

戦-23 大規模地震による橋梁への影響予測と被害軽減技術に関する調査研究

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 19～平 22

担当グループ：橋梁構造研究グループ

研究担当者：運上茂樹、薄井稔弘、堺淳一、張広鋒

【要旨】

長周期地震動を含む大規模地震による地震動及び津波が橋梁の性能に及ぼす影響特性を解明するとともに、橋の性能レベルの設定と大規模地震による性能評価法を提案することを目的として調査研究を実施している。平成 20 年度は、大規模地震による橋梁への影響の解明のため、2007 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震及び 2008 年 6 月 14 日に発生した岩手・宮城内陸地震により被災した既設の鋼橋を対象に挙動解析並びに地震動と被災の関係及び耐震補強の効果について分析を行った。また、津波による橋梁上部構造の流失を防止する機構について、シミュレーション解析により性能の検証を行った。

キーワード：大規模地震、津波、耐震性能、性能評価、被災分析

1. はじめに

中央防災会議や地震調査研究推進本部の調査によれば、近い将来の発生が懸念されている首都直下や東海・東南海・南海、宮城県沖地震等の大規模地震により、現在の耐震設計レベルを大きく超過する地震動や長周期地震動の発生、さらには沿岸部では 10m 規模の津波の発生も予測されている。道路構造物は、このような大規模地震災害発生時においても避難路・緊急輸送路としての機能を果たすことが強く求められるが、このような大規模地震が道路構造物に与える影響については十分に解明されていない。このようなことから、大規模地震が橋梁に及ぼす影響を把握するとともに、これらの外力に対する性能レベルや性能評価法の明示、さらには被害軽減技術の確立に向けた検討が必要とされている。

本研究は、長周期地震動を含む大規模地震による地震動及び津波が橋梁の性能に及ぼす影響特性を解明するとともに、橋の性能レベルの設定と大規模地震による性能評価法の提案に必要な検討を行うものであり、本研究で提案する性能レベルと性能評価法に基づき、効果的な被害軽減技術の検討を行うものである。

平成 20 年度は、大規模地震による橋梁への影響の解明のため、2007 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震及び 2008 年 6 月 14 日に発生した岩手・宮城内陸地震により被災した既設の鋼橋を対象に挙動解析並びに地震動と被災の関係及び耐震補強の効果について分析を行った。また、津波による橋梁上部構造の流失を防止する機構について、シミュレーション解析によ

り性能の検証を行った。

2. 大規模地震が橋梁に及ぼす影響に関する検討

2.1 岩手・宮城内陸地震

2008 年 6 月 14 日 8 時 43 分頃、岩手県内陸南部を震源とするマグニチュード(M)7.2 の地震が発生した。2009 年 1 月 22 日時点で、この地震による死者・行方不明者は 23 人、重軽傷者は 451 人、住家被害は 2,557 棟に上っている¹⁾。この地震では大規模な地盤崩壊が見られ、土砂災害や河道閉塞などの被害が多であった。

本研究では、既設の鋼桁橋を対象にプッシュオーバー解析を実施し、大規模地震による橋梁への影響評価の分析を行った。

2.2 鋼桁橋の被災解析

2.2.1 対象とした鋼桁橋

本研究で対象とした鋼桁橋は、3 径間連続非合成鋼桁橋である。本橋の被災状況を図 2.1 に示す。地震により秋田側の地山が崩壊し、基礎が移動した。これにより橋全体が移動し、桁が A1 パラペットを押し抜くと同時に、移動に追従できなかった P1 が破壊し、最終的に落橋に至ったと考えられている。

震源が架橋地点の北約 1.5km に位置しているほか、近傍の地震計として、南西約 1.3km に KiK-net の一関西、南東約 12.2km に同じく一関東が設置されている。図 2.2 に、架橋地点に最も近い KiK-net の一関西で観測された地震動を示す。観測された地震記録の加速度応答スペクトルによれば、最大応答加速度で 5G

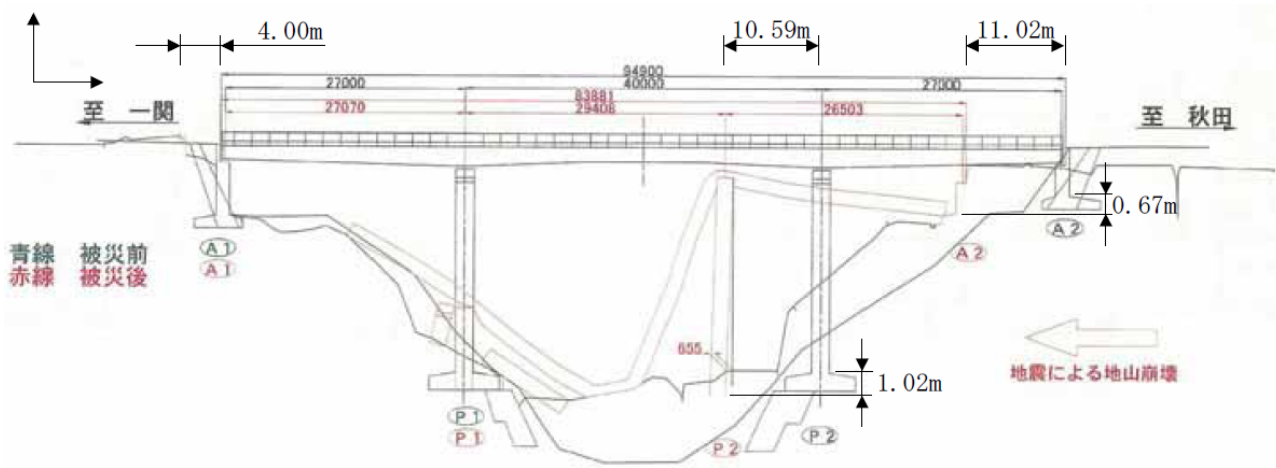


図 2.1 鋼桁橋の被災状況

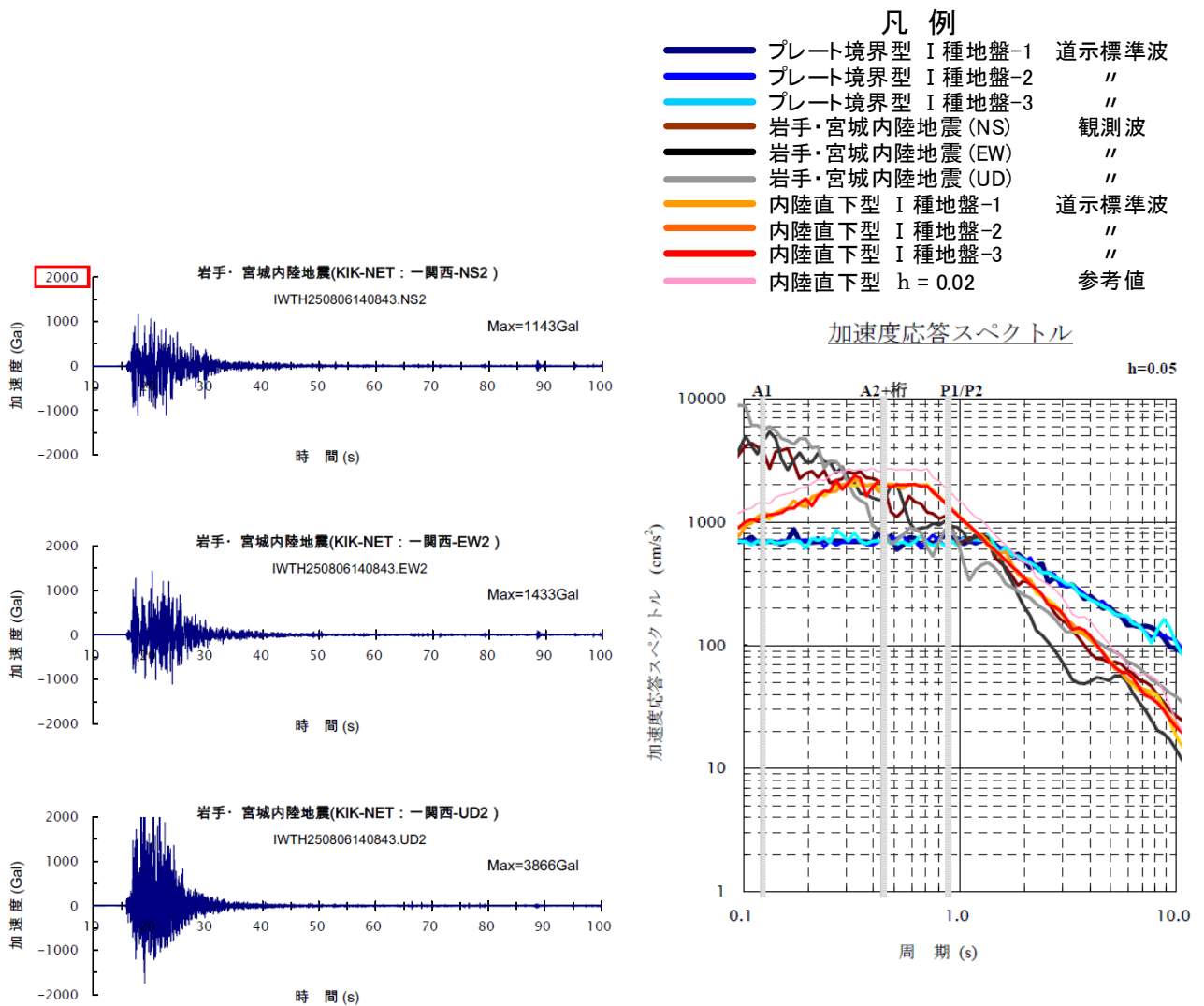


図 2.2 観測された地震動 (KiK-net 一関西)

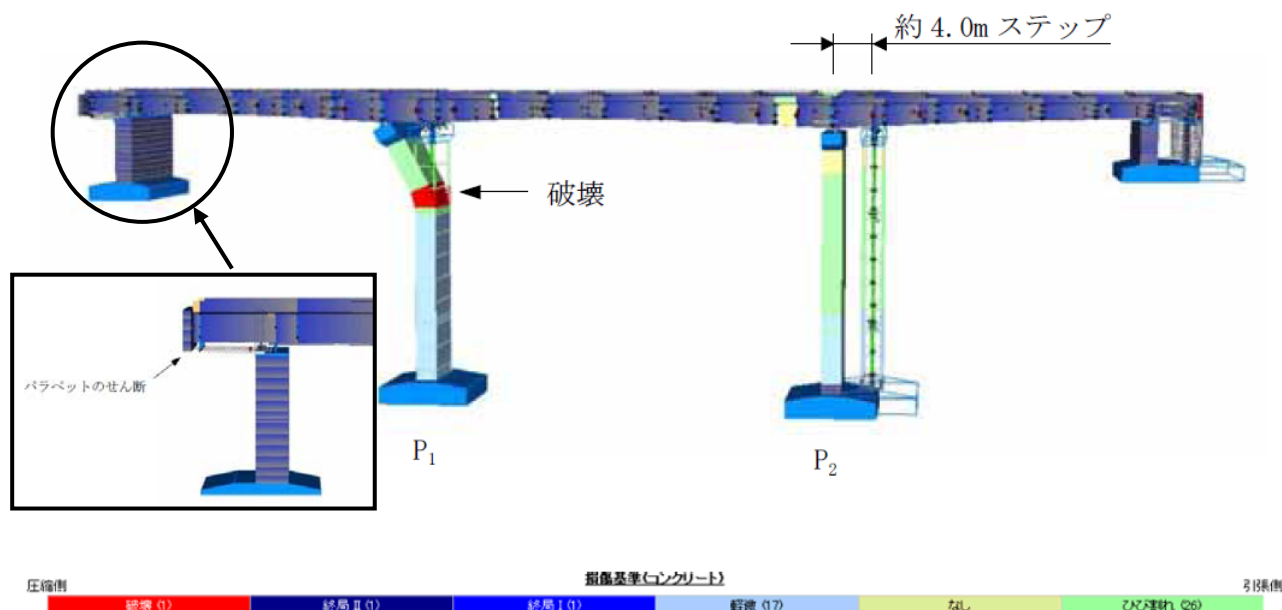


図 2.3 プッシュオーバー解析結果

を超過する周期帯域もあり、現在の設計レベルで想定している設計地震力よりも大きい。ただし、大きいのは 0.5s までの短周期帯に集中しており、周期の比較的に長い構造物への影響は限定的であると考えられる。

本橋の解析モデルの上部構造は、4 主桁として非線形形及び床版の剛性を考慮してモデル化を行った。可動支承は非線形ばね要素でモデル化を行った。橋脚はファイバー要素でモデル化したが、現行基準の細目を満たしていないので帯鉄筋によるコンクリートの拘束効果は見込まなかった。また、段落しの位置は図面から設定し、定着長は見込まず、要素分割は塑性ヒンジ長程度とした。橋台については、躯体は線形要素でモデル化したが、パラペットはファイバー要素でモデル化した。なお、A1 パラペットは、桁による押し抜きを再現するため、せん断ばねを設定した。背面土は、一般的な裏込め相当と仮定した。基礎は、支持地盤が岩質であることや直接基礎であることから、固定としてモデル化した。また、地盤条件は道路橋示方書に示される I 種地盤とした。

プッシュオーバー解析での変位方向は 3 次元とし、最終の変位量は実測値とした²⁾。ステップごとの変位量は途中段階の破壊シナリオが不明なため、線形で与えた。

2.2.2 解析結果と考察

プッシュオーバー解析結果を図 2.3 に示す。P1 では、実際の破壊位置である上部の段落し部よりもさらに 1 段上のブロックで終局状態に至り、破壊する結果となった。また、桁の押し込みによるパラペットのせん断

破壊は概ね再現されている。よって、地盤及び基礎の移動を模擬した解析を実施した結果、概ね被害状況の再現をすることができたと考えられる。

2.3 新潟県中越沖地震

2007 年 7 月 16 日 10 時 13 分頃、新潟県上中越沖を震源とするマグニチュード(M)6.8 の地震が発生した。2008 年 1 月 7 日時点で、この地震による死者は 15 人、重軽傷者 2,345 人、住家被害は 42,011 棟に上っている³⁾。2004 年に発生した新潟県中越地震と規模、被災地域ともに似通っているが、被害はやや小さかった。

本研究では、既に耐震補強のなされている既設の鋼箱桁橋及び鋼アーチ橋を対象に時刻歴応答解析を実施し、大規模地震に対する耐震補強効果の分析を行った。

2.4 鋼箱桁橋の被災解析

2.4.1 対象とした鋼箱桁橋

本研究で対象とした鋼箱桁橋は、鋼 3 径間連続鋼床版曲線箱桁橋と鋼 2 径間連続 2 主桁桁橋から構成されている。本橋の耐震補強状況と被災状況を図 2.4 に示す。破線 (青) の丸で囲まれているのが主な耐震補強メニュー、実線 (赤) の丸で囲まれているのが主な損傷である。橋脚基部への耐震補強により、橋脚には変位が確認されなかった。

被災分析に用いる入力地震動としては、架橋地点に最も近いことから米山気象観測所で観測された地震動を採用した。図 2.5 に加速度波形を示す。これらを 3 方向同時に入力した。また併せて、道路橋示方書に示されるレベル 2 タイプ II の標準地震波を橋軸、橋軸直角の 2 方向で入力した。

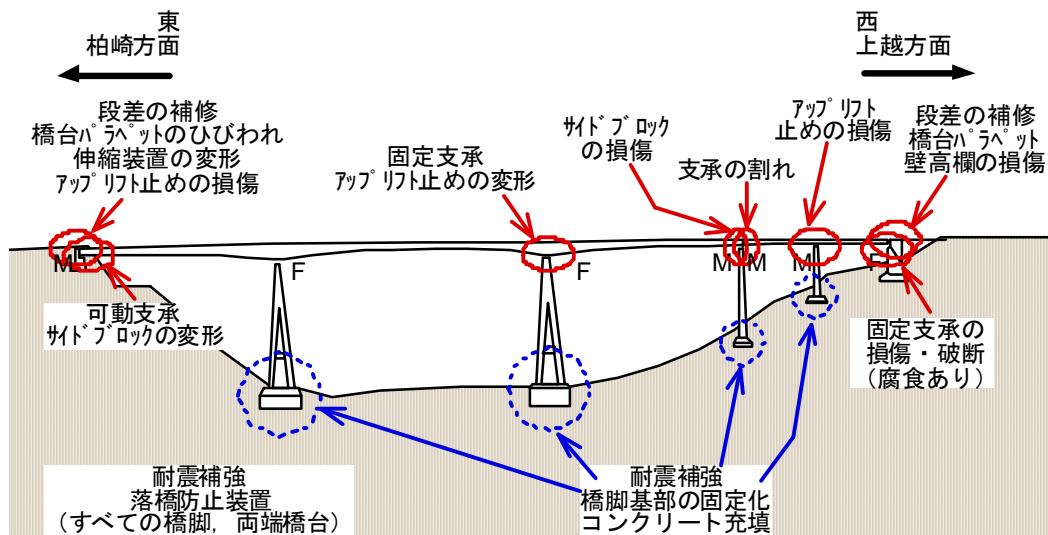


図 2.4 鋼箱桁橋の耐震補強状況と被災状況

解析方法としては、はりばねモデルを用いた時刻歴応答解析とし、耐震補強の前後について解析を実施した。なお、補強後は P3,P4 橋脚に関して座屈パラメータが不足していることからコンクリートを充填しているため、非線形特性としてバイリニアモデルを採用した。また、地盤条件は道路橋示方書に示される I 種地盤とし、減衰定数は上部工 0.03、鋼製橋脚 0.03 (補強後 0.01)、基礎バネ 0.10 とした。

2.4.2 解析結果と考察

時刻歴応答解析結果の一例として、道示標準波に対する P1 橋脚の耐力照査結果を図 2.6 に示す。耐震補強の効果により、発生曲げモーメントは座屈モーメントを下回る結果となった。

また、補強前後の応答値の比較より、

- 1) 加速度・変位・軸力・せん断力・曲げモーメントの最大応答値が補強後は概ね減少している。
- 2) リブ補強した P1,P2 橋脚の応答値は若干増加しているが、許容耐力以内に収まっている。
- 3) コンクリート充填補強した P3,P4 橋脚の応答値は大きく増加しているが、橋脚基部は線形領域内である。
- 4) 補強後の P1,P2 橋脚の支承アップリフトは概ね 10%減少している。

といった結果が得られており、実際には支承の損傷がいくつか生じているが、当該橋梁における耐震補強の効果は概ねあったと考えられる。

2.5 鋼アーチ橋の被災解析

2.5.1 対象とした鋼アーチ橋

本研究で対象とした鋼アーチ橋は、鋼張出式 2 ヒンジ逆ローゼ橋である。本橋の耐震補強状況と被災状況

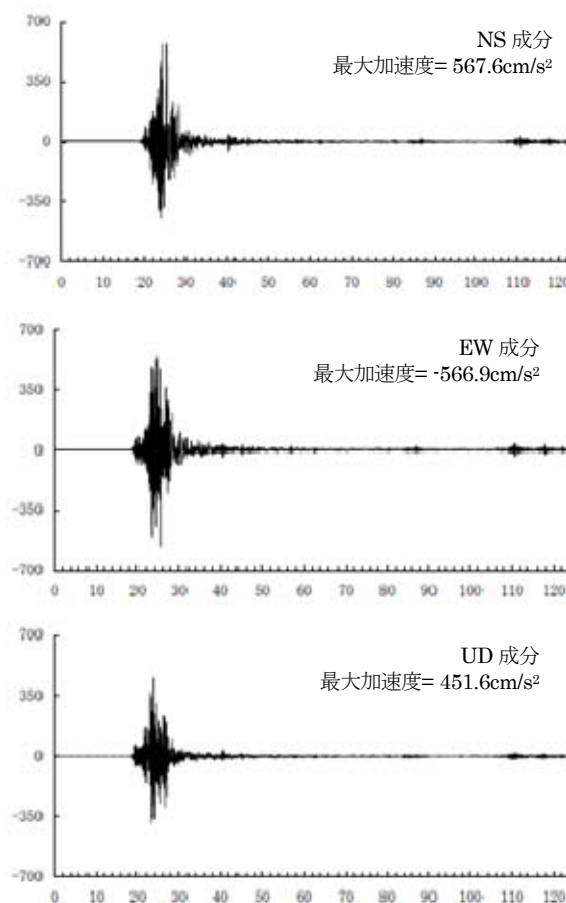
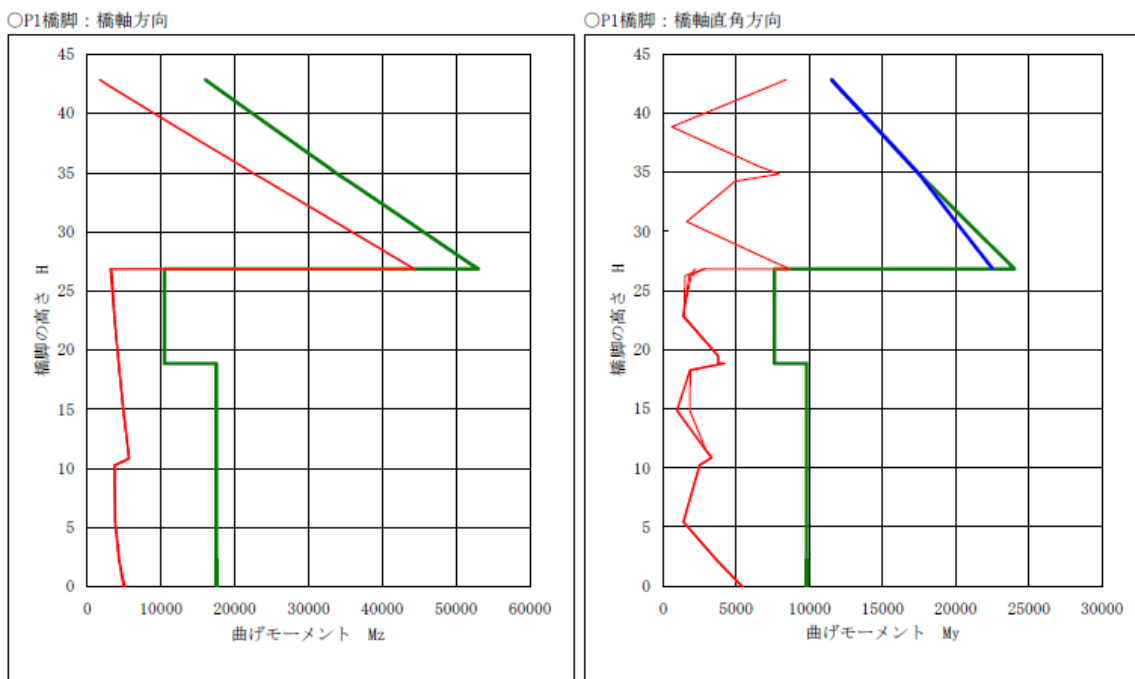


図 2.5 入力地震動 (米山気象観測所)

を図 2.7 に示す。破線 (青) の丸で囲まれているのが主な耐震補強メニュー、実線 (赤) の丸で囲まれているのが主な損傷である。各種の耐震補強により、アーチ主構など主構造には変状が確認されなかった。

被災分析に用いる入力地震動には、鋼箱桁橋と同じ



赤線：標準波による発生曲げモーメントM 青線：座屈モーメント M_{cr} 緑線：降伏曲げモーメント M_y

図 2.6 鋼箱桁橋 P1 の耐力照査結果

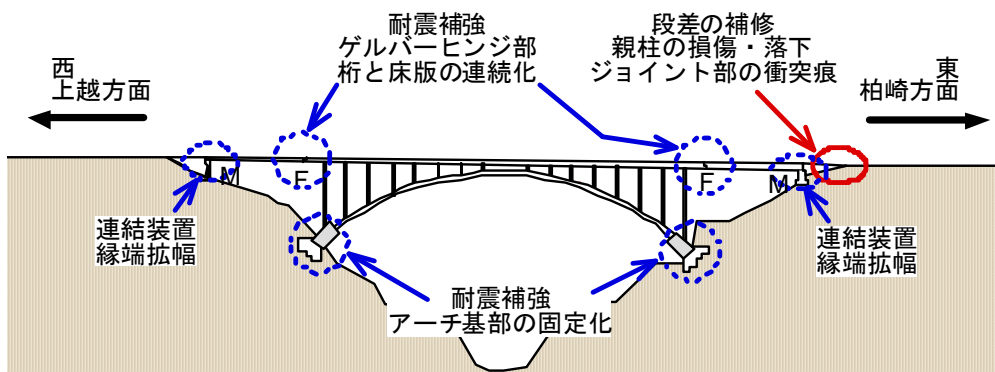


図 2.7 鋼アーチ橋の耐震補強状況と被災状況

く、図 2.5 に示される米山気象観測所での観測地震動を採用し、これらを 3 方向同時に入力した。また併せて、道路橋示方書に示されるレベル 2 タイプ II の標準地震波を橋軸、橋軸直角の 2 方向で入力した。

解析方法ははり要素を用いた時刻歴応答解析とし、耐震補強の前後について解析を実施した。なお、補強後はアーチリブに関してコンクリートを充填しているため、非線形特性としてバイリニアモデルを採用した。また、地盤条件は道路橋示方書に示される I 種地盤とし、減衰定数は 0.02 とした。

この他、補強後の橋梁全体系で耐力がどの程度確保されているかを確認するため、プッシュオーバー解析も併せて実施した。

2.5.2 解析結果と考察

時刻歴応答解析結果の一例として、補強後のアーチ

表 2.1 補強後のアーチリブ耐力照査結果

		単位:kNm		
		実地震記録による発生曲げモーメント	降伏曲げモーメント	応答塑性率
クラウン位置	橋軸	11,458	11,508	0.996
	直角	606	6,137	0.099
スプリング位置(起点側)	橋軸	12,006	14,836	0.809
	直角	4,576	7,148	0.640
スプリング位置(終点側)	橋軸	11,708	14,836	0.789
	直角	4,490	7,148	0.628

リブ耐力照査結果を表 2.1 に示す。アーチリブの固定化により、補剛桁クラウン位置の曲げモーメントが補強前と比べて減少し、降伏値を下回るようになった。

また、

- 1) 補強前後の応答値の比較より、アーチリブの固定化によりアーチリブの応答値が補強後に増加したが、アーチリブ耐力も増加しており降伏していない。

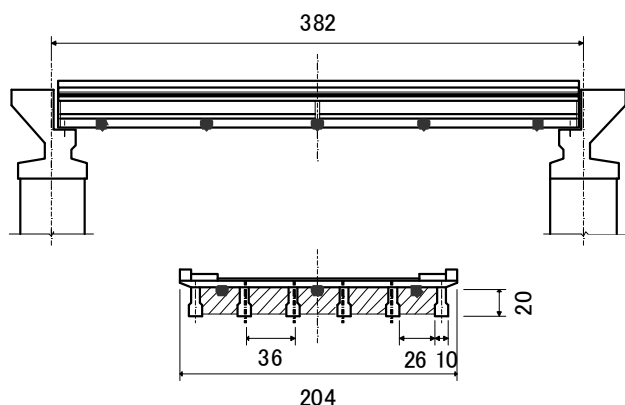


図 3.1 実験に用いた橋梁模型

2) プッシュオーバー解析の結果より、耐震補強により橋梁全体系の耐力が向上した。

といった結果が得られており、当該橋梁における耐震補強の効果は概ねあったと考えられる。

3. 津波が橋梁に及ぼす影響に関する検討

3.1 過年度の成果

2004年12月26日のスマトラ島沖地震に伴って発生したインド洋津波により、橋梁上部構造が完全に流失する等橋梁に甚大な被害が多数発生した⁴⁾。道路は災害時において救援・復旧活動面で重要な役割を担っているが、被災地では橋梁の流失により海岸付近の幹線道路が寸断され、救援・復旧活動に多大な支障をきたした。これら津波による橋梁への影響に関しては十分に解明されておらず、被災事例についての研究が重要であると考えられる。

本研究では、津波による橋梁の流失被災メカニズムを解明するとともに、橋梁の被害を軽減するための対応策に資することを目的として、既往の津波による橋梁構造物の被害事例を収集・分析するとともに、橋梁被害に基づく力学モデルの構築の検討を行い、被災メカニズムを検証するための水理実験と被災橋梁のシミュレーション解析を実施してきた。

過年度の成果としては、以下のものが挙げられる。

1) インド洋津波による橋梁の被害事例の分析により、上部構造が流失した橋梁あるいは大きな残留変位を生じた橋梁では下部構造の沓座に上部構造を載せただけの構造であること、支承部で下部構造と剛結した構造あるいはせん断キーを有する橋梁の場合はほとんど被害が生じていないことを明らかにした。また、力学的な作用として浮力、揚圧力とともに、横力が影響することが考えられた。

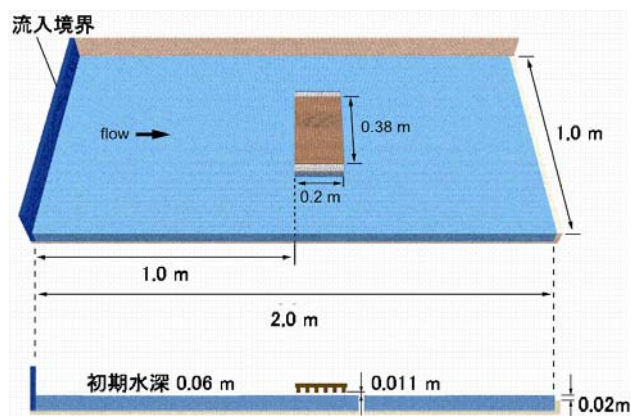


図 3.2 3次元モデル計算領域

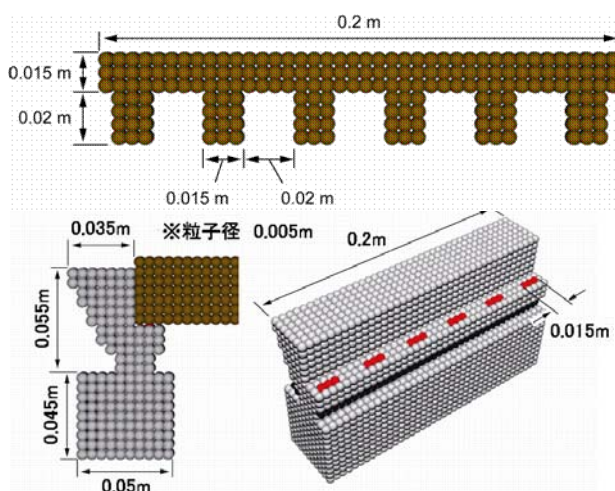


図 3.3 橋梁モデル（上：橋梁断面 下：橋台）

2) 津波被害を受けたインドネシアのRC橋1橋、鋼橋1橋の1/50の模型を作成し、津波襲来時の海象条件を再現した水理実験を実施した。その結果、被災地で見られたような橋桁の移動や流失現象を再現でき、また津波襲来時に橋梁に作用する抗力や揚力に関する基礎実験データを得た⁵⁾。

3) 被災橋梁と水理模型実験を対象に、粒子法(MPS法)による津波を受けた橋梁のシミュレーション解析を実施し、水理実験の結果を定性的・定量的に概ね再現した⁶⁾。

これらの成果を踏まえ、平成20年度は津波による橋梁上部構造の流失を防止する機構について、シミュレーション解析により性能の検証を行った。

3.2 津波のシミュレーション解析

3.2.1 対象とした橋梁構造

本研究で対象とした橋梁は、実際にインド洋津波で被災したスマトラ島のRC橋を参考に製作した図3.1に示す橋梁模型である。模型縮尺は水路の寸法及び水路における津波の造波高さを考慮して、1/50としている。

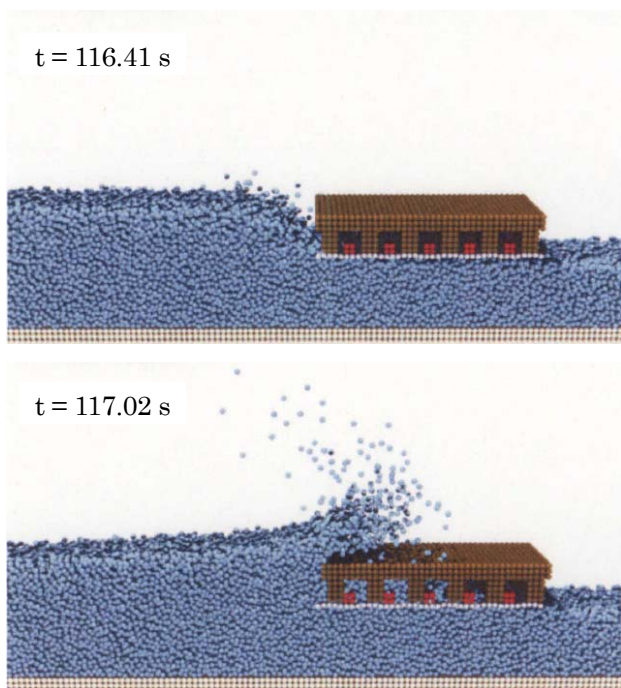


図 3.4 解析結果の瞬間像

一方、解析手法としては粒子法(MPS法 : Moving Particles Semi-implicit Method)⁷⁾を採用した。激しい水の流れなどを解析する際、メッシュ(格子)を用いる従来のシミュレーション手法では、メッシュの生成が煩雑で時間を要する、計算結果がメッシュ形状に沿うため飛沫や水面の微妙な変化が解析できないなどの問題点があった。これに対し、水の流れを粒子の動きで模擬して計算する粒子法では、水面の微妙な変化や飛沫の発生、水塊の分裂や合体などを精度良く安定に解析できる利点があるとされている。

解析モデルは図3.2及び図3.3に示すように、径を均一に5mmとした粒子で作成した。物性値については水、コンクリートともに標準的な値を与えた。支承部は0.2Rdの耐力を保持させ、これを超えると破壊し、上部構造が可動になるものとした。なお、破壊後は上部構造と橋脚の間に摩擦係数0.1の摩擦抵抗力が発生するものとした。上部構造の流失防止機構については、移動制限装置(せん断キー)を設けるものとし、予備計算を行って、移動制限装置の耐力を超えた衝撃力が作用しないような緩衝材を設けることとした。

3.2.2 シミュレーション解析結果

図 3.4 に解析結果のうち、津波が橋梁に衝突した前後の瞬間像を示す。前後の挙動を見ると、津波が橋梁に衝突後すぐに支承部が破壊し、上部構造の前面(津波が当たった面)が浮き上がる。しかし重量があるた

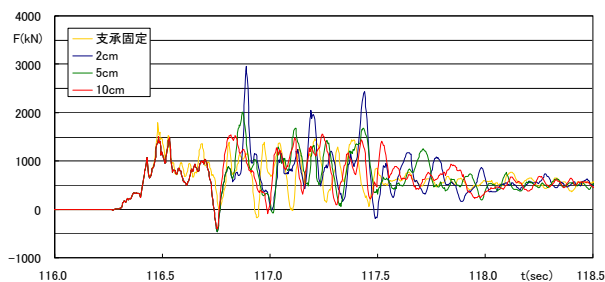


図 3.5 上部構造に作用した抗力(水平力)

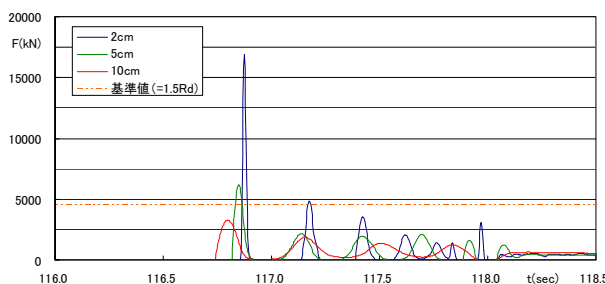


図 3.6 移動制限装置に作用した衝撃力

め、上部構造はすぐに橋台の上に落下し、その後は津波に押され、水平移動を行う。その後、移動制限装置に引っかかり、流失を免れている。

図 3.5 に上部構造に作用した抗力を示す。116.5sec付近で観測される、津波が橋梁に当たったことで生じる衝撃力のピーク値は、支承を可動(耐力を超えると破壊する)としても、固定(破壊しないと仮定したケース)の場合と比較して、あまり落ちなかった。これは、上部構造が十分に重いためであると考えられる。また、支承を可動とした場合に移動制限装置に取り付ける緩衝材(ゴムパッド)の厚さは2,5,10cmの3パターンを想定して解析した。ゴムパッドが薄い場合、上部構造が移動制限装置に衝突した時点で計測される抗力に、支承固定の場合のピーク値を超えるケースが生じた。これは、移動制限装置を設ける場合、緩衝材の設置が重要であることを示している。

一方、図 3.6 に示す、移動制限装置に作用する衝撃力では緩衝材の効果が現れており、ゴムパッド厚を10cm確保するとピーク値が基準値を下回った。なお、ここに示す基準値とは移動制限装置の耐力を示し、道路橋示方書に示される上部構造死荷重の1.5倍とした。また、グラフに示されるとおり、上部構造は移動制限装置と衝突・反発を繰り返す、最終的には定常状態に至るという挙動を示した。

以上より、あくまで1つの解析例ではあるが、津波

による橋梁上部構造の流失を防止する機構として、本来、地震時における上部構造の移動制限装置であるせん断キーが1つの有効な対策である可能性が示された。

4. まとめ

平成20年度は、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震及び2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震により被災した既設の鋼橋を対象に挙動解析並びに地震動と被災の関係及び耐震補強の効果について分析を行った。さらに、津波による橋梁上部構造の流失を防止する機構について、シミュレーション解析により性能の検証を行った。

今後、既往の地震等において地震記録が得られている橋梁の被災検証、被災分析データの蓄積、長周期地震動を含む地震の橋梁への影響度の分析、耐震性能の評価方法の高度化などを図り、性能レベルと性能評価法、効果的な被害軽減技術の検討を進める。また、津波についても、事例収集、解析による分析を図り、効果的な被害軽減技術の検討を進める。

なお、強震記録は、独立行政法人防災科学技術研究所のKiK-netの情報を利用して頂いた。

参考文献

1) 内閣府：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地

震について、

<http://www.bousai.go.jp/kinkyu/iwate2/2008-iwate-cao-030.pdf>

2) 岩手県：第2回 国道342号祭時大橋被災状況調査検討委員会資料、

<http://www.pref.iwate.jp/view.rbz?of=1&ik=0&pnp=14&cd=15284>

3) 内閣府：平成19年（2007年）新潟県中越沖地震について、

http://www.bousai.go.jp/kinkyu/080107jishin_niigata/080107jishin_niigata.pdf

4) “The Damage Induced by Sumatra Earthquake and Associated Tsunami of December 26, 2004, A Report of the Reconnaissance Team of Japan Society of Civil Engineers”, Japan Society of Civil Engineers, 2005

5) 杉本健, 薄井稔弘, 運上茂樹：津波及び高潮の橋梁への影響に関する水路実験, 土木技術資料, Vol.50 No.11, pp. 24-29, 2008.

6) 杉本健, 薄井稔弘, 運上茂樹：津波による被災橋梁に対する水路実験の再現解析, 第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 81-84, 2009.

7) 塚越誠一：粒子法, 丸善, 2005.

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION FOR BRIDGES AGAINST LARGE-SCALE EARTHQUAKES AND THE DISASTER MITIGATION TECHNOLOGY

Abstract : This research is conducted to study seismic performance of bridges against large-scale earthquake including strong and/or long-period ground motions and a tsunami. Then it is aiming to propose the seismic performance level of bridges and the seismic performance evaluation method. In FY 2008, damage simulation study was made for the damaged bridges during 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake and 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake. In addition, the effectiveness of stopper devices to prevent the washout of superstructures by tsunami was studied through simulation analysis.

Key words : large-scale earthquake, tsunami, seismic performance, performance evaluation, damage analysis