

防災・減災の強化に向けた更なる耐震補強報告  
一柱状体基礎構造の耐震性能照査一

(株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 ○熊坂徹也, 審良郁夫, 宮内 健, 青木康徳  
東日本高速道路(株) 館岡真二, 北浦美涼, 三枝俊章, 田中周治

1. はじめに

高速道路では、地震によって被災しても速やかな復旧により緊急輸送路として機能させることが求められており、東日本高速道路株式会社では「更なる耐震補強」(平成 28 年熊本地震以降に実施する既設橋の耐震補強)に取り組むことで防災・減災に向けた耐震補強を実施している。本稿では、「更なる耐震補強」対象橋梁のうち、ケーソン基礎や大口径深礎杭の柱状体基礎に対して、FEM 非線形解析を用いて耐震性能を照査した結果を報告するものである。

2. 対象橋梁の諸元

対象橋梁の側面図、橋脚断面図を図-1, 2 に示す。対象橋梁①にはケーソン基礎が、対象橋梁②には大口径深礎杭が採用されており、各々の橋梁における検討対象橋脚の諸元を以下に示す。

対象橋梁①

- ・上部工形式：鋼 4+4+3 径間連続鈑桁橋
- ・橋脚形式：(P3, P4) RC 張出式小判型橋脚
- ・基礎工形式：(P3, P4) ケーソン基礎 φ7000
- ・竣工年：昭和 62 年(昭和 55 年道示)
- ・地盤条件：N 値 10 程度の砂質土、粘性土層が 20m 程度堆積し、支持層は岩盤となる。Ⅱ種地盤。

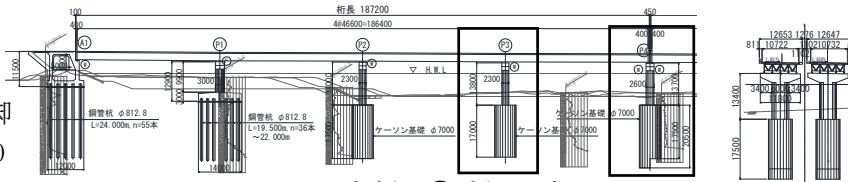


図-1 対象橋梁① 橋梁一般図

対象橋梁②

- ・上部工形式：鋼 3 径間連続トラス桁+鈑桁橋
- ・橋脚形式：(P2) RC 張出式円柱橋脚
- ・基礎工形式：(P2) 深礎杭 φ3000
- ・竣工年：平成 10 年(平成 2 年道示)
- ・地盤条件：A1, P1 付近には表層に土砂が堆積し、岩盤(硬岩)が浅層から分布する。Ⅰ種地盤。

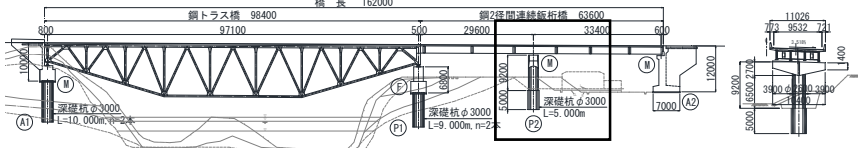


図-2 対象橋梁② 橋梁一般図

3. 既設橋基礎構造の現況照査結果

平成 8 年以前の道路橋示方書で設計されたケーソン基礎は、現行の水準に比べ鉛直方向鉄筋量が少なく、現在の設計手法で照査した場合、ほとんどの基礎構造が既存不適格となる。しかしながら、これまでにケーソン基礎の損傷に伴って下部構造に顕著な残留変位が生じた例は少なく、周辺地盤が安定して存在する場合は、大規模地震時中にも直ちに不安定とはならない可能性が高い。

「更なる耐震補強」においては、基礎の安全性の判定におけるレベル 2 地震動に対する限界値は、強度保持が可能な点(終局点(損傷度Ⅳ))としているが、対象橋梁においても柱状体基礎の耐震性能照査の結果、表-1, 2 に示すとおり、いずれの基礎構造も安定照査では許容値を満足するが、部材照査では許容値を超過する部材が確認された。しかし、ケーソン基礎等の補強は困難であり、大規模になる可能性も高い。そこで、周辺地盤を適切に評価し、地盤の塑性化や材料の非線形特性を考慮した FEM 解析により、柱状体基礎の耐震性能の照査を実施することとした。

表-1 対象橋梁①の基礎構造現況照査結果

| 橋脚別     | 照査方向      | P3(下り側)-現況照査    |                 |                 |                 | P4(下り側)-現況照査    |                 |                 |                 |
|---------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|         |           | タイプⅠ            | タイプⅡ            | タイプⅠ            | タイプⅡ            | タイプⅠ            | タイプⅡ            | タイプⅠ            | タイプⅡ            |
| 基礎の耐力性能 | 地盤間の水平変位  | 0.45            | 0.70            | 0.45            | 0.70            | 0.45            | 0.70            | 0.45            | 0.70            |
|         | 最大曲げモーメント | 42408 ≤ 97225   | 44428 ≤ 97225   | 68910 ≤ 94797   | 68958 ≤ 94797   | 36358 ≤ 97847   | 36378 ≤ 97847   | 53538 ≤ 90447   | 53866 ≤ 90447   |
|         | 基礎の応変率    | 基礎は照査しない        | 基礎は照査しない        | 基礎は照査しない        | 基礎は照査しない        | 基礎は照査しない        | 基礎は照査しない        | 基礎は照査しない        | 基礎は照査しない        |
|         | 基礎の応変率    | 0.0 < 0.00      | 0.0 < 0.00      | 2.8 < 6.00      | 4.4 < 6.00      | 0.0 < 6.00      | 0.0 < 6.00      | 0.0 < 6.00      | 0.0 < 6.00      |
|         | 前面塑性率     | 前面塑性率が 80%に達しない | 前面塑性率が 80%に達しない | 前面塑性率が 80%に達しない | 前面塑性率が 80%に達しない | 前面塑性率が 80%に達しない | 前面塑性率が 80%に達しない | 前面塑性率が 80%に達しない | 前面塑性率が 80%に達しない |
|         | 後面塑性率     | 後面塑性率が 80%に達しない | 後面塑性率が 80%に達しない | 後面塑性率が 80%に達しない | 後面塑性率が 80%に達しない | 後面塑性率が 80%に達しない | 後面塑性率が 80%に達しない | 後面塑性率が 80%に達しない | 後面塑性率が 80%に達しない |
|         | 底面塑性率     | 底面塑性率が 80%に達しない | 底面塑性率が 80%に達しない | 底面塑性率が 80%に達しない | 底面塑性率が 80%に達しない | 底面塑性率が 80%に達しない | 底面塑性率が 80%に達しない | 底面塑性率が 80%に達しない | 底面塑性率が 80%に達しない |
|         | 水平変位      | -168 ≤ -238     | -178 ≤ -240     | -153 ≤ -234     | -151 ≤ -234     | -107 ≤ -210     | -104 ≤ -209     | -83 ≤ -204      | -85 ≤ -204      |
|         | 鉛直変位      | 152 ≤ 157       | 152 ≤ 157       | 136 ≤ 158       | 134 ≤ 158       | 95 ≤ 157        | 93 ≤ 158        | 73 ≤ 159        | 74 ≤ 159        |
|         | 鉛直変位      | 122 ≤ 428       | 127 ≤ 428       | 114 ≤ 428       | 113 ≤ 428       | 80 ≤ 428        | 78 ≤ 428        | 61 ≤ 286        | 59 ≤ 281        |
| 部材の耐力性能 | せん断耐力     | 4308 ≤ 8109     | 4236 ≤ 8108     | 6578 ≤ 7083     | 6570 ≤ 7080     | 2973 ≤ 8109     | 3004 ≤ 8109     | 4541 ≤ 8109     | 4382 ≤ 8109     |
|         | せん断耐力     | -2881 ≤ -15812  | -2881 ≤ -15812  | -824 ≤ -3465    | -818 ≤ -3465    | -2311 ≤ -12291  | -2330 ≤ -12291  | -684 ≤ -2621    | -623 ≤ -2621    |
|         | せん断耐力     | 12381 ≤ 35945   | 12381 ≤ 35945   | 1769 ≤ 8489     | 1751 ≤ 8489     | 8638 ≤ 28878    | 8457 ≤ 28878    | 1587 ≤ 6646     | 1526 ≤ 6646     |
|         | せん断耐力     | -713 ≤ -1098    | -734 ≤ -1098    | -1008 ≤ -1098   | -1008 ≤ -1098   | -604 ≤ -1098    | -604 ≤ -1098    | -842 ≤ -1098    | -818 ≤ -1098    |
|         | せん断耐力     | 43608 ≤ 60261   | 45505 ≤ 60261   | 70117 > 60261   | 74682 > 60261   | 38675 ≤ 52488   | 38440 ≤ 52488   | 56888 > 64646   | 67088 > 64646   |
|         | せん断耐力     | -2881 ≤ -15812  | -2881 ≤ -15812  | -824 ≤ -3465    | -818 ≤ -3465    | -2311 ≤ -12291  | -2330 ≤ -12291  | -684 ≤ -2621    | -623 ≤ -2621    |
|         | せん断耐力     | 12381 ≤ 35945   | 12381 ≤ 35945   | 1769 ≤ 8489     | 1751 ≤ 8489     | 8638 ≤ 28878    | 8457 ≤ 28878    | 1587 ≤ 6646     | 1526 ≤ 6646     |
|         | せん断耐力     | -713 ≤ -1098    | -734 ≤ -1098    | -1008 ≤ -1098   | -1008 ≤ -1098   | -604 ≤ -1098    | -604 ≤ -1098    | -842 ≤ -1098    | -818 ≤ -1098    |
|         | せん断耐力     | 43608 ≤ 60261   | 45505 ≤ 60261   | 70117 > 60261   | 74682 > 60261   | 38675 ≤ 52488   | 38440 ≤ 52488   | 56888 > 64646   | 67088 > 64646   |
|         | せん断耐力     | -2881 ≤ -15812  | -2881 ≤ -15812  | -824 ≤ -3465    | -818 ≤ -3465    | -2311 ≤ -12291  | -2330 ≤ -12291  | -684 ≤ -2621    | -623 ≤ -2621    |
|         | せん断耐力     | 12381 ≤ 35945   | 12381 ≤ 35945   | 1769 ≤ 8489     | 1751 ≤ 8489     | 8638 ≤ 28878    | 8457 ≤ 28878    | 1587 ≤ 6646     | 1526 ≤ 6646     |

表-2 対象橋梁②の基礎構造現況照査結果

| 橋脚別     | 照査方向     | 橋脚方向(引-圧) |       |       |       | 逆方向(引-圧) |       |       |       |
|---------|----------|-----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
|         |          | タイプⅠ      | タイプⅡ  | タイプⅠ  | タイプⅡ  | タイプⅠ     | タイプⅡ  | タイプⅠ  | タイプⅡ  |
| 基礎の耐力性能 | 地盤間の水平変位 | PN (kN)   | 7614  | 7844  | 7763  | 7807     | 7878  | 7520  | 7837  |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 53014 | 53014 | 53014 | 53014    | 53014 | 53014 | 53014 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 0.144 | 0.148 | 0.148 | 0.147    | 0.148 | 0.148 | 0.148 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 0.144 | 0.148 | 0.148 | 0.147    | 0.148 | 0.148 | 0.148 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 0.144 | 0.148 | 0.148 | 0.147    | 0.148 | 0.148 | 0.148 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 0.144 | 0.148 | 0.148 | 0.147    | 0.148 | 0.148 | 0.148 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 0.144 | 0.148 | 0.148 | 0.147    | 0.148 | 0.148 | 0.148 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 0.144 | 0.148 | 0.148 | 0.147    | 0.148 | 0.148 | 0.148 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 0.144 | 0.148 | 0.148 | 0.147    | 0.148 | 0.148 | 0.148 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 0.144 | 0.148 | 0.148 | 0.147    | 0.148 | 0.148 | 0.148 |
| 部材の耐力性能 | せん断耐力    | PN (kN)   | 20824 | 17586 | 17811 | 17759    | 15013 | 18940 | 19584 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 17189 | 17409 | 17331 | 17373    | 17439 | 17089 | 17402 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |
|         | せん断耐力    | PN (kN)   | 1.211 | 1.010 | 1.028 | 1.022    | 1.107 | 1.108 | 1.125 |

キーワード ケーソン基礎, 深礎杭, 耐震補強, FEM 非線形解析, 鋼連続鈑桁, トラス桁  
連絡先 980-0811 仙台市青葉区一番町 4 丁目 6-1 (株)オリエンタルコンサルタンツ東北支社 TEL022-215-5625

### 3. 解析モデルとFEM解析による耐震性能照査

#### (1) 解析モデル

モデル図を図-3に示す。FEMによる検証は、対象橋梁①のケーソン基礎において制限値の超過が最大であった上り線P4橋脚（橋軸方向）と下り線P3橋脚（橋軸直角方向）の2ケースと、対象橋梁②の深礎杭の合計3ケースについて実施した。なお、本検討で用いたFEM解析プログラムは、コンクリート系構造物を対象として、外力を受けた場合の挙動を材料レベルの構成則に基づき、コンクリートのひび割れや圧壊、鉄筋の降伏を考慮して詳細にシミュレートすることが可能なFEM非線形解析用プログラム「FINAL」とした。橋脚、基礎工は全てソリッド要素でモデル化し、橋梁全体系の動的解析にて得られた最大反力を外力として作用させ、各部材の応力性状を把握した。

#### (2) 基礎構造の耐震性能照査

対象橋脚のFEM解析による照査結果を表3, 4, 5に示す。

検証の結果、表-3, 4に示す通り、ケーソン基礎においては、従来の照査方法では側壁水平方向鉄筋および頂版連結部の曲げ耐力が不足していたが、側壁部においては外面で最大 $\sigma_c = 2.23 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ となり、ひび割れが生じる程度の引張応力が発生する結果となった。また、側壁水平方向の曲げ照査においても、内側鉄筋の引張応力度が最大 $\sigma_s = 115 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ 程度となり、いずれの作用方向においても降伏には至らず、耐震性能を満足する結果となった。また、深礎杭については、従来の照査方法においては、杭頭位置およびせん断力最大発生位置においてせん断耐力が不足していたが、FEM解析の結果、表-5に示す通り、杭頭付近でひび割れは発生するものの、せん断補強鉄筋の引張応力度は最大で $\sigma_s = 268 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ となり、軸方向鉄筋、せん断補強鉄筋は降伏耐力を超過せず、制限値以内となる結果となった。

以上の結果より、各柱状体基礎構造は、FEM非線形解析により耐震性能2が確保されていることが確認できた。

#### 4. まとめ

本照査において、従来の照査方法では耐震性能を満足しない柱状体基礎構造の複数の部材に対し、周辺地盤を適切に評価した非線形FEM解析により、耐震性能を満足でき結果として基礎構造の補強が不要となり、補強コストも大幅に低減することができた。FEM解析による柱状体基礎構造の耐震性能照査は、本稿で紹介した基礎以外にも数多く実施されているため、これらの検証結果を分析、地盤条件や構造条件等を考慮し、耐震性能の傾向を把握することで、今後の耐震補強や優先順位の目安になり得る基礎資料となるものと考える。

**謝辞：**本耐震検討を進めるにあたり、協働いただきました東日本高速道路(株)東北支社やいわき管理事務所の方々へ厚く御礼を申し上げ、感謝の意を表します。

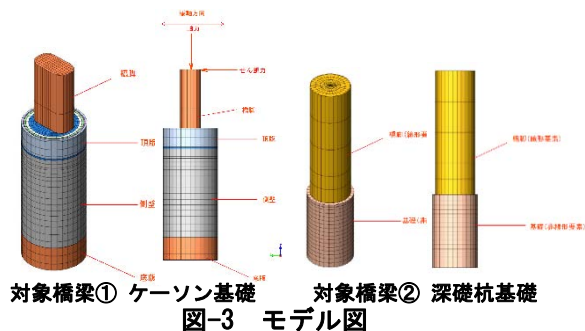


表-3 対象橋梁①P4橋脚の検証結果

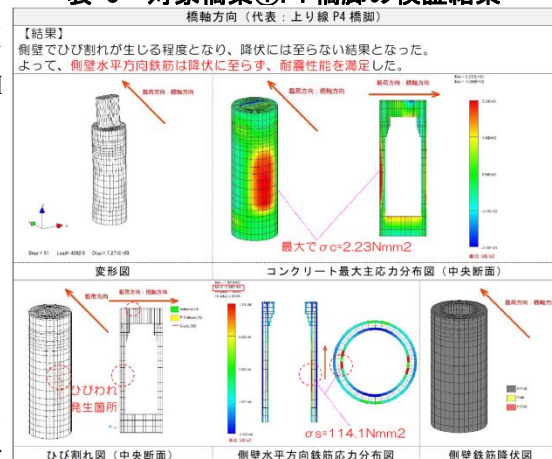


表-4 対象橋梁①P3橋脚の検証結果

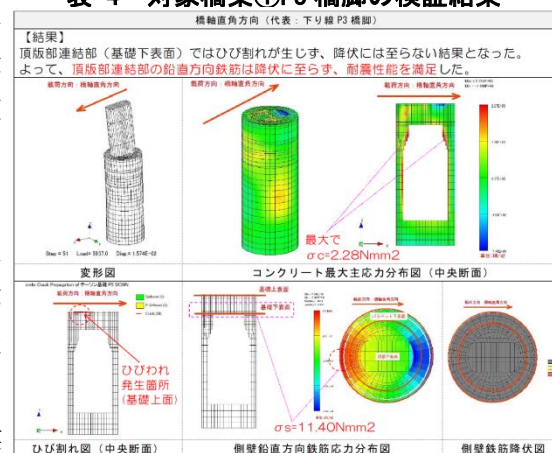
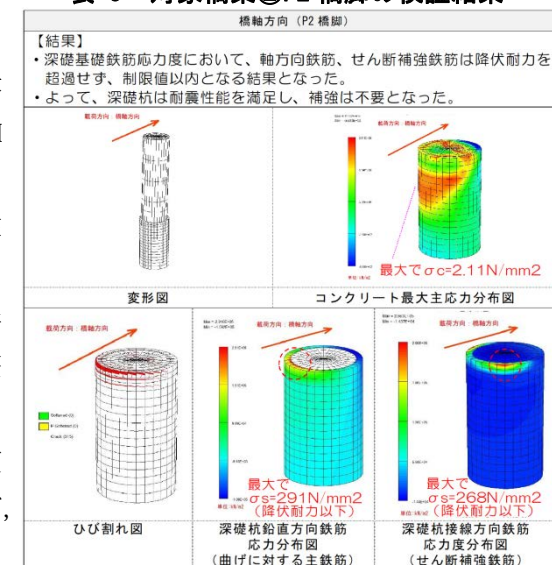


表-5 対象橋梁②P2橋脚の検証結果



【参考文献】1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，平成24年3月

2) 土木研究所：土木研究所資料既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究，平成22年5月

3) 土木研究所：既設ケーソン基礎の耐荷力に関する模型実験，土木技術資料52-5（2010）