



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Dynamic Frequency-Dependent Soil-Pile-Structure Interactions in Damage-Controlled Bridge Piers with Different Foundation Systems and Their Incorporation into a Response Displacement-Based Seismic Design Framework
Author(s)	MAHMOOD UL HASSAN, MUHAMMAD
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第17017号
Issue Date	2026-06-30
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k17017
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/100070
Type	doctoral thesis
File Information	Muhammad_Mahmood_UL_Hassan_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 Muhammad Mahmood Ul Hassan

審査担当者 主 査 准教授 磯部 公一
 副 査 教 授 松本 高志
 副 査 教 授 宮森 保紀

学位論文題名

Dynamic Frequency-Dependent Soil-Pile-Structure Interactions in Damage-Controlled Bridge Piers with Different Foundation Systems and Their Incorporation into a Response Displacement-Based Seismic Design Framework

(異なる基礎形式を有する損傷制御型橋脚における周波数依存的な地盤-杭-構造物動的相互作用の
解明と応答変位法に基づく耐震設計フレームワークへの拡張)

鋼管集成橋脚は、既製鋼管 4 本を履歴型ダンパー機能を有するせん断パネルによって結合した新しい形式の橋脚である。本橋脚には損傷制御設計が適用されており、死荷重や活荷重などの鉛直荷重は主部材である鋼管柱が支持し、地震時の慣性力などの水平荷重は二次部材である横つなぎ材が抵抗する。この機構により、地震時の損傷を横つなぎ材のせん断パネルに集約し、主部材である鋼管柱を健全に保つことが可能となる。

本研究では、この鋼管集成橋脚に対し、基礎構造を合理化した杭基礎一体型鋼管集成橋脚を新たに提案し、従来のフーチング形式との地震時挙動を比較することで、その構造成立性を検討している。本構造は、鋼管集成橋脚において柱部でのエネルギー吸収により下部構造への伝達荷重が低減される点に着目し、鋼管柱と杭を 1 対 1 で接続することで、フーチングを介さずに上部構造および橋脚からの荷重を直接伝達する形式を採用している。これにより、フーチング重量の低減、橋脚と基礎の剛性差の解消による接合部の応力集中の緩和、施工期間の短縮およびコスト削減、狭隘条件下における杭基礎の適用可能性の向上など、多くの利点が期待される。これらの有効性を実験的に検証するため、1/20 スケール模型を用いた振動台実験を実施し、乾燥砂地盤および液状化地盤における変形特性および耐震性能が評価されている。その結果、杭基礎一体型は従来のフーチング型に対して優位な挙動を示すことが確認されている。

本論文では、この振動台模型実験結果の再現を目的として 3 次元弾塑性有限要素解析を実施している。鋼管柱および地中梁はバイリニア型弾塑性梁要素によりモデル化され、せん断パネルはバイリニア型弾塑性梁要素とバイリニア型弾塑性ばね要素を組み合わせで表現されている。杭と地盤の相互作用については、バイリニア型弾塑性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を用いてモデル化されている。地盤の構成則には、上負荷面および下負荷面の概念を導入したサイクリックモビリティモデルを採用し、パラメータは三軸圧縮試験および等方圧密試験により決定されている。また、対称性を考慮した半断面解析モデルを用い、境界条件は実験条件を適切に再現するように設定されている。数値解析の結果、慣性力と橋脚頂部変位の関係や降伏前のせん断パネル挙動については、実験結果と良好に一致した。一方、杭基礎一体型においては、降伏後領域においてヒステリシスループの広がりや初期剛性に若干の差異が見られたが、ピーク応答や杭に沿った変形分布な

ど、全体的な挙動は適切に再現された。特に入力振動数 2 Hz においては、杭基礎一体型構造が従来のフーチング型構造に比べて応答が小さく、構造的優位性が確認された。しかしながら、広範な周波数帯におけるパラメトリック解析の結果、この優位性は周波数に依存し、低周波数域では共振の影響により杭基礎一体型の応答が増大することが明らかとなった。

続いて、地盤-杭-橋脚構造物の動的相互作用の本質的メカニズムを明らかにするため、慣性相互作用と運動学的相互作用を分離した解析が実施されている。加えて、位相差に基づく評価手法を導入し、各相互作用の支配性が定量的に検討されている。その結果、低周波数域では慣性相互作用が支配的であるのに対し、高周波数域では運動学的相互作用が支配的となることが示された。また、入力周波数の増加に伴い土圧の寄与が増大し、特にフーチング型構造では慣性力との作用方向が反転することが確認された。さらに、位相差の影響により、両相互作用の重ね合わせが全体応答を低減する可能性も示唆された。

これらの知見に基づき、本研究では鉄道構造物等設計標準・同解説に示された応答変位法を拡張した簡略型静的解析フレームワークが提案されている。本手法は、位相差および地盤の非線形性を考慮しつつ、慣性効果と運動学的効果を相互作用係数により統合的に評価するものであり、動的解析結果を良好に再現できることが確認された。また、本手法は液状化地盤にも拡張され、剛性低下の影響を考慮した評価が可能であること、杭基礎一体型構造にも適用可能であることが示された。

これを要するに、著者は、損傷制御型橋脚に対する合理的な杭基礎構造の実用化に資する実験的および数値解析的検証成果を示すとともに、当該基礎構造における地盤-杭-橋脚構造物の動的相互作用に関する新たな知見を提示している。特に、慣性相互作用と運動学的相互作用の複合効果を考慮した簡便かつ合理的な耐震設計手法の構築は、基礎構造物の耐震設計手法の高度化に資する重要な成果であり、地盤工学および耐震基礎工学の発展に大きく寄与するものである。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与されるに十分な資格を有するものと認める。