

高架橋基礎の 耐震補強工法



西脇 敬一*



藤原寅士良**



渡邊 明之*



渡邊 康夫**

現状の鉄道構造物の設計では、柱前面の地盤抵抗や地表面に敷設されるコンクリート（以下、基礎スラブと称す）の効果は、地震時に地盤が構造物に与える影響を評価することが困難であるため、考慮しないことになっている。

そこで、柱前面の地盤抵抗や基礎スラブの影響を適切に考慮することによって、既設の高架橋に対して基礎スラブを設置することが高架橋の基礎部の簡易な耐震補強工法のひとつになると考え、高架橋および基礎スラブを模擬した縮小試験体を用い遠心載荷実験を行った。

その結果、表層地盤や基礎スラブが地震時の基礎構造物に作用する水平力を低減し、基礎スラブを設置することが高架橋基礎の耐震補強工法となり得ることが明らかとなった。

●キーワード：耐震補強、基礎構造物、基礎スラブ、表層地盤

1. はじめに

駅改良等において既設構造物の改良を行う場合には、大規模地震に対応するため、既設構造物の耐震補強が進められている。検討の結果、基礎構造物の耐震補強が必要となるケースもあるが、基礎構造物は地中にあることから、上部構造物に比べ耐震補強を講じることが難しい。一般には、フーチングを大きくして杭の本数を増やす等の補強を行っているが、これらの補強は掘削土留めを伴う大規模工事となるため、工事費の増大や工期の長期化を招いており、簡易な補強工法が望まれている。

構造物の地中部の抵抗を考えた場合、図1に示すような部位における地盤の抵抗が考えられるが、現状の鉄道構造物の基礎の設計¹⁾では、良好に埋め戻しが施工された場合のフーチング前面の前面抵抗のみ考慮できている。しかし、柱前面の前面抵抗や地表面の基礎スラブ等の影響について適切に評価できれば、効率的な補強ができるものと考えられる。

本稿では、過去の地震による高架橋構造物の被害状況から、表層地盤や基礎スラブが地震時の水平力に対して抵抗要素となることを示すと共に、高架橋基礎の簡易な補強工法を確立することを目的に、縮小模型試験体により遠心載荷実験を実施したので、その結果について報告するものである。

2. 表層地盤・基礎スラブが地震時水平力に対して抵抗要素となった例

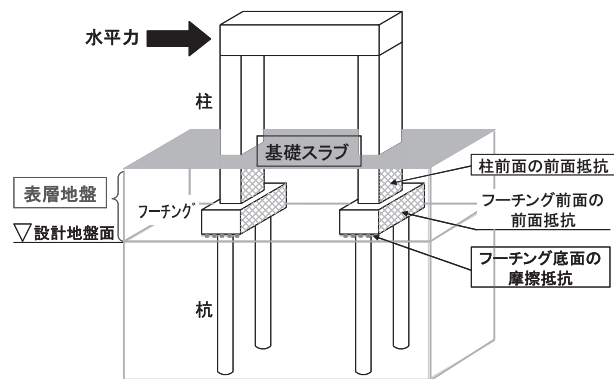


図1 地盤抵抗箇所の模式図

2005年10月に発生した新潟県中越地震の際に、事前に行った耐震診断においてせん断破壊先行型でないと診断されていたラーメン高架橋が、柱中間部を表層地盤（埋め戻し土）や基礎スラブにより拘束されていたため、柱上部にてせん断破壊を生じた例がある。

2章では、事前の検討結果と異なるせん断破壊となった、上越新幹線第3和南津高架橋の被災状況の概略を述べる。

2.1 第3和南津高架橋の損傷状況²⁾

第3和南津高架橋のR2ラーメンは、3径間の1層ラーメン高架橋で、基礎形式は直接基礎である。柱部分は、柱高さの半分程度となる約4.0m程度が土により埋め戻されていた。また、図2のように高架橋上の散水消雪用機械整備が入った消雪基地として活用されていた。この消雪基地は、厚さ15cmの基礎スラブ（土間コンクリート）が設置されており、基礎スラブは消雪機器の荷重が高架橋に伝わらないように杭で支持されていた。杭は、 $\phi 318.5\text{mm}$ 、長さ約5.0mの鋼管杭で、線路方向の両側に約3.5m間隔で設置されていた。

地震による損傷状況は、起点側及び終点側の端部に位置する柱が大きくせん断破壊し、線路方向の中間に位置する柱では曲げひび割れが卓越した損傷であった。せん断破壊を起こした端部列柱の損傷状況を図3に示す。端部列柱は、地上部でせん断破壊し、主筋が大きく曲がり、せん断補強筋が外れていた。また、コンクリートは内部からはらみ出し、損傷の卓越方向も明確に判断できないほど大きな損傷であった。これに対して、損傷の大きかった端部柱の表層地盤を掘削して柱基部を調査したところ、図4と図5に示すように、隅角部にコンクリートの剥落や浮きが、また曲げひび割れが確認される程度であった。

2.2 表層地盤や基礎スラブが有する水平抵抗

柱の損傷状況及び地中部の調査結果から、せん断破壊先行型でない高架橋柱がせん断破壊を生じた原因は、表層地盤と付帯設備である消雪基地（基礎スラブ+杭）が、高架橋柱の水平変位を地表面で拘束し、その結果、柱のせん断スパンが短くなったためと考えられている。

今回の現象を検証するために、この高架橋をモデル化した2次元FEMを用いた静的非線形解析を実施したところ、上部の柱がせん断破壊した時点での表層地盤や基礎スラブが負担した水平力は、全水平力の半分程度を負担している結果となった。これは、地震時の水平力に対し、柱前面の地盤や基礎スラブが抵抗要素となったことを示している。

本被災例や被災例の再現解析により、表層地盤、基礎スラブおよび基礎スラブに設ける杭が、地震時の構造物に作用する水平力に対し、大きな低減効果を有すると考えられる。

3. 耐震性効果確認実験

2章で述べた事例を踏まえ、表層地盤や基礎スラブが有する水平抵抗効果について検討するため実験を行った。以下に、実験内容と得られた結果を述べる。

3.1 実験概要

3.1.1 実験対象構造物および地盤条件

実験は、任意の重力加速度を加えることで縮小モデルの試験体でも実際の構造物と同じ応力状態を模擬できる図6に示す遠心载荷実験装置により行った。

対象とする高架橋の基礎構造を図7に示す。また、実験一般図を図8に示す。実験モデルは縮尺を1/50に設定した。

地盤設定に関しては、埋め戻し土を想定した表層地盤および中間層はN=5、支持地盤はN=20の水平成層地盤とし、締固めによる密度管理を行い、模型地盤を作製した。

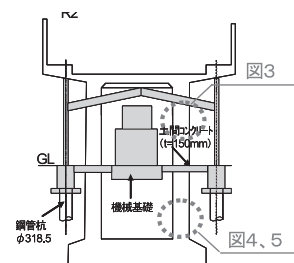


図2 消雪基地模式図



図3 柱の損傷状況



図4 柱基部のコンクリート剥落状況



図5 柱基部の曲げひび割れ

3.1.2 実験ケース

実験ケースの概略図を図9に示す。今回の実験は、表層地盤や基礎スラブの有無が基礎構造物に作用する地震時の水平力に及ぼす影響を確認することを目的とするため、実験ケースは、表層地盤のないCase1、表層地盤のみのCase2、表層地盤の上面に基礎スラブを設置したCase3と

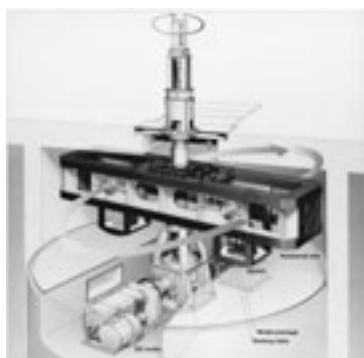


図6 遠心荷重装置

した。また、さらに補強効果を高める構造とし、基礎スラブを設置し、その基礎スラブを杭（以下：基礎スラブ杭と称す）により固定したCase4（表層地盤50mm、フーチング上面から基礎スラブ上面までの土被り26mm）およびCase5（同36mm、12mm）の計5ケースとした。

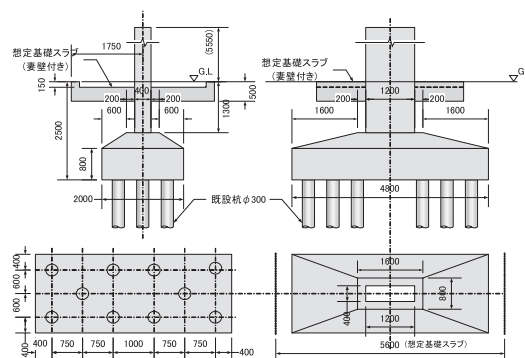


図7 対象とした高架橋基礎部（実物）

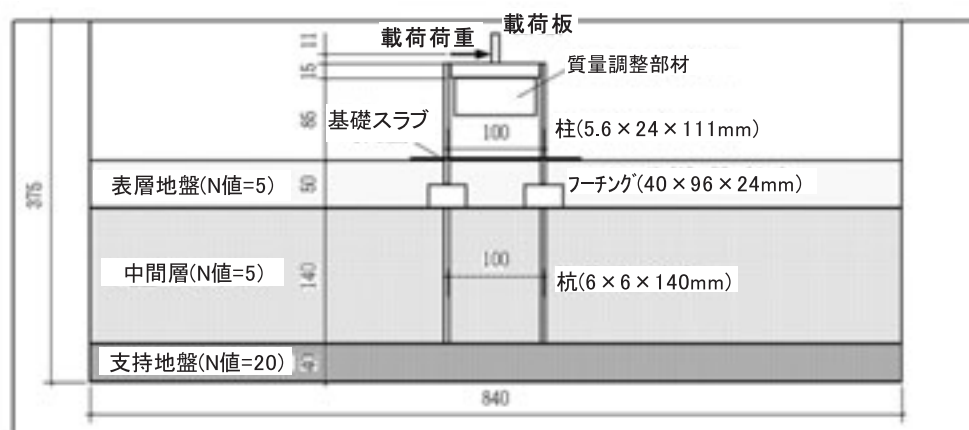


図8 実験一般図

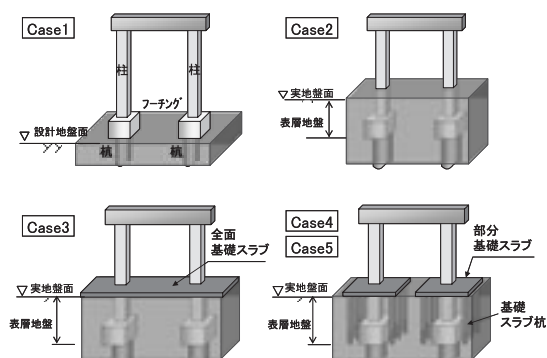


図9 実験ケースの概要図



図10 試験体外観

3.1.3 試験体諸元

試験体は、図7に示した基礎構造を有するラーメン高架橋を模擬し、硬質アルミによって作製した。高架橋をモデル化した模型を図10に示す。荷重直角方向の部材の幅は、対象とした高架橋の部材の幅の1/50とし、荷重方向

の部材の厚さは、対象とした高架橋と試験体の各部材の曲げ剛性が相似則に従い一致するように定めた。対象とする高架橋の杭は、1フーチングに10本の杭が設置される群杭となっているが、模型では群杭効果を考慮し、杭5本を杭1本に換算して設置した。各試験体の諸元を表1に示す。

なお、Case4とCase5の基礎スラブ杭は、低空頭の高架橋下でも簡易に施工が可能なBH杭や鋼製打込み杭を想定しモデル化したものである。

3.1.4 実験方法

荷重は、図8に示すように高架橋の上部に設置した載荷板を水平方向に0.03mm/秒の変位制御で静的に行った。なお実験は、遠心載荷装置により50Gの遠心場で行った。

実験時には、試験体の変形を把握することを目的にレーザ変位計により載荷点水平変位を、また、上部工と杭部に作用する応力を把握するため、柱と杭に貼り付けたひずみゲージによりひずみを測定した。

なお、以後に示すすべての実験結果は、実験データを実物の構造物に換算した値で評価している。

3.2 実験結果

3.2.1 荷重－変位の関係

荷重 (P) と載荷点水平変位 (δ 、以下変位と称す) の関係を図11に示す。荷重と変位の関係は、表層地盤および基礎スラブの有無により大きく異なっている。表層地盤の影響を見ると、荷重P=500kN時の変位は表層地盤の無いCase1に対し表層地盤を有するCase2で40%程度に、基礎スラブ杭を設けたCase4とCase5では表層地盤の厚いCase4が表層地盤の薄いCase5の71%程度に低下した。表層地盤の存在や厚さの増加により変位量が低下することは、表層地盤が水平方向の反力として評価できることを示している。

次に、基礎スラブが荷重と変位関係に及ぼす影響を見ると、基礎スラブを設置したCase3のP=500kN時の変位はCase2に比べ14%程度低下した。さらに、基礎スラブ杭を設けたCase4では、Case2から25%程度低下することが確認された。このことは、基礎スラブを敷設することによって地盤が負担する水平抵抗力が向上することを示している。

3.2.2 杭の曲げモーメント分布

杭に設置したひずみゲージをもとに、(1) 式により曲率を計算し、ひずみ計測箇所の曲げモーメントを (2) 式により算出した。

$$\text{曲率}k = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / H \cdot 10^6 \quad \cdots (1)$$

$$\text{曲げモーメント}M = EI k \quad \cdots (2)$$

ここに、

k：曲率

表1 試験体諸元 (縮尺1/50モデル)

ケース	表層地盤 (厚さ)	基礎スラブ (載荷方向長さ×載荷直角方向幅×厚さ)	基礎スラブ杭 (径×長さ×本数)
Case1	なし	なし	なし
Case2	なし	なし	なし
Case3	50mm	112×176×3.0mm(全面スラブ)	なし
Case4		柱1本あたり72×70×4.8mm (部分スラブ)	部分スラブ1枚あたり φ6-60mm-6本
Case5	36mm		

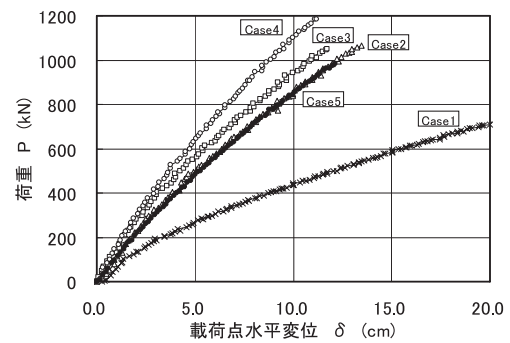


図11 荷重－載荷点水平変位の関係

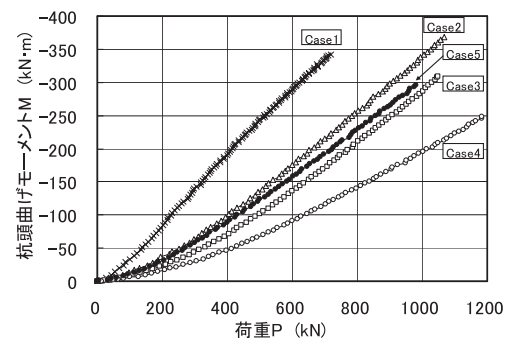


図12 荷重と杭頭曲げモーメントの関係

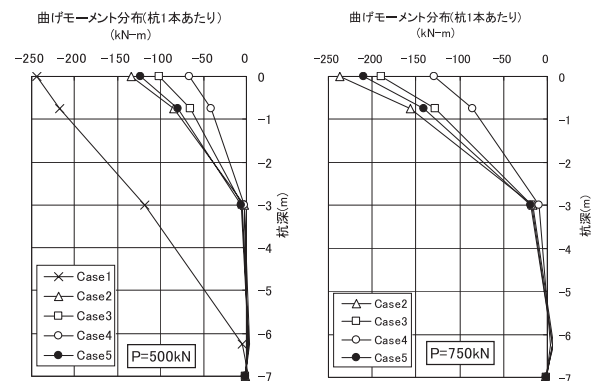


図13 曲げモーメント分布 (左：P=500kN時、右：P=750kN時)

ε_1 と ε_2 ：ひずみ測定値

H：ひずみゲージ間隔

E：弾性係数

I：断面二次モーメント

である。

荷重と高架橋の杭1本あたりの杭頭部の曲げモーメントの関係を図12に、また、P=500kN時とP=750kN時の各ケ

ースの曲げモーメント分布を図13に示す。ここでの曲げモーメントは、試験体のすべての杭4本に発生した曲げモーメントを平均して算出した試験体の杭1本あたりの値である。なお、Case1は、 $P=750\text{kN}$ まで到達しなかったため、図13の $P=750\text{kN}$ 時の曲げモーメント分布には記載していない。

表層地盤の厚さを変えたCase5以外を比較すると、 $P=500\text{kN}$ 時の杭頭部の曲げモーメントはCase1が最も大きく、Case2、Case3およびCase4の順に低下した。さらに荷重が増加した $P=750\text{kN}$ 時でも同様の傾向となり、杭頭部の曲げモーメントは、Case2に対し、Case3で18%、Case4で46%低下する結果となった。

これらの結果より、表層地盤および基礎スラブを考慮することにより、杭に作用する曲げモーメントを低減できること、また、基礎スラブを杭等で固定することによって、杭に作用する曲げモーメントをさらに低減できることが確認できた。

3.2.3 杭に作用するせん断力分布

杭のせん断力分布は、杭の曲げモーメントを深さ方向に微分することにより算出した。荷重と杭頭部のせん断力の関係を図14に、 $P=500\text{kN}$ 時と $P=750\text{kN}$ 時の各ケースのせん断力分布を図15に示す。ここでのせん断力は、全ての杭に生じたせん断力の合計である。

Case2の $P=200\text{kN}$ 時杭頭部のせん断力は、Case1に比べ14%程度小さくなった。これは、柱及びフーチング前面の表層地盤が水平力の一部を負担したことによるものと考えられる。

次に基礎スラブの影響を見ると、 $P=750\text{kN}$ 時のCase3の杭頭部のせん断力はCase2に比べ22%程度低下した。これは、基礎スラブが地盤の変形を抑制したことにより表層地盤が負担する水平力が増加したためと推測される。

さらにCase4の杭頭部のせん断力は、 $P=750\text{kN}$ 時にCase2の55%程度と大幅に低下する結果となった。

これらの結果からも表層地盤、基礎スラブさらに基礎スラブを杭により固定することが、地震時の水平力の基礎構造物への伝達を低減させる効果があると判断できる。

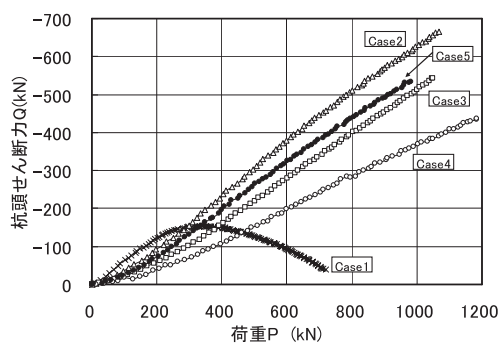


図14 荷重と杭頭せん断力の関係

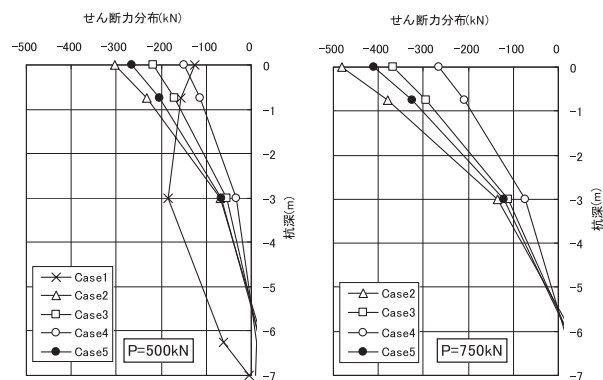


図15 せん断力分布（左： $P=500\text{kN}$ 時、右： $P=750\text{kN}$ 時）

により、基礎スラブを設置することによって、高架橋基礎が負担する地震時水平力が低減できることが明らかとなった。また、基礎スラブに杭を設置することにより、さらに基礎が負担する地震時水平力を低減できる結果が得られ、本方法が高架橋基礎の簡易な耐震補強工法の一つとなり得ることが確認できた。

そこで、本工法を高架橋基礎の耐震補強工法として展開していくために、設計方法に関しても、現段階において整理を行っている³⁾。

今後、基礎スラブ杭を設置する場合のフーチングとの干渉効果に着目した実験を行い、表層地盤と基礎スラブの有する水平抵抗力をより適切に評価し、設計に反映させる予定である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・解説 基礎構造物・抗土圧構造物，丸善出版，2000.6
- 2) 藤原寅士良，津吉毅，萩原郁男，青戸拓起：建物基礎により柱中間部を拘束された鉄道高架橋の地震被害に関する一考察，第28回コンクリート年次論文集，pp.907-912，2006.7
- 3) 藤原寅士良，西脇敬一，渡邊康夫，渡邊明之：基礎スラブを利用した耐震補強工法の当面の設計法について，東日本旅客鉄道株式会社構造技術センターSED，No.27，pp.30-41，2006.11

4. おわりに

新潟県中越地震の高架橋の被災例や今回の一連の実験