

東北地方太平洋沖地震をはじめとする大地震による被害を踏まえた調査研究と道路橋示方書の改定

星隈順一* 玉越隆史** 七澤利明*** 塚 淳一**** 片岡正次郎***** 西田秀明*****

1. はじめに

平成23年3月11日に、我が国における観測史上最大の東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震により、東北地方から関東地方にかけて継続時間が長い揺れを観測するとともに、太平洋沿岸地域では津波により甚大な被害が生じ、道路橋においても、部材の損傷や上部構造の流出などの被害が生じた。

前回の道路橋示方書の改定以降、平成16年新潟県中越地震、平成19年新潟県中越沖地震、平成20年岩手・宮城内陸地震など、道路橋に被害を及ぼす大地震が発生し、復旧、復興に資する主たる道路ネットワークを構成する橋においては、地震後に速やかに機能を回復するという観点で、新たな課題も認識されてきていた。また、平成14年以降、東海地震、東南海地震、南海地震の被害想定が政府機関から公表されたことを受け、プレート境界型の大地震に対する対策の重要性も認識され、こうした点を改定のポイントとして検討をしている最中の東北地方太平洋沖地震の発生であった。このため、東北地方太平洋沖地震の被災事例から得られた教訓を踏まえて、さらなる検討を行った上で、平成24年2月に道路橋示方書が改定された。

本文では、特に、近年の大地震による道路橋の被害の教訓を踏まえて改定された項目について、その根拠となる研究成果や知見を含めて紹介する。

2. 大地震による被災等を踏まえた改定

(1) 津波など地震時の振動ではない事象に対する考え方

平成23年東北地方太平洋沖地震における極めて大きな津波や平成20年岩手・宮城内陸地震における大規模な地すべりのように、地震時の振動



(a) 津波による上部構造の流出¹⁾



(b) 地すべりの影響による落橋²⁾

写真-1 地震時の振動ではない事象による落橋

ではなく、地震によって引き起こされる別の事象が原因となって、道路橋に落橋等の甚大な被害が生じた（写真-1）。このような被害を受け、道路橋示方書による耐震設計において具体的に考慮していない事象に対する考え方を解説に明記した。

特に津波に関しては、津波に関する地域の防災計画等を考慮した上で橋の構造を計画することを規定した。これは、津波に対しては道路橋単独で対策を考えるのではなく、他の施設も含めた地域全体として計画される防災対策や避難対策等に応じて、その橋を含む路線に求められる性能を検討し、その上で当該性能を満たすことができるような橋の構造を計画することが重要であることを意図したものである。津波に対する橋の構造計画の考え方の例としては、防災という観点から、津波に関する地域の防災計画等を参考にしながら津波の高さに対して桁下空間を確保すること、また減災という観点から、津波の影響を受けにくいような構造的工夫を施すこと、上部構造が流出しても復旧しやすいように構造的な配慮をすること等を例示した。

Revision of "Specifications for Highway Bridges" based on knowledge derived from recent earthquakes and research accomplishments

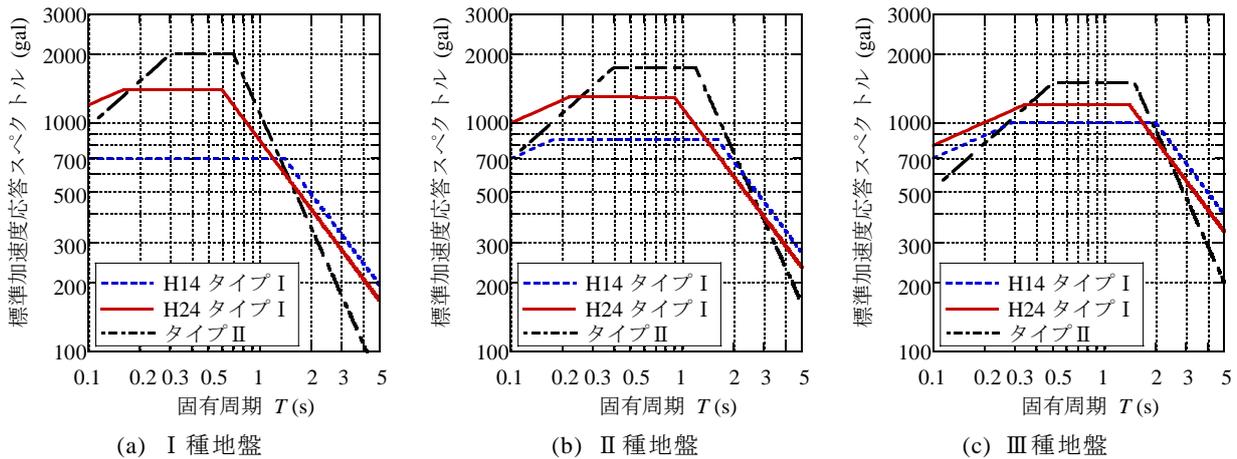


図-1 標準加速度応答スペクトルの比較

(2) レベル2地震動（タイプ I）の見直し

道路橋の耐震設計では、レベル2地震動として、プレート境界型の大規模な地震による地震動（タイプ I の地震動）と内陸直下型地震による地震動（タイプ II の地震動）の2種類を考慮している。平成23年東北地方太平洋沖地震と同じプレート境界型の地震である東海地震、東南海地震、南海地震等が近い将来に発生すると考えられていること³⁾等を踏まえ、今回の改定では、これらのプレート境界型の大地震による地震動を推定した結果をもとに、レベル2地震動（タイプ I）を見直した。

(a) 標準加速度応答スペクトルの改定

道路橋の設計地震動は、図-1のような地盤種別ごとに設定された標準加速度応答スペクトルに、減衰定数別補正係数と地域別補正係数^{*}を乗じることで設定される。レベル2地震動（タイプ I）の標準加速度応答スペクトルは、大正12年関東地震(マグニチュードM7.9)において東京周辺で生じた地震動を、近年得られた強震記録及び回帰分析法の改良によって高度化された距離減衰式^{4), 5)}を用いて推定した結果に基づき、工学的判断を加えて定めたものである。

図-1は、従来のタイプ I の地震動、今回見直したタイプ I の地震動及びタイプ II の地震動の標準加速度応答スペクトルを比較して示したものである。今回改定したタイプ I の地震動は、スペクトルのピークは従来のタイプ I の地震動に比べて大きく、長周期側についてはタイプ II の地震動より大きい。

また、従来のタイプ I の地震動の加速度応答ス

ペクトルのピークは堅い I 種地盤（良好な洪積地盤及び岩盤）よりも軟らかい III 種地盤（沖積地盤のうち軟弱地盤）において大きく設定されていたが、改定された標準加速度応答スペクトルでは大小関係が逆転している。これは、振幅が大きい強震記録のみを用いて地盤種別ごとの地盤補正係数を算出し加速度応答スペクトルを推定した結果、軟らかい地盤では表層地盤の非線形性が強くなることで、I、II、III種地盤の順に加速度応答スペクトルのピークが全体的に小さくなった結果を取り入れたものである。

(b) 地域別補正係数の改定

標準加速度応答スペクトルの改定にあわせて、平成14年・15年の地震防災対策強化地域・推進地域の指定にあたって用いられた震源域⁶⁾等に関する情報をもとに、こうした地震の各地域における影響の度合いを踏まえて、従来の地域別補正係数とは別に、レベル2地震動（タイプ I）に対して適用する地域別補正係数を新たに設定した。その際、東北地方太平洋沖地震、北海道太平洋沖の地震が連動する場合、東海・東南海・南海地震及び日向灘地震が連動する場合などの震源域が連動する影響を考慮した上で、大正12年関東地震において東京周辺で生じた地震動よりも強い影響を受けると推定される地域では地域別補正係数を1.2とした。

(c) 動的解析に用いる加速度波形

動的解析による耐震性能の照査に用いるため、改定した標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振幅調整した加速度波形を地盤種別ごとに3波形ずつ示した。これらは平成15年十勝

^{*}土木用語解説：地域別補正係数

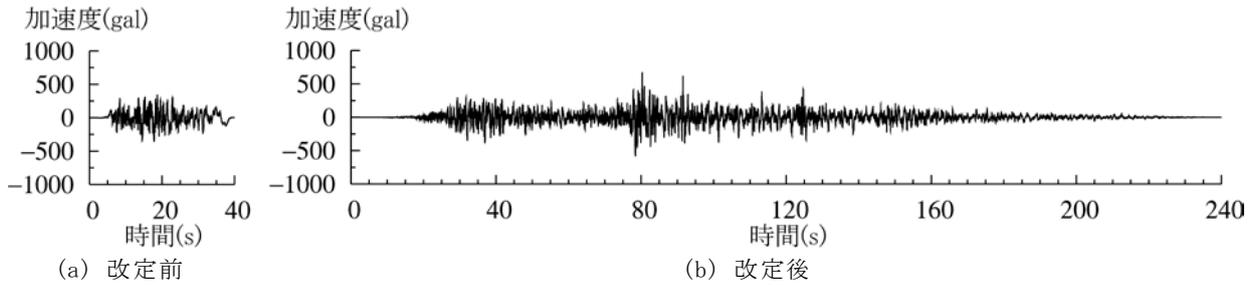


図-2 動的解析に用いるレベル2地震動(タイプI)の加速度波形の例(Ⅱ種地盤の3波形の1つ)

沖地震と平成23年東北地方太平洋沖地震の際に観測された強震記録をもとに作成したものである。

改定前と改定後の加速度波形を比較した例を図-2に示す。改定前の波形(a)は昭和43年日向灘地震(M7.5)の際に愛媛県宇和島市の板島橋周辺地盤上で、改定後の波形(b)は東北地方太平洋沖地震の際に仙台河川国道事務所構内地盤上で得られた強震記録をそれぞれ振幅調整したものである。図からも明らかなように、東北地方太平洋沖地震で観測された地震動は継続時間が長い特性を有していることが特徴であるが、計算機の性能が飛躍的に向上し、継続時間の長い地震動を入力する動的解析が実務上行い得るようになったことも踏まえ、このような地震動を考慮することとした。

(3) 液状化地盤上の基礎の耐震設計法の合理化

平成23年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方にかけて広い範囲で液状化の発生が確認された。東北地方太平洋沖地震において観測された地震動は、前述のとおり、継続時間が長いことが1つの特徴であり、これが液状化の発生を助長させた可能性が考えられた。このため、東北地方太平洋沖地震における液状化が発生した事例と液状化が発生しなかった事例に対して、従来規定されていた液状化判定法により、液状化が発生した事例を適切に判定できるかに関する検討が約200地点のデータをもとに行われた^{7), 8)}。事例分析の結果から、図-3に示すように、液状化が発生していない地点に対しても液状化が発生すると判定される例もあったものの、液状化発生地点では液状化が発生すると判定された。すなわち、液状化の発生を見逃すような事例はなかったことが確認されたことから、今回の改定においても従来の液状化判定法に従うこととした。

一方で、従来は液状化判定をレベル2地震動に対してのみ行い、レベル1地震動に対する耐

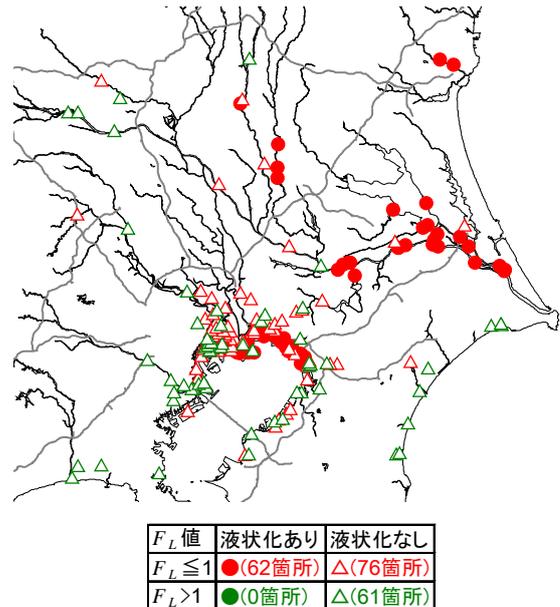


図-3 東北地方太平洋沖地震における液状化・非液状化事例に対する液状化の判定結果(文献8)を元に作図)

震設計においてはレベル2地震動に対する液状化判定の結果に応じてその影響を考慮するとしていたが、今回の改定において、レベル2地震動(タイプI)の改定に伴い地盤面の震度が見直されたため、従来そのままとするとレベル1地震動に対する耐震設計がこの影響を受けることになってしまう。そこで、液状化地盤上の基礎の耐震設計を合理的に行う観点から、レベル1地震動に対しても液状化判定を行うことを規定した。

また、従来は液状化地盤上の基礎の耐震設計においては、タイプIの地震動とタイプIIの地震動について、慣性力は大きい方を用い、地盤の抵抗は小さい方を用いることとしていたが、今回の改定では、技術的な知見を踏まえ、耐震設計の合理化のために地震動のタイプごとに慣性力の大きさと地盤の抵抗特性を組み合わせることを規定した。

(4) 落橋防止システムの規定の見直し

過去約100年間の我が国における地震による道

路橋の落橋モードの分析^{9),10)}及び近年採用が多い多径間連続橋の地震時の挙動特性等を踏まえ、橋の構造特性に応じてより合理的に落橋を防止できるようにするために、落橋防止システムの規定を見直した。特に、落橋に至るまでの挙動（シナリオ）を適切に設定し、それに応じた対策を行うことが重要であることを明確にするとともに、こうした落橋シナリオの検討に基づき、落橋防止構造の設置を省略できる範囲を拡大している。

落橋防止対策は、橋の構造特性に応じて、橋軸方向と橋軸直角方向に対してそれぞれ検討する。橋軸方向に対しては、桁端部において桁かかり長を確保した上で、橋の構造特性に応じて落橋防止構造を適切な箇所に設置する。ここで、橋軸方向の落橋防止構造を省略してよいかどうかは、支承部の破壊に伴う落橋に対して構造的な補完性又は代替性が高いかどうかという観点から検討することが重要であり、橋軸方向に大きな変位が生じにくい構造特性を有する橋か、又は端支点の鉛直支持が失われても上部構造が落下しない構造特性を有する橋か、という観点から判定することを規定している。例えば、従来は、地震時に不安定となる地盤がある場合には両端が剛性の高い橋台に支持された橋のうち25m以下の一連の上部構造を有する条件を満たす場合にも落橋防止構造を省略してはならないとしていた。しかし、平成23年東北地方太平洋沖地震をはじめとする近年の大規模な地震による橋の被災調査結果を踏まえ、今回の改定では、落橋防止構造の省略の可否の判定は、地震時に不安定となる地盤の有無には依存しないとしている。これは、両端が橋台の場合には、地震時に地盤が不安定となっても、橋台間の距離が狭まる方向に挙動をすることが確認されており、このような構造特性の橋は、橋軸方向に落橋に至るような方向の大きな相対変位が上下部構造間に生じにくい橋とみなすことができるためである。

また、落橋防止構造や**横変位拘束構造**^{*}は、これらが機能する際の力の伝達機構を考えれば、当該構造が取り付けられる下部構造等の水平耐力以上の抵抗力は期待できないため、これを踏まえてこれらの構造の設計地震力を見直している。

さらに、平成23年東北地方太平洋沖地震においては、写真-2に示すように支承部の損傷等の影響が落橋防止構造の取付部にまで及んだ事例が確



写真-2 支承部の取付部の損傷が落橋防止構造の取付部にまで及んだ事例（写真提供：福島市）



写真-3 地震時に橋脚の張出ばりが損傷した事例

認されたことから、支承部が損傷しても、その影響が落橋防止構造には及ばず、落橋防止構造に期待する機能が確実に発揮されるように取り付けることを規定した。

(5) 支承部や落橋防止システムからの荷重に対する下部構造の設計

平成23年東北地方太平洋沖地震による被害の1つとして、上部構造から支承部や落橋防止システムを介して作用する荷重により橋脚の張出ばりなどが損傷し、震後の供用性に影響する事例がみられた（写真-3）。このように橋脚の張出ばりが地震時に降伏し塑性化が生じると、上部構造を安全に支持できず地震後の速やかな機能の回復が困難となり、損傷が著しい場合には桁の落下等に至るおそれもある。このため、橋脚の張出ばりなど塑性化を考慮しない部材については、降伏以内に留まるよう照査することを下部構造編において規定した。落橋防止システムからの作用に対しても同様の照査を行うこととしている。また、地震時や、落橋防止システムからの作用を受ける際の具体的な設計の考え方についても、既往の損傷事例等を踏まえて検討を行い、橋脚の張出ばりに作用する荷重等を例として解説に示した。

^{*}土木用語解説：横変位拘束構造



写真-4 橋台背面に著しい段差が生じた事例



写真-5 斜面崩落により杭頭が露出した事例

表-1 注意すべき地形・地質、懸念される現象及び調査項目の例

注意すべき地形・地質	懸念される現象	主な調査項目
地層の傾斜が地形(切土)の傾斜と同一方向に傾斜している地盤(流れ盤)	・将来的な斜面崩壊、地すべり	・近傍の災害履歴、対策工の有無 ・地層の傾斜方向、割れ目、層構造 ・湧水の有無
山麓や谷沿いに崩壊物が堆積した地形(崖錐)	・施工時の湧水、崩壊の発生 ・将来的な落石、崩壊	・崖錐の分布(平面、深度)、硬軟、安定性 ・湧水の有無

の例を下部構造編の巻末参考資料に示している。

しかし、上記のような設計や施工を行っても、規模の大きな地震が生じた際に、橋の複雑な挙動や流動化による地盤変状等の影響により路面に段差が生じる可能性がある。このため耐震設計編において規定しているB種の橋のように、地震後の通行機能の確保が必要な橋では、踏掛版の設置等適切な対策を講じるのがよいとしている。踏掛版については段差の低減に有効であることが平成23年東北地方太平洋沖地震の際も確認されたが、これに限らず路面の連続性の確保の観点から適切な対策があれば採用することができる。

なお、盛りこぼし橋台についても段差が生じた事例を踏まえて設計の考え方や留意点について示している。

(7) 斜面上の基礎の変状

斜面上に設置された下部構造で、地震に起因した基礎前面地盤の崩落などにより下部構造に変位や傾斜が生じ、橋の安全性が低下した事例がみられる(写真-5)。このような被害は、平成16年新潟県中越地震や平成20年岩手・宮城内陸地震などにおいて主に山間地で見られた。

この対応として、(独)土木研究所(以下、土研)では、調査の専門家に加え、設計や施工の専門家と共に検討を行い、調査に関する規定を充実させた。特に、一般に地盤条件が複雑で留意すべき点が多い丘陵や山地部については、特に留意して調査すべき地形・地質条件や調査項目を具体的に示した(表-1)。この地形・地質条件や調査項目の検討に際しては、これまでの地震被災調査や技術相談の知見を踏まえるとともに、地質・地盤調査者と設計・施工者とが基本的な認識を共有し、それぞれの立場から適切な対応を行うことが重要

(6) 橋台背面アプローチ部

地震による橋に関連した典型的な被害の1つとして、橋台とその背面との間に生じる段差がある。最近の地震では、橋本体の損傷は比較的軽微であっても橋台背面に著しい段差が生じたことによって、通行ができず結果的に橋としての速やかな機能の回復に影響を及ぼした事例が見られた(写真-4)。また、盛りこぼし橋台の背面でも盛土の沈下に伴い著しい段差が生じた事例が見られた。

この対応として、橋台と背面側の盛土等との間に位置し、両構造間の路面の連続性を確保するために設ける構造部分を「橋台背面アプローチ部」として新たに定義し、橋本体構造とは異なるものの橋の安全性や供用性に影響する重要な部分として位置づけた。この部分では、良質な材料を用い、1)常時・地震時の基礎地盤の安定性、2)常時・地震時のアプローチ部本体の安定性、3)降雨時の排水性を考慮して設計・施工を行うことを規定した。これらの観点は道路土工指針の構造物の取付部におけるものと同じであるが、前述のように路面の連続性の確保が土工だけでなく橋として重要であることから改めて示している。また、路面の連続性を確保するという観点や、インテグラルアバット構造における確実な地盤抵抗の確保の観点から、道路盛土での現場での実状や、既往の知見を踏まえたうえで、材料の仕様や締固め管理値、排水工

であることが容易に理解できるよう、表形式で例示を取りまとめた。

下部構造の設置位置は、これらの調査を適切に行い斜面の性状を把握して安定した地点に設置することが基本であり、計画段階から配慮しておく必要がある。しかし、やむを得ず地盤の変状が生じうる地点に下部構造を設置する場合には、地盤変状の影響を受けにくい下部構造の形式を検討するとともに、地すべり抑止杭や押え盛土など橋とは切り離れた対策を行い橋に影響を与えないようにするのがよいとしている。この場合の下部構造の配慮の例としては、組杭深礎基礎等を適用する場合には補完性・代替性の確保の観点から複数列の杭で抵抗する組杭構造とするのがよいことをあげている。これは、単列深礎杭の前面地盤が崩落などをすると、基礎の安定性が大きく低下するおそれがあること、複数列の深礎杭を有する斜面上の基礎で、大地震時に基礎周辺地盤に変状が生じたものの、供用性に影響する損傷等が生じなかった例が見られることによる。

3. おわりに

本稿では、近年の大地震による道路橋の被害及びその被害に対する調査や原因、対策に関する研究を踏まえて改定された項目について紹介した。

国土技術政策総合研究所と土研では、東北地方太平洋沖地震により被災した橋の本復旧や今後の維持管理上の留意点等について技術支援を行ってきている。今後の震災対策や耐震設計に関する技術開発の必要性がある事項が認められた場合には、被災メカニズムの推定・分析や対策の検討など、積極的に研究課題として取り入れている。現在も

継続的に研究を実施している課題もあり、引き続き今後の地震被害の軽減に向けて取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報、国土技術政策総合研究所資料第646号／土木研究所資料4202号、2011。
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0646.htm>
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料第486号／土木研究所資料4120号、2008。
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0486.htm>
- 3) 地震調査研究推進本部：海溝型地震の長期評価、http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.htm
- 4) 片岡正次郎、佐藤智美、松本俊輔、日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集A、Vol.62、No.4、pp.740～757、2006。
- 5) 片岡正次郎、松本俊輔、日下部毅明、遠山信彦：やや長周期地震動の距離減衰式と全国の地点補正倍率、土木学会論文集A、Vol.64、No.4、pp.721～738、2008。
- 6) 中央防災会議：第4回資料・第9回資料
- 7) 国土交通省、液状化対策技術検討会議：「液状化対策技術検討会議」検討成果、2011。
- 8) Ishihara, M. & Sasaki, T: Relationship between age of ground and liquefaction occurrence in the Great East Japan Earthquake, *Int. Sym. on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake*, pp.771-776, 2012.
- 9) 運上茂樹、星隈順一、堺淳一、植田健介：過去の大規模地震における落橋事例とその分析、土木研究所資料第4158号、2009。
- 10) 堺淳一、運上茂樹、星隈順一：大規模地震における落橋メカニズムと落橋防止構造の効果に関する分析、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.67、No.1、2011。

星隈順一*



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員、博（工）
Dr. Junichi HOSHIKUMA

玉越隆史**



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室長
Takashi TAMAKOSHI

七澤利明***



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
Toshiaki NANAZAWA

堺 淳一****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター 主任研究員、博（工）
Dr. Junichi SAKAI

片岡正次郎*****



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室 主任研究員、博（工）
Dr. Shojiro KATAOKA

西田秀明*****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター 主任研究員
Hideaki NISHIDA