

戦-32. 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（一般勘定）

研究期間：平 19～平 22

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：星隈順一、薄井稔弘、張広鋒

【要旨】

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を実施している。平成 21 年度は大規模地震による橋梁への影響の解明のため、2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾地震により地震動を受けた既設の免震橋を対象に挙動解析を実施し、免震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の抑止を図るための上部構造の断面形状について考案し、水理実験によりその抑止効果の検証を行った。

キーワード：大規模地震、津波の影響、耐震性能、性能評価、免震橋

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 21 年度は、大規模地震による橋梁への影響の解明のため、2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾地震により強い地震動を受けた既設の免震橋を対象に挙動解析を実施し、実観測データとの比較から、免震支承による免震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の抑止を図ることを意図として、その効果的な上部構造の断面形状について検討し、

その効果を水理実験により検証した。

2. 大規模地震が橋梁に及ぼす影響に関する検討

2.1 駿河湾地震

2009 年 8 月 11 日 5 時 7 分頃、駿河湾を震源とするマグニチュード(M)6.5 の地震が発生した。2009 年 11 月 19 日時点で、この地震による死者は 1 人、重軽傷者は 319 人、住家被害は 8,406 棟に上っている。この地震では、東名高速道路の法面が崩落する等の被害はあったものの、全壊家屋数 0 など家屋での被害は少なかった。

本研究では、これまでに大規模地震の影響を受けた事例が少なかった既設の免震橋について、現地での観測記録を入手できたことから、これを対象に時刻歴応答解析を実施し、大規模地震に対する免震効果の分析を行った。

2.2 免震橋の挙動解析

2.2.1 対象とした免震橋

本研究で対象とした免震橋は、橋長 175m の PC7 径間連続中空床版橋、橋長 725m の PC29 径間連続中空床版橋及び橋長 375m の PC15 径間連続中空床版橋からなる高架橋である。本橋の側面図及び強震観測装置設置位置を図 2.1 に示す。また、桁の断面図及び橋脚の標準形状図を図 2.2 及び図 2.3 に示す。

図 2.1 に示すように本橋では強震観測装置が設けられており、地震動の他、主要な位置での応答加速度や応答変位が記録されている。これらのうち 2 号橋 P14

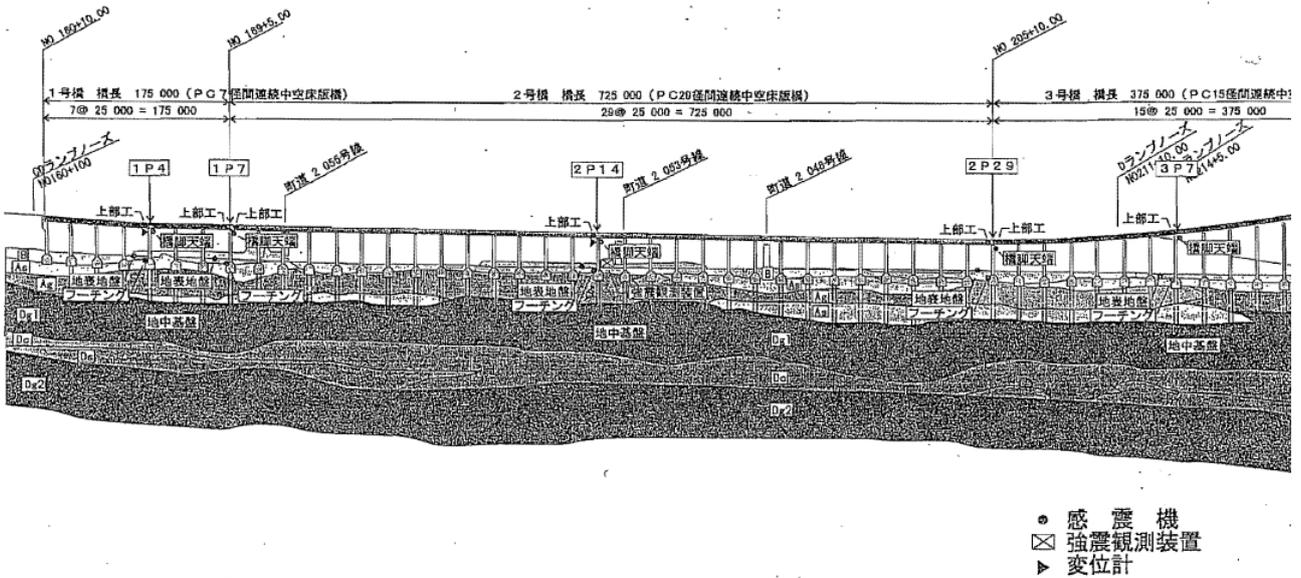


図 2.1 側面図及び強震観測装置設置位置図

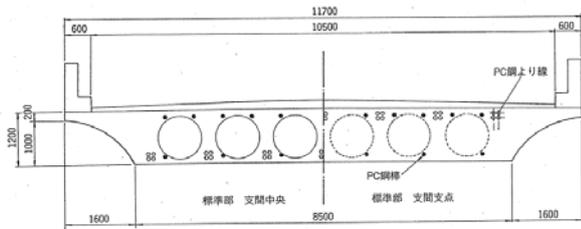


図 2.2 桁断面図

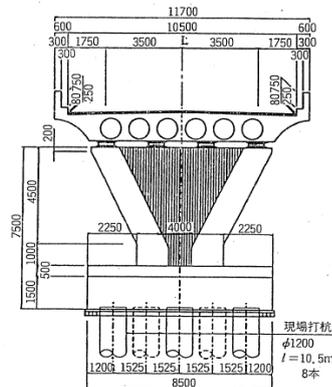


図 2.3 橋脚形状標準図

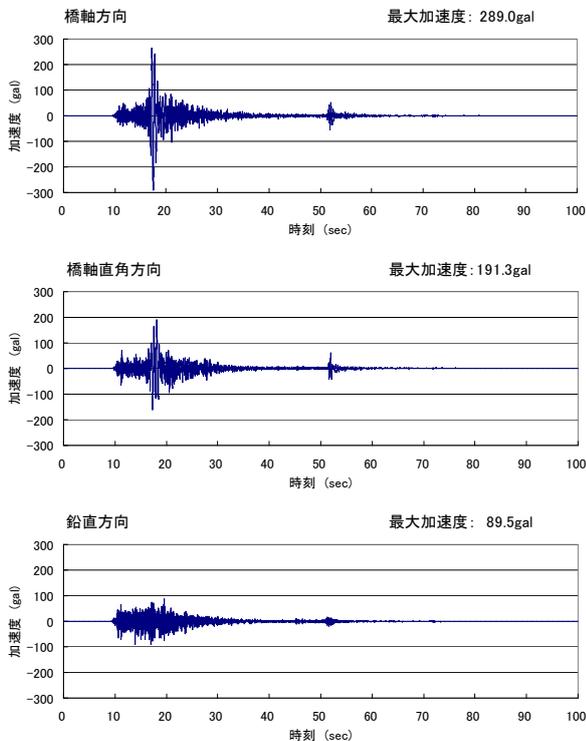


図 2.4 2号橋 P14 橋脚地表地盤位置の観測記録

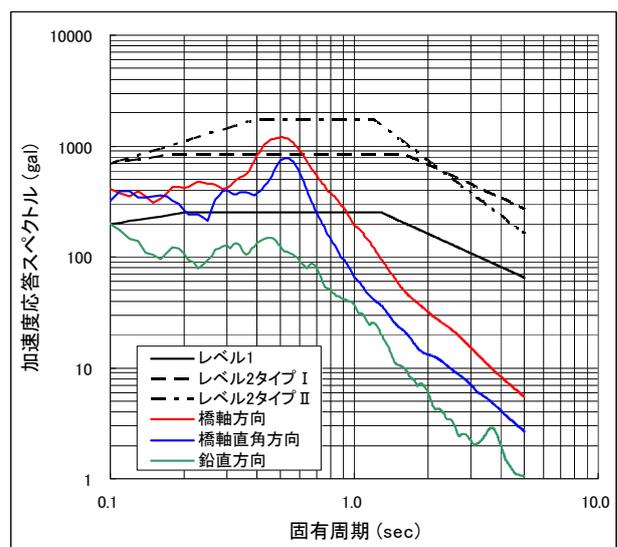


図 2.5 2号橋 P14 橋脚地表地盤位置地震動の
加速度応答スペクトル

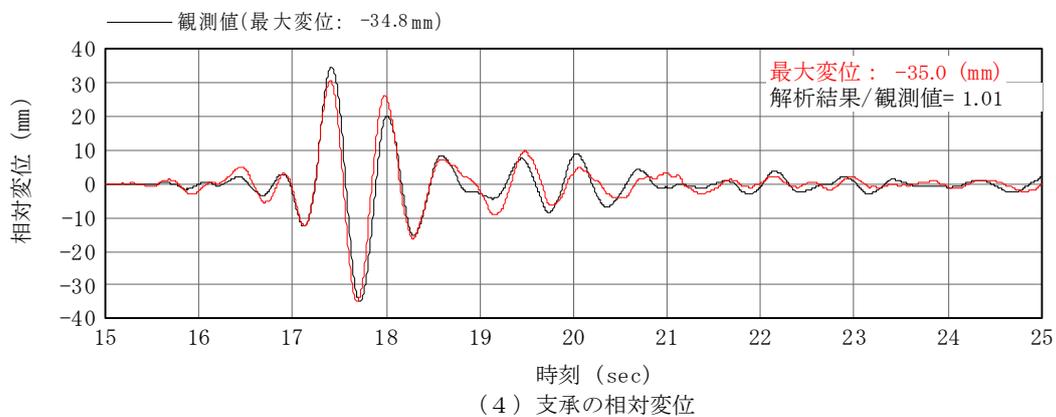
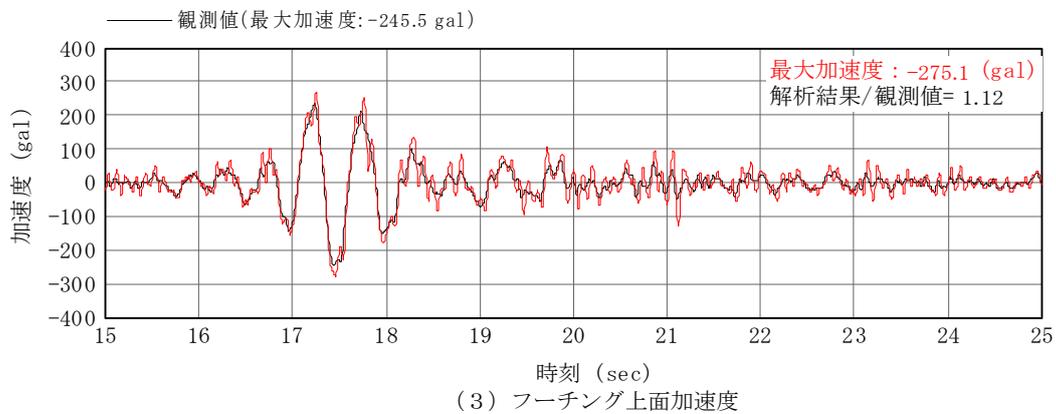
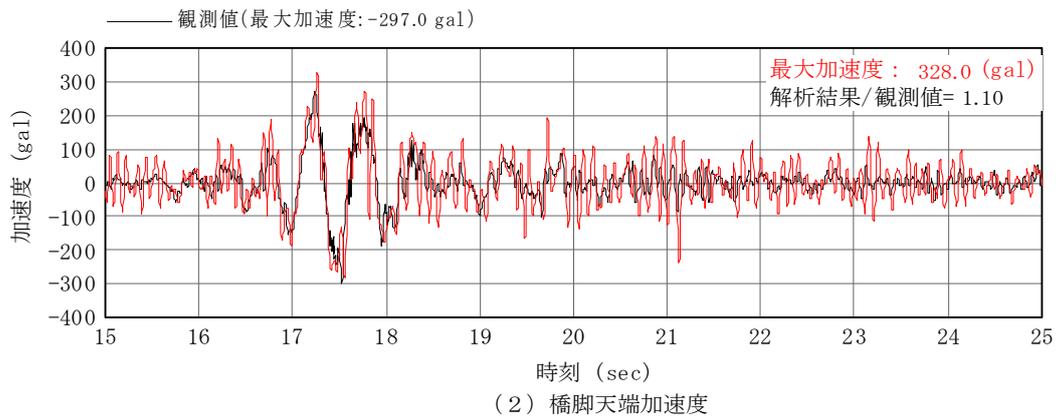
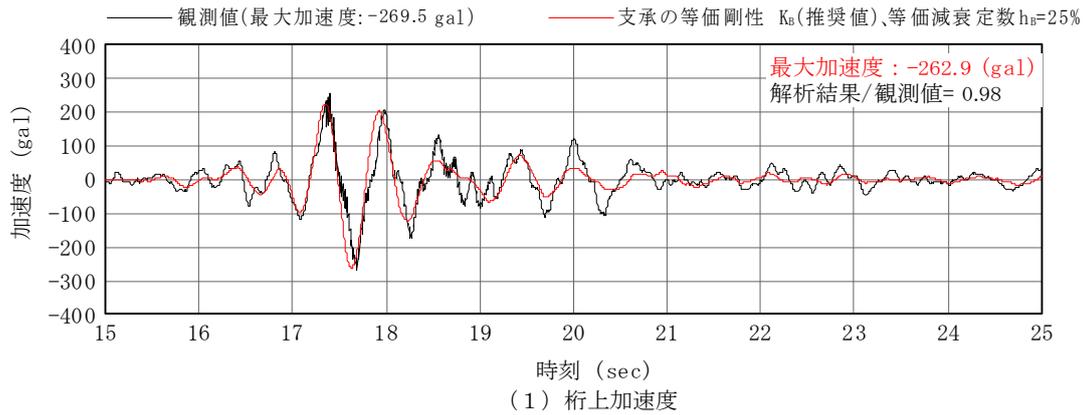


図 2.6 2号橋の解析結果と観測記録の比較 (橋軸方向)

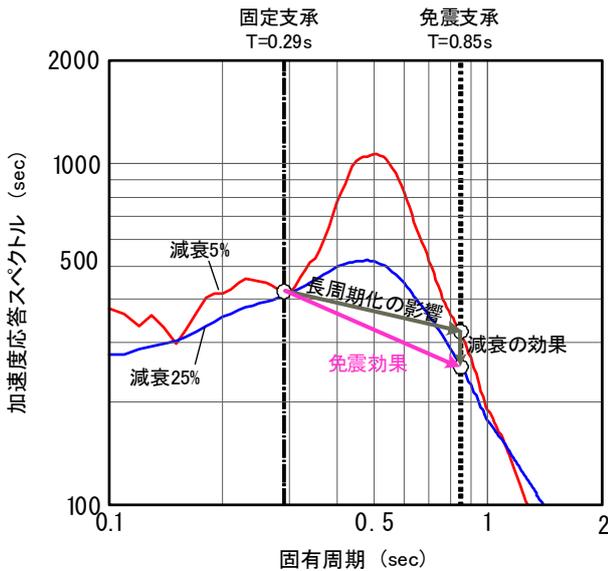


図 2.7 免震による長周期化と減衰の効果 (2号橋)

の位置で記録された地表地盤位置の地震動を図 2.4 に、その加速度応答スペクトルを図 2.5 に示す。図 2.5 によると、固有周期 0.5sec 近傍では 1G 程度の加速度応答スペクトルとなっており、対象とした地震動はレベル 2 タイプ I 地震動に近いレベルの地震動であり、極端に小さな地震動ではなかったことが伺える。なお、本橋は地震後の点検でも特に損傷した箇所は生じていない。

本橋の時刻歴応答解析の手法としては、対象地震動に対する橋梁の応答の非線形性が小さいことから、モード解析法を採用した。解析モデルは、桁、橋脚、フーチングは線形ばね要素とし、基礎-地盤系はフーチング底面位置の線形ばね要素(水平、回転、鉛直)としてモデル化した。免震支承は線形ばね要素とし、非線形性については等価剛性と等価減衰定数でモデル化した。等価剛性と等価減衰定数の値は、それぞれをパラメトリックに変化させた感度解析を行い、観測記録と比較することで推定した。なお、実橋での免震支承は、1号橋では高減衰ゴム支承が、2号橋及び3号橋では鉛プラグ入り積層ゴム支承が用いられている。地盤条件は道路橋示方書に示されるII種地盤とした。各構造部位の減衰定数は桁：0.03、橋脚：0.05、フーチング：0.0、基礎-地盤系：0.24(橋軸方向)、0.21(橋軸直角方向)とし、材料強度は、桁： $\sigma_{ck}=350\text{kgf/cm}^2$ 、橋脚： $E_c=3.10 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 、フーチング： $\sigma_{ck}=350\text{kgf/cm}^2$ とした。なお、基礎-地盤系の減衰定数の値は過去に実施された、建設時の起振機実験とシミュレーション解析の比較から推定した値を用いた²⁾。

2.2.2 解析結果と考察

解析結果と応答波形の比較結果の一例を図 2.6 に示す。なお、凡例に示される支承の等価剛性 K_B の推奨値とは、免震支承の相対変位(観測値)をもとに道路橋支承便覧の提案式から求めた値である。図 2.6 より、解析結果と観測記録の波形に多少のずれは見られるものの、解析結果が観測記録の波形形状及び位相を良く近似しているものと考えられる。また、桁の最大加速度と免震支承の相対変位についても、解析結果が観測記録を概ね良く近似しているものと推察される。

図 2.7 に、今回の地震による地震動と本橋における免震効果との関係をまとめた一例を示す。ここでは、本橋の条件(免震支承の等価減衰定数を 25%とした場合で図中の青線)とともに、支承が本免震支承と同じ水平剛性を有する弾性ゴム支承だったとする場合(図の赤線)の両者を比較して示している。これより、減衰性の高い免震支承とすることにより、加速度応答スペクトルが最大で 50%程度(固有周期が 0.5sec 付近)低減することがわかる。なお、本橋の固有周期は 0.85 秒であり、この周期においては今回の地震による地震動のスペクトルがもともと小さくなっていたことから、減衰による免震効果はさほど大きくはなっていない。

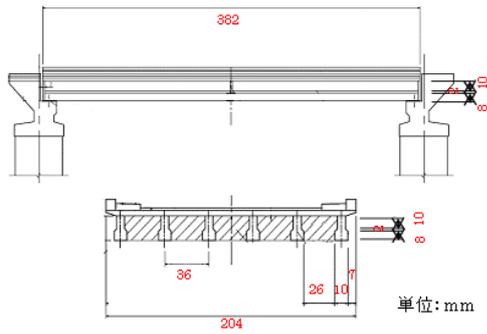
本解析からは、本免震橋の実地震による応答挙動が時刻歴応答解析により、よく評価できることが確認できた。今回の地震動は固有周期で 0.5sec 付近にピークを示す特性であり、結果として減衰による免震効果を顕著に発揮できるタイプの地震ではなかった、仮に、長周期の帯域で強いスペクトルとなる特性のある地震動が生じれば、減衰による免震効果がより明確に現れるものと推測される。

3. 津波が橋梁に及ぼす影響に関する検討

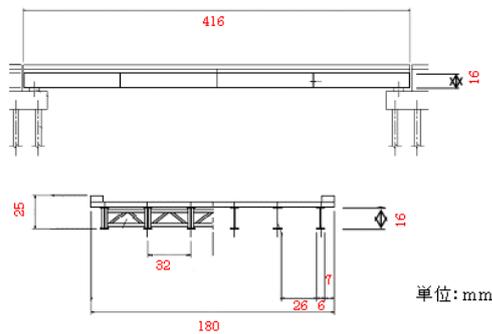
3.1 上部構造流失被害の軽減策

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。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、津波襲来時に橋梁上部構造に作用する水平波力(抗力)及び垂直波力(揚力)を軽減するための対策として、従来耐風分野で主に長大橋を対象として取り付けられてきたフェアリングに着目した。そして、フェアリング頂部の水平方向及び鉛直方向の位置をパラメータとして津波による波力が橋梁に及ぼす



(a) Concrete Bridge Model (Lueng Ie Bridge)



(b) Steel Bridge Model (Kr.Cuntuem Bridge)

図 3.1 実験に用いた橋梁模型 (上: RC 橋、下: 鋼橋)

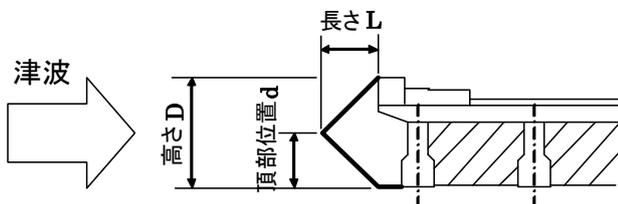


図 3.2 フェアリングの形状図

影響を実験的に調べ、フェアリングの最適形状について検討を行った³⁾。また、最適形状の下で水深及び津波高さを変化させ、津波衝突時の橋梁上部構造の作用力及びその挙動を検討した。

3. 2 津波の水理実験

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 橋及び鋼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。また、実験で使用した二次元水路は長さ 20m、幅 1m、高さ 0.8m である。津波は、湛水域を設け、ゲートを転倒させることにより発生させた。な



写真 3.1 フェアリング取り付け済みの橋梁模型

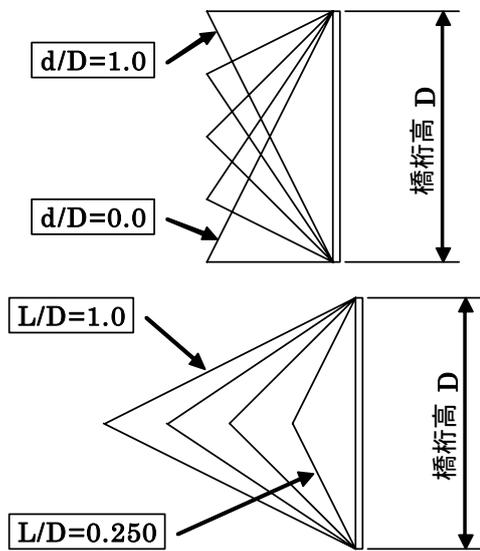


図 3.3 フェアリングの形状パラメータ

お、実験時には波高計により橋梁模型上流側 2 箇所、津波高さ、橋梁模型の下に設置した分力計により橋梁模型上部構造に作用する抗力及び揚力を計測した。

橋梁上部構造流失被害の軽減策としては、前節 3. 1 で述べたようにフェアリングに着目した。フェアリングは図 3.2 及び写真 3.1 に示すような形状をしている。フェアリングによる波力軽減効果は、その形状に左右されると考えられるため、フェアリング頂部の水平方向及び鉛直方向の位置をパラメータとし、最適形状を検討することとした。フェアリングの形状パラメータの概念を図 3.2 及び図 3.3 に示す。

フェアリングの最適形状検討時の実験ケースは、フェアリングの長さ、フェアリング頂部の高さ位置の他、津波高さをパラメータとして整理できるように 40 ケース (橋梁模型は RC 橋のみ、L/D 4 ケース、d/D 5 ケース、津波高さ 2 ケースの全ての組合せ) 設定した。

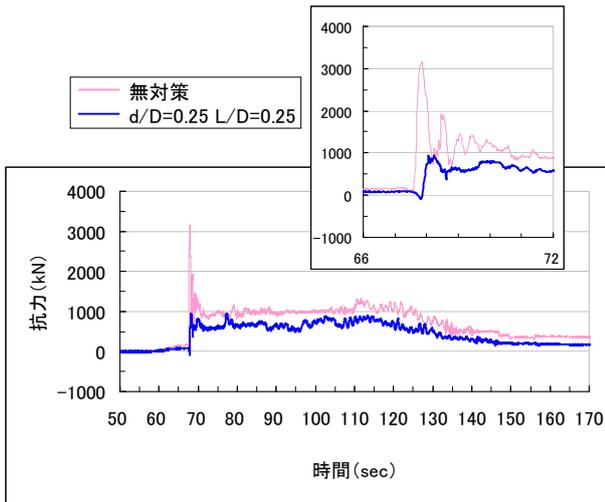


図 3.4 橋梁上部構造に作用する波力(抵抗力)
(水深 3m、津波高さ 5m)

水深は実物換算値で 3m に固定した。

また、橋梁上部構造の作用力及び挙動検討時の実験ケースは 40 ケース (RC 橋 or 鋼橋、支承固定 or 可動、水深 5 ケース、津波高さ 2 ケースの全ての組合せ) 設定した。

3.2.2 フェアリング最適形状の検討結果

図 3.4 に津波衝突時に RC 橋に作用した抵抗力の測定結果の一例を示す。なお、横軸の時間及び縦軸の抵抗力・揚力は実物換算値により表記している。図 3.4 によれば、無対策の場合は津波衝突後すぐ (67.8sec 時) に最大値 (3166kN) を記録し、その後は下降傾向を示すが、下降し始めの約 2 秒間は振動が大きい。一方、フェアリング有りの場合には明確なピークが現れず、66.1sec 時に 937kN まで上昇した後、約 1 分間ほぼ 600kN 前後の値で一定した。これらの結果より、フェアリングの設置により、津波衝突時に発生する衝撃的な波力を低減することが可能であるといえる。

RC 橋の水路実験における揚力の測定値 (最大値) とフェアリング長及びフェアリング頂部の位置との関係をフェアリング長に着目して整理したグラフを図 3.5 に示す。これらより、フェアリング長は抵抗力にはあまり影響を与えないが、揚力については短いほど波力を低減する結果が得られた。

RC 橋の水路実験における抵抗力の測定値 (最大値) とフェアリング長及びフェアリング頂部の位置との関係をフェアリング頂部の位置に着目して整理したグラフを図 3.6 に示す。これらより、フェアリング頂部の位置は、抵抗力に対しては桁高さの中央位置とした場合に波力低減効果が最も大きく、また揚力に対しては位

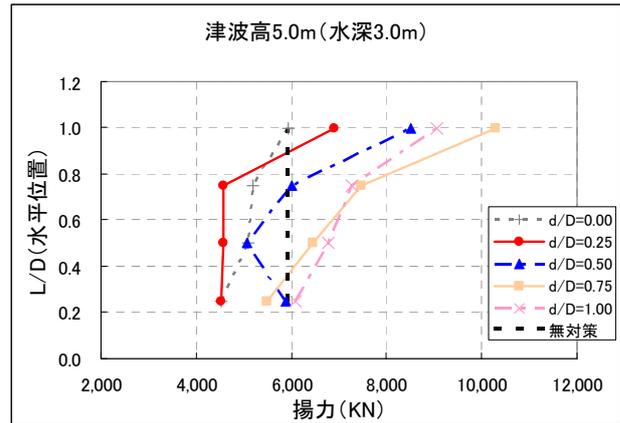


図 3.5 フェアリング長と揚力の関係

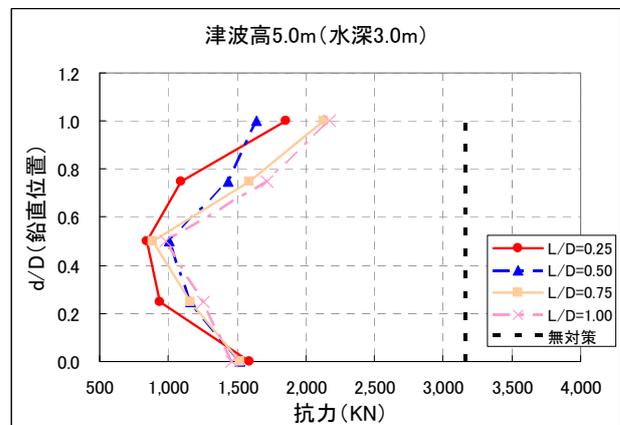


図 3.6 フェアリング頂部の位置と揚力の関係

置を下げた方が波力の低減効果が大きい結果が得られた。

以上を踏まえると、今回の実験の範囲内でのフェアリングの最適形状は、 $d/D=0.25$ 、 $L/D=0.25$ であると考えられる。

3.2.3 橋梁上部構造の作用力及び挙動の検討結果

前項 3.2.2 で決定した最適形状の下で水深及び津波高さを変化させ、津波衝突時の橋梁上部構造の作用力及びその挙動を検討した。表 3.1 に検討結果を示す。なお、この表において作用力は、同じ条件の下でのフェアリング無しの場合の作用力に対するフェアリング有りの場合の作用力の割合を示し、上部構造の挙動は支承可動実験後の橋梁模型上部構造の移動状況 (写真 3.2 参照) を示す。

表 3.1 によると、フェアリングを設けることで、抵抗力は水深・津波高さにかかわらず低減し、揚力は水深が浅いほど低減することが分かる。また、津波高さに対する揚力は、RC 橋では津波高さが低いと水深による低減率の変化が大きいのに対し、鋼橋では津波高さ

表 3.1 作用力と挙動の計測結果

橋梁形式	水深 (m)	津波高 (m)	作用力		上部構造の挙動	
			抗力 (%)	揚力 (%)	フェアリング有り	フェアリング無し
RC 橋	1.0	3.0	15	4	○	○
		5.0	31	36	○	△
	1.5	3.0	12	5	○	○
		5.0	23	38	○	△
	2.0	3.0	20	25	○	○
		5.0	31	46	△	×
	2.5	3.0	22	58	○	△
		5.0	21	55	×	×
3.0	3.0	20	94	△	△	
	5.0	22	69	×	×	
鋼橋	1.0	3.0	52	3	○	○
		5.0	60	16	△	△
	1.5	3.0	45	3	○	○
		5.0	50	2	△	△
	2.0	3.0	72	14	○	○
		5.0	55	44	×	×
	2.5	3.0	46	48	△	△
		5.0	70	52	×	×
3.0	3.0	73	65	×	×	
	5.0	73	69	×	×	

注) ○：移動無し △：移動有り ×：橋台上から落下

による差異が少なかった。全体として鋼橋の方が RC 橋に比べて作用力の低減効果が小さいが、これは鋼橋の桁高が RC 橋に比べて低いことが要因であると考えられる。

次に、上部構造の挙動についてはフェアリング無しの場合と同様の傾向を示し、水深が深いほど、津波高が高いほど桁が移動しやすく、揚力の効果が抗力よりも卓越していた。全体として、フェアリングを設けることで桁の移動は低減され、フェアリング設置の効果が確認された。

4. まとめ

平成 21 年度は、2009 年 8 月 11 日に発生した駿河湾地震により強い地震動を受けた既設の免震橋を対象に挙動解析を実施し、免震支承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の防



写真 3.2 RC 橋模型上部構造の挙動 (水深 3.0m)
(左：移動有り 右：橋台上から落下)

止を図るための断面形状について、水理実験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、強震記録及び免震橋の図面等は静岡県から、インド洋津波で被災した橋梁に関する資料は九州工業大学幸左賢二教授、筑波大学庄司学准教授及び大日本コンサルタント田崎賢治氏から提供していただいた。ここに、深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 内閣府：駿河湾を震源とする地震について、
http://www.bousai.go.jp/090810/091028surugawanhig_aizyoukyou007.pdf
- 2) 静岡県沼津土木事務所 財団法人国土開発技術研究センター：平成 9 年度 (国) 136 号橋梁整備 (2A) 工事に伴う振動性状検討業務委託、1998
- 3) 薄井稔弘、星隈順一：津波による橋梁の被害軽減に関する水路実験、第 13 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.163-166、2010.

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

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2007-2010

Research Team : Bridge and Structural Technology
Research Group

Author : HOSHIKUMA Junichi

USUI Toshihiro

Guangfeng ZHANG

Abstract : This research has been conducted to study the seismic performance of bridges for large-scale earthquake with strong and/or long-period ground motions and the effect of tsunami attack on bridge performance. Then it is aiming to propose the seismic performance level of bridges and the seismic performance evaluation method. In FY 2009, the seismic behavior of the seismic isolated bridges during 2009 Suruga-wan earthquake was analyzed and compared with observation records measured in the isolated bridge. Secondary, to study the mitigation of Tsunami attack effect on bridge performance, the shape of the cross section of the superstructure was examined through the hydraulic model tests.

Key words : large-scale earthquake, tsunami, seismic performance, performance evaluation, seismic isolated bridge