

3. 大地震に備えるための道路・河川施設の耐震技術

研究期間：平成 18 年度～22 年度

プロジェクトリーダー：耐震総括研究監 田村敬一

研究担当グループ：橋梁構造研究グループ，材料地盤研究グループ（土質・振動），
水工研究グループ（ダム構造物）

1. 研究の必要性

最近大きな地震が頻発し，再び活動期に入ったとも言われている。今後，東海・東南海・南海地震，首都圏直下地震，宮城県沖地震など，人口・資産の集積する地域で大地震が発生する可能性が高く，それぞれの地震による想定被害額は数10兆円から110兆円などと推定されている。政府は，これらの地震に対して，今後10年間で人的被害・経済被害を半減させる「地震防災戦略」を決定している（中央防災会議，平成17年3月）。

これを実現するためには，道路をはじめとするライフライン施設，ゼロメートル地帯等を津波浸水から守る河川施設などを対象に，既設構造物の耐震診断・補強技術，および震災後に迅速に機能回復する技術を優先的に開発・改良することが必要である。

2. 研究の範囲と達成目標

本重点プロジェクト研究では，道路・河川の主要構造物を対象に，既設構造物の耐震診断・補強技術，および震災後に迅速に機能回復する技術を開発・改良することを研究の範囲とし，以下の達成目標を設定した。

- (1) 既設道路橋の耐震診断・補強技術の開発
- (2) 山岳盛土の耐震診断・補強技術の開発
- (3) 道路橋の震後早期機能復旧技術の開発
- (4) 既設ダムの耐震診断・補修・補強技術の開発
- (5) 河川構造物の耐震診断・補強技術の開発

3. 個別課題の構成

本重点プロジェクト研究では，上記の目標を達成するため，以下に示す研究課題を設定した。

- (1) 補強対策が困難な既設道路橋に対する耐震補強法の開発（平成 18～21 年度）
- (2) 既設道路橋基礎の耐震性能評価手法に関する研究（平成18～20年度）
- (3) 橋梁基礎の耐震補強技術に関する試験調査（平成18～22年度）
- (4) 山岳道路盛土の耐震補強技術に関する試験調査（平成18～22年度）
- (5) 震災を受けた道路橋の応急復旧技術の開発に関する試験調査（平成18～21年度）
- (6) 記憶型検知センサーを用いた地震被災度の推定手法（平成15～19年度）
- (7) ダムの健全性評価に関する研究（平成16～19年度）
- (8) コンクリートダムの補修・補強に関する研究（平成17～19年度）
- (9) コンクリートダムの地震時終局耐力評価に関する研究（平成18～22年度）
- (10) 強震時の変形性能を考慮した河川構造物の耐震補強技術に関する調査（平成18～22年度）
- (11) 大規模地震時におけるフィルダムの沈下量の評価方法に関する研究（平成20～22年度）

4. 研究の成果

本重点プロジェクト研究の個別課題の成果は，以下の個別論文に示すとおりである。なお，「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して，平成 18 年度～22 年度に実施してきた研究の成果について要約すると以下のとおりである。

(1) 既設道路橋の耐震診断・補強技術の開発

- ・ 補強対策が困難な既設道路橋に対する耐震補強工法の開発として，緊急輸送道路の橋梁耐震補強 3 箇年プロ

グラムにより段落し部の耐震補強が実施された RC 橋脚を現行耐震水準にグレードアップさせるための耐震補強において、実験的な検討に基づき、従来の RC 巻立て工法を用いる場合の補強効果の検証を行うとともに、連続繊維シート (FRP) と鋼板を併用する耐震補強工法の提案を行った。また、基本的な考え方や設計計算方法等をまとめ、提案する補強工法の設計マニュアルの案も作成した。

- ・ 既設道路橋基礎の耐震性能評価手法に関しては、被災事例の分析、設計基準及び施工技術の変遷の整理、既設道路橋基礎の耐震性試算を行い、基礎の建設年代、基礎形式、地盤条件等のパラメーターと基礎の脆弱度の関係を整理し、基礎の脆弱度判定 (耐震補強の優先度の振り分け) フローを提案した。また、基礎の脆弱度判定の効率化を図るため、標準貫入試験結果のみから簡易に液状化発生の可能性、度合いを判定するための方法を提案した。
- ・ 数多く提案されている橋梁基礎の耐震補強工法について、補強原理の類似した 5 グループに分類し、現場の条件、補強の効果、施工の確実性、維持管理性、地震後の長期的な状態評価等の観点から、それぞれのグループに対して橋梁基礎の耐震補強において要求される性能に応じた性能検証法を提案した。また、耐震補強工法の検証があまりなされていないフーチングや、耐震性の検証が十分でないため補強優先度の判断が容易でないケーソン基礎や液状化地盤上の橋台について、載荷実験や数値解析を行い、耐震性の向上を図るため必要となる基本的な性能検証項目を提案した。

(2) 山岳盛土の耐震診断・補強技術の開発

- ・ 盛土のり尻付近の排水、押え盛土等のり尻強化工法に着目し、これらの耐震補強工を施した山岳部の既設道路盛土の耐震性について動的遠心模型実験を実施した。その結果、盛土のり尻部を押さえることで、大規模な崩壊を防止しうることが分かった。また、横ボーリング等で水抜きを行い、浸透水位を下げることで、既設盛土の耐震性を向上させられることを明らかにした。
- ・ 上記の山岳道路盛土の動的遠心模型実験を対象として地震時残留変形解析手法 (ニューマーク法) の適用性を検討し、実験における浸透水位の違い及び耐震補強工の効果による地震時残留変位の違いを定性的に表現できることを示した。
- ・ また、これらの成果をとりまとめ、耐震診断法として現地踏査 (机上調査を含む) およびサウンディングによる簡易調査法を提案するとともに、耐震補強法については排水工およびり尻補強工を併用した簡易な耐震対策、地下水位による重点監視、のり枠等による追加対策の考え方を提案した。

(3) 道路橋の震後早期機能復旧技術の開発

- ・ 被災発見後に余震の影響を適切に考慮して速やかに被災診断を行うとともに、即効性のある復旧工法を用いて迅速かつ合理的に機能回復を図るための応急復旧技術の開発が必要とされている。本研究では、本震で損傷した橋脚の余震に対する耐震性能に関する検討、損傷した橋脚を早期に応急復旧する工法に要求される事項の整理を行い、これらをもとに迅速かつ効果的な応急復旧工法として、機械式定着繊維バンド巻立てによる応急復旧工法を開発、提案した。鉄筋コンクリート橋脚模型に対する正負くり返し載荷実験より、提案工法の設計法を提案した。
- ・ 大規模地震後の構造物の被災程度、継続使用の可能性などの判断は、専門家による外観からの目視判定に頼らざるを得ないのが現状であり、専門家でなくても構造物の損傷を迅速かつ精度よく検知・判定できる技術の開発が必要とされている。本研究では、鉄筋コンクリート橋脚 (RC 柱) を対象とした振動台加震実験から、損傷によって固有周期が大きくなる特性があることを明らかにした。また、柱基部で曲げ破壊する RC 柱 12 体を対象とした合計 64 ケースの振動台加震実験の結果の分析から、この特性に基づき応答塑性率を推定し、地震による被害を判定する手法を構築した。さらに、こうした機能を有する地震被災度判定センサを開発し、これを実橋梁に適用した。

(4) 既設ダム耐震診断・補修・補強技術の開発

- ・ 新形式ダムである CFRD (コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム: Concrete Face Rockfill Dam) の

重要計測箇所を選定と表面変形計測器による変形分布の評価、堤体コンクリートの長期間暴露試験による耐久性評価、GPS 変位計測システムを取り入れた大規模地震によるフィルダムの計測評価方法について検討し、最終的に CFRD の安全管理のための計測方法、GPS 変位計測システムと大変形挙動計測システム（官民共同研究）を組み合わせた、ロックフィルダムの大規模地震による損傷形態を考慮した変形挙動監視システムなどを開発、提案した。

- ・コンクリートダムの補修事例および一般のコンクリート構造物の補修・補強工法の調査・整理を行い、コンクリートダムで想定される耐震補修・補強工法を整理し、コンクリートダムに有効な補修・補強工法として、断面増厚工とアンカー工を選定した。コンクリートダム堤体の地震前補強ならびに地震後補修（クラックが発生したダム堤体の補修）として、両工法を用いた補修・補強対策の効果に関する数値解析を実施し、対策の度合いとダム堤体の強度といった力学性能の回復・向上効果の関係を定量評価した。実際のダムで補修・補強対策を検討する際に有効な工法選択ができる手法を提案した。
- ・大規模地震によるコンクリートダム堤体の亀裂分断後における、終局的な堤体の耐震安定性の評価手法を開発するため、堤体分断ブロックの地震時における変位挙動・メカニズムを解明することを目的として、ダム形状の分断堤体模型による振動実験を実施し、亀裂分断面内揚圧力、分断面摩擦特性、加振特性が分断ブロックの変位挙動に与える影響を分析した。さらに、振動実験により明らかになった分断ブロックの挙動（ロッキング・滑動）について、個別要素モデルによる再現解析を行い、振動実験における挙動を再現できていることを確認した上で、この解析方法を終局耐力の評価方法として提案した。また、提案した解析方法を実ダムモデルに適用し、得られた変位量を基に亀裂分断時の限界状態及び評価指標を提案した。
- ・大規模地震によるフィルダムのすべりを伴わない揺すり込み沈下量の評価手法を提案するため、堤高 100m の中央土質遮水壁型ロックフィルダム（以下、ECRD と呼ぶ）モデルを対象に静的、動的解析を行い、地震時の堤体内部の応力状態を推定し、得られた応力から累積損傷解析に用いる繰返しせん断応力比を適切に算出する方法を提案した。さらに、平成 20 年に発生した岩手・宮城内陸地震時により、すべりを伴わない比較的大きな沈下が発生したコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム（CFRD）と ECRD を対象に、提案した方法をもとに累積損傷解析を用いた再現解析を実施し、地震時の沈下挙動が精度よく再現できていることを確認し、大規模地震時におけるフィルダムの沈下量評価方法として提案した。

(5) 河川構造物の耐震診断・補強技術の開発

- ・河川堤防の耐震点検を的確かつ効率的に実施することを目的として、既往の地震被害事例の分析に基づき、区間細分方法、代表断面の選定方法、スクリーニング方法等を提案した。
- ・堤防のり尻部に適用される液状化対策工法である締固め工法、固結工法、ドレーン工法、鋼材を用いた工法について、実験及び解析を行った結果に基づき、レベル 2 地震動に対する設計法の原案をとりまとめた。また、液状化対策が堤防の浸透破壊に対する安全性に与える影響について検討するための遠心力模型実験を行い、液状化対策工法の耐浸透特性の観点からの留意事項を整理した。
- ・複数の柱部材から構成される水門、堰について、耐震診断にあたっての照査手順、主たる塑性化が生じる部材や破壊形態の判定方法、応答算定法等の整理を行い、計算例とあわせて土木研究所資料としてとりまとめた。また、自立式構造の特殊堤及び樋門について、地震被害事例を対象とした再現解析を行った結果に基づき、耐震診断手法を提案した。
- ・各種河川構造物の耐震対策における工法選定のための参考資料として、土堤、特殊堤、水門、樋門、堰、揚排水機場について、既往の地震被害事例から地震時の被災パターンを整理し、被災パターンごとに適用可能な対策工法等を技術資料としてとりまとめた。

DEVELOPMENT OF SEISMIC RESISTANT TECHNOLOGIES FOR ROAD AND RIVER FACILITIES TO PREPARE FOR THE ANTICIPATED BIG EARTHQUAKES

Abstract : Big earthquakes are expected to occur in Japan in the coming few decades. They are likely to hit the major areas where population and properties are highly accumulated, and the expected damage loss by the individual earthquake amounts to as large as some tens- to a hundred- trillion yen. In order to reduce the damage loss, seismic retrofitting of existing structures is one of the most crucial tasks. The research project aims to develop/improve technologies to seismically assess and strengthen existing engineering structures, including bridges, embankments, dams and river facilities. To develop such technologies, the following research projects were conducted:

- 1) Seismic retrofit strategy for existing highway bridges
- 2) Seismic performance assessment of existing highway bridge foundations
- 3) Research on the seismic retrofit of highway bridge foundations
- 4) Seismic retrofits for road embankments on mountain side
- 5) Development of rapid repair method for seismic damage of bridge structures
- 6) Development of detection/estimation method for seismic damage using advanced sensor
- 7) Research on Integrity Evaluation of Dams
- 8) Research on Rehabilitation and Reinforcement of Concrete Dams
- 9) Evaluation of ultimate limit resistance of concrete gravity dams against large earthquakes
- 10) Seismic retrofits for river facilities considering structure ductility under strong earthquake motions
- 11) Evaluation method of earthquake induced settlement of rockfill dams due to large earthquake motions

Key words : seismic resistant technologies, assessment, retrofit, road, bridge, dam, river