

# 東神戸大橋の耐震性に関する実験と解析

## Seismic Test and Analysis of Higashi-Kobe Bridge

技術本部 藤田 勝久\*<sup>1</sup> 福澤 清\*<sup>2</sup>  
 神戸造船所 山上 哲示\*<sup>3</sup>  
 阪神高速道路公団 北沢 正彦\*<sup>4</sup>

東神戸大橋は、阪神高速道路公団湾岸線の東神戸水路を横断する全長 885 m の長大斜張橋である。本橋は主塔の地震反力の低減を目的にオールフリー構造を採用し、橋軸方向の固有周期 4.3 s を実現するとともに両橋端にはオイルダンパを用い、免震及び制振構造を本格的に採用した斜張橋である。これらの設計思想及び耐震安全性を確認するため、本橋の縮尺 1/100 の弾性相似模型を製作し、大型三次元振動台を用いた耐震試験及び耐震解析を行った。その結果、短周期地震に対しては設計思想どおり応答は小さく、また長周期地震に対してはオイルダンパが有効に作動して応答が低減し、本橋は耐震上安全であることを確認した。

Higashi-Kobe Bridge is a three-span cable stayed bridge with whole length of 885 m an overall. This bridge is not only a long-span cable stayed bridge, but also adopts the free support condition in the bridge axis direction in order to reduce the earthquake reaction force applied to the pylon bases. Furthermore, its displacement in the bridge axis direction is controlled by oil dampers installed between the main girder and both end piers. In order to confirm the seismic safety of this bridge which has the above-mentioned structural characteristics, the authors carried out seismic verification testing and analysis on a 1/100 scale model of entire Higashi-Kobe Bridge. As a result, we found that the response of the bridge to seismic waves became small for short period seismic waves as in the design concept and was reduced by the effectiveness of the oil dampers for long period seismic waves and also confirmed the seismic safety of this bridge.

### 1. ま え が き

東神戸大橋は、阪神高速道路公団湾岸線の東神戸水路を横断する中央径間 485 m、橋長 885 m の 3 径間連続鋼斜張橋である。本橋は東神戸水路の玄関口に位置することから、力学的な合理性はもちろんであるが景観を重視した設計となっており、図 1 に示すように主塔は塔柱を円弧状の曲線を持たせた水平材でつないだ直立柱 H 型ラーメンを採用している。また、主桁(けた)には垂直材を持たない純ワーレントラスのダブルデッキ構造を採用し、床版は主構弦材と一体構造の鋼床版として、主桁作用も受け持たせて鋼重の軽減を図っている。

我が国の大型橋梁の設計においては、耐震安全性の確保が重要な課題であり、本斜張橋においても基本構造の選定の要件となっている。本橋では、主桁の橋軸方向の支持条件を全支点において可動のオールフリー構造とし、その固有周期を 4.3 s と長周期化

することにより主塔及びケーソン基礎に働く地震荷重を低減している。また、主桁をオールフリーとし、長周期化しているため主桁の橋軸方向の移動量が大きくなるが、端部橋脚上にオイルダンパを設置することにより移動量を制御している。

本橋はこのような構造的特徴を有しているため、耐震安全装置としてのオイルダンパの有効性を検討するとともに、1/100 縮尺の三次元相似模型を用いた耐震試験及び耐震解析を行った。

### 2. 耐震安全装置の検討

本橋は前述のようにオールフリー構造の採用により主桁の移動量が大きくなることから、設計段階においてこの移動量の制御を目的に端橋脚にストップ及びオイルダンパを耐震安全装置として設置することを検討した。ここでは、これらの検討結果について述べる。

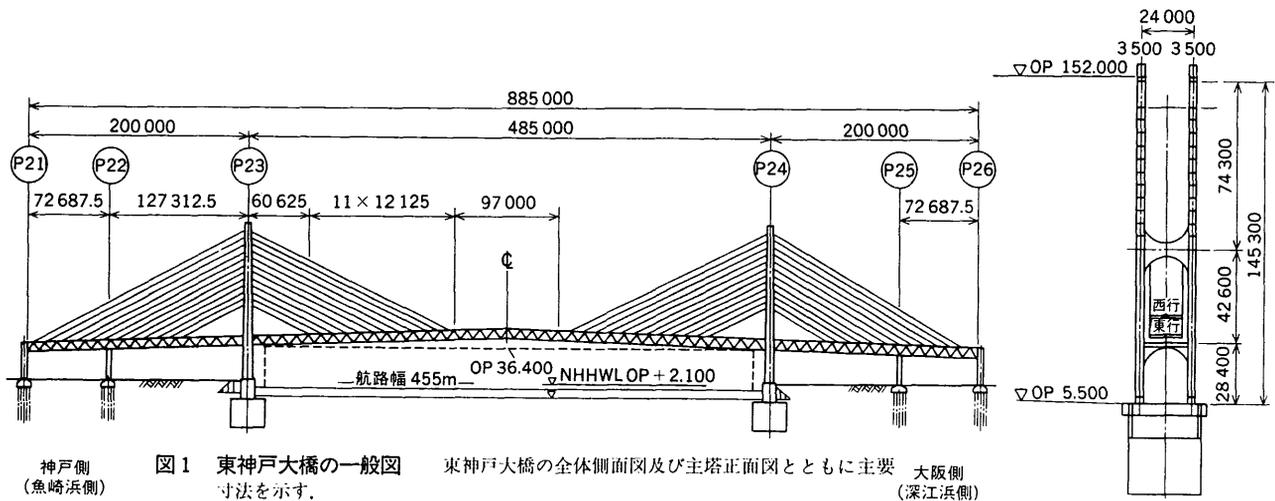


図 1 東神戸大橋の一般図  
 東神戸大橋の全体側面図及び主塔正面図とともに主要寸法を示す。  
 General view of Higashi-Kobe Bridge

\*1 高砂研究所次長 工博 \*3 鉄構部構造設計課長  
 \*2 高砂研究所振動・騒音研究室主務 \*4 神戸建設部設計課長

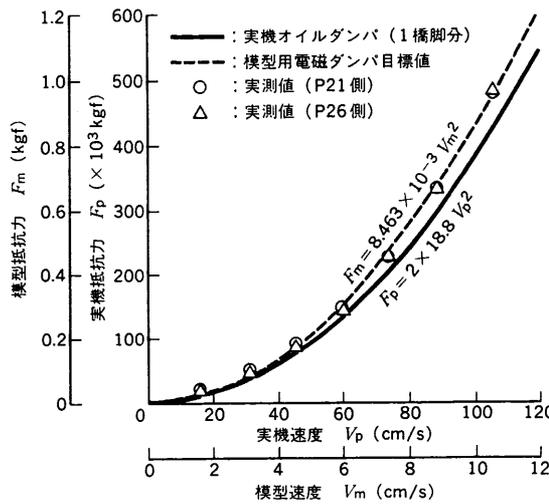
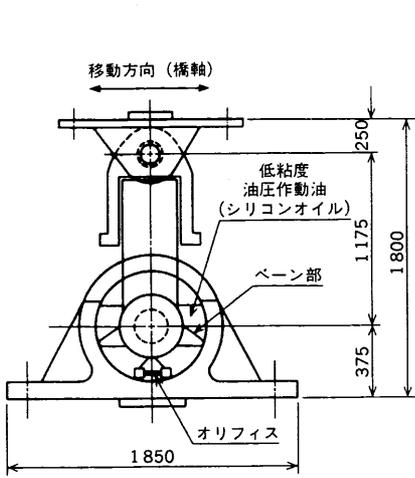


図2 ベーン型オイルダンパとその特性  
シリコンオイルが主桁の変位に伴い、オリフィスを通過するときの乱流抵抗を利用している。ダンパの抵抗力は速度の二乗に比例する。  
Vane type oil damper and its characteristics

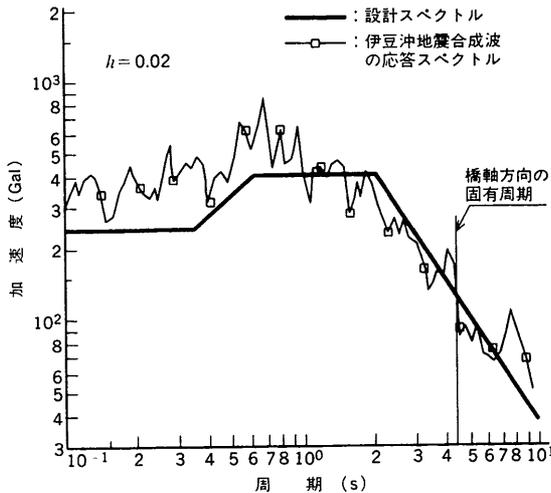


図3 設計スペクトルと伊豆沖地震合成波の応答スペクトル  
本橋の設計スペクトルと耐震試験及び応答解析に用いた伊豆沖地震合成波の応答スペクトルとの比較を示す。  
Comparison between design spectrum and response spectrum of Izuoki composite seismic wave

表1 3質点モデルによる時刻歴応答解析結果  
Results of time history response analysis using three lumped mass model

地震レベル	全体構造系減衰比	本橋と端橋脚との相対変位 (cm)	最大応答速度 (cm/s)	耐震安全装置反力		備考
				オイルダンパ (t)	ストッパ (t)	
設計スペクトルレベル	1%	72	---	---	---	---
	(1+4.8%)*	48	75	151	---	オイルダンパあり
耐震安全装置設計レベル	(1+6.2%)*	64	99	369	---	オイルダンパあり
		64	99	369	69	オイルダンパ及びストッパ(遊間 60 cm)あり
		64	99	369	314	オイルダンパ及びストッパ(遊間 55 cm)あり
	1%	102	231	---	5287	ストッパ(遊間 55 cm)あり

\* 構造減衰比1%とオイルダンパによる減衰比の和を示す。

度レベルは、設計スペクトルレベルとしての“平均値  $m + \text{標準偏差 } \sigma$ ”レベルと、耐震安全設計レベルとして“ $m + 2\sigma$ ”レベル、すなわち固有周期において設計スペクトルの1.4倍のレベルについて検討した。なお本橋は設計減衰比として2%を用いたが、本検討ではダンパ等の付与減衰を除く構造減衰比として2%は期待できないものとして1%を用いた。

2.2.2 検討結果

上記の3質点モデルによる時刻歴応答解析結果をオイルダンパのない場合の結果を含め表1に示す。表に示すように、オイルダンパ及びストッパ等の耐震安全装置がない場合、またストッパがある場合でも耐震安全装置設計レベルでは本橋の応答変位及び端橋脚反力の設計限界値である74 cm及び500 t以下に収めることが困難である。しかし、オイルダンパを設置することにより端橋脚の反力を低減しつつ、応答変位を許容値以下にすることができ、かつ応答が大きくなれば減衰効果も大きくなり、オイルダンパはストッパの役割も兼ね備え非常に有効であることが明らかとなった。

3. 耐震試験

本橋にはオールフリー構造を実現するため、上記のオイルダンパのほかに主塔部にはケーブル支承を、また各橋脚にはウインドウ支承、ペンデル支承が設置されている。これらの構造要素が地震時に所定の機能を果たし、本橋の耐震安全性が確保されることを確認するため、三次元相似模型を用いて斜め方向加振や二次元及び三次元地震波加振を実施した。

2.1 装置の概要

本橋に採用したオイルダンパは図2に示すベーン型オイルダンパである。これは一般のオイルダンパと同様オリフィス孔をオイルが通過する際の乱流抵抗を利用したものであり、主桁の水平変位をピンとスライド機構を用いて回転変位に変換し二枚のベーンを回転させてオリフィス孔に主桁の変位に応じてオイルを通過させるものである。このようにオイルの乱流抵抗を利用しているため、図に示すように速度の二乗に比例する抵抗力が生じる。

2.2 有効性の検討

2.2.1 検討方法

ここでは橋軸方向挙動の解析を目的としているため、本橋の全体系を主塔、ケーブル及び主桁から成る主橋部と両端橋脚の3質点系にモデル化して解析した。この3質点系モデルにおいて主橋部と両端橋脚の間には前述の特性を有するオイルダンパ及びストッパが設置され、ストッパはあるクリアランスを持って設置されるものとした。ストッパはゴム製とし、ゴムの特性を付与した。

応答解析の入力波形としては伊豆沖地震(1974年5月9日)の比較的短周期成分を含む加速度記録と変位記録に基づく長周期成分を含む加速度波形とを合成し、図3に示すように設計スペクトルに近似させた合成波を作成して用いた。このときの入力加速

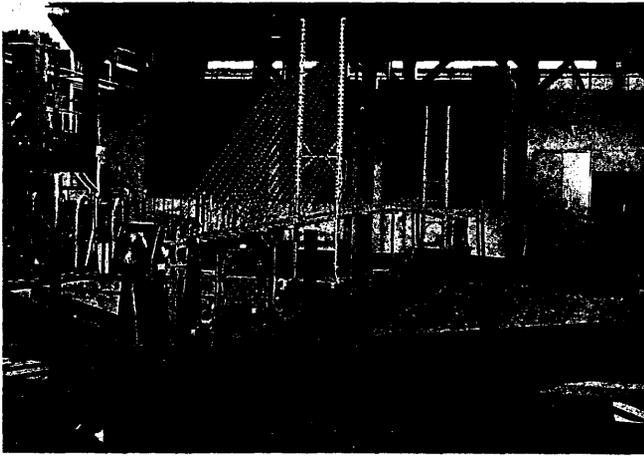


図4 耐震試験状況 本橋の弾性相似模型を大型三次元振動台上に据付け、地震波により加振を行った。  
Scale model on 3-dimensional earthquake simulator

3.1 試験体

3.1.1 相似則

本橋はオールフリーの吊り構造を採用していることから、振り子状の振動挙動が想定される。そのため、相似則としては弾性パラメータのほかに重力パラメータを考慮した。

3.1.2 模型製作

模型は加振装置としてテーブルの大きさが6m×6mの振動台を用いることから1/100模型とした。

また、実橋に設置されるオイルダンパは速度二乗型の特性を有しているため、模型用のダンパは電磁アクチュエータと電気回路により模擬した。模型用電磁ダンパの特性は実機ダンパの特性と共に図2に示す。このようにして製作した模型の全景を図4に示す。

3.2 試験内容

振動台を用いて正弦波掃引加振を行い試験体の振動特性及び模型の製作精度を把握するとともに、地震波を用いた加振試験を実施した。地震波加振試験では前述の伊豆沖地震合成波に加え、千葉沖地震修正波及びEl-Centro地震波を用いた。千葉沖地震修正波は千葉沖地震(1987年12月17日)の比較的長周期成分を含む3成分記録で、橋軸方向加振に用いたNS波を橋軸方向の固有周期において設計スペクトルレベルに合わせ、EW波及びUD波はNS波の修正に用いた修正率で修正したものである。また、El-Centro地震波は短周期地震波の代表として選び原波形(最大加速度341.7Gal)で入力した。これらの振動特性試験及び地震波加振試験においては、加速度計及びレーザ型変位計を用いて主桁、主塔及び橋脚の加速度並びに変位を計測するとともに、ひずみ計を用いて塔基部の曲げモーメント及びダンパ反力を計測した。

3.3 試験結果

3.3.1 振動特性試験

振動特性試験はダンパなしの状態において実施した。正弦波掃引加振により得られた周波数応答曲線の各ピークにおけるモードを調べ、試験体の固有振動数を求めた結果の一例を図5に示す。また、各方向の1次固有振動数について減衰比を調べた結果、ほぼ構造減衰比の1%を有していることを確認した。

3.3.2 地震波加振

各入力地震波加振による最大応答変位の実測値を表2に示す。表に示すように伊豆沖地震合成波、千葉沖地震修正波などの長周期地震ではダンパなしの橋軸方向加振時の桁変位は63~66cm

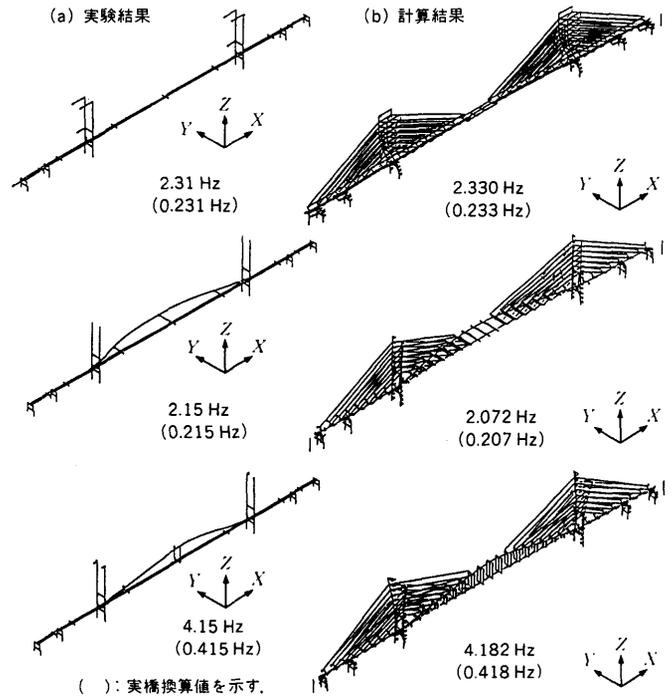


図5 固有振動数とモードの実験結果と計算結果の比較 模型の固有振動数とモードの実験結果と計算結果の比較を示す。固有振動数及びモードともに双方が良く一致している。  
Comparison of experimental results and calculated ones for natural frequency and mode of model

表2 各試験条件における最大応答値

Maximum response values for various test conditions 単位 cm

条件	橋軸方向加振		橋軸直角方向加振		
	桁		桁中央	塔頂	
	ダンパなし (h=2%)	ダンパあり			
長周期	伊豆沖地震合成波	66.0	50.3(53.9)	61.0	47.5(45.1)
	千葉沖地震修正波	63.7	52.0(51.6)	48.0	55.5
短周期	El-Centro地震波	18.7	16.3	36.0	27.0
設計計算値(応答スペクトル法)	60.4	—	79.4	82.0	—

(注) 1. 表中の値はすべて実橋変換値を示す。  
2. ( )内は時刻歴応答解析による計算値を示す。  
3. ダンパなしの場合、ダンパを線形ダンパとして用い設計減衰比の2%に調整した。

とほぼ設計計算値に近い値であるが、ダンパを設置することにより50~52cmと20%強低減している。なお、このときのダンパ反力は双方共302tであり設計限界値以下である。また、3方向成分がそろっている千葉沖地震修正波にて各方向の単軸加振、NS波及びEW波による2方向同時加振並びに3方向同時加振を行った。一例として各方向単軸加振時と3方向同時加振時の桁中央部の変位応答波形を図6に示す。図6は3方向同時加振の結果であるが、2方向同時加振及び斜め方向加振においても橋桁の応答には特異な現象は見られなかった。

4. 評価

上記試験に対応する模型解析及び実橋解析を有限要素法によるはり要素によりモデル化して実施した。ケーブルは基本的にはケーブルの引張り剛性のみを考慮してモデル化したが、橋軸直角方向加振時にはケーブルに節点を設け、ケーブルの振動を考慮した場合についても解析した。本橋には非線形減衰特性を有するオイルダンパが設置されているため時刻歴解析にて解析検討す

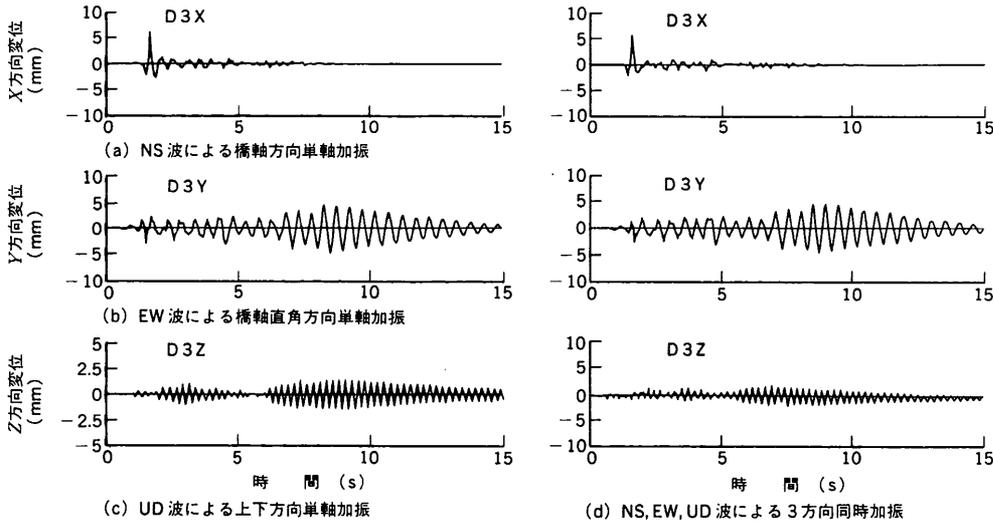


図6 単軸加振時と3方向同時加振時の桁中央部変位の比較 各方向成分の地震波による単軸加振の応答と3方向同時加振の応答との比較を示す。  
Comparison of displacement time histories at center of girder during single excitation on one direction and 3-dimensional excitation

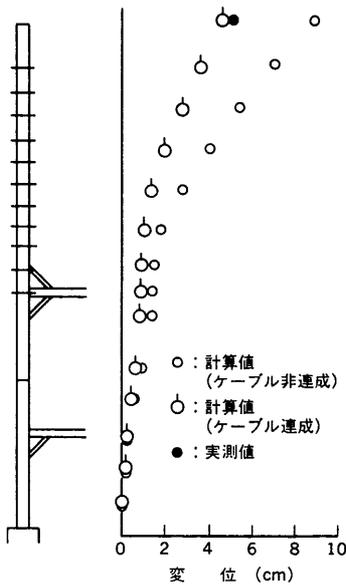


図7 主塔橋軸直角方向の最大変位分布 ケーブル振動を無視した場合と考慮した場合の主塔橋軸方向変位の計算結果と実測値の比較を示す。  
Maximum displacement distribution for pylon in perpendicular to bridge axis direction during excitation in perpendicular to bridge axis direction

の必要があり、固有値解析後、モーダル時刻歴応答解析を行った。この場合構造減衰として  $k=0.01$  を用い、両橋端には図2に示す減衰特性を有する減衰要素を挿入して解析した。まず、固有値解析結果であるが橋軸方向、橋軸直角方向及び上下方向各1次モードの計算値と実験値の比較を図5に示す。これらの結果に示すように、各方向とも計算値と実験値は良く一致しており、モデル化が妥当であることが分かる。

次に、これらの固有値解析結果を用いて地震応答解析を行った。主要な応答値の計算値と実験値との比較を表2に示す。また、一例として伊豆沖地震合成波による橋軸直角方向加振時の主塔の最大変位分布を図7に示す。橋軸方向はケーブル振動との連成を無視しても計算値と実測値は一致するが、橋軸直角方向の場合には計算値は図に示すように実測値の約2倍となっている。しかし、ケーブル振動との連成を考慮することにより両者は良く一致する。このことは、斜長橋主塔の橋軸直角方向の応答解析にはケーブル振動の存在は無視できないことを示している。

上記の試験ではオイルダンパの特性を電磁ダンパで模擬したが、縮尺率が大きく形状を相似にできなかったため、ダンパを独立した基礎に設置した。したがって、ダンパの設置方法が実橋と多少異なるため、改めて実橋解析を行い耐震安全性を照査した。この場合、図5及び表2に示すように試験結果とその解析結果は良く

一致しているので、モデル化は模型解析と同じとし、オイルダンパの設置位置のみを実橋に合わせて解析した。その結果、設計地震入力波としての伊豆沖地震合成波に対する橋軸方向の桁及び塔頂最大変位はそれぞれ 54.7 cm 及び 59.0 cm となり、これらのスペクトル応答解析による設計計算値 ( $k=0.02$ ) である 60.4 cm 及び 65.8 cm 以下となった。また、設計地震入力の約 1.4 倍の耐震安全装置設計レベルに対する橋軸方向変位及びダンパ反力はそれぞれ 71.4 cm 及び 447 t で、それぞれの設計限界値である 74 cm 及び 500 t 以下となり、安全であることを確認した。

5. む す び

東神戸大橋は免震構造として本格的にオールフリー構造を採用した最初の長大斜張橋である。この基本構造を成立させるための構造要素としては種々のものがあり、特に成立性に大きく関与しているオイルダンパの要素試験結果を踏まえ、その特性をも考慮した全体模型による耐震試験並びに応答解析を行い、本橋の耐震安全性を確認した。

本耐震試験に当たっては、東神戸大橋技術委員会耐震設計幹事会の山田善一京都大学名誉教授、土岐憲三京都大学教授、川島一彦建設省土木研究所耐震研究室長にご指導いただくとともに、総合技術コンサルタントの西森孝三氏らには貴重なご意見をいただきここに深く感謝の意を表します。また、各種のデータの提供などにご協力いただきました共同企業体関係各位に改めて感謝致します。

なお、本橋は平成5年3月に無事竣工した。大阪湾岸道路の他工区も急ピッチで工事が進められており、平成6年3月には供用の予定である。

参 考 文 献

- (1) 北沢正彦ほか, 基本構造系をオールフリーとした長周期斜張橋(東神戸大橋)の地震応答特性と耐震設計, 土木学会論文集第422号/I/14 (1990) p.343
- (2) 土岐憲三ほか, 強震記録における長周期成分の信頼度に関する研究(その3), 防災研究協会 (1987)
- (3) 山上哲示ほか, 東神戸大橋の設計と施工, 三菱重工技報 Vol 30 No.3 (1993) p.213
- (4) Kitazawa, M. et al., Seismic Test on Higashi-Kobe Bridge: Cable Stayed Bridge-Using Scale Models. ASME PVP Vol.162 (1989) p.131