

地表面の敷設物が地震時の基礎の支持力に与える影響評価

室野剛隆¹・今村年成²・樋口美紀恵³

¹正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 工修 中央復建コンサルタンツ(株) (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

1. はじめに

地震時の基礎の支持力評価に際しては、基礎と周辺地盤との相互作用を適切に評価することが重要である。しかしながら、基礎周辺の地盤抵抗が基礎の支持力に与える影響については未解明な部分が多いため、新設構造物の設計では安全側となるように工学的判断を下す必要がある。鉄道構造物の設計¹⁾では、周辺地盤の埋戻しが良好に施工された場合に限りフーチング前面の地盤抵抗を考慮してよいとされているが、柱前面やフーチング底面の地盤抵抗、地表面の敷設コンクリートやアスファルトの効果については考慮しないこととされている。一方、既設構造物においては、設計上無視している基礎周辺の地盤抵抗要素を適切に評価することで、合理的な耐震性能評価を行うことができるものと考えられる。

筆者らはこれまでに、三陸南地震における鉄道高架橋の被災事例について、杭頭部の試掘調査を行うとともに非線形骨組み解析による数値シミュレーションを実施しており、被災事例を合理的に説明するためには、現行設計法では考慮されていない柱前面の水平地盤抵抗やフーチング底面のせん断地盤抵抗を考慮する必要があることを明らかにしている^{2)~4)}。また、滝沢ら⁵⁾は、新潟県中越地震において同様の検討を行い、やはり基礎周辺の地盤抵抗要素を適切に評価しなければ被災事例を説明できないことを明らかにしている。さらに、藤原ら⁶⁾は、土被りが大きく地表面に土間コンクリートが設置されているラーメン高架橋において、設計段階で曲げ破壊モードと判定されていた柱が実際にはせん断破壊を生じた事例について調査している。これは、基礎周辺の地盤が、基礎にとっては抵抗要素として有利に作用する一方で、柱にとっては逆に危険

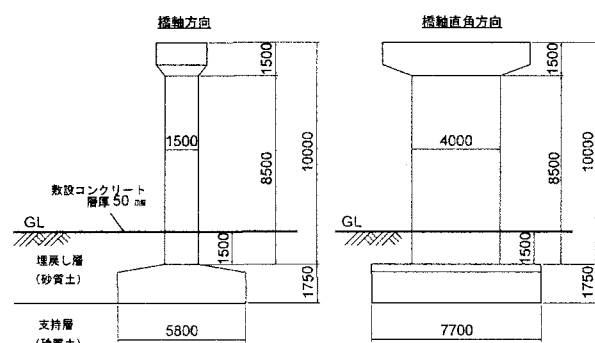


図-1 検討対象構造物

【単位: mm】

側に作用することを示す重要な事例である。このように、基礎周辺の抵抗要素に関連した調査・研究データがここ数年で着々と蓄積されつつある。

以上の背景を踏まえ、本論文では、敷設コンクリートやアスファルトなどの地表面に敷設されている地盤抵抗要素に着目し、直接基礎橋脚を対象として、構造物と地盤を一体でモデル化した3次元非線形有限要素法(DGPILE-3D)⁷⁾を用いて静的非線形解析を実施し、地表面の敷設物が地震時の基礎の支持力に与える影響について検討した結果を報告する。

2. 解析条件

(1) 対象構造物

検討対象構造物を図-1に示す。これは、鉄道の設計計算例(直接基礎橋脚)⁸⁾を参考に設定したものである。上部工はスパン29.2mのI型プレストレストコンクリート桁であり、当該橋脚に作用する上部工反力は7540kNである。く体は1500mm×4000mmの矩形断面、橋脚高は10mであり、フーチング寸法は5800mm(線路幅)×7700mm(直角幅)×1750mm(高さ)である。

地盤条件は、地表面からフーチング底面までを埋戻し層とし、その直下には堅固な支持地盤があると想定

した。また、解析ケースによっては、地表面に厚さ50mmの敷設コンクリートが存在するものと仮定している。なお、地下水位については、フーチング底面よりも十分に深い位置に存在するものと仮定して、間隙水圧の影響は考慮しないこととした。

(2) 解析モデル

解析モデルを図-2に示す。解析領域の底面(x-y平面)は固定境界とし、側面(y-z平面、z-x平面)は鉛直ローラー境界としている。そのため、解析領域としては、構造物の変形が解析結果に影響を及ぼさないだけの十分広い領域を確保する必要がある。ここでは、慣性力載荷時に生じる地盤のすべり線が解析領域内に収まるように、載荷方向(x方向)には片側当たりフーチング幅の5倍以上、載荷直角方向(y方向)にはフーチング幅の3倍以上の領域を確保した。また、深さ方向(z方向)にも、模型実験などで得られるすべり線を参考にフーチング幅の3倍程度の深さを確保した。なお、計算の効率化の観点から、構造物の対象性を考慮して解析領域は半断面としている。節点数は6918、要素数は5824である。

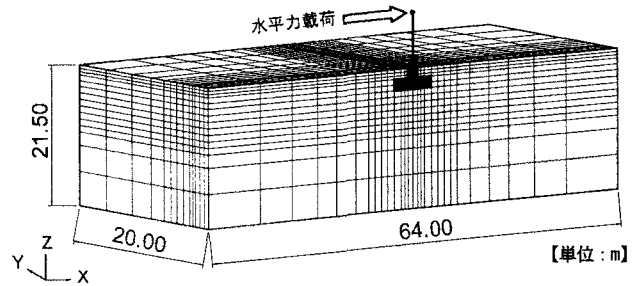


図-2 解析モデル

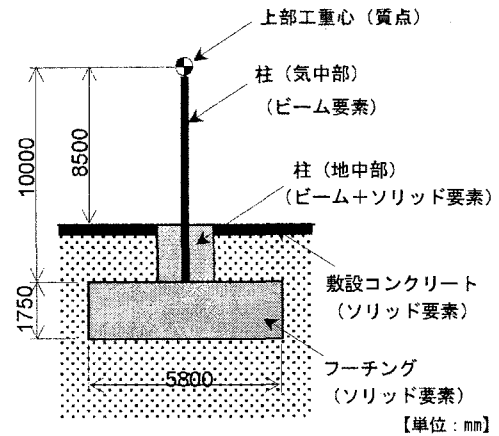


図-3 構造物のモデル化

(3) 構造物のモデル化

構造物のモデル化を図-3に示す。同図に示すように、柱は気中部においては通常の梁要素でモデル化した。一方、地中部においては、通常の梁要素では柱と地盤の接触条件が表現できないため、柱前面の地盤抵抗を解析上考慮することができないという問題がある。これを解決するために、地中部では、梁要素とソリッド要素を組み合わせたハイブリッド要素⁷⁾でモデル化することとした。ハイブリッド要素では、剛性は梁要素とソリッド要素で分担されて表現されるため、その分担率の設定が重要となる。特にソリッド要素は地盤との接触条件を評価するものであるため、地盤に対して十分に剛とみなせる設定にする必要がある。本解析では、張ら⁷⁾の提案方法と同じく、梁要素とソリッド要素で9:1の割合で負担するように設定した。これによると、コンクリートの弾性係数が 10^4 MPa程度であるのに対し、地盤の弾性係数は10MPa程度であることから、ソリッド要素の弾性係数を1/10に設定しても両者の間には100倍程度の剛性比があり、十分に剛であるとみなすことができる。なお、検討では主に、敷設コンクリートによる支持力向上のメカニズムに着目するため、解析の便宜上、構造物と敷設コンクリートの部材特性は線形とした。柱とフーチング、敷設コンクリートの諸元を表-1、表-2に示す。

表-1 柱およびフーチングの材料定数

弾性係数 E (MPa)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν
25000	25.0	0.20

表-2 敷設コンクリートの材料定数

弾性係数 E (Mpa)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν
22000	23.0	0.20

表-3 地盤定数 (t_f -sand model)

土層	γ (kN/m ³)	e_0	R_f	C_t	C_e	D_f	α	m
埋戻し層	18.0	0.80	3.00	0.0180	0.0090	-0.20	0.85	0.30
支持層	18.0	0.60	3.70	0.0084	0.0060	-0.60	0.85	0.30

(4) 地盤のモデル化

地盤要素は非線形部材として、砂の弾塑性構成モデルには t_f -sand model⁸⁾を用いた。解析に用いた土質定数を表-3に示す。ここでは、仮想地盤をモデル化しているため、各パラメータは、既往の研究結果⁸⁾をもとに初期間隙比(e_0)に応じて設定した。

(5) 載荷条件

静的非線形解析では、自重解析で得られた断面力を初期断面力として、構造物天端(上部工質点)に慣性

力を作用させた。荷重方向は図-3に示すX方向とし、1STEP=250kNの荷重制御で荷重した。

(6) 解析ケース

敷設コンクリートが基礎に及ぼす影響として、①柱背面における基礎の回転抑制効果、②柱前面における水平抵抗効果の2種類が考えられる。このため、コンクリート敷設範囲を区別した解析を行い、それぞれのメカニズムについて検討することとした。表-4に解析ケースの一覧を示す。敷設物を考慮しないケース(Case1)を基本ケースとし、回転抑制効果を確認するためのケース(Case2)、水平抵抗効果を確認するためのケース(Case3)の計3ケースについて、解析を実施した。図-4(a)~(c)に各解析ケースにおける地表面のコンクリート敷設状況を示す。

3. 静的非線形解析結果

(1) 構造物の変形に対する影響

構造物天端および基礎中心における荷重変位曲線を図-5、図-6に示す。回転抑制効果を期待した場合(Case2)は、敷設無しの場合(Case1)とほぼ同じ初期剛性を示し、荷重の小さい範囲では回転抑制効果が発揮されていないことが確認できる。その後、水平荷重2000kN付近から水平変位が抑制されることから、基礎の回転抑制に対しては、変形がある程度進んだ後に効果が表れるものと考えられる。また、基礎中心の水平変位は5000kN付近で頭打ちとなっており、回転抑制の効果が、ある荷重範囲に限定された効果であることが予想される。一方、水平抵抗効果を期待した場合(Case3)は、Case1と比べて初期剛性が大きく変化しており、荷重直後から敷設コンクリートによる水平抵抗効果が発揮されている。また、基礎中心では、荷重増加に伴ってマイナスの変位（荷重方向と反対方向）が生じており、コンクリートの敷設位置によって、基礎に及ぼす影響が大きく異なることが分かる。

水平荷重2000kN、5000kNにおける柱の変形モードを図-7、図-8に示す。Case2の場合、2000kNではCase1とほぼ同様の水平変位が生じているが、5000kNでは基礎の水平変位が抑制されている様子が確認できる。変形モードについては、荷重増加に伴って橋脚と基礎の水平変位が徐々に増大する傾向を示し、Case1と同様の傾向である。一方、Case3では、地表面での水平変位がほとんど生じておらず、地表面を境に地上部は右方向へ、地中部では左方向へ変形している。このことから、敷設コンクリートの水平抵抗効果によって、柱とコンクリートとの接点が構造物の回転中心となり、

表-4 解析ケース

ケース名	コンクリート敷設範囲	確認内容
Case1	無し	—
Case2	柱背面	回転抑制効果
Case3	柱前面	水平抵抗効果

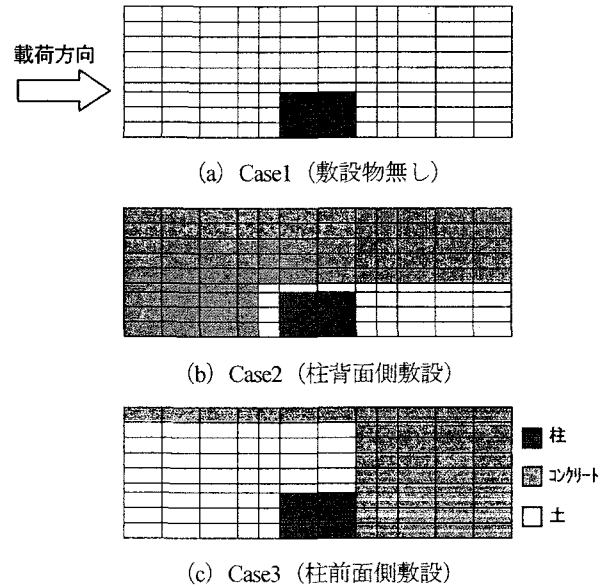


図-4 柱周辺のコンクリート敷設状況

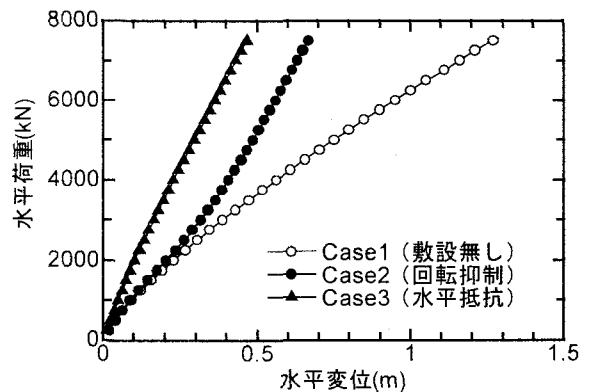


図-5 荷重変位曲線（構造物天端）

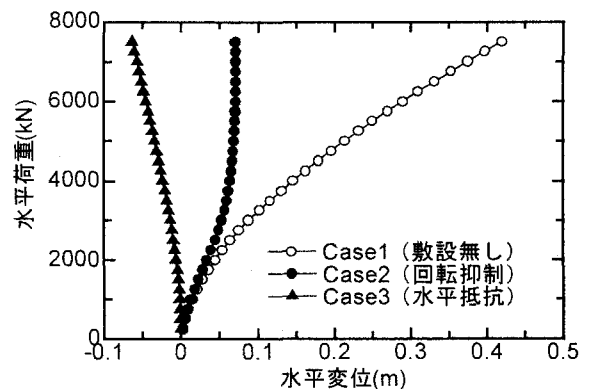


図-6 荷重変位曲線（基礎中心）

変形モードが変化することが分かる。

(2) 基礎の支持力に対する影響

①回転挙動に対する抵抗

フーチング底面における地盤の接地圧分布を図-9、図-10に示す。Case2の場合、Case1と同様に、背面側のフーチング接地圧が $0(\text{kN}/\text{m}^2)$ に達するとともに、つま先部に接地圧が集中していることから、フーチングが浮き上がってからかなり変形が進行していることが分かる。ただし、フーチングつま先部での接地圧がCase1よりも抑制されており、基礎の回転抑制効果が表れている。一方、Case3の場合は、フーチング背面側で接地圧がちょうど $0(\text{kN}/\text{m}^2)$ となる点が表れており、フーチングが浮き上がり始めたところである。また、Case1に比べてフーチングつま先部の接地圧が抑制されるとともに、フーチング前方地盤の接地圧も抑制されており、敷設コンクリートの水平抵抗効果によって、フーチングが前方地盤へ及ぼす影響が小さくなったと考えられる。

また、フーチング上面地盤における鉛直応力分布を図-11に示す。Case2では、基礎の回転に伴ってフーチングが浮き上がる側の地盤要素が圧縮されるため、大きな鉛直応力が生じている。一方、Case3では、柱背面側にコンクリートを敷設していないため、フーチング上面の地盤要素では圧縮変形が生じていないことが分かる。

③水平挙動に対する抵抗

柱前面地盤の水平応力分布を図-12、図-13に示す。これは、柱とフーチング前面に位置する地盤要素を鉛直方向に取り出し、その水平応力を要素中心の深度に応じてプロットしたものである。GL-0.275~-1.250mは柱前面地盤、それ以深はフーチング前面地盤要素の値を示す。また、荷重増加に伴う水平応力の分布状況を確認するため、図-12に示す5つの荷重レベルについてプロットした。同図より、Case2では水平荷重の増加に伴って、柱とフーチング前面地盤の水平応力が増大していることが分かる。Case1と比較すると、STEP5(1250kN)まではほぼ同じ大きさの水平応力が生じているが、STEP10(2500kN)になると、フーチング前面地盤の水平応力が抑制され、STEP15(3750kN)ではその傾向が顕著になっている。2000kN付近から基礎の回転抑制効果が表れる傾向は図-6に示す荷重変位曲線とも一致している。一方、図-13より、Case3では水平荷重が増加しても地盤の水平応力がほとんど増大していないことが分かる。Case1と比較すると、STEP1(250kN)の状態からフーチング前面地盤の水平応力が抑制されており、以降の荷重レベルではその差が

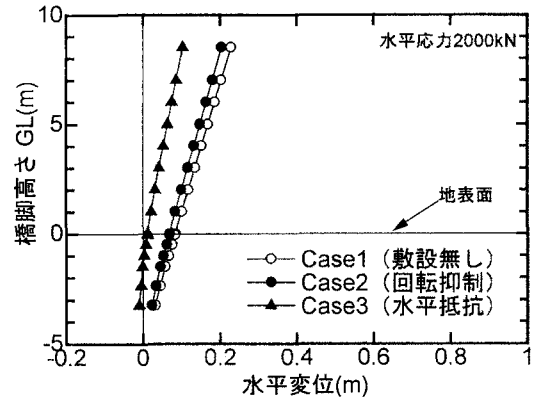


図-7 柱の変形モード (2000kN 荷重)

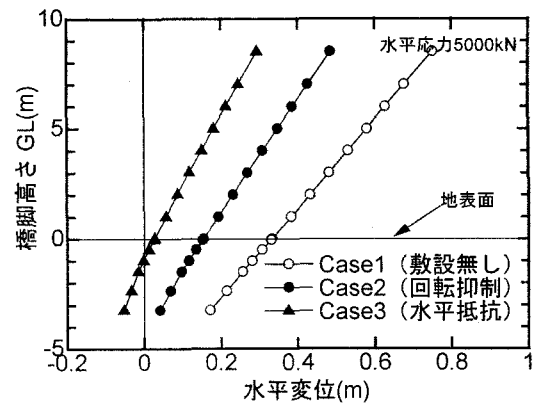


図-8 柱の変形モード (5000kN 荷重)

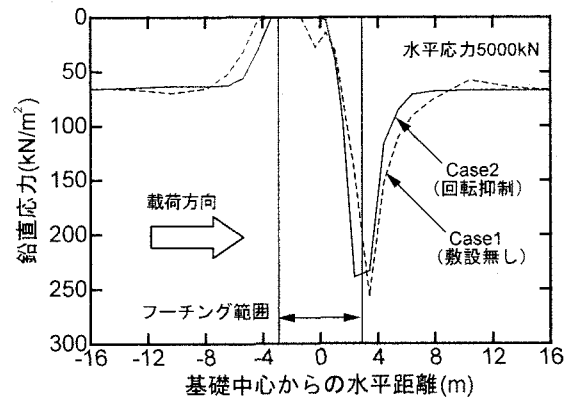


図-9 フーチング底面の接地圧分布 (Case2)

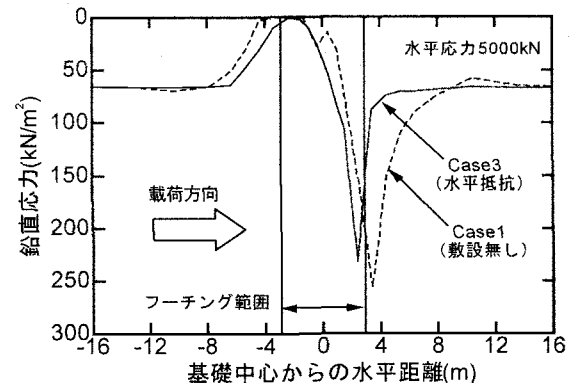


図-10 フーチング底面の接地圧分布 (Case3)

顕著になっている。また、フーチング前面の水平応力は、STEP1(250kN)よりもSTEP15(3750kN)のほうが減少していることから、基礎中心における水平変位の発生状況（マイナス方向の変位）と整合する。

(3) 敷設コンクリートの発生応力

Case2, Case3におけるコンクリート層の発生応力を図-14、図-15に示す。回転抑制効果を期待した場合(Case2)は、フーチングの浮き上がる側の敷設コンクリートが持ち上げられるため、コンクリート層には曲げ引張りが発生する。解析の結果、コンクリート層のうち最も早い要素でSTEP11(2750kN)で引張強度に達することを確認した。また、水平抵抗効果を期待した場合(Case3)は、柱前面のコンクリート層に圧縮力が発生する。これについては、最も早い要素でSTEP6(1500kN)で圧縮強度に達していることを確認した。以上より、本解析結果のうち、敷設コンクリートによる効果を考慮できる妥当な範囲は、回転抑制効果に対して2750kNまで、水平抵抗効果に対して1500kNまでと考えられる。

4. おわりに

地表面の敷設物が地震時の基礎の支持力に与える影響について、3次元有限要素法を用いた静的非線形解析を実施した。検討の結果、以下の知見を得た。

- ①地表面の敷設物は、地震時には、基礎に対して回転抑制効果および水平抵抗効果を有する。
- ②回転抑制効果は、基礎の浮き上がりに対して、敷設コンクリートが基礎の回転を押さえ込む効果である。初期剛性に与える影響は小さく、ある程度基礎の変形が進んだ段階で効果が表れる。
- ③水平抵抗効果は、基礎の水平変位に対して、敷設コンクリートが柱前面で突っ張りの役割を果たす効果である。柱と柱前面のコンクリートとの接点が回転中心になることで効果が表れる。

なお、地表面の敷設物による影響把握を目的として、実大高架橋の水平載荷試験を実施しているので、ここで、その概要に触れておく。

試験対象構造物は、既設ラーメン高架橋（2柱2線ビームスラブ式構造）であり、試験に先立って、このラーメン高架橋を縦ばりハンチ支点において切断し、門型ラーメン橋脚に構造変更したものである。載荷試験は、地表面の敷設アスファルト無しと敷設アスファルト有りの2基に対して実施した。構造物の全景（敷設アスファルト有り）を写真-1に示す。

載荷装置は、スラブ天端にH鋼によって構築した載

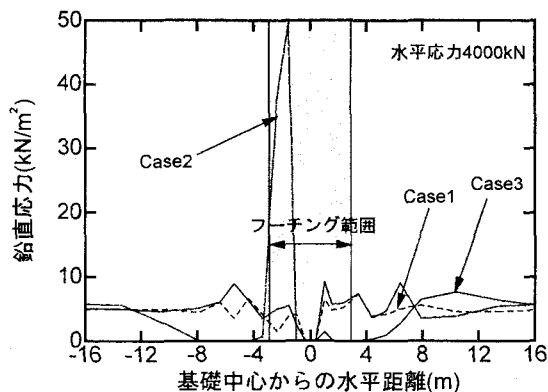


図-11 フーチング上面の鉛直応力

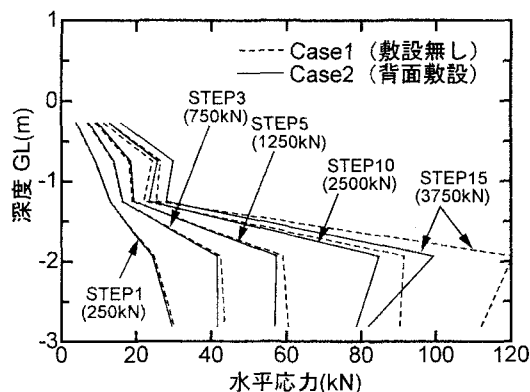


図-12 柱前面地盤の水平応力分布 (Case2)

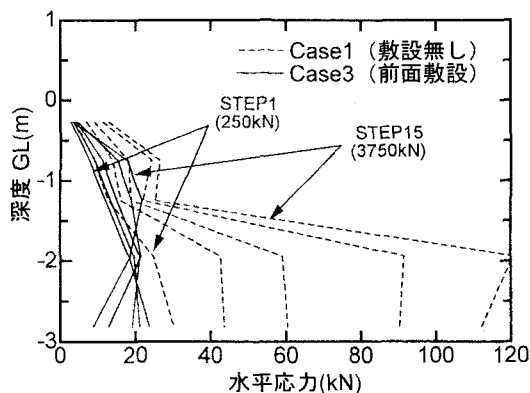


図-13 柱前面地盤の水平応力分布 (Case3)

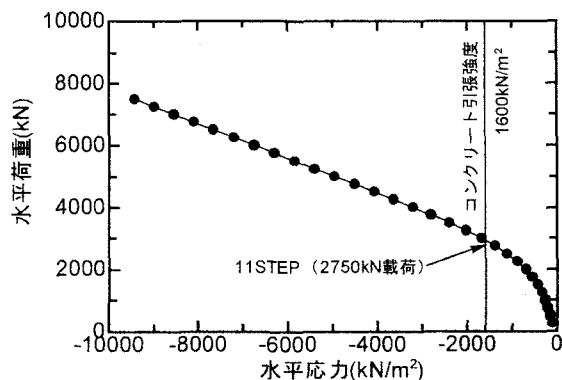


図-14 コンクリート層の発生応力 (Case2)

荷桁と、PC鋼より線、手動の油圧ジャッキを用いて
 載荷した(写真-2参照)。試験では、構造物がねじれ
 ないように、載荷点を左右2ヶ所設けるとともに、構
 造物天端での左右の変位計を読みが等しくなるように
 モニターで確認しながら、1方向繰返し載荷を行った。
 試験の結果、アスファルト無しの場合には、地盤の支
 持降伏が生じたのに対し、アスファルト有りの場合
 には、柱の曲げ降伏が発生し、両者で破壊モードが大
 きく異なった。また、アスファルト有りの場合の最大
 抵抗荷重は、アスファルト無しの場合の1.5倍以上と
 なり、敷設アスファルトが基礎の支持力に与える影
 響が大きいことを確認した。

以上のように、地表面の敷設物が基礎の支持力を
 向上させることが実験的にも確認されている。なお、
 この実験の詳細は別の機会に報告する予定である。

今後は、既設高架橋の合理的な耐震性評価手法の
 確立を念頭におき、敷設範囲による感度分析、構
 造物と敷設物の非線形特性を考慮した検討等、敷
 設物が基礎の支持力に与える影響について、さら
 なる深度化を図っていく予定である。

謝辞：本研究を進める上で、解析モデルの設定など
 において、名古屋工業大学の張鋒教授に、多大なご
 指導、ご助言を賜りました。ここに、紙面をお借
 りして深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，1999.
- 2) 弥勒綾子，室野剛隆，桐生郷史，館山勝，塚田堅士：三陸南地震における高架橋地中部の杭掘削調査及び検証解析，第39回地盤工学研究発表会，pp.2067-2068，2004.
- 3) 滝沢聡，荻原郁男，室野剛隆，館山勝，弥勒綾子，桐生郷史：地震被害を受けた高架橋の基礎調査及び解析（その1），第59回土木学会年次学術講演会，pp.93-94，2004.
- 4) 桐生郷史，室野剛隆，弥勒綾子，館山勝，滝沢聡：地震被害を受けた高架橋の基礎調査及び解析（その2），第59回土木学会年次学術講演会，pp.95-96，2004.
- 5) 滝沢聡，谷口善則，塚田堅士：新潟県中越地震における高架橋の基礎の被害調査，第40回地盤工学研究発表会，pp.2141-2142，2005.
- 6) 藤原寅士良，渡邊康夫，津吉毅，菅野貴浩，荻原郁男，石橋忠良：新潟県中越地震における第三和南津高架橋R2ラーメンの被害検証解析，SED No25，pp.62-71，2005.
- 7) Feng Zhang, Makoto Kimura, Teruo Nakai and Takuya

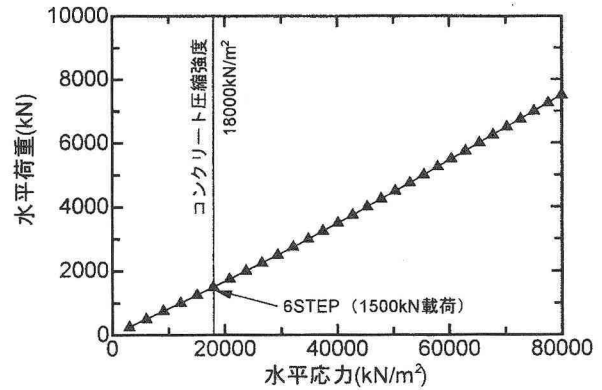


図-15 コンクリート層の発生応力 (Case3)

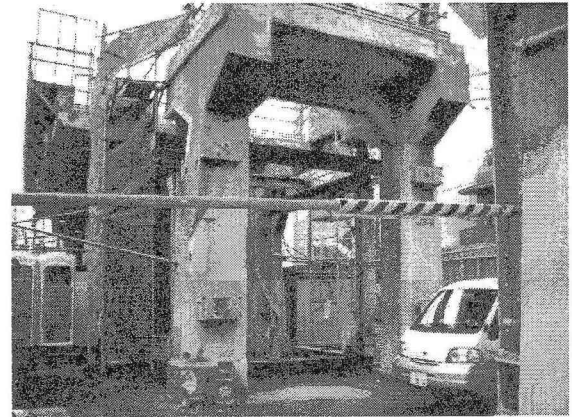


写真-1 構造物の全景(敷設アスファルト有り)

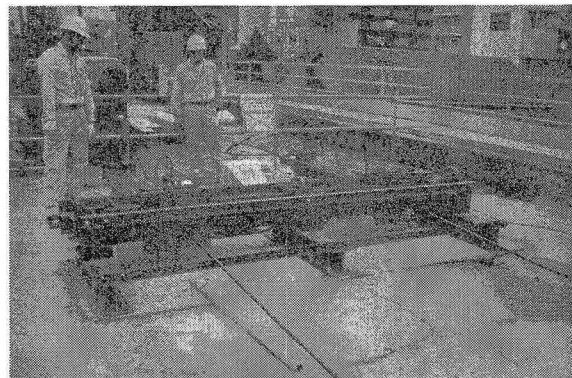


写真-2 載荷桁と油圧ジャッキ

Hoshikawa : Mechanical Behavior of Pile Foundations Subjected to Cyclic Lateral Loading up to the Ultimate State, Soils and Foundations, Vol.40 No.5, pp.1-17, 2000.

- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計 設計計算例 鉄筋コンクリート橋脚（直接基礎），2001.
- 9) Nakai, T. : An Isotropic Hardening Elastoplastic Model for Sand Considering the Stress Path Dependency in Three-Dimensional Stress, Soils and Foundations, Vol.29 No.1, pp.119-137, 1989