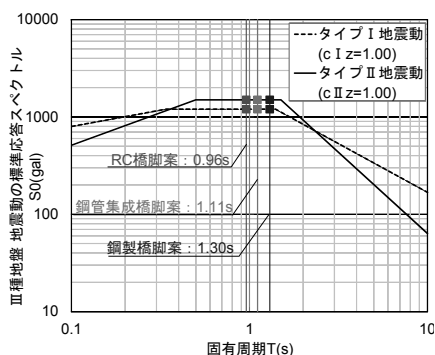


図-3 加速度応答スペクトルと卓越周期の関係（橋軸方向）

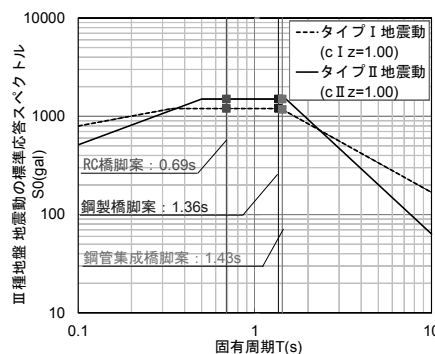


図-4 加速度応答スペクトルと卓越周期の関係（橋軸直角方向）

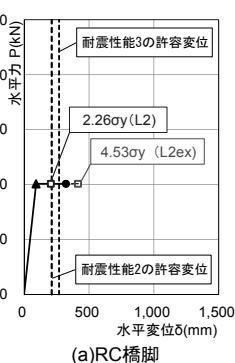


図-5 橋脚の荷重-変位関係および応答値（橋軸方向）

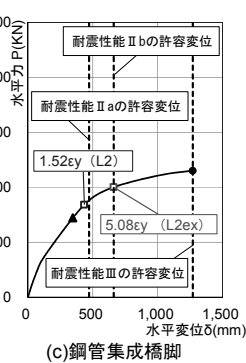
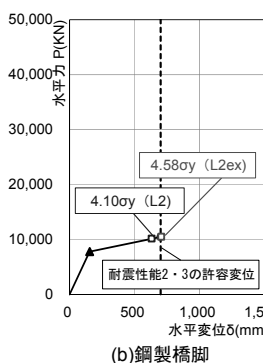


図-5 橋脚の荷重-変位関係および応答値（橋軸方向）

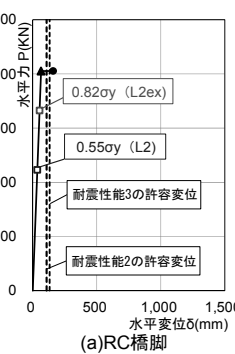


図-6 橋脚の荷重-変位関係および応答値（橋軸直角方向）

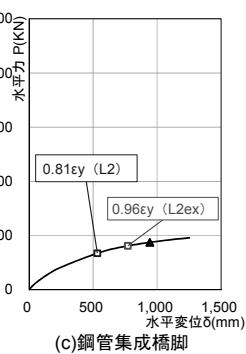
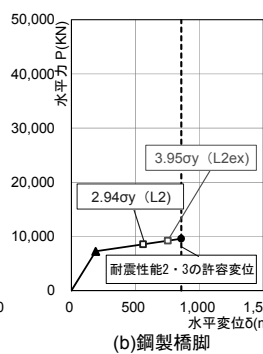


図-6 橋脚の荷重-変位関係および応答値（橋軸直角方向）

や鋼管集成橋脚は変形能に優れており、RC橋脚のように耐力を上げなくても、許容値内に収まることが示された。なお、鋼管集成橋脚の鋼管柱の許容値は、文献2)に準じ、構造弾性範囲の $2\varepsilon_y$ とした。次に3案の地震応答特性を評価するために時刻歴応答解析を実施した。入力する地震動は道路橋示方書<sup>7)</sup>のレベル2地震動（タイプII）に加え、同地震動の加速度を150%入力した超過外力地震動を橋軸方向と橋軸直角方向のそれぞれに入力した。

図-5 と図-6 の橋脚の荷重－変位関係上に、レベル 2 地震動(L2)、超過外力地震動(L2ex)を作用させた場合の応答値をプロットしたものを示す。RC 橋脚案では、橋軸方向に超過外力を入力した場合に許容値を超過したが、橋軸直角方向については、超過外力を入力しても許容値に収まる結果となった。これは、橋軸直角方向の橋脚耐力が大きいためと考えられる。鋼製橋脚案では、橋軸方向、橋軸直角方向いずれの方向においても、許容値内に収まったが、耐震性能 3 の許容値に対する余裕度は小さいことが示された。一方、鋼管集成橋脚案では、レベル 2 地震動に対して、橋軸方向、橋軸直角方向ともに道示の耐震性能 2 よりも高い性能に相当する耐震性能 IIa に相当する許容ひずみ  $2\varepsilon_y$  以内に収まっている。さらに超過外力に対しても、橋軸方向では道示の耐震性能 2 に相当する耐震性能 IIb の許容ひずみ  $5\varepsilon_y$  程度に、橋軸直角方向では弾性範囲内に収まっており、かつ、終局に対して余裕を有していることが示され

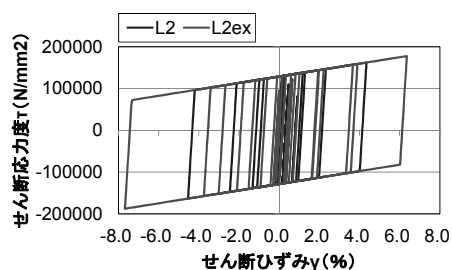
た。

### (3) セン断パネルの応答

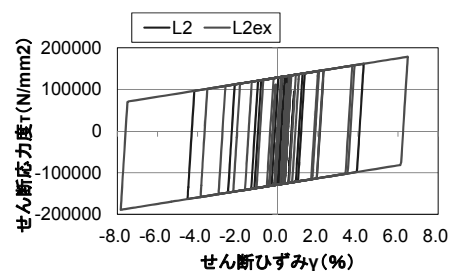
鋼管集成橋脚案のせん断パネルのせん断応力度－せん断ひずみ関係の応答履歴を図-7、図-8 に示す。橋軸方向については、上段、下段ともに、せん断パネルの応答値が、レベル 2 地震動で 4%程度、超過外力地震動で 8%と効果的に機能していることが示された。せん断パネルのエネルギー吸収により、橋脚の応答を抑制できたと考えられる。一方、橋軸直角方向については、上段、下段ともに、せん断パネルの応答値が、レベル 2 地震動で 2%程度、超過外力地震動で 3%と橋軸方向ほど機能していないことが示された。

### (4) 最大応答時の変形モード

鋼管集成橋脚案において、橋脚天端の変位が最大となった場合のひずみコンター図を図-9、図-10 に示す。橋軸方向については、橋脚の変形が SWAY モードになっており、鋼管間に相対変位が生じるため、せん断パネルが効果的に機能することがわかる。一方、橋軸直角方向については、Cantilever モードになっており、鋼管間に大きな相対変位が生じないため、せん断パネルが橋軸方向ほど機能していないことがわかる。

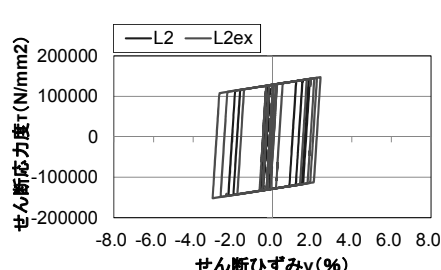


(a)上段

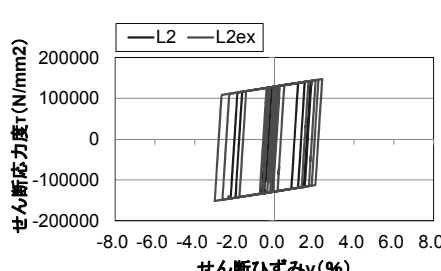


(b)下段

図-7 セン断パネルのせん断応力度－せん断ひずみの関係（橋軸方向）



(a)上段



(b)下段

図-8 セン断パネルのせん断応力度－せん断ひずみの関係（橋軸直角方向）

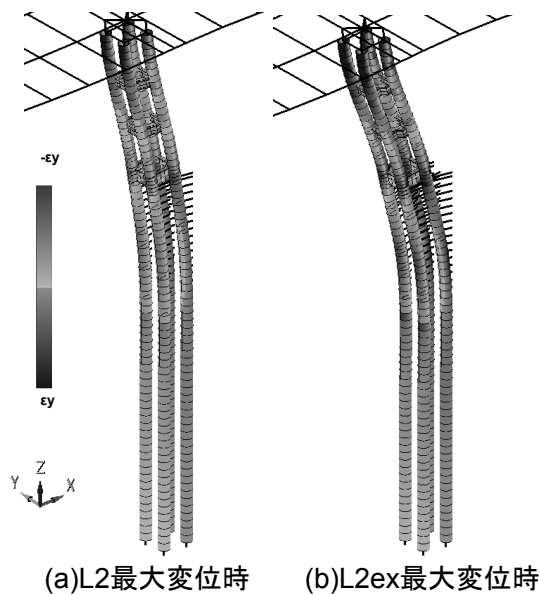


図-9 最大変位時のひずみコンター図（橋軸方向）

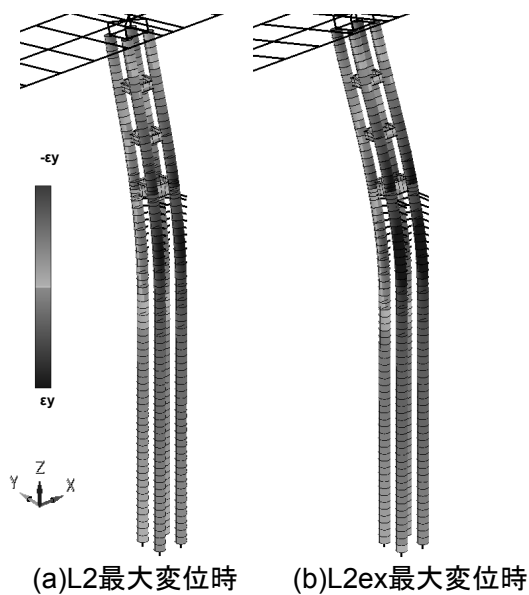


図-10 最大変位時のひずみコンター図（橋軸直角方向）

#### 4. 結論

本検討では、レベル 2 地震動に対して許容値を満足するように設計した RC 橋脚、鋼製橋脚、杭基礎一体型鋼管集成橋脚に支持される連続高架橋に対して、レベル 2 地震動を上回る超過外力を入力し、各構造案の地震応答特性を比較することで、杭基礎一体型鋼管集成橋脚の耐震性を評価した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 固有値解析の結果、橋軸、橋軸直角方向ともに RC 橋脚案が卓越周期が短い結果となった。鋼管集成橋脚案の卓越周期は、橋軸方向では鋼製橋脚案よりも短く、橋軸直角方向では、鋼製橋脚案と同等であることが示された。
- (2) レベル 2 地震動に対して設計を行った結果、RC 橋脚は耐力が大きく、変形能が乏しい構造となったのに対して、鋼管集成橋脚は RC 橋脚に比べて耐力は小さいものの、変形能に優れた構造となった。
- (3) 超過外力を入力した結果、RC 橋脚案では、許容値を満足しないケースがあったが、鋼管集成橋脚案では、道示の耐震性能 2 に相当する耐震性能 IIb の許容値程度に収まり、かつ、鋼製橋脚よりも、終局に対して余裕を有していることが示された。
- (4) 鋼管集成橋脚案については、特に橋軸方向については、橋脚の変形が SWAY モードであるため、せん断パネルが効果的に機能し、せん断パネル

のエネルギー吸収により、橋脚の応答を抑制できたと考えられる。橋軸直角方向については、橋脚の変形が Cantilever モードであるため、橋軸直角方向ほどせん断パネルが機能していないことが示された。

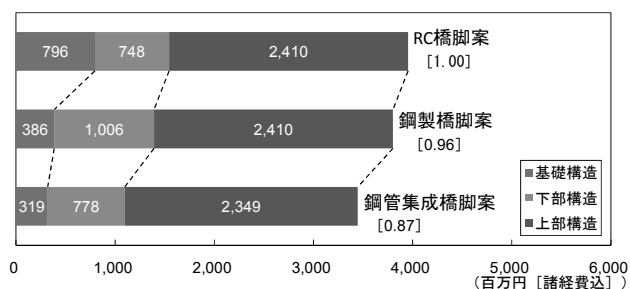
#### 付録

##### (1) 経済性比較

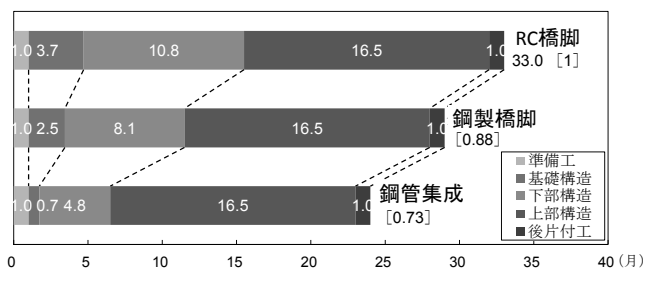
各案の概算工事費を付図-1 に示す。RC 橋脚案に対して、鋼管集成橋脚案は 13% 工事費を縮減できる可能性が示された。これは、RC 橋脚案と比べて、上部構造、下部構造の工事費は同等であるが、基礎構造の工事費が 1/2 以下になっているためである。

##### (2) 工期比較

各案の概算工期を付図-2 に示す。ここで、架橋位置は、桁下を施工ヤードとして利用できることを想定し、上部構造の架設方法はトラッククレーン・ベント工法を採用している。また、下部構造、基礎構造の施工時掘削には、土留め構造を用いるものとした。施工は P1 橋脚から開始し、1 基の基礎構造の施工が終わり次第、次の橋脚の施工を開始する条件とした。鋼管集成橋脚案は、基礎構造の施工日数を他案の半分程度に短縮することができることから、全体で 5 カ月程度工期を短縮することができる。なお、鋼管集成橋脚の架設は、海老江 JCT の PD4 橋脚同様、単材架設としているが、地組みによる一括架設が出来れば、さらなる工期の短縮が期待される。



付図-1 概算工事費の比較



付図-2 概算工期の比較

## 参考文献

- 1) 金治英貞，鈴木英之，野中哲也，馬越一也：履歴型ダンパー付鋼管集成橋脚の損傷制御構造に関する基礎的研究，構造工学論文集，(公社)土木学会，Vol.50A，pp.559-566，2004.
- 2) 篠原聖二，金治英貞，小坂崇，杉山裕樹，津丸徳宏，鳥越卓志：鋼管集成橋脚の技術コンセプトと構造設計，橋梁と基礎，Vol.48，pp.31-36，2014.2.
- 3) 谷口惺，堀岡良則，杉山裕樹：西船場 JCT における既設橋梁拡幅部の耐震設計，第 18 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，pp.295-298，

2015.7.

- 4) 篠原聖二，金治英貞，鬼木浩二，木村亮：杭基礎一体型鋼管集成橋脚の構造提案と地震時応答解析，土木学会論文集 C (地圏工学)，(公社)土木学会，Vol.69，No.3，pp.312-325，2013.7.
- 5) 一宮利通，金治英貞，小坂崇，齋藤公生：鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版の開発，プレストレストコンクリート，Vol.56，No.1，Jan.2014.
- 6) 阪神高速道路(株)：鋼管集成橋脚の設計・製作・架設手引き，2015.6.
- 7) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.3.