

建設後 50 年経過した都市高速道路鋼製基礎の耐震補強 — 湊町・難波地区鋼製基礎大規模更新工事 —

Seismic Reinforcement of Urban Expressway Steel Foundations 50 Years after Construction — Approach in the Large-scale Renewal Project at Minatomachi-Namba District —

永井 久徳*
Hisanori Nagai

内川 裕也*
Yuya Uchikawa

富留宮 直*
Tadashi Furumiya

要旨

阪神高速 15 号堺線の湊町付近は、地下街や鉄道が存在する地下函体上に高速道路の橋梁基礎が設置されている。そのため、建設当時、地下函体への荷重軽減を目的として 9 基の鋼製基礎が採用されている。建設から 50 年経過し、地下水利用状況の変化などによって建設当時よりも付近の地下水位が上昇した影響で、空洞となっている鋼製基礎内部に滞水が確認され腐食が問題視されてきた。この問題を解決するため、2021 年 5 月より阪神高速道路の大規模更新事業の一つとして、これらの鋼製基礎に対して、抜本的な止水対策の実施に合わせて、基礎本体の防食や支承などの取替え、維持管理性・耐震性の向上が可能な構造への改築を目的とした更新工事を実施している。本報告では、このうち既設鋼製基礎の耐震性向上のために実施した耐震性能照査および耐震補強検討について報告する。

キーワード：鋼製基礎 耐震補強 非線形動的解析 非線形静的有限変位解析

1. はじめに

阪神高速 15 号堺線湊町付近は、地下街や鉄道が存在する地下函体上に高速道路の橋梁基礎が設置された特異な構造となっている（図 1）。高速道路の荷重は橋梁基礎の支承を介して地下函体の側壁または中柱に直接伝達される構造であるため、地下函体への荷重軽減を目的として 9 基の鋼製基礎が採用されている（図 2）。建設後 50 年経過し、地下水利用状況の変化などによって建設当時よりも付近の地下水位が上昇した影響で、空洞となっている鋼製基礎内部に滞水が確認され腐食が問題視されてきた。これまでは最小限の施工規模で対策可能なアルミニウム溶射や電気防食などの補修が行われてきたが、抜本的な対策にはなっていない。そのため、2021 年 5 月より阪神高速道路の大規模

更新事業の一つとして、これらの鋼製基礎に対して、抜本的な止水対策の実施に合わせて、基礎本体の防食や支承などの取替え、維持管理性・耐震性の向上が可能な構造への改築を目的とした更新工事（技術提案交渉方式のうち設計交渉・施工タイプによる発注）を実施している。本報告では、このうち既設鋼製基礎の耐震性向上のために実施した耐震性能照査および耐震補強検討について報告する。

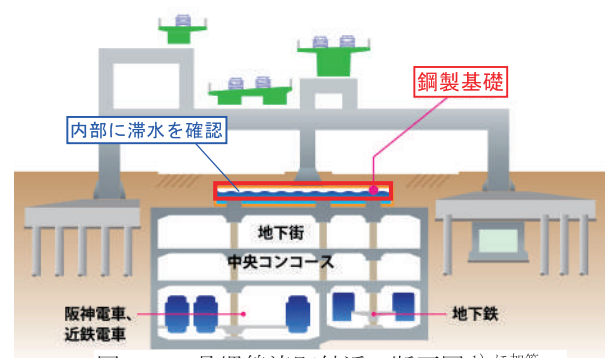


図 1 15 号堺線湊町付近の断面図 1) に加筆

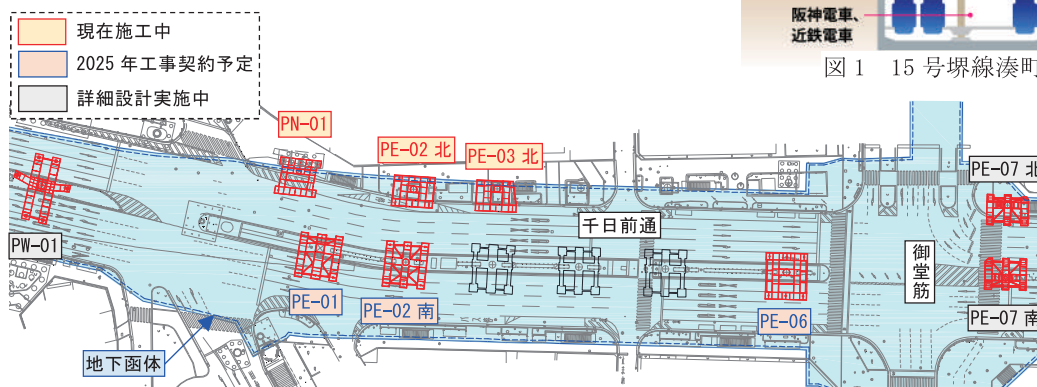


図 2 15 号堺線湊町付近の全体位置図（赤色の基礎が鋼製基礎）

*1 技術本部 土木技術部

*2 大阪本店 土木部

2. 更新工事内容

鋼製基礎既設構造のイメージを図3に示す。また、鋼製基礎内部の腐食状況を図4に示す。鋼製基礎は見た目の腐食が激しいものの減肉はほとんどしておらず、概ね建設当時の板厚を有していることが調査によって判明している。

更新の基本方針は以下の通りであった。

- ・止水対策や防食対策により所要の耐久性を確保し、将来的にも維持管理が適切に実施できるよう構造改築することによる「永続性」の確保
- ・耐震性について「最新基準への適合」

図5にPN-01における現状の平面図・断面図を、図6に更新後の平面図・断面図を示す。

更新後の構造では維持管理用ボックスカルバートを鋼製基礎の側面および上面に設置し遮水壁とする。この維持管理用ボックスカルバートは、地下函体に直接支持させる構造とはせず、鋼製基礎に支持させて鋼製基礎の支承を介して地下函体に荷重を伝達する構造である。そのため、地下函体との接続部においては、地下水の浸入を防止することを目的に可とう伸縮継手を設置する。維持管理用ボックスカルバートと鋼製基礎との間の空間は、「点検およびブラストや金属溶射等の補修が可能となる維持管理空間」として利用できる構造とすることで、止水性および維持管理性の向上を図る。

次に、防食対策は、長期耐久性の確保も兼ね、鋼材の内面および外面はブラストし金属溶射または重防食塗装を行う。さらに、最新基準へ適合させるため、各鋼製基礎に対して現行基準（H29 年道路橋示方書）での耐震性能照査を行い、必要に応じて耐震補強を実施する。

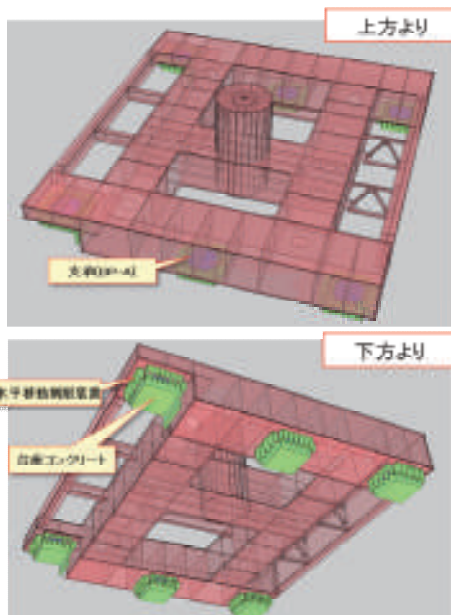
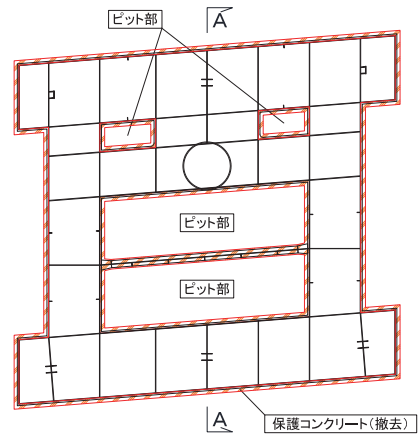


図3 鋼製基礎のイメージ (PE-06) ²⁾



図4 鋼製基礎内部の腐食状況

平面図



A-A断面

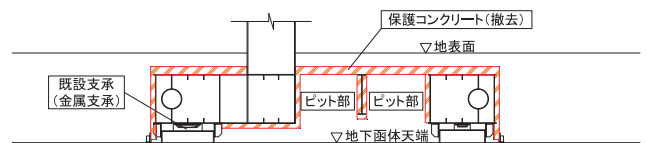
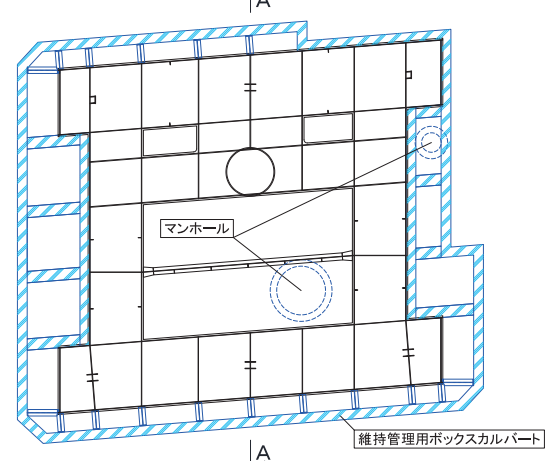


図5 現状の鋼製基礎平面図および断面図 (PN-01)

平面図



A-A断面

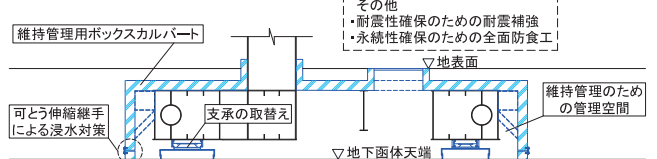


図6 更新後の鋼製基礎平面図および断面図 (PN-01)

3. 耐震性能照査方法

3.1 照査方法

鋼製基礎の耐震性能照査は、地下函体より上方を対象として、2段階で地震時の挙動の評価を行うものとした。

はじめに、鋼製基礎および維持管理用ボックスカルバートを線形シェル要素、橋脚は基部に塑性ヒンジ（非線形回転ばね）を設けた非線形梁要素、上部工は質点、鋼製基礎と維持管理用ボックスカルバートの接触部および周辺地盤をばね要素でモデル化し、別途作成した入力地震動を用いた非線形動的解析を行った。この解析結果より橋脚基部の断面力および維持管理用ボックスカルバートから鋼製基礎に伝達される反力を抽出した。表 1 に非線形動的解析のモデル条件一覧を示す。

次に、鋼製基礎を非線形シェル要素でモデル化した鋼製基礎のみのモデルを用いて、抽出した断面力および反力を入力値とした非線形静的有限変位解析を行った。同モデルにおいては、はじめに抽出した橋脚基部の最大断面力と維持管理用ボックスカルバートを介して伝達される反力を、その比率を保ったまま漸増させるプッシュオーバー解析を行い、地震時の鋼製基礎の挙動を確認した。表 2 に非線形静的有限変位解析のモデル条件一覧を示す。

これにより、地震時の鋼製基礎各部材の応力状態を把握するとともに、鋼製基礎全体の挙動を確認した。

表 1 非線形動的解析におけるモデル条件一覧

解析モデル	3次元 FEM 解析
地盤	地下函体より上の地盤を地盤ばねとしてモデル化
上部工	質点
橋脚	非線形ばね要素＋非線形梁要素
鋼製基礎	線形シェル要素
維持管理用ボックスカルバート	線形シェル要素
維持管理用ボックスカルバートと鋼製基礎の接合部	圧縮に対してのみ抵抗する非線形ばね要素（維持管理用ボックスカルバートと鋼製基礎は非合成構造）
支承	ピン条件（併進方向は剛、回転方向は自由）
入力地震動	入力地震動作成モデルによる動的解析より得られた支承位置の応答加速度

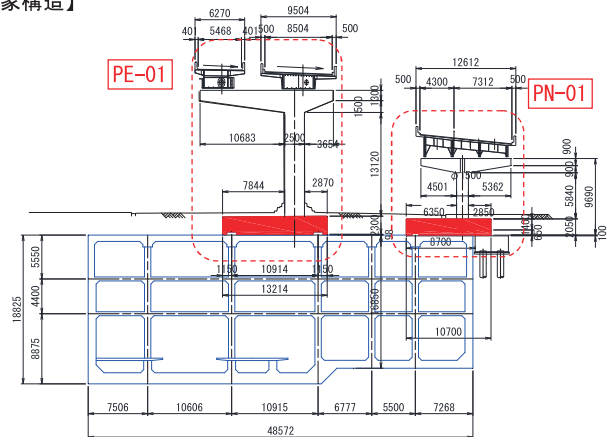
表 2 非線形静的有限変位解析におけるモデル条件一覧

解析モデル	3次元 FEM 解析
地盤	モデル化しない
上部工	モデル化しない
橋脚	基部（剛域）のみモデル化
鋼製基礎	非線形シェル要素
維持管理用ボックスカルバート	モデル化しない
維持管理用ボックスカルバートと鋼製基礎の接合部	モデル化しない
支承	ピン条件（併進方向は剛、回転方向は自由）
入力荷重	非線形動的解析により得られた橋脚基部の最大断面力と維持管理用ボックスカルバートを介して伝達される反力をその比率を保ったまま漸増荷重させる

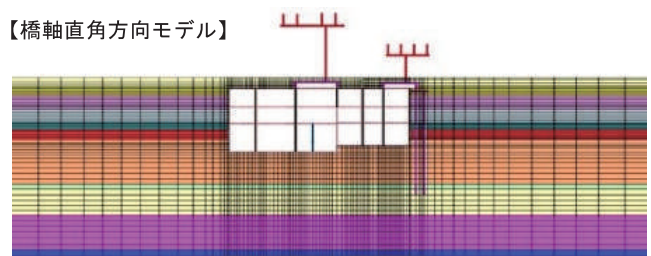
3.2 入力地震動の作成

鋼製基礎の耐震性能照査用の入力地震動は、周辺地盤に加え、地下函体の振動の影響を受けることを考慮し、地下函体と周辺地盤、鋼製基礎および鋼製橋脚をモデル化した二次元 FEM 解析（橋軸方向は鋼製基礎の幅分を考慮した三次元 FEM 解析）（図 7）を行い、耐震設計上の基盤面に道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編³⁾の I 種地盤の標準加速度波形を入力することで、鋼製基礎を支持する支承位置における応答加速度波形を抽出した。地盤は、平面ひずみ要素（橋軸方向は三次元ソリッド要素）とし、地盤の非線形性は GHE-S モデル⁴⁾により評価した。地下函体、鋼製基礎、鋼製橋脚は、M-φ 関係を定義した非線形モデルとし、上部工は重量のみを考慮した。解析には非線形動的解析を適用し、抽出した応答加速度波形を、鋼製基礎の耐震性能照査用の入力地震動として用いた。本報告では、最も応答加速度の大きいレベル 2-T II-I-1 について示す。

【対象構造】

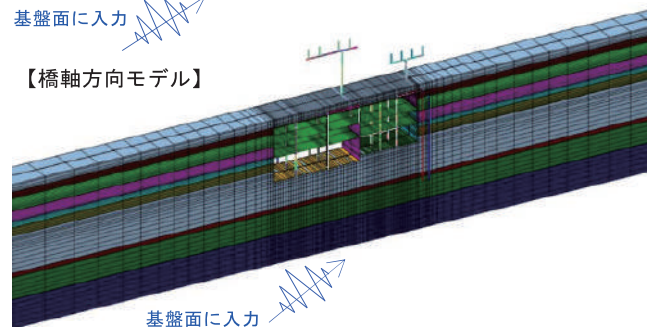


【橋軸直角方向モデル】



基盤面に入力

【橋軸方向モデル】



基盤面に入力

図 7 入力地震動作成モデル (PN-01 または PE-01 の場合)

4. 耐震性能照査 (PN-01)

PN-01 は単柱形式の鋼製橋脚を支持する鋼製基礎である（写真 1、図 8）。本鋼製基礎は、地下函体の柱上の頂版において、金属支承（BP-A 支承）で支持されている。鋼製基礎の断面形状は箱断面であり、上下フランジには補剛リブが設置されているものの、ウェブにはリブが設置されていない（図 9）。そのため、地震時の横揺れに対しては、無補剛であるウェブが弱点となることが想定された。鋼板の材質は SM490YA 材と SM400YA 材が使用されている。また、新設する維持管理用ボックスカルバートは、周辺の埋設管を考慮して形状を決定した（図 6）。非線形動的解析モデル図を図 10 に示す。

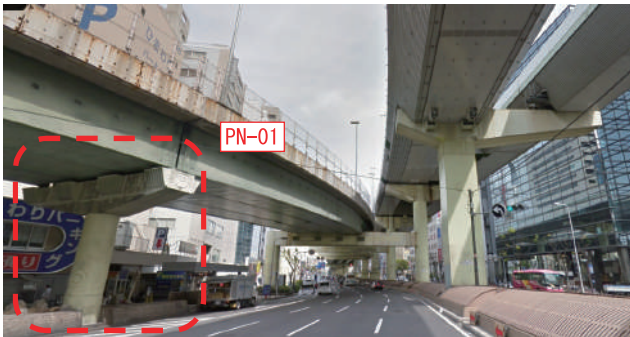


写真 1 対象構造 (PN-01) 現地写真

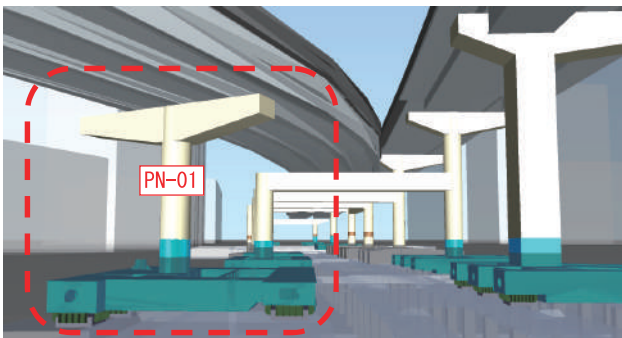


図 8 対象構造 (PN-01) CIM モデル

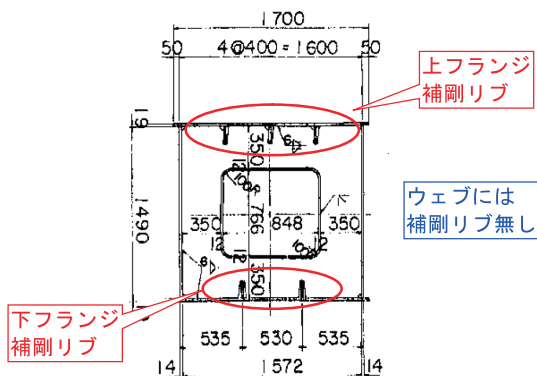
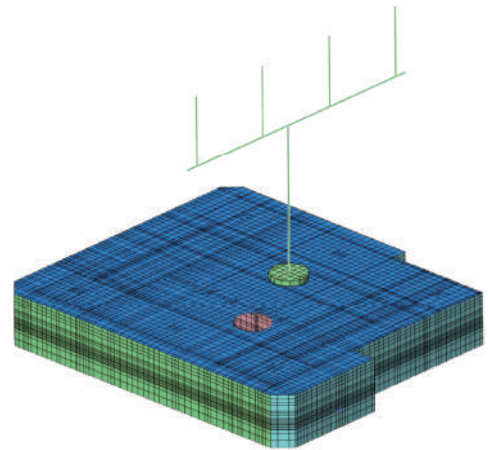
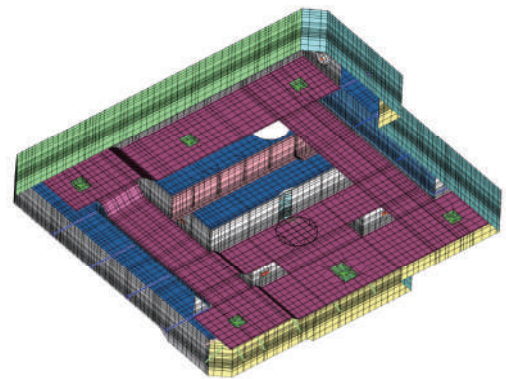


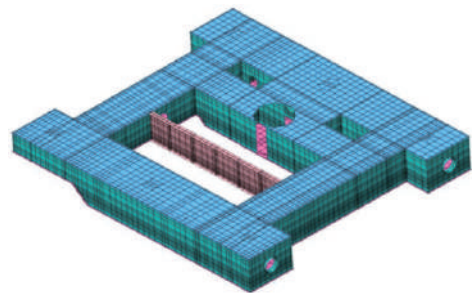
図 9 鋼製基礎断面 (既設図面より)



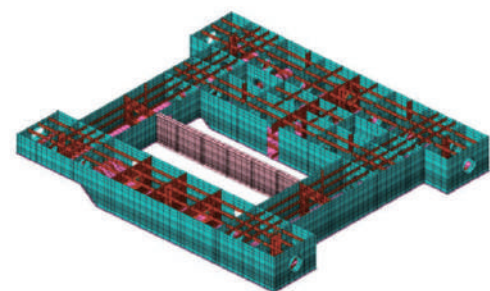
【全体 (上面より)】



【全体 (下面より)】



【鋼製基礎 (上面より)】



【鋼製基礎 (内部、上フランジ非表示)】

図 10 非線形動的解析モデル (PN-01)

非線形動的解析により橋脚基部の断面力および維持管理用ボックスカルバートから鋼製基礎に伝達される反力を抽出し、それらを入力荷重として鋼製基礎の非線形静的有限変位解析を行った。非線形静的有限変位解析モデル図を図 11 に、解析条件を表 3 に示す。

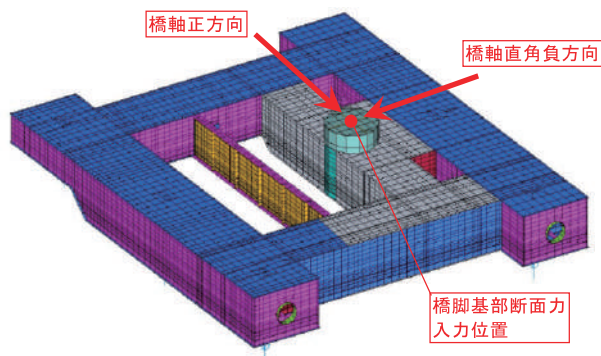


図 11 非線形有限変位解析モデル図 (PN-01)

表 3 非線形静的有限変位解析条件

項目		内容
解析ソフト		ABAQUS
解析方法		非線形静的有限変位解析
使用要素	橋脚	基部の剛域のみモデル化
	鋼製基礎	非線形シェル要素
	支承	ピン条件 (併進方向は剛、回転方向は自由)
	充填コンクリート (補強ケース)	非線形ソリッド要素
鋼製基礎	応力ひずみ関係	バイリニア型 (第 2 勾配 $E_a/100$, E_a 初期弾性係数)
	硬化則	移動硬化則
	降伏条件	フォンミーゼスの条件
	初期不陸	考慮しない
載荷方法		単調漸増載荷

本報告では、最も厳しい結果となった橋軸直角負方向に加振した場合の結果を以降に示す。

橋脚基部の水平変位と荷重倍率の関係は図 12 の通りである。ここに、グラフの縦軸の荷重倍率はレベル 2 地震時の橋脚基部最大断面力が作用した場合を 1.0 としている。また、水平変位は橋脚基部中心位置の変位である。図 12 より、荷重倍率が 1.0 に達する前に橋脚基部の変位が大きくなっていることが分かる。また、最大荷重倍率以降は、荷重倍率が低下している。

荷重倍率 1.0 のステップにおける鋼製基礎の塑性化範囲を図 13 に、橋脚基部近傍を拡大した変形図 (変形倍率 10 倍) を図 14 に示す。これらより、鋼製基礎の塑性化は橋脚基部近傍に集中し、橋脚直下のフランジおよびウェブが大きく変形しており、これが、荷重倍率の低下に至った原因と考えられる。

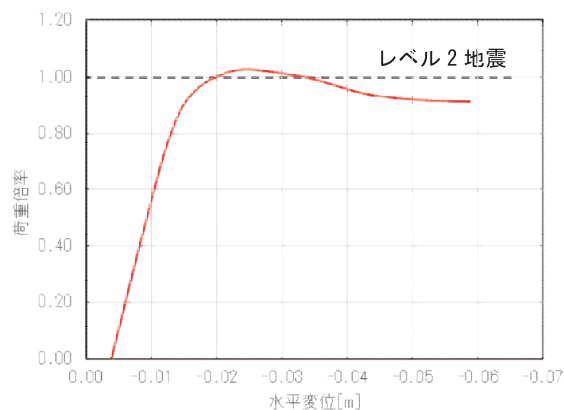
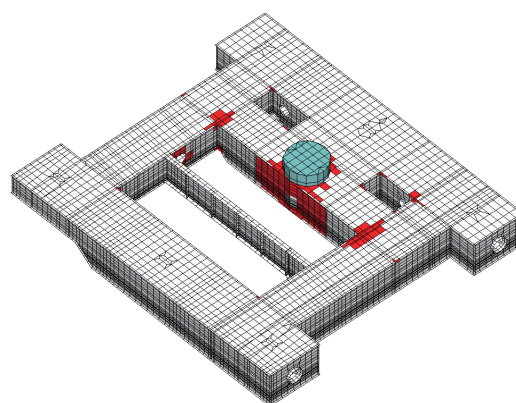
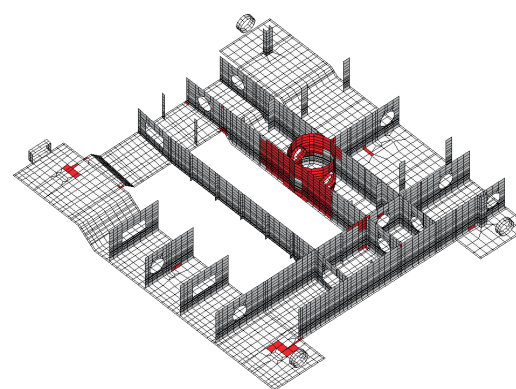


図 12 PN-01 荷重倍率～水平変位関係 (橋軸直角負方向)



【外部塑性化範囲 (赤色)】



【内部塑性化範囲 (赤色)】

図 13 PN-01 鋼製基礎の塑性化範囲 (荷重倍率 1.0)

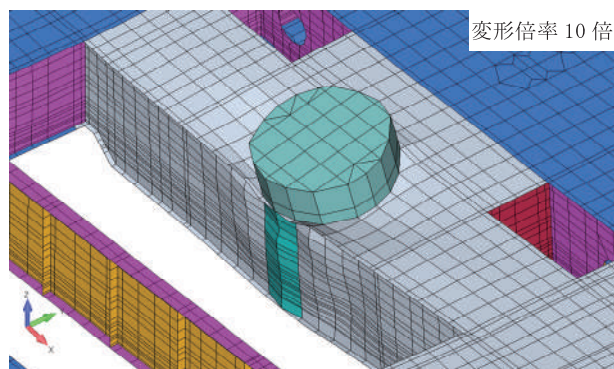


図 14 PN-01 橋脚基部近傍変形図 (荷重倍率 1.0)

5. 耐震補強検討 (PN-01)

PN-01 において、鋼製基礎の耐震性能照査を行った結果、レベル 2 地震動に対して、鋼製基礎の耐力が不足することが分かった。このため、耐力向上を目的とした耐震補強検討を行った。

鋼製基礎の塑性化は橋脚基部近傍に集中していることから、この部分の局部座屈を防止することで耐力向上が期待できると考えられるため、以下の 3 ケースについて検討を行った。各ケースの詳細は図 15 に示す。

補強 CASE1：橋脚直下のウェブ外面に縦リブ増設

補強 CASE2：橋脚直下の鋼製基礎内にコンクリート充填

補強 CASE3：橋脚直下の鋼製基礎内にコンクリート充填
(充填範囲を補強 CASE2 よりも拡大)

各ケースについて、補強前の鋼製基礎の耐震性能照査と同様の方法で検討を行った。充填コンクリートについては非線形ソリッド要素でモデル化し、鋼材とコンクリートの接合面は剛接合とした。

補強前および補強 CASE1～3 の橋脚基部の水平変位と荷重倍率の関係を図 16 に示す。グラフの縦軸および横軸は図 12 と同じである。補強 CASE1 は、最大荷重倍率は補強前に比べやや向上する程度であるが、最大荷重以降においても荷重倍率の低下は見られず、じん性の向上がある程度図れたものとする。ただし、補強前と同様に荷重倍率 1.0 に達する前に橋脚基部の変位が大きくなっており、レベル 2 地震動に対して耐力が不足している。補強 CASE2、CASE3 については、荷重倍率が大きくなっており、補強前や補強 CASE1 に比べ 1.4 倍程度耐力が向上する結果であった。また、荷重倍率 1.3 程度までは線形挙動を示している。

図 17 に荷重倍率 1.0 のステップにおける鋼製基礎の塑性化範囲と橋脚基部近傍を拡大した変形図 (変形倍率 10 倍) を示す。補強前および補強 CASE1 に比べ補強 CASE2、CASE3 は橋脚直下の塑性化範囲が小さくなっていることが確認できる。補強 CASE2 と CASE3 の塑性化範囲の違いはほとんど見られなかった。

以上より、補強 CASE1 は耐力が現況と比べてやや向上し、かつ、ウェブが座屈損傷しにくくなったことによりじん性の向上が確認できたものの、レベル 2 地震動に対しては耐力が不足する結果であった。これに対して補強 CASE2 では局所的な塑性化は見られるものの、レベル 2 地震動に対して鋼製基礎全体としては線形挙動であり、十分な耐力を有することが確認できた。補強 CASE3 は、補強 CASE2 よりもさらに耐力の向上が見られるものの大きな差は無かった。このことから、最適な補強案として補強 CASE2 を選定した。

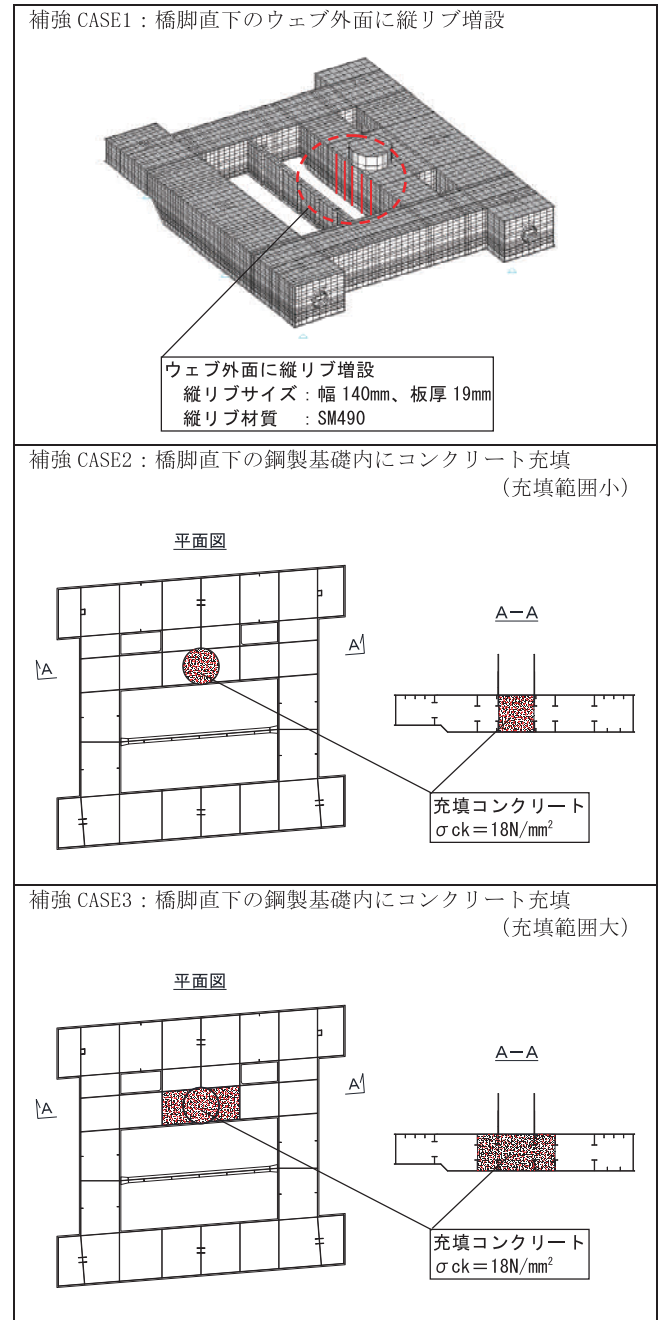


図 15 補強検討ケース

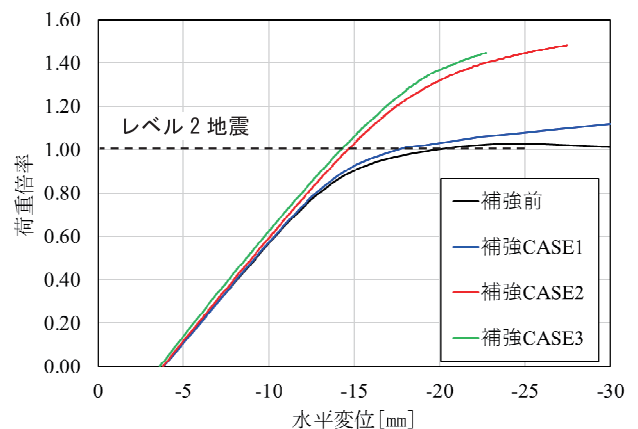
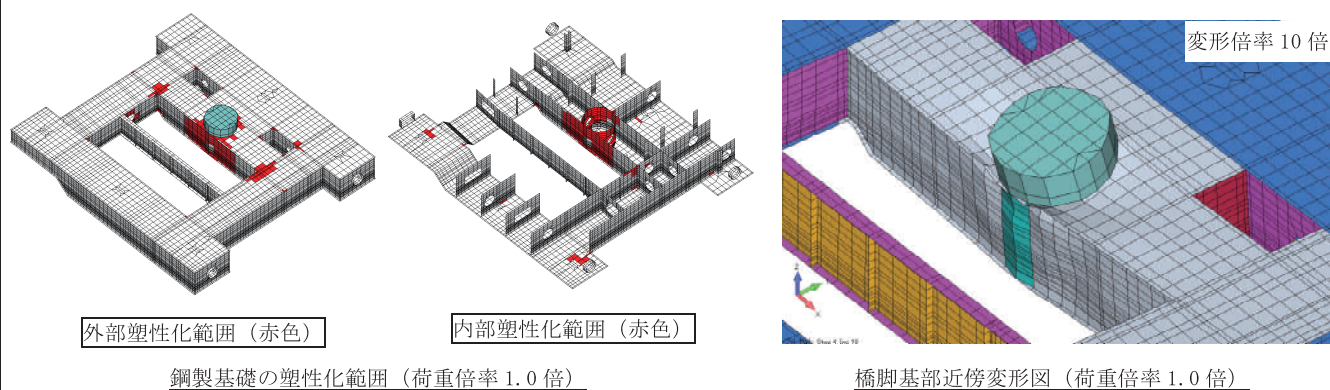
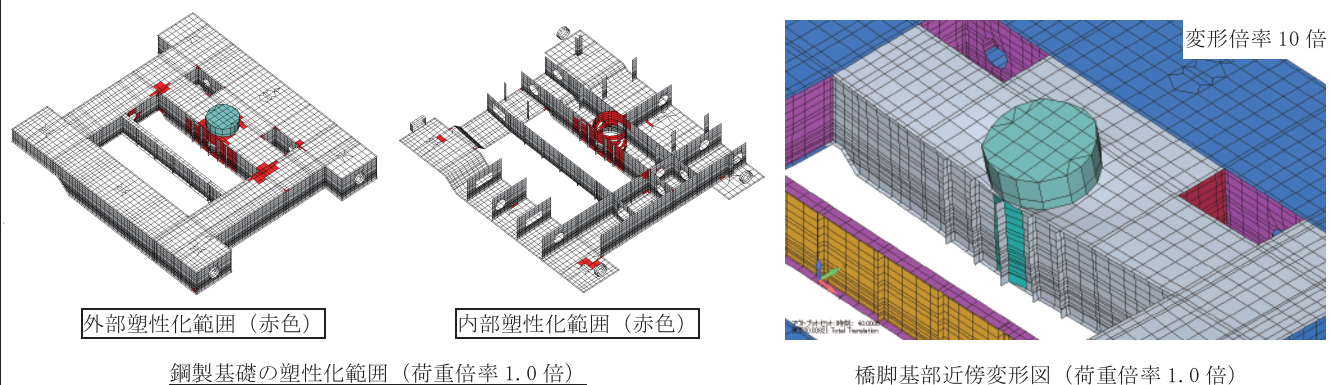


図 16 PN-01 荷重倍率～水平変位関係(橋軸直角負方向)

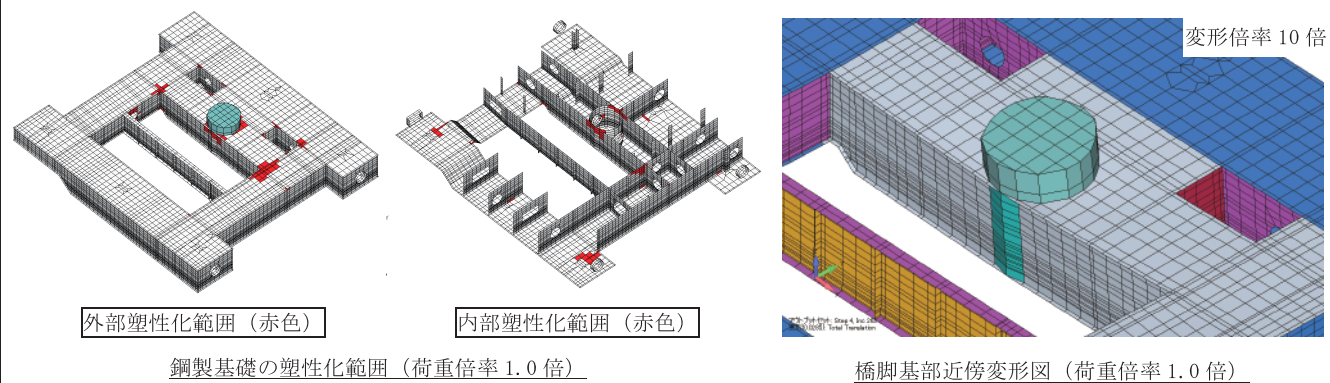
【補強前】（比較のため、図 13 および図 14 を再掲）



【補強 CASE1：橋脚直下のウェブ外面に縦リブ増設】



【補強 CASE2：橋脚直下の鋼製基礎内にコンクリート充填（充填範囲小）】



【補強 CASE3：橋脚直下の鋼製基礎内にコンクリート充填（充填範囲大）】

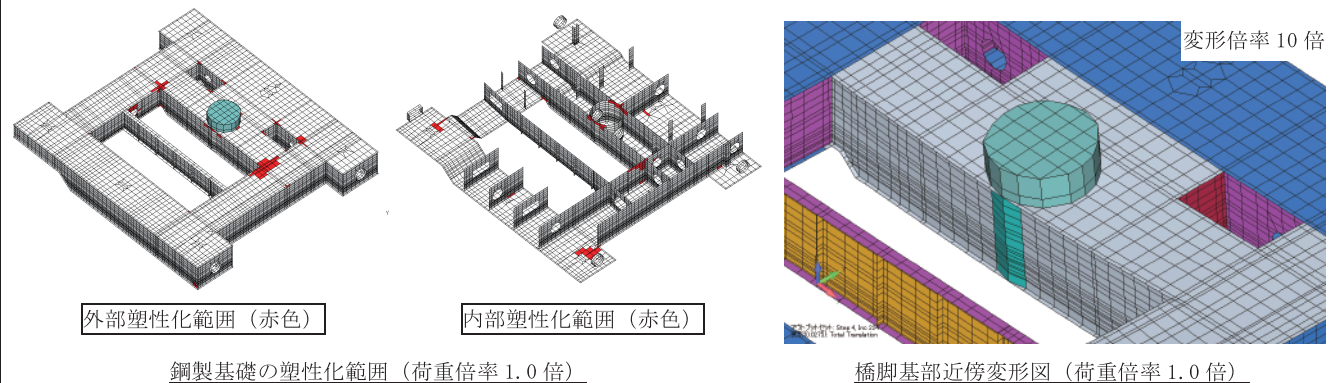


図 17 PN-01 鋼製基礎の塑性化範囲および橋脚基部近傍変形図

6. まとめ

建設後 50 年経過した都市高速道路を支持する鋼製基礎のうち PN-01 について、非線形動的解析と非線形静的有限変位解析の 2 つの解析を組み合わせ耐震性能照査と耐震補強検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・補強前の鋼製基礎では、レベル 2 地震動に対して橋脚基部直下において塑性変形が卓越し、鋼製基礎が損傷を受ける可能性があることが分かった。
- ・補強案として、橋脚基部直下の鋼製基礎のウェブをリブ補強する案、橋脚直下の鋼製基礎内にコンクリートを充填する案について検討を行った結果、リブ補強ではじん性が向上するものの、レベル 2 地震動に対して塑性変形が進行することが分かった。一方、コンクリート充填案では、レベル 2 地震動に対して、橋脚直下の塑性変形は抑制され、基礎全体の耐力も十分確保することが可能であることが明らかになった。また、コンクリート充填は、橋脚直下の円形部材内部のみとすることで、死荷重の増加を最小限としつつ、十分な耐力向上が期待できることが分かった。

本報告では、9 基の鋼製基礎のうち、PN-01 について耐震性能照査結果と耐震補強検討結果を述べたが、他基礎につ

いても同様の方法で検討を行っている。橋脚基部直下へのコンクリート充填のみでは十分な耐力向上が得られない場合は、鋼材補強との併用により耐震性向上を図っている。

先行着手した PN-01 の更新工事については 2024 年 4 月時点で、保護コンクリート撤去、支承取替えおよび防食工が完了し（写真 2～写真 7）、今後は鋼製基礎補強工および躯体コンクリート工に着手する。

本工事において、耐震性の向上に加え、維持管理面も考慮した鋼製基礎の更新を行うことで、阪神高速道路の大規模更新事業のスローガンである、「100 年先も安心して利用できる高速道路」の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：高速道路リニューアルプロジェクト 15 号堺線 湊町付近
<https://www.hanshin-exp.co.jp/company/torikumi/renewal/project/minatomachi/>（2024 年 8 月閲覧）
- 2) 渡邊雅大、肥田肇、永井久徳：地下函体上の鋼製基礎における止水対策—湊町・難波地区鋼製基礎大規模更新工事—、橋梁と基礎 令和 4 年 8 月号、pp. 31-34、2022. 8
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2017. 11
- 4) 鉄道総合技術研究所編 運輸省鉄道局監修：鉄道構造物等設計標準同解説 耐震設計、2012. 9



写真 2
PN-01 保護コンクリート撤去前



写真 4
PN-01 支承取替え前



写真 6
PN-01 鋼製基礎内部防食工施工前



写真 3
PN-01 保護コンクリート撤去後



写真 5
PN-01 支承取替え後



写真 7
PN-01 鋼製基礎内部防食工施工後