

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

論文題目

軟弱地盤上に建設される海上橋梁の下部構造における耐震設計方法に関する研究

A Study on the Seismic Design Method of Foundation Construction of Seaside Bridge on Soft Ground

申請者

齊藤	泰
Yutaka	SAITOU

建設工学専攻 構造設計研究

2012年 4月

本研究の対象としている東京ゲートブリッジは、海上部に建設される東京港第三航路を横断する3径間連続鋼トラスボックス複合橋である。

本橋の主塔部橋脚の設計にあたっては大きく二つの問題があった。一つ目は「道路橋示方書」の適用範囲支間長である200mを超える長大橋であり、主橋脚が約80,000kN/基という大きな反力を支持しなければならないこと。二つめは周辺地盤においてN値0の軟弱な沖積層が30m以上堆積しているため、支持層がA.P.-50m~-70m程度と非常に深い位置に存在することである。以上から、入力地震動の設定や耐震性能の設定にあたっては、慎重な設計検討が必要であった。

本研究では、このような技術的課題に対し、大型の機能分離型すべり免震支承、 $\phi 1,500\text{mm}$ の大口徑鋼管杭を用いた鋼管矢板井筒基礎を採用した軟弱地盤上に建設される海上橋梁の下部・基礎構造の耐震設計方法について提案するものである。

本論文は、5つの章により構成されている。

第1章「序論」では、本研究の背景、目的、既往の研究および技術的課題について述べている。既往の研究については、軟弱地盤上に建設される構造物の動的解析に用いられる入力地震動に関する研究、 $\phi 1,000\text{mm}$ を超える大口徑の鋼管杭載荷試験および試験より得られた杭の先端支持力機構に関する研究、機能分離型すべり免震支承の特性および設計方法に関する研究について取りまとめている。

入力地震動に関する研究については、合理的な耐震設計を実施するために、本橋建設地点近傍の構造物の入力地震動について調査し、得られた知見を取りまとめ評価をしている。大口徑の鋼管杭載荷試験に関する研究については、 $\phi 1,000\text{mm}$ を超える鋼管杭の載荷試験および支持力機構についての研究事例を調査し、本橋が建設される東京湾内で実施された載荷試験を中心に取りまとめ評価をしている。機能分離型すべり免震支承に関する研究については、支承の特性、免震設計方法、動的解析における減衰モデルに関する研究を中心に取りまとめている。既往の研究を整理して本研究の対象を明確にしている。

第2章「設計方法の検討」では、東京ゲートブリッジの耐震設計方法について述べている。本橋の耐震性能は立地条件を考慮し、レベル1、レベル2地震動とも構造材料を降伏応力以下にする要求性能としている。レベル2(タイプI)地震動は、近隣の地震記録をもとに経験的グリーン関数法を用いて南関東地震を想定した基盤面波を新たに設定している。レベル2(タイプII)地震動は、兵庫県南部地震の観測波を基盤面波とし、橋軸方向、橋軸直角方向それぞれに入力している。これにより、本橋のような長周期成分を含む地震動に対して共振する恐れのある固有周期が比較的長い橋梁の場合、免震支承を採用することで弾塑性挙動となり、大地震時の固有周期が一義的に定まらない場合の橋梁において、妥当な入力地震動設定方法であることを明らかにしている。

地震時の構造計算については、上部構造と支承、橋脚を三次元骨組モデル、基礎と周辺地盤を平面ひずみ要素でモデル化し、両者の計算モデルの境界部で入出力を相互にやり取りする動的サブストラクチャー法を提案している。これにより、骨組モデルで表現されている上部構造・支承・橋脚・基礎バネ各部位に生じる時刻歴応答値が求められ、耐震安全性の照査を最大反力、断面力、変位でおこなうことを可能としている。一般的な道路橋で採用されている設計手法では、基礎天端に作用する荷重が与えられる為、地盤の変形によって生ずる基礎構造の変形の影響を考慮した安全性の検討が十分なされないという点がある。本橋のように構造物が軟弱地盤条件下にあり、杭基礎構造を採用した深い基礎構造の場合、基礎構造の安全性に対して周辺地盤の影響を考慮する必要があったため、耐震安全性の照査が可能となるこの設計方法は妥当であることを示している。最後に、設定した入力地震動、設計方法を用いて要求性能を照査し、許容値内で収まる結果としている。

第3章「鋼管杭載荷試験結果の鋼管矢板井筒基礎設計への適用」では、静的載荷試験(押込み、水平)、急速載荷試験を実施し、試験結果をもとにした鋼管矢板井筒基礎設計定数を用いた設計照査結果について述べている。

押込み試験の結果から、 $\phi 1,500\text{mm}$ の開端鋼管杭を支持層へ $3D$ (D :杭径)根入れした場合のみかけの閉塞率を明らかにすると共に、既往の載荷試験結果よりも大きな支持力が取れることを述べている。載荷試験を実施することで、杭の閉塞効果を適切に把握することを証明し、合理的な設計が実施できることを明らかにしている。礫層の周面摩擦力は「道路橋示方書」に規定された関係式で与えられる値よりも大きな値となることを明らかにしている。載荷試験結果から鉛直方向地盤反力係数を算定し、孔内水平載荷試験から推定した値より精度が良くなることを明らかにしている。

最後に、設計定数を各土質試験結果を用いた基礎断面と鉛直方向地盤反力係数、水平方向地盤反力係数、杭先端支持力および杭周面摩擦力を載荷試験結果から設定した基礎断面を比較している。ここで、設計に用いる極限支持力は杭の先端支持力と周面摩擦力度の組み合わせであるとして、載荷試験で得られた提案値を採用し新たな修正式を提案している。大口径鋼管杭を用いる時、地盤調査結果をもとにした設計基準等に示される標準的な推定式を用いた支持力設定では、十分な精度が得られない場合が多く、杭の載荷試験を実施することは合理的な設計を行う上では有効であると結論付けている。

第4章「機能分離型すべり免震支承を用いた免震設計」では、鉛直支承部すべり面におけるせん断載荷試験を実施することにより摩擦係数の面圧・速度依存性を調べ、モデル式の各パラメータ値を設定し、動的解析結果について述べている。

試験結果から、載荷順序の影響が載荷履歴に現れないこと、載荷時における急

激な温度上昇は認められないこと、偏心载荷による支承の摩擦係数に与える影響は小さいことを明らかにしている。今回の試験では、加振回数の増加に伴い摩擦係数が低下する傾向がみられたが、原因はテフロン板の融解であることを明らかにしている。

また、既往の面圧・速度依存型バネモデル式を用いて、試験結果から支承バネモデルを設定している。ここでは、本橋の支承部における最大速度および死荷重反力に着目したモデル式へのフィッティングを実施している。今回の試験では、摩擦係数の低速度帯へのフィッティングが良好となっていなかったことから、面圧、速度の双方が摩擦係数に対し指数関数的な変化を示していることに着目し、両者の関係を自然対数で近似した新たな修正式を提案している。

次に、今回の試験より得られたバネ定数を用いてバイリニア型支承バネモデルを用いた動的解析を行い、鉛直方向地震動は支承の免震効果に与える影響が小さいことを明らかにしている。第2章で設定したレベル1およびレベル2(タイプI、タイプII)地震動を入力し、動的解析の結果、「道路橋示方書」、「道路橋支承便覧」の許容値内で収まることを確認している。摩擦力をバイリニア型でモデル化して免震設計を行う場合には、摩擦係数が0.05~0.2程度の範囲が良く、鉛直支承のすべり面の摩擦係数の適合性に留意が必要であると結論付けている。

第5章「結論」では、本研究によって得られた各章毎の結論を取りまとめている。本橋では、上下方向と水平方向の機能を分離した大型の機能分離型すべり免震支承を採用し、鉛直支承におけるすべり面の摩擦力によるエネルギー減衰を考慮している。今回の試験結果を基に地震応答解析を行い、水平機能を構成する水平抵抗部材のゴムバッファーについては、「道路橋示方書」等に示される許容せん断ひずみ内に納めた。

押込み試験の結果から $\phi 1,500\text{mm}$ の開端鋼管杭を支持層に3D根入れした場合のみかけの閉塞率はレキ層75%、砂層50%となった。今回の試験結果からは、既往の载荷試験の結果から得られた支持力より大きな値を取ることができた。周面摩擦力は押込み試験、急速载荷試験結果から試験杭の設置条件、試験方法にかかわらず、砂質土層、粘性土層では「道路橋示方書」に規定された関係式で与えられる値と同様であった。試験結果を用いて基礎の設計を見直したところ、鋼管矢板の値入長を短くすることができたほか、鋼管矢板井筒基礎の断面積を基本設計の5割まで低減することができた。

レベル1およびレベル2地震動として「道路橋示方書」に示される地震波形とともに、関東地震クラスの模擬地震動を用い、地盤と基礎構造との動的相互作用を考慮した動的サブストラクチャー法を採用要求性能を照査し、鋼管矢板井筒基礎の鋼管杭、鉄筋コンクリート製橋脚および鋼トラス部材の材料の要求性能を降伏応力以下にすることができた。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 齊藤 泰 印

(2012年 4月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
①論文	
○1)	東京港臨海大橋(仮称)の耐震設計法について 構造工学論文集 Vol.56A, pp.393-406, 2010.3 齊藤泰, 日下部治, 清宮理, 下迫健一郎, 川上泰司
○2)	東京ゲートブリッジで採用した機能分離型すべり免震支承の力学特性 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.67, No.3, pp.503-516, 2011.9 齊藤泰, 米山治男, 川上泰司, 日下部治, 清宮理, 今井隆
○3)	東京ゲートブリッジにおける鋼管杭載荷試験結果の鋼管矢板井筒基礎設計への適用 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.67, No.4, pp.544-557, 2011.12 齊藤泰, 菊池喜昭, 日下部治, 清宮理, 米山治男, 川上泰司
○4)	ASASEISMICITY OF THE TOKYO BAYSIDE ROAD BRIDGE WITH STEEL PIPE SHEET PILE FOUNDATION CONSTRUCTED ON EXTREAEELY SOFT GROUND IABSE, 2010. May Osamu Kiyomiya , An Tongxiang, <u>Yutaka Saitou</u> , Teruo Chiba
②講演等	
1)	空港アスファルト舗装の理論的設計法パラメータの感度分析 第66回年次学術講演会, V-380, 2011.9 高橋真一, 坪川将丈, 水上純一, 齊藤泰
○2)	New Technologies on Design and Construction of Tokyo Port Bayside Bridge International Symposium on Recent and Future Technologies in Coastal Development 沿岸域の開発プロジェクトと新しい技術の発展に関する国際シンポジウム, 2010.12 Osamu Kiyomiya, Taiji Kawakami, <u>Yutaka Saitou</u>
3)	空港コンクリート舗装の版上下面温度差頻度分布に関する考察 第65回年次学術講演会, V-036, 2010.9 阿部長門, 水上純一, 坪川将丈, 齊藤泰
4)	東京港臨海大橋(仮称)の色彩計画 第63回年次学術講演会, IV-183, 2008.9 齊藤泰, 上野雅明, 窪田陽一
○5)	東京港臨海大橋(仮称)の計画 国土交通省関東地方整備局スキルアップセミナー関東, 2008.7 齊藤泰

- 6) 東京臨海大橋（仮称）主橋梁部における支承の点検方法
沿岸技術研究センター論文集 No. 8, pp. 53-56, 2008. 6
糸永克彦, 上野雅明, 齊藤泰
- 7) 簡易拡散予測モデルの比較研究
第 15 回土木学会関東支部新潟会研究調査論文集, pp. 13-15, 1997. 11
齊藤泰, 泉宮尊司
- 8) 高炉スラグ微粉末と水酸化カルシウムの反応性に関する基礎的研究
セメント・コンクリート論文集, Vo. 50, pp. 228-233, 1996. 6
齊藤泰, 佐伯竜彦