

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

研究期間：平成 23 年度～27 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：地質・地盤研究グループ（地質、土質・振動）、水工研究グループ（水工構造物）、
道路技術研究グループ（トンネル）、寒地基礎技術研究グループ（寒地構造）、橋梁
構造研究グループ

1. 研究の必要性

東海・東南海・南海地震、首都直下地震等、人口及び資産が集中する地域で大規模地震発生の切迫性が指摘され、これらの地震による被害の防除・軽減は喫緊の課題とされている。また、今後、多くの社会資本ストックが維持更新の時期を迎えるに当たり、耐震対策についても構造物の重要性や管理水準に応じて適切かつ合理的に実施することが求められている。このためには、耐震性能を共通の基盤とし、種々の構造物の耐震設計法・耐震補強法の開発を図ることが必要である。

2. 研究の範囲と達成目標

本プロジェクト研究では、耐震性能を基盤とした耐震設計法・耐震補強法の開発及び近年の地震被害の特徴を踏まえた耐震対策や震災経験を有しない新形式の構造物の耐震設計法の開発を研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 構造物の地震時挙動の解明
- (2) 多様な耐震性能に基づく限界状態の提示
- (3) 耐震性能の検証法と耐震設計法の開発

3. 個別課題の構成

本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) 性能目標に応じた橋の地震時限界状態の設定法に関する研究（平成 23～26 年度）
- (2) 基礎を含めた橋全体系の動的照査法に関する研究（平成 24～27 年度）
- (3) 地中構造物の耐震設計法に関する研究（平成 24～27 年度）
- (4) 山岳トンネルの耐震対策の選定手法に関する研究（平成 23～27 年度）
- (5) 地盤変状の影響を受ける道路橋の耐震安全対策技術に関する研究（平成 23～27 年度）
- (6) 降雨の影響を考慮した道路土工構造物の耐震設計・耐震補強技術に関する研究（平成 23～27 年度）
- (7) ロックフィルダム設計・耐震性能照査の合理化・高度化に関する研究（平成 23～27 年度）
- (8) 再開発重力式コンクリートダムの耐震性能照査技術に関する研究（平成 23～27 年度）
- (9) 台形 CSG ダムの耐震性能照査に関する研究（平成 23～27 年度）

このうち、平成 23 年度は(1)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)、(9)の 7 課題を実施している。

4. 研究の成果

本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 23 年度に実施してきた研究と今後の課題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

・1970 年頃まで適用実績のある丸鋼鉄筋を用いた RC 橋脚の地震時挙動に関する基礎資料を得ることを目的に、

正負交番載荷試験を実施した。その結果、丸鋼鉄筋を用いた RC 橋脚では、大きな載荷変位においても塑性ヒンジが形成されずフーチング内での軸方向鉄筋の伸び出しに起因した柱部のロッキングが卓越するとともに、これによる高い変形性能を示すこと、また、最大耐力は平面保持を仮定して算出した設計値と同程度であることを確認した。

また、実験データ等による知見が少ない高軸力かつ高軸方向鉄筋比の条件を有する中空断面 RC 橋脚を対象として、正負交番繰返し載荷実験を行い、損傷の進展過程と破壊形態を明らかにした。地震後の点検において柱の損傷状態を評価する上で必要となる外周面側の損傷と内面側の損傷の関係を明らかにすることで、中空断面 RC 橋脚の限界状態の設定の重要な根拠データを得た。この実験結果から、中空断面の塑性変形能力を確保するための設計法と構造細目を確立し、H24 年 3 月に改定された道路橋示方書・同解説への反映を行った。

- ・山岳トンネルの耐震対策の効果や、効果を発揮するメカニズムについて、数値解析等により検討を行い、地震時における覆工の応力を低減させる方法としては、覆工を柔な構造とすることや、覆工背面に空洞がある場合は裏込め注工を行うことが有効である可能性があることが明らかとなった。また、実トンネルで得られた地震時の動的計測結果からは、地震時の一般的な地山の変形モードとされているせん断変形ではなく、水平圧縮変形や鉛直圧縮変形が発生したと類推される覆工のひずみモードも発生する場合があることが明らかとなった。
- ・平成 23 年東北地方太平洋沖地震で液状化・流動化による地盤変状に起因して被災した道路橋 2 橋を対象として、再現解析を行った。地震により生じた下部構造の変位や傾斜などの被災による変状を、道路橋示方書による方法により液状化による地盤反力係数等の低減や流動力を考慮した静的解析を行ってどの程度再現できるかを確認するとともに、被災状況を再現するために地盤抵抗の低減や流動力の推定（逆解析）を行った。この結果、被災要因を断定するには至らなかったが、杭基礎の鉛直地盤ばね（剛性）の低下や、軟弱粘性土の側方移動による影響に加えて杭体に損傷が生じている可能性があることなどが推定された。
- ・東日本大震災において地震動により被災した直轄国道の道路盛土について地盤調査等を行い、主な被災原因が集水地形上の盛土で盛土内水位が高い状態にあったこと、軟弱地盤上の盛土で基礎地盤または盛土材が液状化したことによるものであったこと等を明らかにした。また、調査結果を踏まえ、本省と連携の上、軟弱地盤上の盛土の調査法案を作成した。本調査法案は、平成 24 年 1 月に本省より各地方整備局等に送付された。
- ・ロックフィルダム of 合理的設計法に関する検討として、近年の地震動記録を用いて、下流側の震力係数および上下流勾配の影響も考慮した震力係数の検討を行った。その結果、ロックフィルダムにおける上流側すべりと下流側すべりの違いによる震力係数への影響はほとんどなかった。また、通常考えられるロックフィルダムの上下流面勾配の範囲においては、斜面勾配の違いによる震力係数への影響もほとんどなかった。本研究で得られた堤高と震力係数との関係式を用いることにより、下流側すべりや異なる斜面勾配にも適用可能である。また、新設計法における材料安全率を信頼性設計に基づき設定するための基礎的検討として、震度法設計断面に対して、せん断強度のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーション（MCS）を実施し、せん断強度と地震力の評価方法や堤高等の解析条件がすべり安定性評価に与える影響を検討した。その結果、MCS を実施する際のロック材の強度評価法を震度法（ $c-\phi$ 法、 $c=0$ ）から Ab 法にすると、同一断面における安全性指標が大幅に低下した。これは震度法による強度評価では粘着力を無視しているため強度の変動が小さく設定されるが、Ab 法による強度評価では強度の変動が相対的に大きく設定されることに起因する。また、地震荷重の設定方法により破壊確率が 1~2 オーダー程度変化することもわかった。今後も引き続き、ロック材の材料安全率の設定についての検討を行う。
- ・大規模地震による再開発ダムの耐震性能照査に必要な嵩上げダム等の初期応力状態やダムコンクリートの引張強度特性について、既設再開発ダムの実測挙動データやコンクリートの引張試験データによる検討を行った。その結果、初期応力状態の再現には気温や貯水位の変化による影響を考慮する必要性について検討すべきこと、ダムコンクリートの動的引張強度には破壊前の応力履歴が影響する可能性があることなどがわかった。また、数値解析により、再開発ダムにおける地震時の応力状態は同規模の新設ダムとは大きく異なる可能性があることもわかった。これらの点を踏まえ、今後は大規模地震による損傷過程も考慮した上で再開発ダムの耐震性能を照査する手法を検討していく必要がある。
- ・大規模地震時における台形 C S G (Cemented Sand and Gravel) ダムの損傷形態として、数値解析により台形

CSG ダムの応力特性を数値解析的に検討するとともに基本的検討によりCSGの引張破壊を想定し、その強度や破壊特性に関する実験的検討を行った。その結果、CSGの破壊エネルギーは、コンクリートでの試験に基づき提案された既往の推定式による値より大きく、動的载荷状態ではその値が増加する可能性があることなどがわかった。これらの点を踏まえ、今後は、大規模地震による損傷過程も考慮して台形CSGダムの耐震性能を照査する手法を検討していく必要がある。

(2) 多様な耐震性能に基づく限界状態の提示

- ・山岳トンネル以外の土木構造物の基準類に関する文献調査等をもとに、山岳トンネルで要求されると考えられる耐震性能を3種類仮定した上で、それらに対応すると考えられる山岳トンネルの限界状態について整理を行った。

(3) 耐震性能の検証法と耐震設計法の開発

- ・地震時に道路橋に影響を及ぼすような変状を起こしやすい山地部の地盤条件の判定手法を提案することを目的として、過去の調査報告や文献検索等により地震による斜面地盤変状42事例を収集し、地盤変状箇所の地形・地質の特徴の整理と変状パターンの分類を行った。変状の規模は幅では300mまで、長さで400mまで、層厚では40mまでのもので約9割を占めるが、地すべりとされた事例の中にはこれを超えるものも存在する。変状箇所の地質構造（層理面、節理面など）については流れ盤の事例が非常に多い。また、変状パターンについては以下に示すパターンに分類することができた。①古い地すべりなどにより形成された崩積土のすべりまたは崩壊、②厚い風化層または未固結層のすべりまたは崩壊、③流れ盤の層理面・節理面・断層面・薄い脆弱層によるすべりまたは崩壊、④下部の脆弱層の変形による上部の岩盤の変状又は崩壊、⑤柱状節理の発達した岩盤の節理面からの変状または崩壊。

RESEARCH TO ENSURE FUNCTIONS OF VARIOUS STRUCTURES DURING EARTHQUAKES BASED ON SEISMIC PERFORMANCE

Research Period : FY2011-2015

Project Leader : Research Coordinator for Earthquake Engineering
Keiichi Tamura

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

Abstract: Large earthquakes are expected to strike the areas where population and properties are highly accumulated in Japan, and reducing damage from these earthquakes is a crucial issue. Many infrastructures will soon need repair or renewal, and it is necessary to implement seismic countermeasures properly according to the importance or maintenance level of structures. For this, it is indispensable to develop seismic design and retrofit techniques of various structures by employing seismic performance as the common base. Scope of the research project extends to development of seismic design and retrofit techniques based on seismic performance, seismic countermeasures reflecting damage features in the recent earthquakes and seismic design techniques for the new structures without damage experience in the past earthquakes.

Key words: earthquake, structure, seismic design, seismic retrofit, seismic performance