

目標」に示した達成目標に関して得られた研究成果について要約すると以下のとおりである。

(1) 構造物の地震時挙動の解明

- ①道路橋については、中空断面 RC 橋脚の損傷メカニズムの解明と設計法を提案するとともに、丸鋼を用いた橋脚の損傷メカニズムの解明およびアンボンド巻立て工法の提案を行った。成果の一部は、平成 24 年道路橋示方書の改定に提案した。
- ②東日本大震災において津波により被害を受けた橋の挙動メカニズムに関する実験・解析を実施するとともに、水路実験、模型実験を用いた支承作用力と既設支承部の耐荷特性の検証と評価方法、反力軽減対策の検討を行った。平成 27 年度には、損傷モードを確実化する損傷制御型支承及び津波の影響低減のための構造的対策手法を提案した。
- ③トンネルについては、実山岳トンネルにおける地震時挙動の計測によりトンネルの挙動と被害発生メカニズムを確認するとともに、山岳トンネル模型実験により背面空洞による不安定化現象とインバート・ロックボルト等の耐震対策効果を把握した。また、数値解析により地震時に作用する静的換算荷重を把握した。
- ④盛土については、東日本大震災における道路盛土の被災分析により排水条件の重要性を確認するとともに、東日本大震災で被災した実盛土における盛土内水位観測を継続し、融雪時には高水位が継続することを確認した。
- ⑤ダムについては、ロック材料強度の材料安全率および堤高 100m 以上のフィルダムに適用可能な震力係数を提案するとともに、提案した震力係数を用いた既設ダムのすべり安全率を検討した。原位置・室内試験結果に基づき締固め度による動的物性のばらつきを整理するとともに、継続時間の長短によるすべり変位量への影響、コア強度のばらつきによる沈下量への影響を検討した。また、嵩上げダムや堤体の削孔を実施したダムの実測挙動データの分析、供試体試験によるダムコンクリートの動的強度特性（速度依存、繰り返し載荷依存、引張軟化特性）の調査、嵩上げダムや削孔ダム特有の条件（施工過程等）を考慮した大規模地震時の挙動・損傷分析を行った。さらに、地震応答解析により台形 CSG ダムの地震時挙動特性（断面形状、貯水位、内部構造の影響、滑動）を分析するとともに、CSG の強度特性（圧縮・引張・せん断、引張軟化特性）、繰り返し載荷による応力履歴が CSG の動的物性に及ぼす影響等を検討した。
- ⑥液状化に関しては、地盤の液状化の発生および評価に及ぼす要因として、地質情報と地形区分等、細粒分含有率、乾燥密度、せん断剛性等の関係を分析するとともに、液状化の発生に及ぼす各種要因（地震動の継続時間等）の検討を行い、細粒分を含む砂の新たな液状化強度評価式を提案した。また、火山灰質土の液状化特性に関する地盤調査・解析、地盤データの質と量による地質構造の把握精度の検証を行った。さらに、強震記録・遠心実験に基づく砂の年代効果の影響を把握するとともに、地中のせん断応力分布の推定方法を提案した。平成 27 年度には、地中のせん断応力分布の評価手法を検証し、液状化に及ぼす各種影響要因のとりまとめを行った。

(2) 多様な耐震性能に基づく限界状態の提示

- ①道路橋については、軸方向鉄筋のはらみ出し挙動に着目した RC 橋脚の地震時限界状態の評価手法を提案するとともに、耐震補強における性能目標に応じた補強方法を提案した。
- ②道路橋基礎に関して、既成 RC 杭基礎模型を用いた載荷実験に基づく照査に用いる限界状態を検討した。平成 27 年度には、性能目標に応じた道路橋基礎の限界状態の設定法を提案した。
- ③トンネルについては、山岳トンネルの限界状態と対策の考え方を整理するとともに、山岳トンネルの供用性と修復性に着目し、重要度を踏まえた耐震性能に応じた限界状態を整理した。

(3) 耐震性能の検証法と耐震設計法の開発

- ①道路橋については、RC 橋脚や橋台の橋座部のせん断破壊に対する応急復旧工法を提案するとともに、提案した橋座部の応急復旧工法の効果を実大供試体を用いて実験的に検証した。施工年次の古い既設橋の耐震補強法としてアンボンド鉄筋を用いた補強方法及び補強設計法を提案した。

3. 耐震性能を基盤とした多様な構造物の機能確保に関する研究

- ②道路橋基礎に関しては、基礎の被災が発生した橋に対する解析の実施と被災状況の再現性の検討、撤去橋から取り出した既成 RC 杭の載荷実験による抵抗特性の把握を行った。平成 27 年度には、動的解析を用いた杭基礎により支持された橋梁の耐震性能評価手法を提案した。
- ③津波の影響を受ける橋のメカニズムに基づき、平成 27 年度には、津波による橋の最終的な破壊モードを確実化する損傷制御型支承とその設計思想の提案、津波に対して影響軽減効果のある構造的対策手法（フェアリング形状とその取り付け方法）を提案した。
- ④地震による斜面変状事例の収集・分析に基づき、変状パターンを整理するとともに、流れ盤の岩盤地すべり事例の数値解析に基づく評価手法を検討した。さらに、斜面上に設置された柱状体基礎に対する地すべりの影響分析、単列杭・組杭基礎の安定性と斜面条件の関係分析、遠心力載荷装置を用いた杭基礎への影響検討を行った。平成 27 年度には、地震時に地盤変状を起こしやすい斜面地盤条件の判定手法と基礎の安定性評価手法と併せ、「地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策ガイドライン(案)」を提案した。
- ⑤トンネルについては、新設の山岳トンネルにおける耐震対策フロー(案)の作成、既設の山岳トンネルにおける耐震対策手法を検討した。平成 27 年度には、山岳トンネルに要求される耐震性能に応じた耐震対策の選定手法を提案した。
- ⑥盛土については、盛土の耐震性に対する降雨の影響およびドレーン材の効果に関する解析により、ドレーン材の布設範囲に応じた耐震性向上効果を確認した。また、模型実験により薄型の排水マットの排水効果が十分でないことを確認した。また、空気間隙率を低減させる施工による耐震性向上の考え方とともに、変形解析に基づく耐震性評価法を提案した。さらに、排水および抑え効果を考慮した耐震補強法の効果について検証した。平成 27 年度には、事前降雨等の影響を定量的に考慮した道路盛土の耐震設計法・耐震補強手法を提案した。
- ⑦ダムについては、再開発ダムおよび台形 CSG ダムの大規模地震時の挙動・損傷形態の推定方法の基本的な考え方を整理し、耐震性能の照査方法の案を作成した。平成 27 年度には、大規模地震時におけるフィルダムの簡易耐震性能照査方法、再開発ダム及び台形 CSG ダムの挙動の推定法及びこれを踏まえた耐震性能照査方法を提案した。
- ⑧液状化に関しては、地盤データの質と量による地質構造の把握精度の検証とともに、原位置で液状化特性を把握する新たな振動コーンの適用性を検討した。また、火山灰質土の液状化特性に関する地盤調査・解析の実施、破砕性を有する火山灰質土の液状化強度と貫入抵抗の関係を把握した。平成 27 年度には、液状化判定のための地質構造推定における留意点のまとめ、液状化特性把握手法として振動コーンの適用性の検証、各種影響要因、新たな調査方法を踏まえた高精度な液状化判定法を提案した。

(4) 研究成果の公表と耐震設計法の開発

研究成果に関しては、国内外の論文集や学会等において、合計 205 本の論文（査読付き：国内 27 本、海外 25 本 査読なし：国内 142 本、海外 11 本）を発表している。

また、事業や社会への貢献として、研究成果を基準類への反映の提案、あるいは、資料として公表するとともに、技術相談や技術指導を通じ、現場での耐震設計、耐震補強等の実務に活用されている。以下に研究成果が反映された主要な基準類の例を示す。

- (1) 道路橋示方書（平成 24 年 3 改訂）及び普及講演会の実施
- (2) 既設橋の耐震補強設計に関する技術資料（土研資料第 4244 号）（平成 24 月 11 月）
- (3) 道路土工指針—軟弱地盤対策指針（平成 24 月 8 月）
- (4) 道路ストックの総点検点検要領（道路のり面工・土工構造物編）
（平成 25 年 2 月国土交通省国道・防災課長通達）
- (5) 斜面上の深礎基礎設計施工便覧（日本道路協会）（平成 24 年 4 月）
- (6) 河川構造物の耐震性能照査指針（液状化判定法の改定）（平成 28 年 4 月）
- (7) 道路トンネル維持管理便覧（本体工編）（平成 27 年 6 月）

A STUDY ON PERFORMANCE-BASED SEISMIC DESIGN AND SEISMIC RETROFIT ENGINEERING TO ASSURE EARTHQUAKE EMERGENCY FUNCTIONS OF INFRASTRUCTURE SYSTEMS

Research Period : FY2011-2015

Project Leader : Research Coordinator for Earthquake Engineering
UNJOH Shigeki

Research Group : Geology and Geotechnical Engineering Research Group
(Soil Mechanics and Dynamics Research, Geology)
Hydraulic Engineering Research Group
(Dam and Appurtenant Structures)
Road Technology Research Group (Tunnel)
Cold-Region Construction Engineering Research Group
(Structures, Geotechnical)
Bridge and Structural Engineering Research Group

Abstract : In Japan, the occurrences of large earthquakes along the Nankai trough in the Pacific sea and in the Tokyo metropolitan area have been anticipated and the effective countermeasures to mitigate and minimize the damages and the effects caused by such large earthquakes are one of the pressing issues. The objectives of this project study is to develop the performance-based seismic design and seismic retrofit technology to assure earthquake emergency functions of the infrastructure systems which consists of several structures including bridges, embankments, tunnels, dams and others. The research targets are 1) to clarify dynamic behavior of structures during earthquakes, 2) to propose limit states based on the necessary performance requirement, and 3) to develop performance verification methods and seismic design methods. Through the project, seismic design and retrofit technologies for such structures have been developed and/or improved, and some were employed in the revision of the design standards and guidelines for the practical applications.

Key words : earthquake, seismic design, seismic retrofit, infrastructure, tsunami, liquefaction