

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

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

2012 年 7 月

本研究の対象としている東京ゲートブリッジは、東京港第三航路を横断して2012年2月に竣工した3径間連続鋼トラスボックス複合橋である。この東京ゲートブリッジの主塔部の橋脚基礎の構造設計では、二つの大きな技術問題があった。一番目の技術課題は本橋が「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、主橋脚基礎が一基あたり約80,000kN/基の大きな上部からの荷重を支持しなければならず、かつ支持層がA.P.-50m~-70mと非常に深い位置に存在することで大規模な基礎構造となることであり、二番目の技術課題は、橋脚基礎の周辺地盤がN値0の軟弱な沖積層が30m以上堆積し、耐震設計を行う際の入力地震動の設定や本橋の耐震性能の評価にあたって、合理的な設計検討が必要であった。

本論文では、このような技術的課題に対し、 $\phi 1,500\text{mm}$ の大口径鋼管杭を用いた鋼管矢板井筒基礎および耐震性能を確保するための大型の機能分離型すべり免震支承の採用の検討内容を主に述べている。

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、本研究の目的、既往の研究および本橋での技術的課題について述べている。

入力地震動に関する既往の研究では、本橋建設地点近傍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。大口径の鋼管杭載荷試験に関する既往の研究では、 $\phi 1,000\text{mm}$ 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、特に、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既往の研究では、すべり系免震支承の力学特性、免震設計方法および動的解析における履歴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と目的を明確にしている。

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、重要性および地震後の補修を考慮し、レベル1、レベル2地震動に対してともに構造材料が降伏応力以下にすることを述べている。

海洋境界型のレベル2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て基盤面入力波を新たに設定している。内陸型レベル2の地震動は、橋軸方向、橋軸直角方向それぞれに複数の基盤面入力波を設定している。本橋のような固有周期が比較的長い橋梁が軟弱地盤に建設される場合、長周期成分を含む設計地震動に対して共振する恐れのあることを示している。

地震時の構造計算では、トラス構造-支承-橋脚を三次元骨組でモデル化、基礎-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応答値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。地盤-基礎モデルは基盤面より入力する地震動が、鋼管矢板井筒基礎の天端位置でどのような応答となるかを計算するものであり、併せて上部構造の計算モデル下端のバネ定数、減衰定数を設定している。これにより、トラス構造・支承・橋脚・基礎バネ各部位に生じる時刻歴応答値を求め、耐震安全性の照査を最大断面力および最大変位で行っている。一般的な道路橋で採用されている耐震設計手法では、基礎構造の相互作用の影響を考慮した上部構造物の安全性の検討が十分でないことを示し、本論文での耐震計算が合理的であることを示している。本研究で設定した入力地震動で新たな設計方法を用いて地震応答計算を実施したところ照査結果は、所定の耐震性能での許容値内であるこ

とを明らかにしている。

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、東京ゲートブリッジ建設地点近傍で実施された静的載荷試験と急速載荷試験で得られた大口径鋼管杭の鉛直方向、水平方向の荷重支持力機構を述べている。また載荷試験結果をもとに設定した鋼管矢板井筒基礎の設計定数を用いた設計照査結果について述べている。

鉛直方向の載荷試験の結果から、 $\phi 1,500\text{mm}$ の開端鋼管杭を支持層へ3D根入れした場合の見かけの閉塞率を明らかにし、既往の載荷試験結果よりも大きな支持力が得られることを示している。砂質土層と粘性土層の周面摩擦力は「道路橋示方書」に規定された関係式で与えられる値とほぼ同じ値に、礫層については大きな値となったことを明らかにしている。静的載荷試験結果から鉛直方向地盤反力係数を算定し、砂地盤および砂礫地盤ともに「道路橋示方書」とほぼ同じ地盤係数を得ることを明らかにしている。一方水平方向地盤反力係数については、載荷試験の方が大きな値になったことを明らかにしている。

「道路橋示方書」に従い各土質試験結果から得た設計定数から計算した鋼管井筒基礎の断面形状と載荷試験結果から設定した断面形状を比較している。ここでは、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の組み合わせとして、また周面摩擦力を載荷試験で得られた値を採用し、大口径鋼管杭の新たな修正支持力式を提案している。設計基準等に示される標準的な推定式を用いて大口径鋼管杭支持力を設定すると、大規模な断面形状の基礎構造となり、杭の載荷試験を実施することにより経済的な基礎形状となったことを述べている。

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、機能分離型すべり免震支承の鉛直支承部すべり面におけるせん断載荷試験を実施し、摩擦係数の面圧依存性、速度依存性を調べ、この載荷試験より得られた力学特性を基にして行った動的解析結果について述べている。

載荷試験結果から、供試体の温度が試験の進行とともに徐々に上昇することを得ている。今回の試験では加振回数の増加に伴って摩擦係数が低下する傾向があり、この摩擦係数の低下はテフロン板の融解が原因であることを明らかにしている。また荷重の偏心載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。載荷試験に用いる供試体と実橋で採用されている支承のスケール効果の違いによる摩擦係数への影響も併せて検討を行い、面圧分布を変化させても、摩擦係数に大きな影響がないことを明らかにしている。

また、鉛直支承のバネモデルについて、既往の面圧・速度依存型バネモデル式を基に、載荷試験結果から新たなバネモデルを提案している。支承部における本橋の最大速度および死荷重反力での既往のモデル式への適用性を検討しているが、面圧依存性と速度依存性への既往の提案式でのフィッティングで低速度帯での適用性が良くないことを明らかにしている。このため載荷試験では面圧、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、今回の載荷試験より得られた免震支承のバイリニア型バネモデルで動的応答解析を行い、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地震動を入力し、動的応答解析の結果、「道路橋示方書」および「道路橋支承便覧」に示されている許容値内で収まることを確認している。さらに、水平力を受け持つゴムバッファの力学特性を確認するため、動的特性、静的特性およ

び耐久性試験を行い、一般の積層ゴム支承の性能試験条件で今回の大型水平ゴム部材の力学特性を確認できたことを明らかにしている。最後に、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、摩擦係数を0.05~0.2の範囲で検討し、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ことを示している。

第5章「結論」では、本研究によって得られた各章ごとの結論を取りまとめている。東京ゲートブリッジでは、レベル1およびレベル2地震動とも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を降伏応力以下にする要求性能を採用したことを述べている。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想定断層を基に作成している。地盤と基礎構造との動的相互作用を計算モデルで同時に見込む動的サブストラクチャー法を採用し、この設計法より要求性能を照査し、各種構成材料が降伏応力以下であることを確認している。

また、本橋の要求性能を満足するため、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た設計を行っている。この際、摩擦係数の速度依存性および面圧依存性をせん断載荷試験により確認し動的応答計算に取り入れている。今回の試験結果を基に地震応答解析を行ったところ、機能分離型すべり免震支承の水平機能を構成する水平抵抗部材のゴムバッファについてはレベル1地震時では「道路橋示方書」許容値内で収まり、レベル2地震時には「道路橋支承便覧」における許容せん断ひずみに納まることを示している。また鋼管杭の載荷試験結果からφ1,500mmの開端鋼管杭を支持層に3D（D：杭径）根入れした場合の見かけの閉塞率は砂礫層で75%、砂層で50%となり既往の閉塞率よりかなり大きな値を採用できることを示している。載荷試験結果を用いて基礎の設計を行ったところ、鋼管矢板の支持地盤への5Dより3Dと値入長を短くでき、かつ鋼管矢板井筒基礎の断面積を基本設計の半分まで低減できたことを示している。

以上を要するに、本論文は、東京ゲートブリッジの基礎構造の支持力機構と本橋の耐震性を数値解析、載荷試験および現地実験で解明し、地震活動が大きく地盤条件が軟弱な地点での大型橋梁の構造設計で所定の安全性を合理的かつ経済的に確保していることを示している。本論文で得られた成果は、橋梁工学と耐震工学に有用な情報を与えるだけでなく構造工学の発展に大いに寄与するものであり高く評価できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる。

2012年6月

審査員	主査	早稲田大学教授	工学博士（東京工業大学）	清宮 理
	副査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	依田 照彦
		早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	小泉 淳
		早稲田大学教授	工学博士（東北大学）	秋山 充良