

3. 今後の課題

3.1. 道路施設

東日本大震災による道路橋の被害としては、東北東部から関東地方にかけて、耐震補強されていない古い RC 橋脚や伸縮装置、支承などの地震動による損傷、液状化による土工部との段差のほか、津波による被害が数多くまた広い範囲で見られた。耐震補強などの対策が進んでいる高速道路や国道でもいくつかの被害があった。

今回の広範囲にわたる長い継続時間の地震動による道路施設の被害として、岩手県南部から茨城県にわたる地域では短周期の強い加速度による被害、首都圏においても地震動による被害などが生じたことが特徴としてあげられるが、被害状況はそれらの構造特性と地盤条件などから様々であった。そこで、2.1. で掲載した道路施設の被害調査結果から明らかになった鋼道路橋における課題について、以下に示す。

3.1.1. 設計における課題

(1) 支承・落橋防止システム・伸縮装置

今回の地震により、多くの道路橋において支承および伸縮装置部の損傷が多く報告された。これらの損傷の種類としては、鋼製フィンガージョイントをはじめとする伸縮装置の異常遊間、段差、フィンガー一等の変形、破損、定着部コンクリートの損壊などのほか、橋りょうの変位が桁遊間以上となったために桁の衝突が生じ、桁の変形、座屈、部分的な破断、支承の異常変形や破断、支承のサイドブロックなどを含む変位制限構造の損壊などが見られた。また、土工とのジョイント部では液状化により橋台背面土の沈下による段差のような被害も多く見られた。

特に今回の地震被害で特徴的なものとして、仙台東部道路や首都高速などの事例が挙げられる。比較的新しい耐震設計基準が適用されていた仙台東部道路の鋼橋の連続高架橋の掛違い部においては複数のゴム支承が破断した。地震時の挙動が異なる隣接する高架橋が鋼製フィンガージョイントにより端部で強制的に変位を与えられたと考えられる事例である。また、震源から遠い首都高速道路において鋼桁ゲルバー部で桁や支承の損傷が発生し、復旧に時間を要する事例も見られている。このような高架橋における損傷状況から、以下の課題があげられる。

- 1) 高架橋において振動特性の異なる上部構造が隣り合うジョイントにおいては、橋軸方向、橋軸直角方向に大きな相対変位が生じる可能性がある。特に、以下の例については相対変位の影響を直接受け、設計に際しては動的解析による地震時の挙動把握が必要である。
 - ・掛け違い部において、上部構造同士が支承で連結されているゲルバー部がある橋りょう。
 - ・掛け違い部において、橋軸直角方向の耐力が大きい鋼製フィンガージョイントなどが設置される橋りょう。この場合、鋼製フィンガージョイントの拘束により2連以上の桁が連動して挙動する可能性がある。
- 2) 伸縮装置や支承の遊間の設定は温度変化による伸縮量で設定されるが、地震時に大きな変位が生じるハイピアな高架橋は、それぞれの遊間を適正に整合させたうえで他に衝突する可能性のある桁端部などの離隔についても検討することが必要である。
- 3) 伸縮装置などの付属物を含めた構造とその耐震設計が課題である。たとえば、以下の例があげられる。
 - ・ジョイントプロテクターや変位制限構造など、支承部に取りつく部材のボルト部の設計にあたっては、その作用位置を考慮し、せん断力のみでなく必要に応じて曲げ引張力に対する照査を実施する必要がある。
 - ・橋脚、橋台上に設置された付属物に落下防止チェーンなどを取り付ける場合は、この破断を防止するため、付属物破損時の慣性力を考慮して設計する必要がある。

- ・橋軸直角方向に大きな耐力を有している鋼製フィンガージョイントが採用されている場合、ジョイントプロテクター設置の要否そのものについて、伸縮装置の耐力確認を実施したうえで判断してもよいと考えられる。

(2) 支承まわりの補強

端支点部の下フランジや補剛材の局部的な座屈については、上部構造の主桁側の耐力が十分に確保されていないと重大な損傷が生じる可能性が高く、このような部位に被害が生じた場合は、緊急性を要するが復旧作業自体が容易でないため、避けるべき破壊形態であることが指摘されている。

今回の地震でも過去の地震同様に、変形は顕著ではないものの座屈が見られた橋があり、これらは、いずれも支点上の補剛材が1段で構成されていた。これに対して文献1)では図3.1.1のような補強リブを設けることを推奨している。また、支承部の性能設計として、支承まわりの構造を含めた耐震性能向上策についても言及されているので、参照されたい。

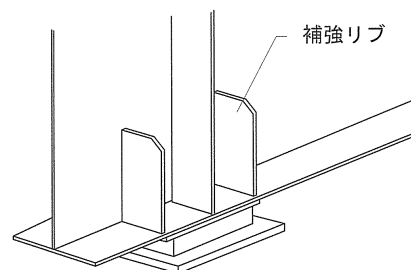


図 3.1.1 支点部の補強材の例

(3) トラス・アーチ橋の横つなぎ材

今回の地震においてトラス橋やアーチ橋などで二次部材やガセットプレートなどの損傷がいくつか見られた。国道の上路アーチ上横構の座屈、ガセットの破損、下路トラスの下弦材のき裂や座屈、首都高速道路のトラス橋の対傾構や横構の材取付けガセットプレートの破断、変形などが事例としてあげられた。

桁形式の橋りょうと比較し、これらの構造形式は長い支間の橋りょうで採用されるため、周期が長くなることや上部構造の変位も全体的には大きくなる。特に古い耐震設計基準で設計した橋りょうでは、二次部材やその接合部においては単純化したモデルや当時の設計標準的な細目で設計されており、局部的には厳しい状態になる場合も考えられる。トラス橋やアーチ橋などの形式の耐震補強は、近年事例としては多くなっており、ダンパー等の制震構造を利用するなどの技術開発も進んできている。しかし、二次部材やガセット等の接合部は接合する部材の力の流れや接合構造などが個々で異なることから、標準的な補強方法として確立するのはむずかしいが、課題として以下があげられる。

- 1) 橋の立体的な挙動および力の流れを把握して、接合部に対する構造詳細を検討する必要がある。特に慣性力が集中する支点付近の構造が重要である。
- 2) 対傾構および横構造は荷重や地震荷重により設計されるが、上路および中路トラス橋においては、支点上の対傾構に桁の面外方向の振動により拘束条件によっては大きな力が集中する可能性がある。したがって、設計に際しては動的解析による地震時の挙動把握が必要である。

(4) 適切な維持管理

今回の点検調査で観察されたのが、桁端における支承と鋼桁の腐食である。腐食が支承の損傷を助長しており、この腐食の原因が排水型の伸縮装置からの土砂の堆積である例が報告されている。排水型の伸縮装置による土砂堆積は維持管理上の問題であることが指摘されており、震災調査を通して維持管理上の課題が改めて認識させられた。以下にまとめる。

- 1) 端支点部での防食性能が、耐震性確保の観点から重要である。
- 2) 端支点部の腐食を促進する原因のひとつである排水型の伸縮装置は、非排水型に変更すべきである。

3.1.2. 道路計画としての課題

(1) 広い範囲での地震・津波被害への緊急対応および応急復旧方法

今回の地震・津波は東北から関東まで広い範囲にわたり道路橋に被害を与えた。津波による流出や変形、さらには流出物による火災被害、地震による RC 橋脚の損傷や支承、伸縮装置、桁等の変状など様々な被害があった。耐震補強などの対策が進んでいる高速道路や国道でもいくつもの被害があったが、これらの道路は管理者や専門技術者により緊急点検、そして早期復旧の努力があり緊急路が確保された。そして、今回の震災ではそれらの高速道路や国道を使った櫛の歯状の緊急路の確保が緊急対応やその後の復旧に大きく寄与した。また、津波被害の大きな地区においては仮橋等が地域をつなぐ道路の一部として応急復旧橋としてたくさん利用された。

今後、少子高齢化や人口減少にともない技術者の減少が想定される中、こうした広い範囲での大地震時に、道路橋の被害の把握、緊急車両走行のための橋りょうの緊急点検、早期応急復旧などが難しくなることが想定される。道路橋においては緊急路の一部としてそうした措置を常時より考える必要がある。

そのようなことから、コンクリート橋、鋼橋において今回の震災を含めた地震被害を分析し、広範囲を迅速に対応できる効率的な橋りょう緊急点検手法やより迅速な損傷橋りょうの評価、より高い供用性を確保するための対策、復旧のしやすい構造や既存橋りょうの改良方法、被害の大きな橋りょうの撤去方法やより迅速に設置できる応急橋などが今後の検討課題として挙げられる。また、応急橋について言えば、仮橋のその後の復興を考えた設置方法や架設時間の短縮を目指した更なる改善／改良、鉄道のよりに流出した橋りょうの再利用などの方法についても検討が望まれる。

(2) 津波被害の回避・軽減

今回の震災の特徴の一つとして津波被害が挙げられる。道路橋においては、一般道で桁の流出が多く見られた。桁の流出は比較的軽量の鋼橋だけでなくコンクリート橋でも見られた。また、大きな津波被害のあった河口近くの小さな I 桁や横構等がない少数 I 桁橋でも致命的な被害がない事例なども見られ、その被害傾向は単純ではなかった。津波による被害は、津波の形態や漂流物、架橋条件、桁断面など様々な要素が複雑にからんでいると考えられる。

今後、東海・東南海・南海地震をはじめとするプレート境界型地震などによる津波被害が想定される地域の橋りょうにおいて、同様の被害となることが想定される。それらの被害が緊急路となる道路橋の場合、緊急対応やその後の復旧の障害となることも考えられる。

現在、港湾施設等では津波に対する設計基準はあるが、それらについても議論されていることや、さらには道路橋については具体的な基準がない状況である。特に上部構造については、今回の津波をふまえた議論はこれからと考えられる。鋼道路橋の分野では、今回の被害を分析し、どのような橋りょうで津波被害の回避・軽減が考えられるかを検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会・鋼構造委員会；道路橋支承部の改善と維持管理技術，鋼構造シリーズ 17，2008。

3.2. 鉄道施設

鋼鉄道橋の被害としては、耐震補強されていない鋼鉄道橋の支承部や桁端部の損傷が見られた。津波被害を受けたエリアでは、鋼桁の流失が見られた。一方で、現在の「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」に基づいて設計された鋼鉄道橋に関しては、損傷がほとんど報告されていない。地震および津波被害を受けた鉄道施設の復旧・復興のための対策は、鉄道システム全体として対応を進めていくことが重要¹⁾であり、今後の町づくりにも関係することであるため、一概に述べることはできないが、ここでは、既設の鋼鉄道橋における耐震対策と津波対策に関する対策の考え方の一例について示すこととする。

3.2.1. 鉄道施設の地震対策の考え方

今回の地震においても、支承部の損傷と桁の損傷が報告されている。支承部の損傷に対する復旧方法は、これまでも検討されてきているが²⁾、鉄道構造物では列車走行性の観点から特に支承部の移動制限の扱いが重要であり、既設の鋼鉄道橋の耐震性を向上させるためには、支承部の挙動を明らかにすることが鋼鉄道橋の耐震性向上に関わる。ここでは、既設の線支承の載荷実験から破壊に至る耐力を求め、非線形復元力モデルを設定し、そのモデルを取り入れて橋りょう全体の時刻歴応答解析を行った例^{3), 4)}を示す。なお、大地震に対しては、鋼鉄道橋の対策だけで耐えられる構造とするのではなく、鉄道システム全体として被害を極力少なくする減災という考え方に立って対策を進めることが望ましい。

(1) 既設鋼製線支承を用いた鋼構造物の耐震評価の考え方

線支承の損傷としてよく見られるソールプレートのつめの部分の損傷とサイドブロックの損傷に対して、これまでに実施した載荷試験を基にして設定した復元力モデルの例を、**図 3.2.1** および **図 3.2.2** に示す。この復元力モデル (**図 3.2.1**) を基にして、構造物の応答への影響を調べるために、構造全体をモデル化し時刻歴応答解析を行った。解析モデルとパラメータは、**図 3.2.3** に示すとおりである。

解析結果の例を **図 3.2.4** と **図 3.2.5** に示す。支承部と下部工の耐力比が 1.0 より小さい場合は、支承部の応答変位は急激に大きくなり、下部工の応答塑性率は小さくなることがわかる。これは、支承部が塑性化すると支承の応答が支配的になるためと考えられる。耐力比が 1.0 よりも大きい場合は、下部工の応答塑性率および支承部の応答はほとんど変わらない。このことより、支承部の耐震補強は、支承部の降伏耐力が、下部工の降伏耐力を超えるような補強を行っても効果が変わらないことが明らかになった。また、支承部の降伏耐力が、下部工の降伏耐力の 0.8~0.9 倍程度の場合でも、大掛かりな補強が不要となるケースがあることが明らかになった。

このように、支承部の補強を検討する際は、支承部の耐力や変形性能を精度よく評価し、鋼桁や下部工との耐力のバランスを考慮した上で必要に応じて補強していくことが重要であると考えられる。

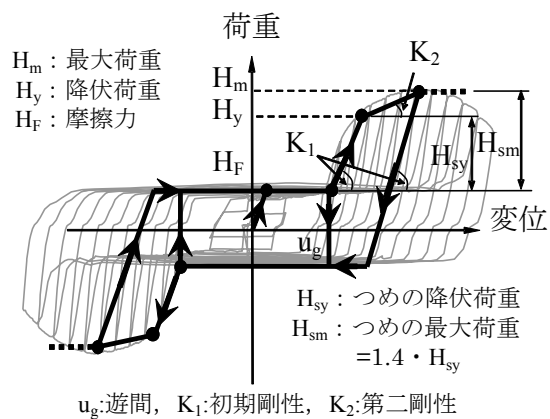


図 3.2.1 ソールプレートの復元力モデル

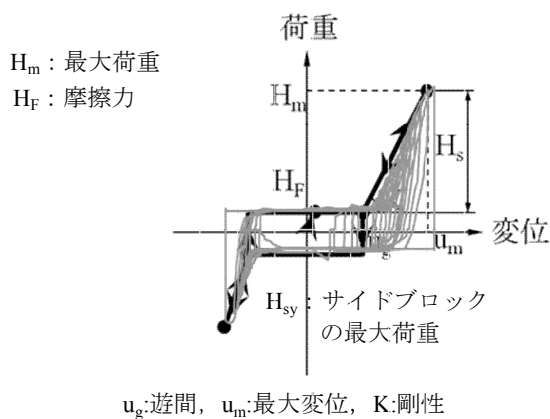


図 3.2.2 サイドブロックの復元力モデル

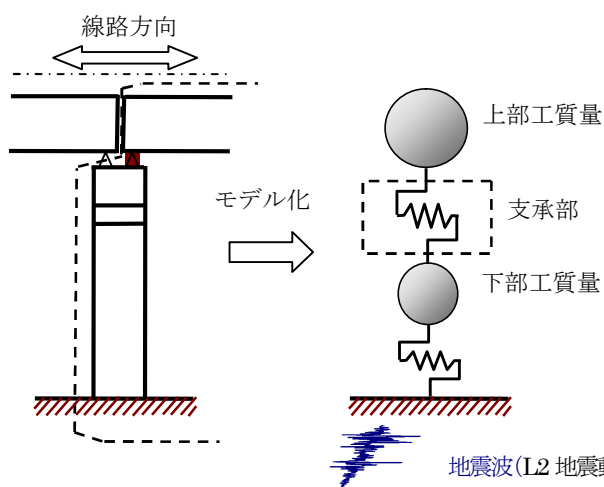


図 3.2.3 2 質点ばねマスモデルの概要と解析条件

解析パラメータ (支承部)	
耐力 $\kappa \cdot K_{hy} \cdot W_u$	$\kappa = (\text{支承降伏耐力} / \text{下部工降伏耐力})$ 0.1~1.3

解析パラメータ (下部工)	
降伏震度 K_{hy}	0.2~0.8
固有周期 $T(\text{sec})$	0.5~1.2

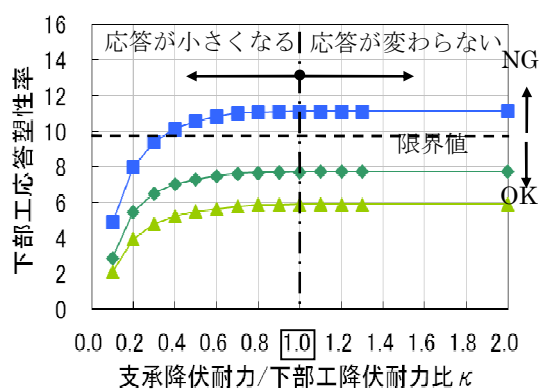


図 3.2.4 下部工の応答塑性率 ($T=0.9 \text{ sec}$)

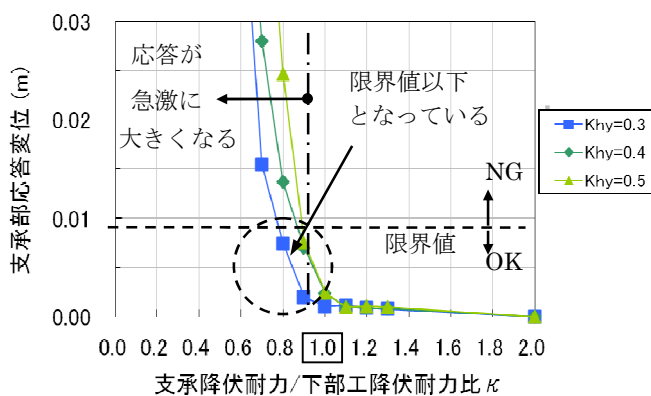


図 3.2.5 支承部の応答変位 ($T=0.9 \text{ sec}$)

3.2.2. 鉄道施設の津波に対する損傷と対策の考え方

今回の津波被害を受けたエリアでは、鋼桁の流失が見られた。津波に対する対策の考え方としては、津波に対して抵抗する構造の採用、もしくは、津波に対して抵抗が少ない構造の採用などが考えられる。万が一、鋼桁が津波に流された場合を想定して、流された鋼桁が再利用しやすいような対応を取っておくことも重要と考えられる。

以下、津波に対する対策法の一例を示す。なお、津波に対しても、鋼鉄道橋の対策だけで耐えられる構造とするのではなく、鉄道システム全体として被害を極力少なくする減災という考え方に立って対策を進めることが望ましい。

(1) 津波に対して抵抗する構造の採用（例：既設盛土一体化橋梁）

従来の橋桁方式では、大きな津波に耐えることは基本的に困難と考えられるが、今回の地震では、被災した鉄道の橋りょうの傍で、河川護岸に埋め込まれた道路の橋桁が流出していない状況が見られた。このようなことから、例えば、既存の盛土と橋りょうを一体化した既設盛土一体化橋梁のような構造が、津波に対して有効ではないかと考えられる。

既設盛土一体化橋梁とは、鋼桁と橋台を一体化してラーメン構造化したもので、既に道路橋で実績があるが⁵⁾、鉄道では、鋼桁・橋台・盛土を一体化する方法について検討を進めている^{6,7)}。一体化橋梁のイメージ図を施工前と比較して図3.2.6に示す。一体化することにより、支承部のメンテナンスが不要となり、鋼桁の支間中央部の断面力も減少し耐荷力を向上できる。

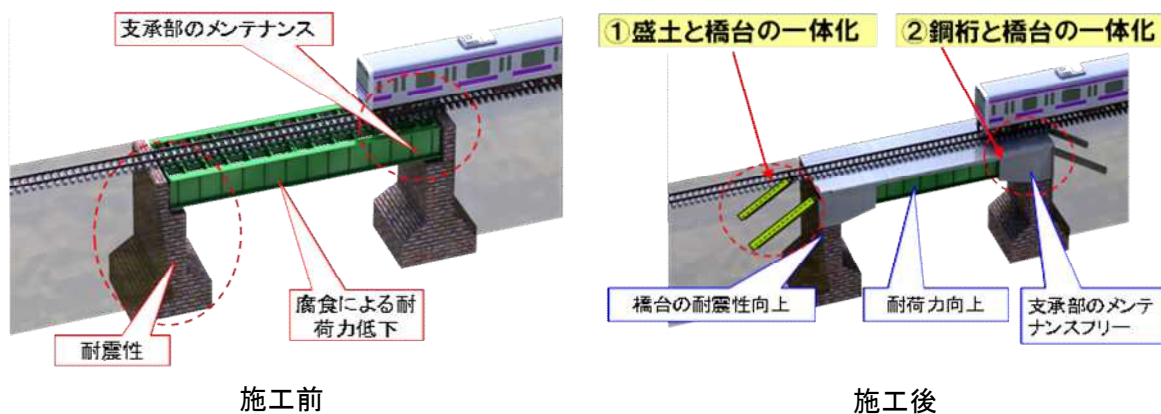


図 3.2.6 鋼桁・橋台・盛土一体化構造



図 3.2.7 既設盛土一体化橋梁

先の道路橋の構造が津波に耐えた事例もあることから、ここで示すような構造が、津波に対しても抵抗する構造として期待される。本構造に関しては、現在、国土交通省の補助金を受けて検討中である（図 3.2.7）。

（２） 津波で流された鋼桁の再利用

今回の地震では、津波で流された鋼桁の一部を再利用している。鋼桁はコンクリート桁などと比較して軽量であり、比較的、補修が行いやすく、これまでも台風や大雨で流された鋼桁を再利用してきた事例もある。このように鋼桁は再利用ができれば早期復旧に有利な構造となっている。今後の対策としては、津波に対して鋼桁が流されないようにすることが前提ではあるが、いかなる規模の津波に対しても流されないような構造とすることは不合理な場合も考えられる。そこで、万が一、鋼鉄道橋が流された場合を想定して、津波で流された鋼桁が再利用しやすい状態にしておくことも重要と考えられる。鋼桁の再利用を考える場合、津波で遠くへ流されると、鋼桁が健全な場合であっても、元の位置まで搬送することが困難となることも想定される。また、流された距離が長いと、鋼桁に座屈等の損傷が生じる可能性も高くなる。このため、鋼桁が橋台や橋脚から外れても遠くに流されず、できるだけ軽微な損傷に留めるような構造的な対応も重要と考えられる。

3.2.3. まとめ

以上、地震と津波に対する既設鋼鉄道橋の対策の考え方の一例について示した。新設の構造物の耐震設計に関しては、現在、鉄道構造物等設計標準（耐震設計）を改訂中である。

鉄道施設は線状構造物であり、う回路が簡単に設置できないことから、線区全体の耐震性の向上が重要となる。現段階では、町づくりから見直されている地域もあり、ここで挙げたような考え方が必ずしも適切とは限らないが、今後、このような事柄について検討を進めていくことが重要と考えられる。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道の震災復旧・復興に向けた技術提案，2012.12
- 2) 安原真人，市川篤司，村田清満，杉本一郎，川井治：鋼鉄道橋支承部の損傷と復旧，橋梁と基礎，pp.65-68，1996.8
- 3) 中原正人，池田学，豊岡亮洋，永井紘作：鋳鉄製支承の地震時耐荷力特性と復元力モデル，鉄道総研報告，第 22 巻第 3 号，2008.3
- 4) 安原真人，藤橋秀雄，市川篤司，水谷太作：既設鋼鉄道橋の鋼製支承の水平耐力評価法に関する実験および解析的研究，構造工学論文集，Vol.49A，pp.633-644，2003.3
- 5) （財）土木研究センター，新日本製鐵（株）：インテグラル橋の計画ガイドライン（案）（鋼橋編），2004.3.
- 6) 須賀基晃，栗山亮介，舘山勝，神田政幸，杉本一郎，小林裕介：老朽橋梁の延命化のための鋼桁・橋台・盛土の一体化補強，第 46 回地盤工学研究発表会，pp.1499-1500，2011.7.
- 7) 小林裕介，杉本一郎，須賀 基晃，横山 知昭，舘山 勝：既設鋼鉄道橋における鋼桁・橋台・盛土の一体構造化，第9回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2011.11.

3.3. 港湾施設

今回の震災では、港湾施設のうち、鋼構造物においては、顕著な被害は見られなかった。特に地震動による被害は顕著でなかったことから、港湾施設に対する現行の耐震設計法の妥当性が検証された結果となった¹⁾。ただ、一部に被害の生じた施設が存在すること、観測された地震動と設計地震動の違いによる影響などを考えると、まだ検証すべき点が残されていると考えられることから、今後の検討が望まれる。一方で、港湾施設においては、特に防波堤において、津波による甚大な被害が数多く発生し、現在鋭意復旧工事が進められている。これまでも防波堤の設計においては津波力を適切に考慮してきたが、今回の震災では設計をはるかに上回る規模の津波外力が作用したため、防波堤ケーソンの転倒や滑動が大規模に発生することとなった。今後は、想定津波を適切に設定し、これに対して必要な津波防護効果を発揮すべく、防波堤の設計を行っていく必要がある。

ここでは、今回の震災により見直された耐津波設計の考え方について述べる。また、今回の震災では被災が見られなかったものの、鋼構造物の耐震設計・耐津波設計においても今後検討すべき課題がいくつか明らかとなっていることから、これについても今後の取組みの方向性を紹介する。

3.3.1. 港湾施設の復旧にあたっての基本的な考え方

政府の中央防災会議に設置された「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」が2011年9月28日に発表した「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告」²⁾によれば、想定津波と対策の考え方の基本的な考え方に関して、次のようにまとめられている。

従前より整備されてきた海岸保全施設等は、比較的発生頻度の高い津波等を想定してきたものであり、一定の津波高までの被害抑止には効果を発揮してきた。しかし、今回の災害では設計対象の津波高をはるかに超える津波が襲来してきたことから、水位低減、津波到達時間の遅延、海岸線の維持などで一定の効果がみられたものの、海岸保全施設等の多くが被災し、背後地において甚大な津波被害が生じた。

最大クラスの津波に備えて、海岸保全施設等の整備の対象とする津波高を大幅に高くすることは、施設整備に必要な費用、海岸の環境や利用に及ぼす影響などの観点から現実的ではない。したがって、人命保護に加え、住民財産の保護、地域の経済活動の安定化、効率的な生産拠点の確保の観点から、引き続き、比較的発生頻度の高い一定程度の津波高に対して海岸保全施設等の整備を進めていくことが求められる。

なお、海岸保全施設等については、設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことが必要である。

これまでの耐津波設計では、近代で最大の津波、すなわち、100年に1回程度発生する程度の津波を対象としていたために、今回の津波のように1,000年に1回程度発生する巨大津波が来襲した場合には、構造物の破壊や流出に至る被害が発生することになる。今後は、このような巨大津波から人命や資産を確実に守るために、防波堤や防潮堤などの防災施設をどのように整備するかが重要となる。

このため、津波被害を軽減するための対策についての基本的な考え方として、同報告では、次のように述べられている。

最大クラスの津波に対しては、被害の最小化を主眼とする「減災」の考え方に基づき、対策を講ずることが重要である。そのため、海岸保全施設等のハード対策によって津波による被害をできるだけ軽減するとともに、それを超える津波に対しては、防災教育の徹底やハザードマップの整備など、避難することを中心とするソフト対策を重視しなければならない。

すなわち、1,000年に1回程度発生する巨大津波に対しては、減災を目的とした海岸保全施設等のハード対策がまず必要であり、施設整備に加えて、防災教育、ハザードマップの整備、避難通路・避難場所の確保、津波警報等の適切な発令などのソフト対策も行っていくこととなる。また、施設整備にあたっては、「設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことが必要である」という設計方針が示されており、今後の津波対策において考慮しなければならない重要な事項である。

表 3.3.1 津波に対する要求性能の設定例¹⁾

	対象津波	要求性能
レベル 1	・近代で最大 (100年に一度程度)	・人命を守る. ・財産を守る. ・経済活動を守る.
レベル 2	・最大級 (1,000年に一度程度以上)	・人命を守る. ・経済的損失を軽減する. ・特に大きな二次災害を引き起こさない. ・早期復旧を可能とする.

以上の基本的な考え方を踏まえて、想定する津波の規模を防波堤や防潮堤といった防災施設に求められる性能の関係を整理した。表 3.3.1 に、津波の規模と防災施設に求められる性能のマトリクスの 1 例を示す¹⁾。これによれば、先に述べた中央防災会議の報告で言うところの「比較的発生頻度の高い津波」をレベル 1 (津波防護レベル) の津波と定義し、これに対しては、人命や財産を確実に守り、構造物の損傷もある程度の範囲にとどめることが求められる。すなわち、これまでの設計で考慮していた津波対策と同様である。一方、先に述べた中央防災会議の報告で言うところの「最大クラスの津波」をレベル 2 (津波減災レベル) の津波と定義し、これに対しては、人命を守ることは当然のことながら、構造物の壊滅的な被害には至らないようにし、甚大な二次被害を防ぐことが求められる。今回の震災を引き起こした津波は、このレベル 2 津波に相当すると言える。なお、レベル 2 津波に対しては、構造物の整備による防災機能だけでなく、避難施設の整備や避難経路の確保などのソフト的な対策もあわせて講じておくことは言うまでもない。

防波堤や防潮堤などの防災施設にレベル 2 津波が作用した場合、構造物に壊滅的な被害が生じてはならない。損傷が生じたとしても、津波の威力を軽減する機能は保ち続け、被災後の復旧が容易に行えるように設計しておく必要がある。このためには、構造物に「粘り強さ」が求められる。現在、構造物にいかにして「粘り強さ」を付与するかについて精力的な検討が進められている。まだ実施に至った事例はないものの、政府の各種委員会等において具体的なイメージが提案され始めている。例として、粘り強い防波堤構造のイメージ³⁾を図 3.3.1 に、また、粘り強い海岸堤防 (三面張防潮堤) のイメージ⁴⁾を図 3.3.2 に示す。「粘り強さ」の付与のためには、設計以上の外力が作用したときに、構造物がどのように破壊するかをあらかじめ把握しておき、壊滅的な損傷に至らないための対策を今回の被災原因究明を踏まえて講じておく必要がある。

図 3.3.1 に示すように、防波堤の場合、堤内側に作用した流れによるマウンド洗掘が原因と考えられる被災事例が今回の震災で見られたことから、その対策として、防波堤の港内側のマウンド上への腹付け石やコンクリートブロックの設置等の洗掘対策を講じて、ケーソン本体の移動を制限することが考えられる。ただし、この場合でも、作用する外力とケーソン本体の移動・沈下の関係を定量的に明らかにしておくことが必要である。さらに、ケーソン本体の移動を制限した場合には、マウンドや支持地盤に大きな反力が発生するだけでなく、ケーソン本体にも大きな波力が持続的に作用することとなる。したがって、水工学に基づく検討だけでなく、地盤工学や構造工学などに基づく検討も同時に必要となり、これまで以上に様々な分野の土木技術者の叡知を結集しなければならないと考えている。

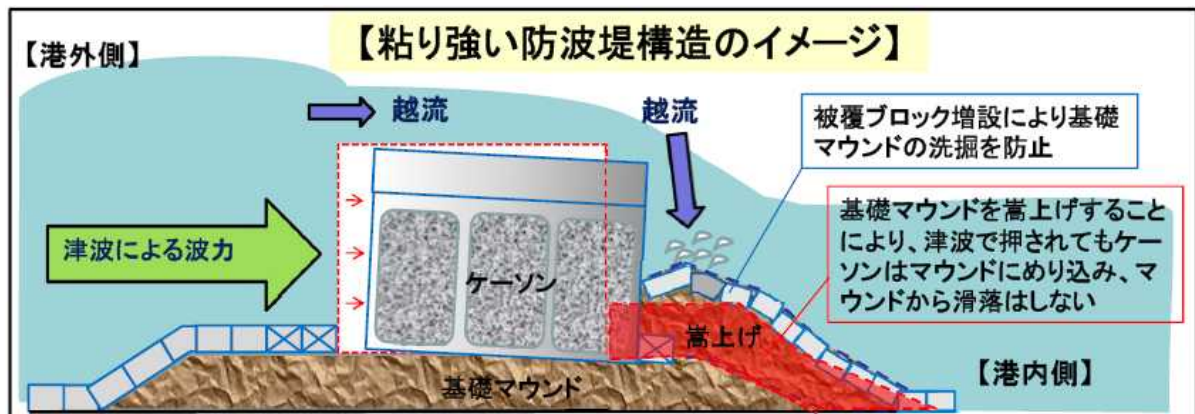


図 3.3.1 粘り強い防波堤のイメージ³⁾

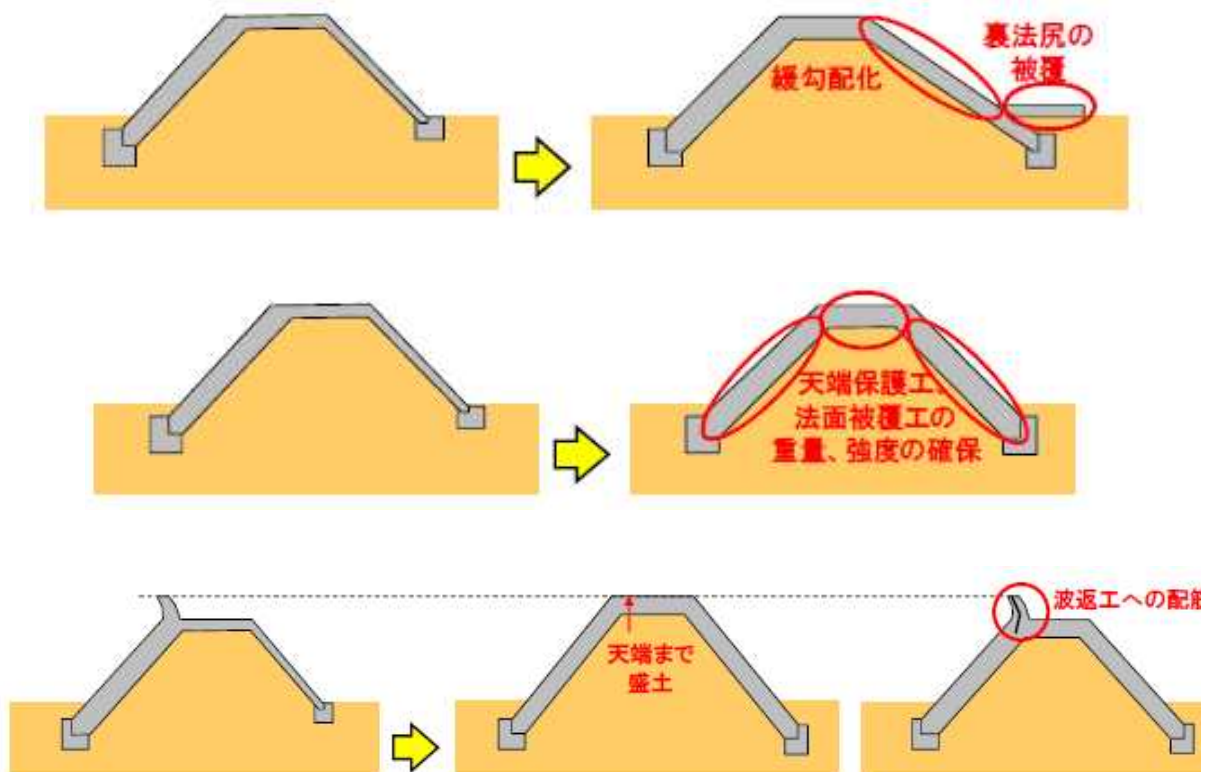


図 3.3.2 粘り強い海岸堤防のイメージ⁴⁾

図 3.3.2 に示すように、海岸堤防のうち、三面張の防潮堤の場合、津波が海岸堤防を越流した後、裏法尻部の地面等を洗掘し、これがきっかけとなって裏法被覆工等の損壊、堤体内の土砂流出が引き起こされたり、津波による波圧によってパラペットが倒壊する被災事例が今回の震災で見られた。そこで、裏法尻部への保護工の設置、裏法の緩勾配化、天端・裏法・表法被覆工の部材厚増加、部材間の連結、パラペットへの配筋などによって、設計対象の津波高を超え、海岸堤防等の天端を越流した場合でも、施設の破壊・倒壊までの時間を少しでも長くする、あるいは、全壊に至る可能性を少しでも減らすことを目指すことが考えられている。

また、施設の維持管理の観点からは、維持管理データを確実に記録・保存しておくことで、地震や津波の後に的確に判断できるようになる。また、定期的な点検診断を確実に行うことで、既存施設の防護機能が評価されるため、安全安心の担保にもつながることから、防災施設に対する定期点検診断の確実な実施がこれまで以上に求められる。さらに、レベル 2 津波のような巨大な外力が作用したときに、既存施設がどのように挙動し、どのように破壊するのかをあらかじめ予測しておかなければ、レベル 2 津波に対する性能を評価することができないため、構造物のポストピーク挙動を的確に評価できる手法を確立しておくことも求められている。

3.3.2. 港湾鋼構造物における課題

2.3 で述べたように、今回の震災において港湾鋼構造物（鋼管杭式栈橋や鋼矢板式岸壁など）の被害は一部を除き顕著ではなかったと言える。しかし、震災後の被災調査などを通じて明らかとなった課題もいくつか挙げられる。ここでは、港湾鋼構造物の耐震性および耐津波性の確保・向上のために取り組むべき課題について説明する。

（1） 鋼矢板式岸壁の複合災害メカニズムの解明

2.3.3 で示したように、一部の鋼矢板式岸壁において甚大な被害が生じている。このような岸壁においては、まず、地震動によって鋼矢板の損傷やエプロンの損傷が生じた上に、背後地盤の液状化が発生したところに、津波が岸壁上を越流したことでエプロンや背後地盤の流出が生じ、さらに引き波によって鋼矢板に対して海側に大きな水平力が作用したものと推測されている。これによって、鋼矢板の継ぎ手が外れ、鋼矢板式岸壁の崩壊に至ったことが考えられる。これは、典型的な地震動と津波の複合災害であり、今回の震災で初めて経験したタイプの被災形態である。今後、この被災メカニズムを実験や解析によって検証するとともに、効果的な対策方法を検討していく必要がある。

（2） 鋼部材の損傷検出技術の開発

今回の震災では、結果的に、鋼管杭や鋼矢板・鋼管矢板の損傷はあまり多くは見られなかったが、鋼材の降伏、塑性化、局部座屈などの損傷を現地にて検出することが困難であった。特に、地中部に打ち込まれた鋼材の損傷を、周辺地盤の掘削を伴わずに検出することが難しく、被災の有無の判定や対策工法の選定に長い時間かかることが多かった。現行の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では、鋼部材の性能を降伏や全塑性で規定しているため、これらの発生状況を精度良く、効率的に検出できる技術の開発が望まれる。

（3） 損傷が生じた鋼構造物の残存性能評価

前述の通り、今回の震災では、鋼管杭や鋼矢板・鋼管矢板が地震動によって顕著に損傷した施設は少なく、あまり問題とはならなかったが、今後、今回と同程度の規模の地震が発生した場合に、栈橋や鋼矢板式岸壁といった鋼構造物の鋼部材に損傷が発生する可能性がある。この場合、発生した損傷が構造物の残存性能にどの程度影響を及ぼしているのか定量的に評価しなければ、地震後の供用可否判断や復旧対策の決定を行うことができない。今後は、(2) で検出された鋼部材の損傷が構造物の残存性能に及ぼす影響を評価する手法について検討を行うとともに、港湾構造物の地震後における早期復旧を目的とした性能評価ガイドラインをとりまとめていく必要がある。

(4) 港湾構造物の耐震設計手法の検証

上記の(1)～(3)の取組みを通じて、港湾鋼構造物の地震動による被害メカニズムを再度検証し、レベル1およびレベル2地震動に対する施設の要求性能に対応する性能規定や限界状態の設定が妥当なものであるのか改めて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 高橋重雄ら：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No.1231，2011.
- 2) 中央防災会議 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 資料：
http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/index_higashi.html
- 3) 国土交通省交通政策審議会港湾分科会防災部会 資料：<http://www.mlit.go.jp/common/000160916.pdf>
- 4) 海岸における津波対策検討委員会 提言：http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tkl_000029.html

3.4. その他 電力関連施設等

3.4.1. 復旧・復興対策

復旧状況としては、送電鉄塔被害に対しては、余震等による被害進展によって送電に支承をきたす恐れがあるもの、および公衆安全確保が懸念されるもの等に対して、速やかに仮支線設置や部材補強を実施し、供給障害が生じている線路の一部では、鉄塔や鉄柱による仮ルートを構築した。

鉄塔建て替えにあたっては、倒壊した鉄塔の基礎の状況（破損程度、変位等）を調査し、流用が可能な基礎についてはこれを流用し、工事期間の短縮による早期の送電機能回復を図っている。例えば、岩手県大槌町の津波で傾いた送電鉄塔(写真 2.4.13)は、鉄柱による仮復旧によって送電を再開し、鉄塔の建て替えにより本復旧している。

3.4.2. 今後の課題

地震による送電鉄塔の被害の要因として考えられるものは、鉄塔の振動周期が異なることによって張力バランスが崩れることによる倒壊、大規模な地すべりによる倒壊なども考えられるが、強風によって倒壊した例はあるものの、地震被害の例はほとんどない。このことから、一般に、送電鉄塔の耐風設計はあるが耐震設計はないと言われている。送電鉄塔の場合は、地震よりも風に対する限界値が低いためである。今回も地震自体による被害は報告されておらず、ほとんどが津波によるものであった。

しかし、今回は平成7年の防災基本計画における「耐震性確保の基本的考え方」に基づく耐震性区分の考え方を適用して送電設備の耐震対策を行ってきたと報告されており、この考え方にに基づく耐震設計は効果があったと報告されている。ただし、その中で津波対策は考慮されていない。

(1) 地震後の支持地盤の液化化によるとみられる鉄塔の傾斜は報告されているが、送電鉄塔は送電線を介して隣接鉄塔に支持されており、それらの共働作用に助けられて倒壊にまでは至らないという考え方、あるいは逆に、一基が倒壊してしまうとそれに引っ張られて周辺の鉄塔も倒壊に至るという考え方もあり、地震や津波などの外力と倒壊メカニズムの関連を調査する必要がある。

(2) 今回倒壊した鉄塔が、津波の直接的な波力を受けて倒壊したものか、津波による洗掘によって支持地盤が喪失したことによるものかという詳しい情報は得られていない。津波によって運ばれたガレキが鉄塔に引っかかり、鉄塔自体の投影面積以上の波力を受けたために倒壊に至ったという説もある。今後の対策としては、特に沿岸部の送電鉄塔については津波およびそれに伴う洗掘を避けて、重要なライフラインである送電鉄塔の立地条件をよく検討することが挙げられる。また、既存の鉄塔の補修・補強としては、上部工よりも支持地盤や下部工の補修・補強に着目すべきであろう。

(3) 被災地域の衛星写真・空中写真による状況把握は今回のような大震災で現地に近づけない場合には非常に効果的である。発災から数日後に国や民間でインターネット上に公開された衛星写真は、解像度の高い写真は特に、各種構造物の被害状況まで確認することが可能であり、非常に効果的であった。今後とも各種の情報提供および協力体制を構築するよう国等に要望すべきである。

