新技術導入に対応した基礎の性能検証方法構築に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 5～令 7
担当チーム：橋梁構造研究グループ
研究担当者：西田秀明、飯島翔一

【要旨】
本研究は、従来採用されていないまたは実績が少ない新技術の適用の検討にあたり、当該技術の採否や適用条件の明確化のために必要な性能検証事項や方法の標準的な考え方の提示を基礎を対象に行うことを目的としたものである。本研究では、道路橋の基礎を対象に、従来から標準的な照査の考え方が規定されている形式の性能検証方法に基づいて一般化した性能検証の考え方を整理するとともに、施工の影響が性能評価に影響しうる工法のひとつであるバイブロハンマ工法を対象に、杭の鉛直支持力に関する性能検証の事例をまとめた。
キーワード：新技術、基礎、性能検証方法、地盤性状の変化

1. はじめに

土木を含む建設業界では、熟練技術者、労働者の不足が深刻化しており、我が国の持続的な発展における問題の一つとして挙げられる。そのため、コストの縮減や生産性の向上に寄与する新技術の導入・活用が期待されており、例えば、2040 年道路政策ビジョン「2040 年、道路の景色が変わる ～人々の幸せにつながる道路～」では、道路分野においても、新技術を積極的に活用していくことが必要であると提言されている [1)]。また、新技術の導入を後押しするために、調達制度や第三者機関による認証制度などが各構造物の実態に則する形で整備が進んでいる [例えば 2),3)]。さらに技術基準の観点からは、仕様規定型から性能規定型への転換が多くの構造物で進みつつあり、新技術の採用、新材料の選定などをしやすい環境が整いつつある。

道路橋の下部構造に着目すると、地形・地質や近接する他の構造物との兼ね合いなどの様々な制約条件の下で基礎を構築する必要があることを踏まえ、施工の安全性・効率性の向上や周辺環境への配慮などの目的から様々な新技術が提案されており、多様な方法で基礎が構築されている。一方で、新技術を導入するにあたっての具体的な性能検証方法や性能水準などが示されておらず、技術基準を満足しているかどうかを確認する方法が整備されていないという課題がある。

本研究では、新たな技術による基礎を適用する際の検討にあたって、検証すべき事項や検証方法の標準的な考え方の提示を目的として、道路橋の基礎を対象として、道路橋示方書で従来から標準的な照査の考え方が規定されている基礎形式における性能検証方法に基づいて一般化した性能検証の考え方を整理するとともに、施工の影響が基礎の性能評価に影響しうる工法のひとつであるバイブロハンマ工法を対象として、杭の鉛直支持力に関する性能検証の事例をまとめた。

2. 基礎の新技術導入にあたっての性能検証の基本的な考え方の整理

新しい建設技術の活用促進に寄与することを目的とし、道路分野においても活用されている制度としては、建設技術審査証明事業 [3)]（以下、審査証明と呼ぶ）がある。この事業は、建設技術審査証明協議会の会員である法人が、民間において自主的に研究・開発された新技術について、依頼者の申請に基づき、学識経験者等で構成される委員会で技術審査し、証明し、普及活動に努めるものである。ここで技術審査し、証明されるのは、依頼者である技術の開発者が掲げた開発目標に対してであり、その目標に沿って開発者自身が行った検証内容に基づいて行う。

道示に標準的な考え方が規定されていない新技術の採用にあたっては、当然ながら道示に規定される要求性能を満足することが求められ、そのために必要な耐荷力や変形能、耐久性などに関する各種特性を検証する必要がある。したがって、道路橋への新技術の採用の検討にあたっては、道示の要求する性能に照らして確認する必要があり、場合によっては新技術の開発者が性能検証した事項や審査証明で確認された事項だけでは不十分な場合もあり得る。一方で、道路橋示方書・同解説の I 共通編 1.8.2 では、「設計では、理論的な妥当性を有する手法，実験等による検証がなされた手法

等適切な知見に基づいて行わなければならない。」と規定[4]されているものの、新技術に対する具体的な検証方法等までは規定されていない。このような技術に対する性能検証の考え方をとりまとめた資料として、国土交通省国土技術政策総合研究所が公表している新技術ガイドライン[5]がある。ここでは「標準解（いわゆる「みなし仕様規定」）との相対比較において「少なくとも標準解として規定されている手法と比較して同等またはそれ以上の性能が着目した観点において得られると考えることができる」という証明を行うことが有力な検証手法となりうる」とされている。そして、道示Ⅰ1.8.2でも「採用の判断にあたっては，当該橋の条件に応じて，要求する事項を満たすとみなしてよい方法として規定されている方法に従う場合に確保される性能と同等以上の性能を実現できるかどうかという観点で要求性能が満足されることを証明したうえで行わなければならない。」と解説されている。

そこで、本研究では基礎の新技術を採用する場合においても同様に、道示の要求性能を満足ために必要となる検証方法を、道示に規定される基礎工法の検証内容と比較することにより整理した。以下では、杭基礎の鉛直支持力特性に関する性能検証を対象に述べる。

杭基礎では、道示Ⅳ下部構造編[6]15.1の解説に4つの基本的要件が示されている。そのうち、特に杭基礎の鉛直支持力特性に着目すると関係する要件は、①鉛直載荷試験の結果から極限支持力及び沈下特性が明らかであること、②杭と基礎地盤の間に緩みがなく、変位の小さな段階から地盤抵抗を確保できること、である。これらは道示に規定されている工法はもとより、新工法においても求められる。そのうえで、杭基礎に求められる性能を満足することを確認する必要がある。そこで①、②の要件に関わりうる事項を、道示に標準的な考え方の規定がある杭工法やこれまで行われてきた杭工法の審査証明での検証内容などを参考に整理した。既往の事例では、載荷条件に関してはいずれも段階載荷方式の多サイクル方式であり杭の鉛直載荷試験方法・同解説[7]における特性調査試験であるが、地盤条件や杭の寸法は様々である。これは適用を想定する条件に応じて、寸法効果や杭先端の閉塞効果などが極限支持力、沈下特性に及ぼしうることを検証するためと考えることができる。さらに②の観点からは杭体そのものや杭体を地盤中に設置する方法などの施工方法の影響も考慮する必要がある。例えば、杭体を原地盤中に打込む、押込む場合と、掘削した後に杭体を挿入する場合では、杭体周辺の地盤を密にする・緩めるという違いがある。また、補助工法を併用する場合はこれが地盤の状態に影響しうることも加味する必要がある。これらは、杭体の周辺地盤の強度や剛性の変化を伴いうるものであるが、その影響の範囲や経時的な影響の程度も様々であるため、支持力特性に係る性能検証はこれらの違いも考慮することが求められるといえる。道示では、これらの違いに応じて、工法の区分や、支持力特性の評価、前提となる施工の管理方法が一連となって標準的な考え方として確立されている基礎工法が規定されている。

3. 施工の影響を考慮した杭の鉛直支持力特性の性能検証例（バイブロハンマ工法の例）

本研究では、このような施工の影響により支持力特性にばらつきが大きくみられる工法のひとつであるバイブロハンマ工法を例題として、性能検証を試みた。

バイブロハンマ工法は、鋼管杭等を把持しながら強制的に上下振動させることで地盤の抵抗を一時的に低減し、自重により地盤に打ち込むものである。打込み杭工法の一つとして分類され、打撃工法よりも振動・騒音が小さい特徴を持つ。

既往の杭の載荷試験から得られている知見[8]によると、周面抵抗力特性を代表する指標である最大周面摩擦力度は打撃工法よりも低い傾向があることや、砂質土のN値との相関が低い傾向があることがわかっている。同じ打込み杭工法と分類される打撃工法あるいはバイブロハンマ工法であるにもかかわらず最大周面摩擦力度の傾向の違いが得られたことからすると、道路橋基礎への適用にあたっては、両者の違いが鉛直支持力に及ぼす影響を明らかにするための性能の検証が必要と考えられる。そこで、施工法の観点から両工法をみると、打撃工法は鉛直下方に離散的かつ鉛直下方のみに杭を沈めるのに対して、バイブロハンマ工法は連続的にかつ上下方向に振動を加えて杭を沈めるという鉛直支持力に影響を及ぼしうる違いがある。このことから、施工法による杭周面の地盤に与える影響の違いが鉛直支持力に及ぼす影響について性能検証が必要であるといえる。

振動により地盤が乱れるメカニズムは、地盤の体積収縮・膨張、間隙水圧、土質、振動特性などの様々な要因が相互に関係していると考えられる。本研究ではメカニズムの一つとして砂質土の粒子の噛み合わせに着目して、粒度と粒子形状の違いが周面摩擦力度に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、模型実験により検証を試みた事例を示す。

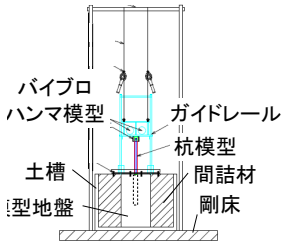

図-1　PPT の実験装置概要図（Case2~4）

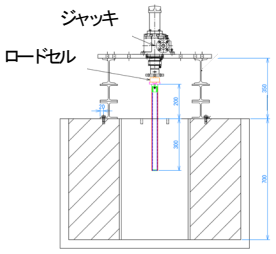

図-2　SLT の実験装置概要図

表-1　実験ケース

ケース	貫入方法	地盤材料	D_r %	c kN/m^2	φ °	ρ_d g/cm^3	ρ_{dmin}/ρ_{dmax} g/cm^3	ρ_s g/cm^3	U_c -
Case1	打撃	宇部珪砂6号	80	8.15	44.2	1.591	1.358 / 1.678	2.619	2.03
Case2	振動								
Case3		混合土A		0.319	34.2	1.587	1.424 / 1.650	2.554	2.06
Case4		混合土B		24.3	43.9	1.712	1.392 / 1.831	2.623	5.83

3.1　実験概要

実験ケースは、杭の貫入方法、地盤の粒度及び粒子形状を変化させた、**表-1** に示す 4 ケースである。模型実験は、杭の打込みを模擬して貫入し（以下「PPT」という）、その後に静的に載荷した（以下「SLT」という）。例として、Case2~Case4 の PPT 及び SLT における実験装置の概要を**図-1** 及び**図-2** に示す。PPT は貫入が停止する度に貫入力を高めていき、目安とする貫入量 300mm に達するまで貫入を繰り返した。貫入終了後、４サイクルで静的に載荷した。模型地盤は、各地盤材料を相対密度 80%で均質になるよう突固めて作製した。各地盤材料は、Case1, 2 は宇部珪砂 6 号、Case3 は粒子形状の影響を確認することを目的として宇部珪砂 6 号とガラスビーズを乾燥質量 1:1 で、Case4 は粒度の影響を確認することを目的として宇部珪砂新特 5 号 A 及び 6 号、7 号を乾燥質量 1:1:1 で混合させた材料である。室内土質試験によって得られた、これらの物性値を**表-1** に合わせて示す。ここに、D_r:相対密度、c:粘着力、φ:せん断抵抗角、ρ_d:乾燥密度、ρ_{dmin}/ρ_{dmax}:最小密度 / 最大密度、ρ_s:土粒子の密度、U_c:均等係数である。模型杭は、外と内の周面摩擦を分離して計測することを目的として、杭模型を二重管構造で作製した。外の周面摩擦は外管で、内の周面摩擦と先端抵抗は内管で受けるようにした。

3.2　実験結果

図-3 および**図-4** に Case1～Case4 の杭頭荷重 P_h と杭先端深度の関係および周面摩擦力度 f の深度分布を示す。**図-3** の縦軸が杭先端の深度を、横軸が杭頭荷重 P_h を表し、黒線が PPT、赤線が SLT の結果で、青線はバイブロハンマ模型の振動周波数を指令した時点を示している。PPT 及び SLT 終了時点での杭模型の貫入深度を点線及び一点鎖線で示す。**図-4** の縦軸が模型地盤の深度を、横軸が周面摩擦力度 f を表している。**図-3** と同様に、PPT 及び SLT 終了時点での杭模型の貫入深度を点線及び一点鎖線で示す。

粒子形状の影響を確認するため、Case2 と Case3 を比較した結果について示す。

PPT、SLT 終了時点の杭頭荷重 P_h は、Case2 では約 3500N、5000N であるのに対して、Case3 は約 1700N であり Case2 よりも小さいことがわかる。周面摩擦力度 f も同様に Case3 は Case2 よりも小さい。また、**表-1** に示す室内土質試験の結果においてもせん断抵抗角 φ は Case3 の方が小さい。これらのことから、Case3 では丸みを帯びた粒子を多く含むことにより、粒子同士の噛み合わせに起因する抵抗力が小さかったと考えられる。

また、**図-4**(b)を見ると、Case2 では SLT の 1 サイクル目の周面摩擦力度 f が特に大きく、2 サイクル目以降は小さくなっている。これは、PPT で杭先端付近の地盤が締固められた影響により 1 サイクル目は周面摩擦力度 f が大きく、それ以降は摩擦が切れたように状態が変化したためと考えられる。一方で、**図-4**(c)を見ると、Case3 では周面摩擦力度 f は載荷サイクルによって大きな変化が見られない。このことから、丸みを帯びた粒子を多く含む場合は粒子同士の噛み合わせの変化や地盤の収縮や膨張は起こらなかったと考えられる。

次に、粒度の影響を確認するため、Case2 と Case4 を比較した結果について示す。

PPT、SLT 終了時点の杭頭荷重 P_h は、Case4 は約 1700N、3500N であり、Case2 よりも小さいことがわかる。周面摩擦力度 f も同様に、Case4 は Case2 よりも小さい。一方で、**表-1** に示す室内土質試験の結果を見ると、せん断抵抗角 φ は同程度で、粘着力 c は Case4 の方が大きくなっている。しかしながら、最小密度 ρ_{dmin} と最大密度 ρ_{dmax} の結果に着目すると、その差分は Case4 の方が大きくなっている。つまり、Case4 の方が密度の変化幅が大きいため、体積変化しやすいといえる。これらのことから、せん断抵抗角 φ や粘着力 c などの強度定数は Case4 の方が大きい一方で、体積変化が起こりやすいことから、貫入によって砂の粒子の噛み合わせが変化したときに、杭周辺地盤の体積が減少し、緩むことによって周面摩擦力度 f、ひいては杭頭荷重 P_h が小さくなったと考えられる。

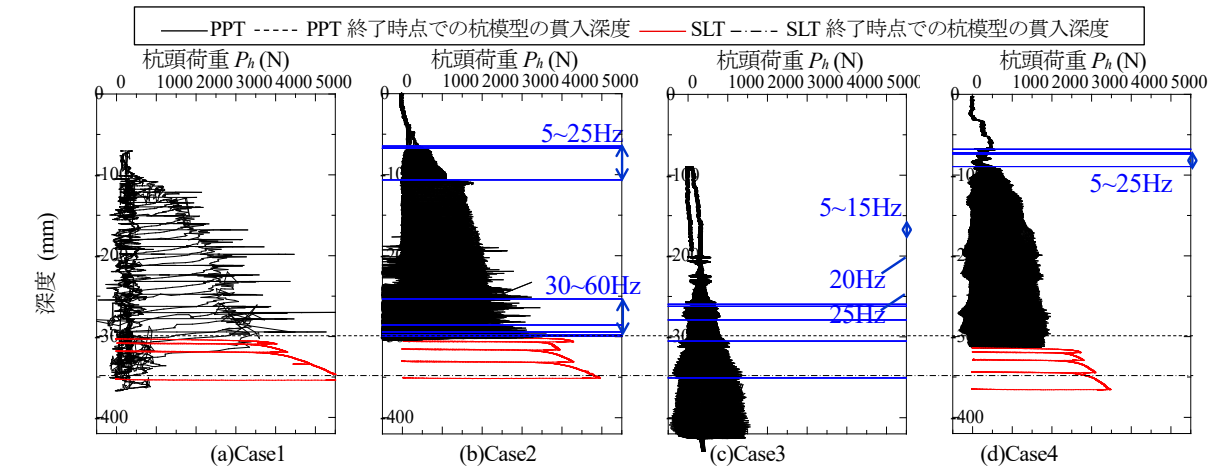

図-3　杭頭荷重 P_h と杭先端深度の関係（Case1～4）

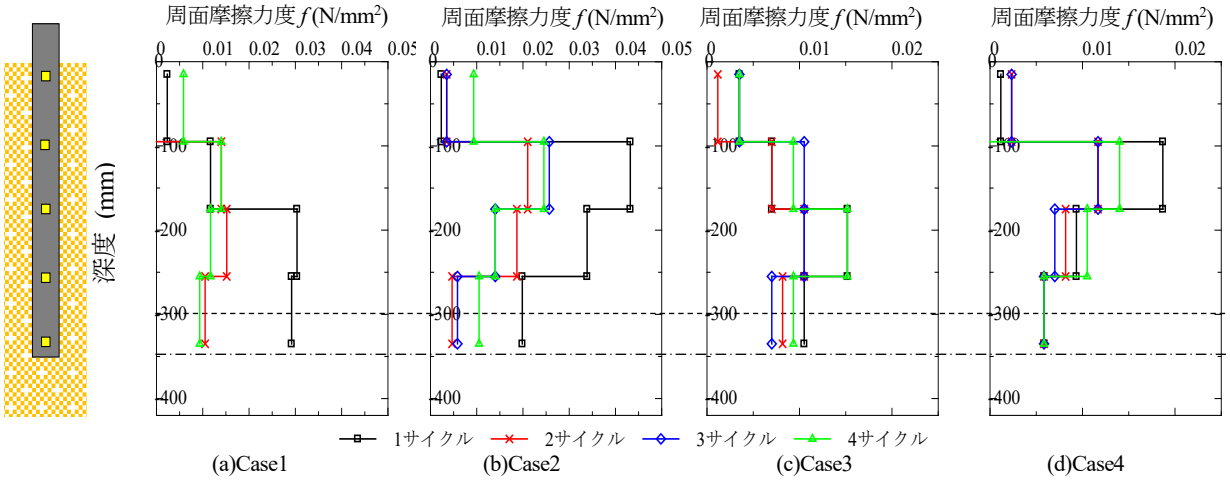

図-4　周面摩擦力度 f の深度分布（Case1～4）

4.　まとめ

本稿では、新技術の基礎を適用する際の検討において検証すべき事項や方法の標準的な考え方の提示を目的として検討を行った結果を報告した。道路橋の基礎を対象として、道路橋示方書で従来から標準的な考え方が規定されている基礎形式における性能検証内容との対比によって鉛直支持力特性に関する性能検証の考え方を整理した。これを踏まえて施工の影響が基礎の性能評価に影響する例として、バイブロハンマ工法の鉛直支持力に関する性能検証の事例をまとめた。その結果、砂の粒子形状の違いはせん断抵抗角で代表される強度の違いにより支持力特性が変化することが確認され、施工の乱れによる影響は確認できなかった一方、粒度の違いにより体積変化のしやすさに違いが生じ、それが施工時の振動により杭近傍の地盤が緩むことにつながった結果、支持力特性の低下に影響した可能性が示唆される結果が得られた。

参考文献

1)　国土交通省：2040 年、道路の景色が変わる ～人々の幸せにつながる道路～、2020.
（URL: https://www.mlit.go.jp/road/vision/pdf/01.pdf）

2)　国土交通省：新技術情報提供システム（NETIS）、
（URL: https://www.netis.mlit.go.jp/NETIS）

3)　建設技術審査証明協議会：建設技術審査証明事業、
（URL: https://www.jacic.or.jp/sinsa/index.html）

4)　（公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、丸善、 2025

5)　国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋の設計における諸課題に関わる調査（2018-2019）付録 1 新技術評価のガイドライン、国総研資料 第 1162 号、2021.

6)　（公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、 丸善、 2025

7)　（公社）地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説-第一回改訂版、 2002

8)　（国研）土木研究所：杭の軸方向の支持力及びばね定数推定式の見直しと推定精度の評価に関する研究、土木研究所資料、第 4374 号、pp.85-90、2018.

RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF BASIC PERFORMANCE VERIFICATION METHODS CORRESPONDING TO THE INTRODUCTION OF NEW TECHNOLOGY

Research Period: FY2023-2025
Research Team: The Bridges and Structural Technology Research Group
Author: NISHIDA Hideaki
IIJIMA Shoichi

Abstract: This study aims to improve the safety and efficiency of foundation construction under various constraints and to present a standard approach to the matters and methods that should be verified when introducing new technologies. Based on the idea that individually verifying that a new foundation technology satisfies the performance requirements of the Specifications for highway bridge by comparing it with a standard solution to verify that it has performance equivalent to or better than the standard solution, this study attempted to verify the performance of the vibro-hammer method, one of the construction methods in which the bearing capacity characteristics vary greatly due to the influence of construction, using the vertical bearing capacity as an example, through model experiments.

Keywords: New technology, Performance verification method, Foundation, Change in ground condition

論文リスト

- **学術誌等による成果普及**

査読無し論文・国内（計 1 本）

c-1) 飯島翔一、岡本宗一郎、西田秀明：バイブロハンマ工法で打設された杭基礎の周面摩擦力度に砂質土の粒度や粒子形状の違いが与える影響、土木技術資料、第 68 巻、第 4 号、pp.8-11、2026.4

学会発表等その他（計 1 本）

e-1) 飯島翔一、田中一徳、西田秀明：粒度や粒子形状を条件としたバイブロハンマ工法による杭の貫入および静的載荷模型実験、土木学会年次学術講演会講演概要集、2025.9