

# 横浜ベイブリッジの耐震性向上技術

山本 泰幹

長大吊形式橋梁の耐震性向上対策は、当時、国内では前例がなく、巨大地震という建設時の想定を超える非常に大きな外力に対しても、景観を保持し、安全で経済的な耐震対策となるように、入力地震動の作成、被害予測シミュレーション、耐震性能評価、および地震観測記録を用いた動的解析の検証等の検討に取り組み、耐震技術を総合的に結集して耐震性向上対策を行った結果、工事後にも横浜港のシンボルとなっている横浜ベイブリッジの優美な橋の姿が保たれた。

キーワード：橋梁，長大橋，斜張橋，耐震性能，耐震性向上

## 1. はじめに

横浜ベイブリッジは、全長 860 m の長大斜張橋であり、横浜港のシンボルとして多くの人々に親しまれている（写真—1）。プレート境界型の長周期地震や内陸直下地震といった巨大地震時の耐震性向上対策を行うことにより、首都圏の動脈としての交通ネットワークと震災時の緊急輸送路としての物流輸送機能を支える。本プロジェクトでは、目標とする耐震性能に対し、耐震解析から解析結果に基づく対策方法の立案に至るまで、長大吊形式橋梁の特徴を考慮して、きめ細かく耐震性能を検討した。また、長周期成分を多く含む地震計の観測記録や異なる非線形解析コードを用いた設計検証にも取り組み、より信頼性の高い性能設計と耐震性向上対策を実現した。



写真—1 横浜ベイブリッジ

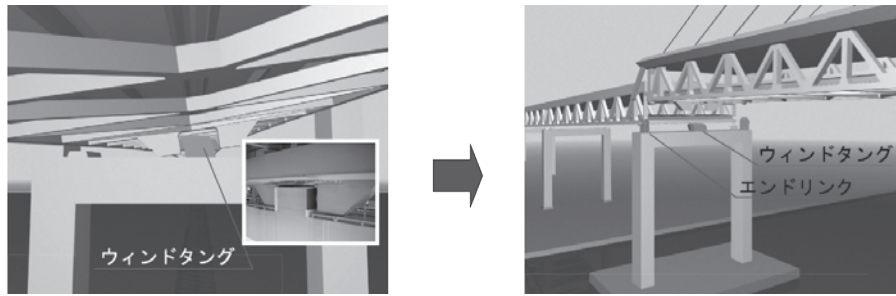
## 2. 代表的な耐震性向上技術

### (1) 入力地震動の作成

M8クラスのプレート境界型の地震動は、東京・横浜で甚大な被害が生じた1923年の関東地震を基本とするシナリオ型地震を本プロジェクトのために作成している<sup>1)</sup>。ここでは、測地データと遠地地震記録を用いたインバージョンによって得られたWald and Sommervilleモデルを用いる。このモデルは2つのアスペリティからなり、地震動の周期成分には、横浜ベイブリッジの主要な固有振動モードの固有周期と同じ比較的長周期のものが多く含まれるようにアスペリティサイズとその位置を変化させた。兵庫県南部地震で観測されたM7クラスの内陸直下型の地震動と合わせて、各橋梁の構造要素ごとに最も大きな応答を与える地震動で耐震性能を照査している。

### (2) 被害予測と耐震性照査

横浜ベイブリッジは3径間連続鋼斜張橋であり、桁をリンクで支持した免震構造として建設されている。長大吊形式橋梁特有の“ある損傷が起点となって別の損傷を引き起こす”という損傷の連鎖現象が現れる特徴を考慮して、損傷のシナリオを慎重に推定している<sup>2)</sup>。耐震性能は、損傷箇所とその状態によって恒久的な補修に時間を要することを許容するが、応急復旧により緊急車両等は地震後短時間で監視のもと通行可能とし、一般交通も走行速度制限等を行うことにより、恒久的な補修を行いながらの走行が可能となることを目標としている。損傷状況は、基本的に非線形動的解析

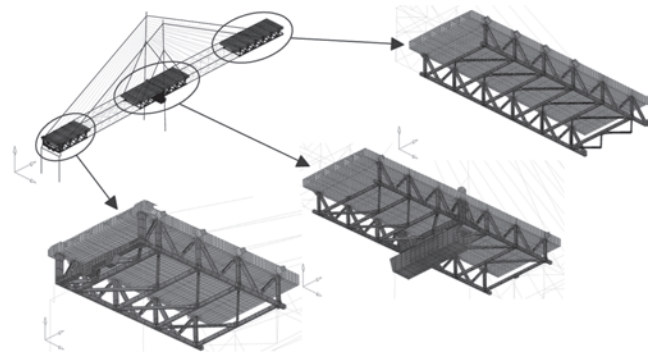


図一 横浜ベイブリッジの橋軸直角方向地震動における損傷のシナリオの一例  
(端橋脚のウインドタンクの損傷に伴う損傷の連鎖)

で得られた応答から推定しているが、大きな損傷が生じると予想された部位は、3次元弾塑性有限要素解析によりその耐力や変形性能を推定し、これらの解析結果に基づき許容する損傷と許容できない損傷を分類している。

横浜ベイブリッジの損傷のシナリオの一例を図一に示す。非線形動的解析の結果、橋軸直角方向地震動に対して、端橋脚のウインドタンクが大きく損傷すると推定された。3次元弾塑性有限要素解析の結果、ウインドタンクを耐力補強すると橋脚への影響があることが判明したため、その損傷を許容した。ただし、端橋脚のウインドタンクが損傷すると、常時の負反力を支持しているエンドリンクに損傷が連鎖して、桁端が上昇すると推定されたため、これを許容できない損傷と分類した。

また、特に重要部位の主塔や主構の耐震性評価については、その構造全体を3次元シェル要素でモデル化した3次元弾塑性有限要素解析(図二)で、着目する部材の損傷状況をより詳細に推定して耐震性能を評価した<sup>3), 4)</sup>。その結果、端橋脚の耐力不足、および主塔位置付近と中央径間中央付近における下路床桁下弦

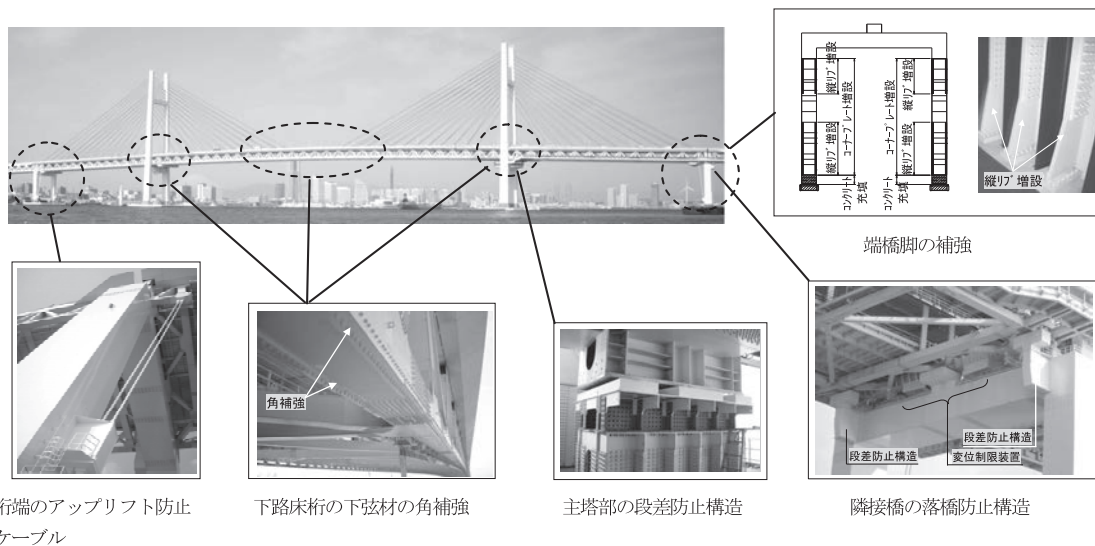


図二 横浜ベイブリッジにおける主構の弾塑性有限要素解析モデル

材の局部座屈による板の大きな面外変形の損傷を許容できない損傷と分類した。

### (3) 耐震性向上対策

前述の目標とする耐震性能を達成するための対策方法は、長大吊形式橋梁の構造の特徴を活かし、橋梁全体のリタダンシーを高めるとともに、耐力不足が致命的となる端橋脚の脚柱の耐力を向上して、橋全体の耐震性能を柔に向上している。横浜ベイブリッジの耐震性向上対策を図三に示す。橋軸直角方向の地震



図三 横浜ベイブリッジの耐震性向上対策

動に対しては、端橋脚のウインドタンク、エンドリンク、および主塔部のタワーリンクの損傷によって連鎖的に生じる損傷に対して、桁端のアップリフト防止ケーブルと主塔部の段差防止構造を追加している。また、下路床桁下弦材の角部の隅肉溶接部に割れが生じた場合にも、部材としての耐力の急激な低下を回避できるような予防対策としての角補強を施している。橋軸方向の地震動に対しては、桁端に生じる変位に対し、隣接橋の落橋防止構造を追加している。

(4) 動的解析の検証

横浜ベイブリッジは、数多くの地震計を設置して多点同時観測を行っており、長周期地震動を含む数多くの地震記録が蓄積されている世界的にも類い希な

橋梁である。耐震性評価で重要となる動的解析の精度に関して、本橋で観測された長周期成分を多く含む地震記録を用いて、動的解析モデルの再現性について、より精緻に検証を行っている<sup>5)</sup>。図-4は、地震計の設置状況を整理したものであり、86chの地震計が設置されている。一例として、横浜ベイブリッジの固有振動モード形を図-5に示す。濃いグレーのラインは動的解析モデルの固有値解析結果であり、薄いグレーのラインの2004.10.23新潟県中越地震で観測された地震動から推定されたモード形と固有周期が、低次から高次モードまでほぼ等しいことが確認された。

さらに、異なる非線形解析コードを用いて得られた地震応答値を比較して検証を行い、各コードの解析結果は、実用上十分な精度で近似していることが確認で

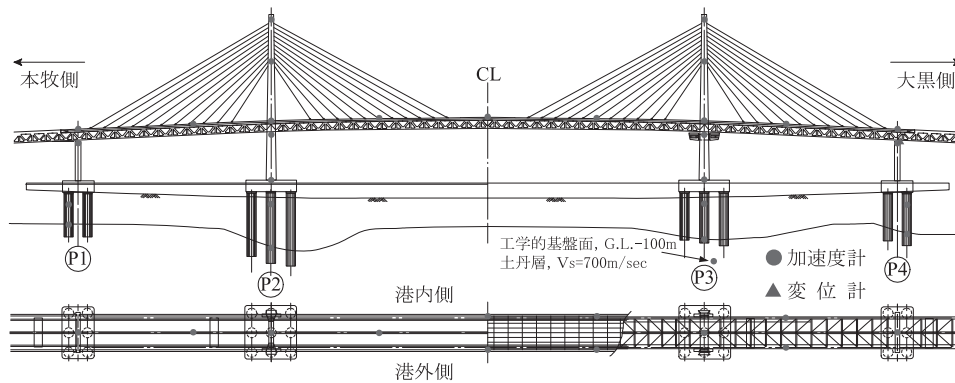


図-4 横浜ベイブリッジにおける地震計の設置状況

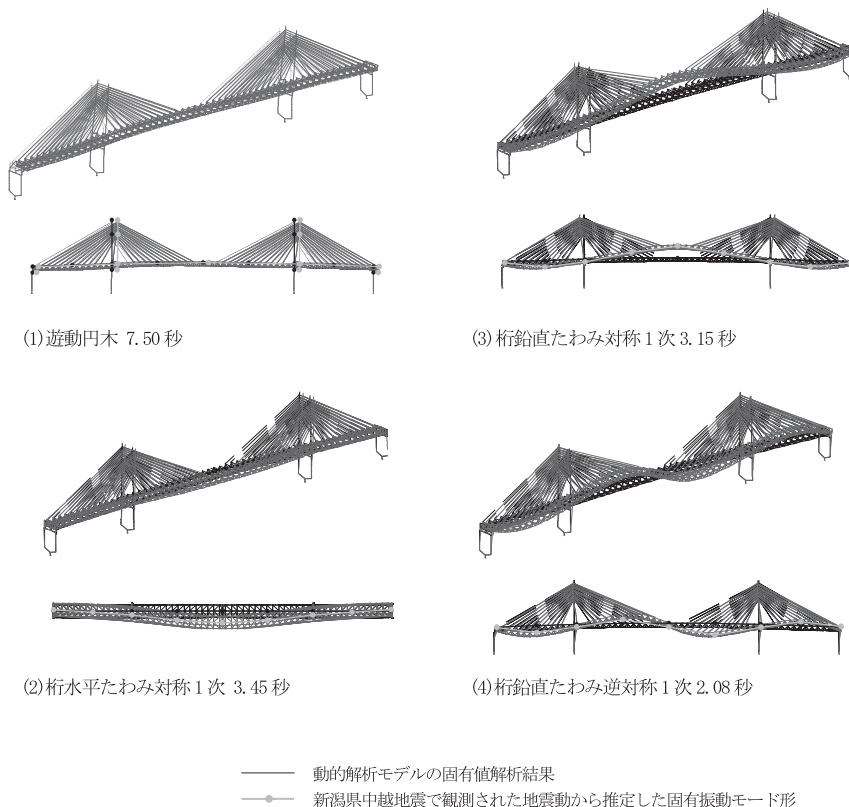


図-5 横浜ベイブリッジにおける動的解析モデルの再現性の検証の一例

きた<sup>6)</sup>。これらの動的解析の検証により、本橋の耐震性向上対策の信頼性がより一層高いものとなっている。

### 3. おわりに

長大吊形式橋梁の耐震性向上対策は、当時、国内では前例がなく、巨大地震という建設時の想定を超える非常に大きな外力に対しても、景観を保持し、安全で経済的な耐震対策となるように、入力地震動の作成、被害予測シミュレーション、耐震性能照査、および地震観測記録を用いた動的解析の検証等の検討に取り組み、耐震技術を総合的に結集して耐震性向上対策を行った結果、工事後にも横浜港のシンボルとなっている横浜ベイブリッジの優美な橋の姿が保たれた。本プロジェクトにご協力いただいた多くの関係者の方々に、厚くお礼を申し上げます。

JCMMA

#### 【参考文献】

- 1) 小森和男, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明: 技術展望・首都高速道路における長大耐震補強の基本方針と入力地震動, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.1-19, 2005.7.
- 2) 小森和男, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明: 技術展望・首都高速道路における長大橋耐震補強検討, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.1-20, 2005.10.
- 3) 山本泰幹, 半野久光, 藤野陽三, 矢部正明: 横浜ベイブリッジの耐震補強設計における鋼上部構造を対象とした性能照査, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.13-30, 2010.1.
- 4) 山本泰幹, 半野久光, 藤野陽三, 矢部正明: 「横浜ベイブリッジの耐震補強設計における鋼上部構造を対象とした性能照査」への討議・回答, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.1, pp.207-212, 2011.
- 5) 山本泰幹, 藤野陽三, 矢部正明: 地震観測された長大吊構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる再現性, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.738-757, 2009.8.
- 6) 山本泰幹, 半野久光, 藤野陽三, 矢部正明: 横浜ベイブリッジの耐震補強設計に用いた非線形地震応答値の設計検証, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.31-36, 2010.1.

#### 【筆者紹介】

山本 泰幹 (やまもと やすみき)  
首都高速道路㈱  
建設事業部 建設企画課  
担当課長



## 平成 24 年度版 建設機械等損料表 発売中

#### ■内 容

- ・国土交通省制定「建設機械等損料算定表」に基づいて編集
- ・機械経費・機械損料に関する通達類を掲載
- ・損料積算例や損料表の構成等をわかりやすく解説
- ・各機械の燃料（電力）消費量を掲載
- ・主な機械の概要と特徴を写真・図入りで解説
- ・主な機械には「日本建設機械要覧（当協会発行）」の関連ページを掲載

#### ■B5判 約 680 ページ

- 一般価格  
7,700 円（本体 7,334 円）
- 会員価格（官公庁・学校関係含）  
6,600 円（本体 6,286 円）
- 送料（単価） 600 円（但し沖縄県を除く日本国内）  
注 1) 複数冊発注の場合は送料単価を減額します。  
注 2) 沖縄県の方は一般社団法人沖縄しまたて協会  
（電話：098-879-2097）にお申し込み下さい。

### 一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒 105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>