

大規模地震に対する橋や土工構造物の機能確保技術の開発

星隈 順一

1. はじめに

南海トラフの巨大地震、首都直下地震等、人口及び資産が集中する地域での大規模地震発生の切迫性が指摘され続けている。土木研究所（以下「土研」という。）では、橋や土工構造物等のインフラ施設に対する耐震対策について、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震等の震災経験を踏まえ、これまでも研究開発や技術基準類の改定に取り組み、順次成果を収めてきたところである。

一方で、地震による被害は激甚化かつ多様化しつつあり、これまでに経験したことのないような形態での被災も懸念されている。政府は、このような災害に対しても被害の防止あるいは軽減を図っていくとともに、迅速な復旧復興を支えるための政策に取り組んでいるところである。国土交通省でも、例えば道路については、「発災後概ね1日以内に緊急車両の通行を確保し、概ね1週間以内に一般車両の通行を確保する」ことを施策目標として掲げており、この施策を実現していくために必要な技術開発が求められている。

このような背景から、土研の第5期中長期計画においては、橋や土工構造物等、道路を構成している構造物や河川の堤防等のインフラ施設に対して、その機能に及ぼす地震の影響を最小化するための研究開発プログラム「大規模地震に対するインフラ施設の機能確保技術の開発」（以下「本プログラム」という。）に取り組んでいる。本報では、その概要について紹介する。

2. 研究開発プログラムの達成目標の設定

激甚化する地震災害に対して社会インフラに求められているニーズを踏まえつつ、これまでの土研における研究成果をさらに発展させていくべく、第5期中長期計画における「大規模地震に対するインフラ施設の機能確保技術の開発」では3つの達成目標を設定している。表-1は、その達成目標

と主要な研究課題の体系を示したものである。

第4期では大規模地震に対して橋や土工構造物の被害軽減を目指して研究開発を実施した。当該研究期間中に熊本地震や北海道胆振東部地震が発生したことから、研究の実施と同時並行で被災した構造物の復旧に成果を採り入れながら¹⁾、達成目標としている耐震技術の技術開発を進めた²⁾、³⁾、⁴⁾、⁵⁾、⁶⁾。第5期の研究開発においては橋や土工構造物の機能確保の観点に着目し、被害の最小化だけでなく、仮に被害を受けても早期の機能回復を可能とする対策技術の開発等を目指す。

3. 研究開発プログラムで目指す成果

3.1 橋梁の機能確保のための耐震技術の開発

3.1.1 リスクマネジメントに基づくレジリエンス技術の提案

道路の重要度に応じて橋としての機能の早期回復が図れる設計法を構築するため、まず、耐震設計で想定する大規模地震による地震動に対しては、早期機能回復のための応急復旧が不要あるいは早期機能回復が可能な被害に留まることの信頼性が高まる構造設計とする。その上で、耐震設計での想定を上回る事象に対しては致命的な被害に至りにくく、仮に被害が生じても応急復旧により比較的早期に機能回復が可能な壊れ方が実現するように、損傷を制御した設計法の開発を目指す。

また、地震動による影響に加え、断層変位や津波など、地震動以外の地震の影響が複合的に作用する状況が生じえることも考えておくことが重要である。このような状況に対しては、橋としての機能回復のための措置がしやすい壊れ方となるように橋全体の損傷シナリオを設定（損傷リスクを制御）し、その損傷シナリオが実現する信頼性が高まるように各部材の耐震設計を行う戦略を設計法として普遍化させていく計画である。

さらに、計画的に損傷させた箇所の応急復旧に対しても、レジリエンス（早期機能回復）の向上に資する新しい技術の開発を促進させ、適切な技術が適所に適用されるように、応急復旧技術に求

表-1 本プログラムを構成する研究課題とその達成目標

第5期中長期計画 達成目標	研究課題	研究課題別の達成目標
(1) 橋梁の機能確保のための 耐震技術の開発	リスクマネジメントに基づく道路橋の レジリエンス技術に関する研究	① レベル2地震動に対する応急復旧が不要・早期機能回復が可能な構造の提案 ② 超過外力に対する損傷制御設計を実現させるための評価・対策手法の提案 ③ 新技術・新材料を用いた耐震設計法及び耐震補強工法の評価技術の提案
	多様な現場条件に対応した道路橋基礎の 耐震補強技術に関する研究	① 構造的に補強された基礎に対する耐荷性能の評価手法の提案、耐震補強設計法の提案 ② 改良された地盤中の基礎に対する耐荷性能の評価手法の提案
(2) 土工構造物の機能確保のための 耐震技術の開発	大地震時の道路盛土の機能確保に関する 研究	① 道路盛土の被害の道路機能への影響評価手法の提案 ② 道路盛土の道路機能への影響を考慮した弱点箇所抽出手法の提案 ③ 道路盛土の道路機能への影響を考慮した耐震性向上策の提案
	地震に対する河川堤防の被害リスク低減 方策に関する研究	① 地震に対する河川堤防の弱点箇所抽出方法の提案 ② 河川堤防の低コストな耐震対策技術の開発 ③ 河川堤防の段階的強化方策の提案
(3) 構造物の機能確保のための 精度の高い液状化予測技術の開発	多様な土質に対する液状化の予測技術に 関する研究	① 多様な土質に対する合理的な液状化の判定法の提案 ② 液状化予測のための調査技術の提案 ③ より合理的な液状化の影響評価法の提案

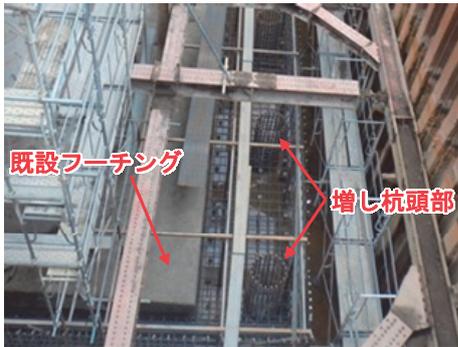


写真-1 基礎の耐震補強工事の施工状況

める要件を明確化したうえで、その評価手法を提案していく。

3.1.2 道路橋基礎の性能評価手法・耐震補強設計法の提案

前項では、想定を超える事象に対しては損傷リスクを制御し、橋全体としての機能回復力を高める構造設計をしていくことの必要性を述べたが、橋を構成する部材の一つである基礎は地中部に存しており、橋の機能に影響をもたらすような損傷が基礎に生じてしまうと、その応急復旧には時間を要してしまう。そのため、一般には基礎には損傷を誘導しない方が望ましいことが多く、既設橋の基礎に対しては耐荷力を向上させる補強が必要となるケースが生じる。

一方で、既設基礎の耐震補強工事の施工にあたっては、写真-1に示すように、施工スペース等の制約条件を伴うことが多い。そのため、合理的な補強工法が選定できるように、まずは既設基礎が保有している耐荷性能の現況を適確に見極める評価方法を高度化していく必要がある。その上で、不足する耐荷力を補う方法を検討することになるが、一般には基礎の構造本体を補強する方法と地盤を補強する方法がある。本研究では、構造的な補強工法として多用されている増し杭補強等を対

象として、その補強がなされた道路橋基礎の限界状態を明らかにした上で、耐荷性能の評価手法を提案する。また、地盤を補強する工法としては、地盤強化系工法（固化改良）、液状化対策工法（固化改良、浸透固化等）及び側方流動対策工法を対象として、改良された地盤中にある道路橋基礎の限界状態を明らかにしながら耐荷性能を評価する手法を提案していく計画である。

なお、これらの耐荷性能の評価において必要となる基礎・地盤系の動的挙動の評価や地盤変位の影響評価についても併せて研究を進めていく。

3.2 土工構造物の機能確保のための耐震技術の開発

3.2.1 道路盛土の道路機能への影響を考慮した弱点箇所抽出手法・耐震補強技術の提案

道路を構成している構造において、盛土は非常に長い延長の区間で適用されている。一般に、盛土構造は地震で被災しても、橋と相対的に比較すれば道路としての機能回復はしやすいが、条件によっては機能回復に長期間を要するような被災に至った事例もある。したがって、機能回復に長期間を要するような被災が生じるリスクの高い箇所を的確に把握し、効果的に耐震対策を推進できるようにしていくことが重要となる。

そこで、谷埋め高盛土や泥炭性軟弱地盤盛土等の既設盛土を対象として被災パターンやそのメカニズムの解明を行う。具体的には、盛土内の水位、3次元的地形の影響、地震時の水圧・応力変化、盛土変状・崩壊の道路機能への影響等を考慮し、道路としての機能に及ぼす影響度合いを評価できるようにする。その上で、図-1のように弱点となる箇所を抽出する手法を構築し、想定される変状と地震後に求められる道路機能に応じ、経済性や施工性等も考慮した補強技術の研究を行っていく。

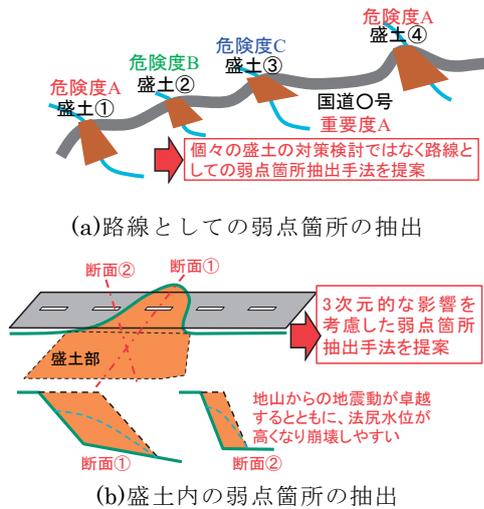


図-1 道路盛土の弱点箇所抽出のイメージ

その際、膨大な数の既設盛土に対して適切な評価を効率的に実施できるようにしていく観点から、物理探査技術をスマートに活用していくことが重要である。そこで、弱点箇所の抽出において重要な根拠情報となる元地形（基礎地盤）条件、盛土材料と締固め程度、盛土内水位等を面的に調査することができる手法を確立させるとともに、盛土斜面における物理探査技術の省力化、高速化及び低コスト化を図っていきたいと考えている。

なお、盛土を設計する段階においては、盛土材料の物性値や盛土内水位の取り扱いに不確実性があり、そのことが地震時挙動の不確実さを大きくし、被害が生じる要因となっている場合もある。そこで、排水、基礎地盤処理、締固め管理の手法、水位観測や物理探査の活用等、盛土の施工や維持管理段階において講じておくべき対策技術についても本研究の中で提示していきたいと考えている。

3.2.2 河川堤防の地震被害リスク低減方策の提案

河川堤防の耐震対策事業は、これまで主として国管理河川において進められてきているが、対策に要するコストが多額であることがネックとなり、十分に進捗していないのが現状である。そのため、河川堤防の耐震対策事業の加速化に資する技術的な方策が求められている。

そこで本研究では、河川堤防についても、地震時に弱点となる箇所の抽出方法の高度化を図るとともに、耐震対策技術の合理化の検討を行っていく。さらに、現場への成果実装を視野に、堤内外の段階的強化等の技術戦略を併せて提案していきたいと考えている。



写真-2 液状化予測の評価のための地盤調査技術の改良

3.3 耐震性能評価のための精度の高い液状化予測技術の開発

これまでの震災による液状化の発生状況との照合から、現行の液状化判定法はやや安全側に偏った傾向の評価となっていることがわかってきている。既設の橋や土工構造物の耐震性を適確に評価し、その上で合理的な耐震対策の選定につなげていくためには、構造物の機能に影響を与えるような地盤の液状化が生じるかどうかの予測技術の精度を更に高めていく技術開発に継続して取り組んでいく必要である。

今期においては、これまでの研究成果を踏まえつつ、土の密度、粒度、年代効果の異なる砂質土や北海道火山灰質粗粒土等、多様な土の変形特性を考慮して合理的な判定基準法を構築していくとともに、液状化判定の要否基準（深度範囲、粒度範囲等）についても改善の検討を行う。また、液状化の予測をするために実施する地盤調査技術（写真-2に示す原位置液状化試験法である振動式コーン）について、試験機器およびデータ解析手法を改良することで適用範囲の拡大を図るとともに、液状化判定に用いる液状化強度の推定方法を提案する。その上で、液状化した後の土の変形特性を考慮して各種構造物の地震応答をより合理的に評価できるように、その解析モデルの設定方法を、適用性の検証結果と併せて提示していきたいと考えている。

3.4 デジタル技術の活用による災害対応の変革に向けた技術開発

「令和4年度の国立研究開発法人土木研究所の業務運営に関する計画」では、急速に進化するデジタル技術の活用により現場の飛躍的な生産性向上に貢献していくため、研究開発の実施にあたっては、現場における課題の解決にデジタル技術を積極的に活用することが示されている。本プログ



写真-3 デジタル技術の活用による地震後の橋の状態把握手法の変革イメージ

ラムにおいても、デジタル技術の活用により大規模地震後の災害対応業務の変革を目指した研究開発にも取り組んでいる。ここでは、橋を対象として実施している研究開発の一例を紹介する。

大規模地震に対して橋のレジリエンスの向上を図るためには、まず、地震後に同時多発的に必要となる緊急点検による橋の状態把握を短時間で行うことが求められる。そして、橋に残存している性能を評価した上で、適切な応急対策・復旧工法を迅速に選定する必要がある。こうした中、UAV等の機器を活用した橋の点検支援技術や測量技術が開発されてきており、また、橋の3次元モデルや点検データ等のデータプラットフォームも整備されつつある。土研で実施する研究開発のねらいは、これらのデジタル技術やデータプラットフォームを有機的に融合させ、大規模地震後の橋のレジリエンス向上につなげることである。

写真-3は、これらデジタル技術の活用イメージを示したものである。現場でUAVにより橋の3次元データや画像情報を取得し、道路管理者へリアルタイムに伝送する。同時に、道路管理者はデータプラットフォームから当該橋のBIM/CIMあるいは3次元モデルを抽出し、格納されている位置座標情報等と現場から送られてくる計測データを照合することにより、地震によって生じた変状箇所を速やかに把握できるようにする。現場からの伝送情報は、国総研・土研等の関係機関とも共有され、初動段階での遠隔技術支援活動に活用する。

このようにデジタル技術とデータプラットフォームを融合させることで、地震後の橋の状態と安全性の評価に必要な情報を道路管理者がより速やかに把握できるようにし、その上で、応

急復旧工法の選定や規制解除の目途の判断が迅速に行えるような技術に仕上げていきたいと考えている。また、その実現に向け、地震後に実施する橋の緊急点検等で用いる調査技術に求める要件を明確にし、ニーズにマッチした新しい技術の開発が促進されるようにもしていく計画である。

4. まとめ

本報では、第5期中長期計画の研究開発プログラム「大規模地震に対するインフラ施設の機能確保技術の開発」について紹介した。ここで紹介した取組み等を推進し、来たるべき大規模地震に対してインフラ施設の機能確保の信頼性が高まるとともに、仮に機能障害が生じてもデジタル技術を活用しながら早期に機能回復を図ることができる対策を実現していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 星隈順一、今村隆浩、宮原史、西田秀明：新阿蘇大橋の性能に及ぼす地盤変状の影響を小さくするための構造的な配慮と工夫、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.77、No.2、pp.339～355、2021
- 2) 大住道生、中尾尚史、石崎寛史、庄司学：破壊尤度の制御による道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法の提案、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.77、No.4、pp.I_360～I_372、2021
- 3) 楊勇、谷本俊輔、桐山孝晴：液状化地盤における既設橋台杭基礎の各種補強対策の効果に関する動的遠心模型実験、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.77、No.4、pp.I_184～I_195、2021
- 4) 東拓生、加藤俊二、佐々木哲也：谷埋め高盛土の地震時変形挙動に関する解析手法の検討、土木技術資料、第62巻、第12号、pp.16～19、2020年12月
- 5) 大重綱平、梶取真一、谷本俊輔、佐々木哲也：地震後の堤防機能に関する遠心力載荷模型実験、土木技術資料、第62巻、第12号、pp.24～27、2020年12月
- 6) 石村陽介、谷本俊輔、佐々木哲也：振動式コーンを用いた原位置液状化試験法に関する基礎的検討、土木技術資料、第61巻、第7号、pp.22～25、2019年7月

星隈順一



土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ長、博士（工学）
Dr. HOSHIKUMA Jun-ichi