

# 既設道路橋杭基礎の耐震性評価のための杭間地盤調査

高橋宏和・谷本俊輔・七澤利明

## 1. はじめに

昨今、既設道路橋の耐震補強を合理的に行うことが求められているが、既設基礎についてはその耐震性の評価方法や地盤抵抗特性について、未解明な点が多いのが課題である。特に、液状化の影響が初めて考慮されることとなった昭和46年道路橋耐震設計指針以前の基準で設計された液状化地盤にある既設基礎については、現行の平成24年道路橋示方書V耐震設計編（以下「道示V」という。）に基づき照査すると、大規模な補強対策が必要となる可能性が高い。ここで、地盤の抵抗特性や基礎の地震時挙動をより実際に近い形で評価することができれば、必要最小限の補強対策で済み、工費縮減及び工期短縮が期待できる。そのためには、実橋における地盤の状態をより精密に調査し、個々の橋の耐震性評価に反映していくことが重要であると考えられる。

一方、既設の基礎形式を調べると、図-1に示すように、1960年代当時の道路橋では、直接基礎に次いで既製杭基礎（基礎形式全体の27%を占める）が多く採用されている。こうした背景を踏まえ、既製杭基礎を対象に当時の施工法である打撃貫入時に、図-2のような杭間地盤の密度が増加する効果を見込むことで、液状化や地盤抵抗の評価を精密かつ合理的に行うことができる可能性がある。そこで、本報では、地盤調査技術に関する取り組みとして、実橋に適用可能な杭間地盤の原位置密度の調査方法について検討し、またその調査を行った結果について報告する。

## 2. 調査対象橋梁

本調査では、①液状化が生じる可能性のある地盤、②施工法として打撃工法が用いられたと考えられる既製杭基礎の2条件に合致する2橋梁を調査対象とした。各調査対象橋梁の基礎形式、杭間の地盤状況については、下記の通りである。また、

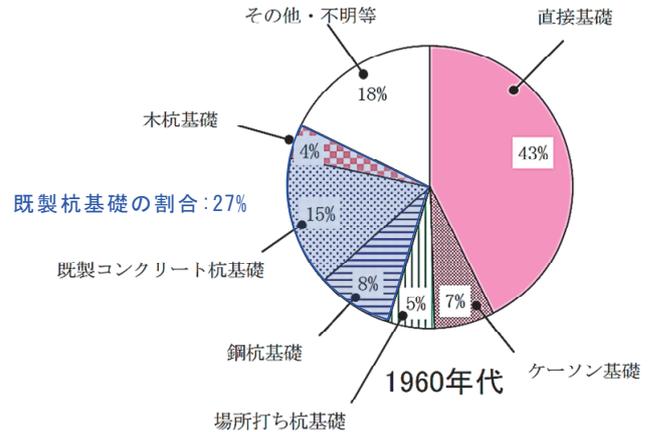


図-1 基礎形式の割合（1960年代）<sup>1)</sup>

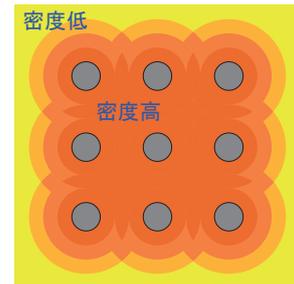


図-2 杭間地盤の密度増加イメージ

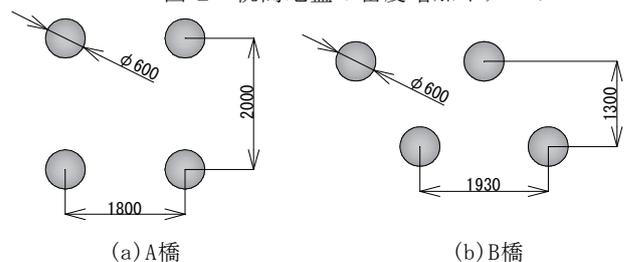


図-3 杭配置

各橋の杭配置を図-3に示す。

A橋は昭和43年道路橋下部構造設計指針に基づき設計され、その基礎形式は鋼管杭（杭径φ600）、杭間隔は1.8~2.0m（杭径の3.0~3.3倍）である。また、杭間の地盤状況は、細砂を主体とした沖積砂質土層である。

B橋は昭和31年鋼道路橋設計示方書に基づき設計され、その基礎形式はRC杭（杭径φ600）、杭間隔は1.3~1.93m（杭径の2.2~3.2倍）である。また、杭間の地盤状況は、シルト質砂層から成る沖積砂質土層である。

### 3. 調査方法

本調査では、周辺地盤及び杭間地盤に対して、標準貫入試験のほか土の現場密度の測定が可能なラジオアイソトープコーン貫入試験<sup>2)</sup>(以下「RIコーン貫入試験」という。)を試験的に適用し、周辺地盤と杭間地盤における密度や貫入抵抗の違い等について調査を行った。ここで、RIコーン貫入試験とは、電気式静的コーン貫入試験で求められる3成分(貫入抵抗, 周面摩擦, 間隙水圧)に加えて、挿入型のRI密度水分計測器により地盤の湿潤密度と含水量も測定が可能な試験方法である。また、RIコーン貫入試験は、盛土の密度管理に用いる表面型RI密度水分計と異なり、約17mm/sの速度でリアルタイムにデータを取りながら貫入する方法である。

本調査は、実橋の杭間地盤を対象にしたRIコーン貫入試験となるため、図-4に示す地盤調査のイメージ図のように鉛直下方に対し、A橋で $\theta=40^\circ$ 、B橋で $\theta=35^\circ$ となる斜方向のRIコーン貫入試験を行うこととした。このような斜方向のRIコーン貫入試験は、これまで実績がなく、圧入時に十分な反力が得られず貫入能力が不足することが懸念された。そこで本調査では、杭の手前まで事前にボーリング孔を設けることで、貫入時の負荷を低減させるように配慮した。また、供用中の杭基礎に影響を与えないように、杭の近傍の事前削孔にあたってはプラスチックビットを使用して掘進した。さらに、作業を安全に進める上で、コーンプローブを確実に回収することが重要となるため、事前削孔による孔壁を泥水及びケーシングにより保孔することで、孔壁の崩壊を防止した。

なお、斜方向のRIコーン貫入試験を行うにあたり、孔壁の崩壊やゆるみによって原位置密度が精度よく得られない可能性が考えられたため、まず周辺地盤において杭間地盤と同じ方法で斜方向のRIコーン貫入試験を行い、鉛直方向のRIコーン貫入試験に対して得られる密度の値にほぼ差異がないことを確認した。現場の地盤調査状況は写真-1の通りである。

その他の調査項目としては、周辺地盤にて標準貫入試験及びPS検層を実施し、また採取した試料による室内土質試験(物理・安定化及び力学試験)を実施した。

### 4. 調査結果

#### 4.1 ボーリング調査結果

本調査による各橋のボーリング調査結果を図-5に示す。A橋は橋台背面で調査したため、地表から7mまで盛土層が堆積している。道示V4.5に基づき耐震設計上の地盤種別を判別すると、どちらの地点もⅡ種地盤に区分される。

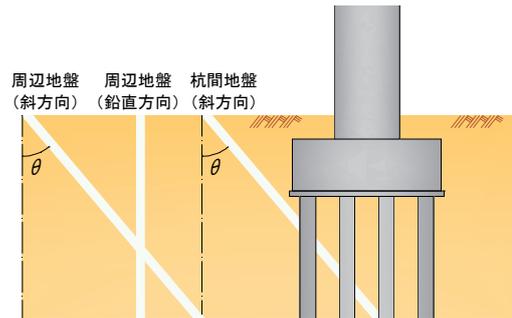


図-4 地盤調査のイメージ



写真-1 現場の地盤調査状況

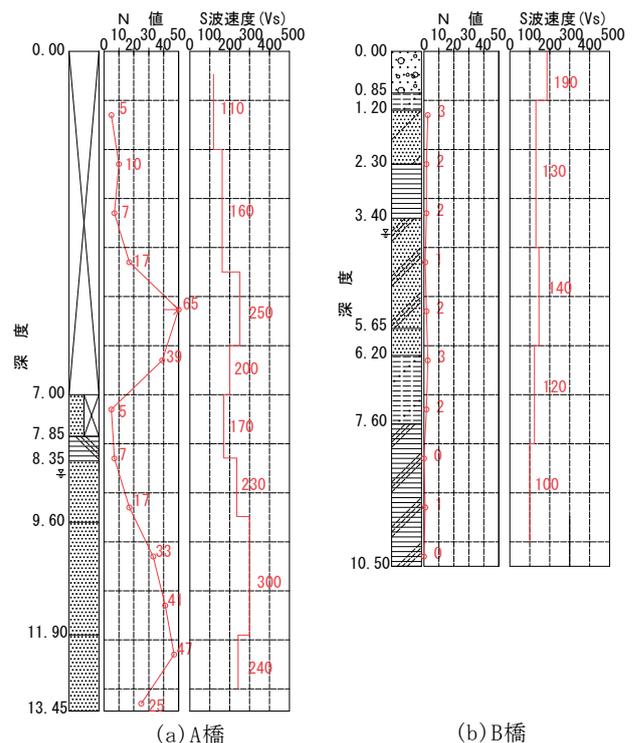


図-5 ボーリング調査結果

図-5より、杭の貫入に伴う密度増加を期待する地層は、A橋では深度8.35~9.60m（平均N値17）、B橋では深度3.40~6.20m（平均N値2）の沖積砂質土層がそれぞれ該当する。また、当該地層の標準貫入試験結果を用いて、道示V 8.2.3に基づき算出した液状化に対する抵抗率 $F_L$ を表-1に示す。橋に影響を与える液状化が生じる地盤かどうか判定すると、A橋ではレベル2地震動（タイプI及びタイプII）、B橋ではレベル1地震動及びレベル2地震動（タイプI及びタイプII）の時に $F_L$ が1.0以下となり、液状化が生じる地盤に判定されることを確認した。

4.2 杭間地盤の原位置密度の調査結果

図-6は、杭間地盤において、既製杭の打撃貫入による密度増加の有無を確認した結果である。なお、図中の杭間地盤にあたる深度は、RIコーンを地表からフーチングに接触しないよう斜方向に貫入し、杭間地盤に到達した際の鉛直深度を指す。そのため、沖積砂質土層の深度は、周辺地盤の調査の深度と異なり、A橋では9.8m、B橋では4.4m以深となる。さらにA橋の当該地層は、コーン貫入時の先端抵抗の測定結果から、杭の近傍で深度

8.35~11.80mまで、周辺地盤のボーリング調査位置よりも厚く堆積していることが確認されたため、鉛直方向のRIコーン貫入試験を杭近傍でも実施し、その結果と比較した。図-6は、各測定値に加え、対象橋梁の杭基礎をサンドコンパクションパイル工法（以下「SCP工法」という。）における砂杭とみなした場合に期待される密度の増加を計算し、実際の原位置密度と比較している。

SCP工法を想定した密度の算出にあたっては、図-3の杭配置を考慮し、各橋における杭断面積を杭配置面積で除して置換率を算出した。置換率は、A橋では7.9%（ $=0.283\text{m}^2/(2.0\text{m} \cdot 1.8\text{m})$ ）、B橋では11.3%（ $=0.283\text{m}^2/(1.3\text{m} \cdot 1.93\text{m})$ ）となった。また、期待される密度増分量の計算にあたっては、細粒分を多く含む土層ほど締め固め効果が得られに

表-1 各橋梁における液状化に対する抵抗率 $F_L$

橋梁名	液状化に対する抵抗率 $F_L$		
	レベル1地震動	レベル2地震動 (タイプI)	レベル2地震動 (タイプII)
A橋	1.866	0.622	0.604
B橋	0.825	0.275	0.201

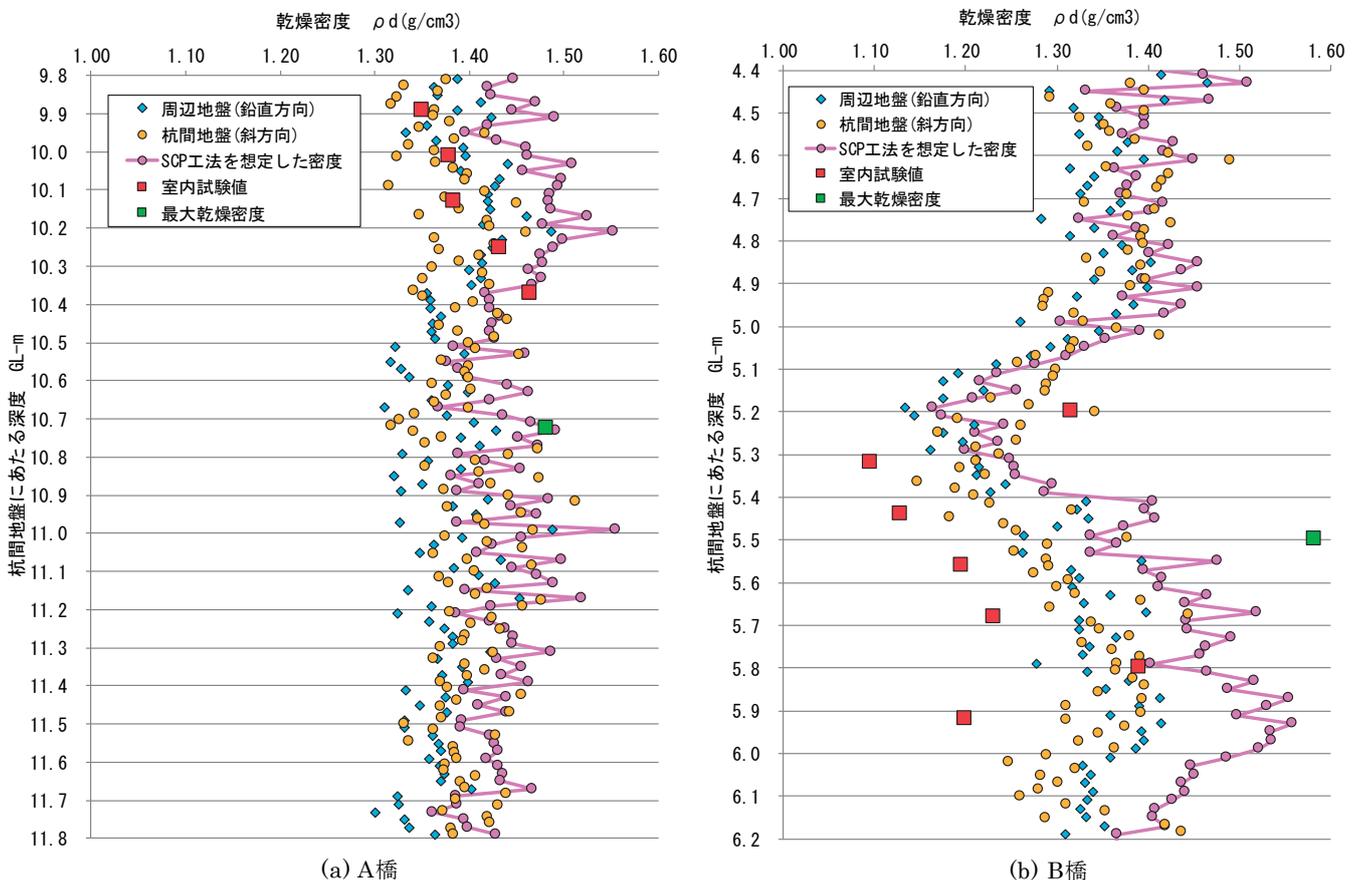


図-6 周辺地盤及び杭間地盤の乾燥密度の分布

くくなる傾向を考慮するため、山本ら<sup>3)</sup>が提案する有効締固め係数 $R_c$ を用いて補正を行った。このとき、 $R_c$ の算出に際して考慮する各深度における細粒分含有率 $FC$ は、静的コーン貫入試験で得られた先端抵抗と周面摩擦の計測値を基に、Robertson & Wride<sup>4)</sup>の式を用いて推定した。

図-6より、杭間地盤の密度増加について、周辺地盤と杭間地盤では、密度の値及び深さ方向分布に大きな差は確認されなかった。このような傾向はA橋、B橋に共通している。また、表-2に周辺地盤、杭間地盤、SCP工法の平均乾燥密度をそれぞれ整理した。表-2より、周辺地盤の測定値を基準に杭間地盤の密度増加率を計算すると、SCP工法ではA橋、B橋共に5%程度の密度増加であったのに対し、杭間地盤の測定値はA橋で1%程度、B橋で0.5%程度の密度増加に留まる結果となった。

以上より、鉛直方向及び斜方向のRIコーン貫入試験値と室内試験値の密度を比べると、杭の打撃貫入による杭間地盤の明確な密度増加は確認できなかったが、それらの値や深さ方向分布は概ね同様の傾向を示しており、RIコーン貫入試験自体の実用性については確認できた。

## 5. まとめ

本調査では、杭の打撃貫入による杭間地盤の明確な密度増加は確認できなかった。この原因については、例えば、開端杭を用いており、打撃貫入時における土砂の杭体内への流入により、SCP工法のような密度増加が得られなかったことが考えられる。

一方で、本調査では、試験的に鉛直及び斜方向のRIコーン貫入試験を行ったが、それらの比較から杭間地盤の調査方法自体の実用性については確認できた。

土木研究所では、今後も液状化地盤上の橋台を

表-2 各橋梁における各地盤の平均乾燥密度

橋梁名	平均乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )		
	周辺地盤 (鉛直方向)	杭間地盤 (斜方向)	SCP工法
A橋	1.380	1.392 (1.009)	1.443 (1.046)
B橋	1.318	1.324 (1.004)	1.391 (1.055)

※( )内の数値は各橋の周辺地盤の平均乾燥密度に対する比

対象にした大型振動台による振動実験や地盤解析技術の開発も含め、既設道路橋基礎の地震時挙動や限界状態の評価がより合理的にできるようにしていきたいと考えている。

## 謝 辞

本調査を実施するにあたり、国土交通省関東地方整備局常陸河川国道事務所、大阪市建設局道路部橋梁課にご協力を頂いた。また、本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人：JST)の一環として実施した。ここに記し、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 中谷昌一、星隈順一、白戸真大、西田秀明、谷本俊輔、横幕清、豊島孝之：既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究、土木研究所資料、第4168号、2010.5
- 2) 三村衛、Abhay K. SHRIVASTAVA、柴田徹、延山政之：RIコーンによる砂質地盤の原位置含水比・湿潤密度検層とその精度評価について、土木学会論文集No638、III-49、pp.227~240、1999.12
- 3) 山本実、原田健二、野津光夫：締固め砂杭工法を用いた緩い砂質地盤の液状化対策の新しい設計方法、土と基礎、Vol.48、No.11、pp.17~20、2000
- 4) Robertson, P. K. & C. E. Wride: Liquefaction of sands and its evaluation, IS-TOKYO '95, 1<sup>st</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Keynote Lecture, 1995.

高橋宏和



土木研究所構造物メンテナンス  
研究センター 交流研究員  
Hirokazu TAKAHASHI

谷本俊輔



土木研究所地質・地盤研究グループ  
土質・振動チーム 研究員、(併)構  
造物メンテナンス研究センター 研  
究員  
Shunsuke TANIMOTO

七澤利明



土木研究所構造物メンテナンス  
研究センター 上席研究員  
Toshiaki NANAZAWA