

2. 兵庫県南部地震における損傷箇所

東神戸大橋は、兵庫県南部地震により落橋等の致命的な被害は受けなかったが、魚崎浜側端橋脚（海P187）のウインド支承とそれに伴うペンデル支承のピンの抜け、橋脚の局部座屈などの損傷が生じた²⁾。主な損傷の状況を図-1.1に示す。これらの損傷状況も踏まえ、耐震補強対策について検討を行った。

3. 検討内容

東神戸大橋を対象として、シナリオ地震波形³⁾および兵庫県南部地震時に東神戸大橋で観測された観測波を用いて、橋梁全体系モデルを用いた非線形時刻歴応答解析を行うことにより、橋軸方向の変位制御対策等の耐震補強対策の検討を行った。耐震補強検討フローを図-3.1に示す。

今回の耐震補強検討では、時刻歴応答解析の結果に基づき、橋軸方向には有馬高槻_A2S3、直角方向には東神戸観測波を用いることとした。加速度応答スペクトルを図-3.2、3.3に示す。

現況の耐震性能照査について表-3.1に示す。

表-3.1 耐震性能照査

橋軸方向の耐震性能照査	橋軸直角方向の耐震性能照査
・橋軸方向変位が約2.0mと大きく、ペンデル支承、ウインド支承、ペーダンバーの可能移動量を超過している。 ・橋軸水平変位の制御対策が重要な課題である。 ・橋軸方向地震時には隣接高架橋の地震力が耐震連結装置を介して端橋脚に作用する。よって、端橋脚柱基部をコンクリート充填等により補強する必要がある。	・海P186中間橋脚を除くすべてのウインド支承で水平反力が降伏水平耐力を超過する。 ・端・中間橋脚の柱および梁部材では、応答曲率が降伏曲率を超え塑性化する箇所がある。 ・端・中間橋脚の梁部材腹板のせん断ひずみは、すべての箇所以降伏せん断ひずみを超え塑性化する。

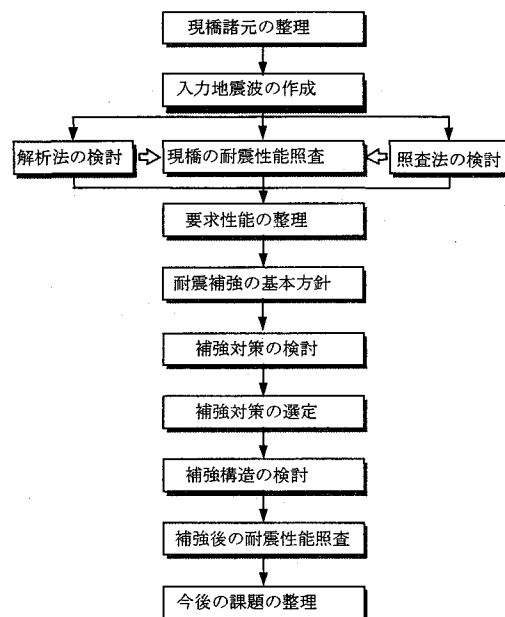


図-3.1 耐震補強検討フロー

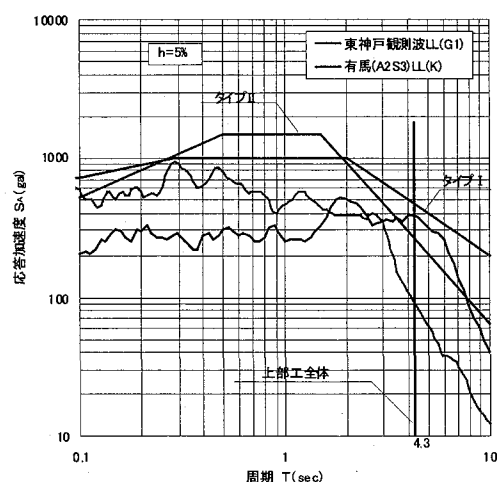


図-3.2 加速度応答スペクトル（橋軸方向）

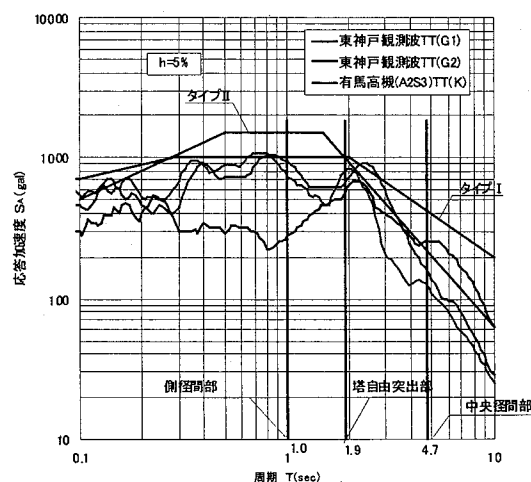


図-3.3 加速度応答スペクトル（直角方向）

4. 耐震補強対策の検討

現況の動的解析による耐震性能照査結果および要求性能に対して、東神戸大橋の耐震補強の基本方針（補強箇所および補強内容）を表-4.1のように設定した。

5. 橋軸方向変位制御対策の要求性能

東神戸大橋では、橋軸方向の支持方法としてオールフリー形式（主桁の全支点において可動）が採用されている。橋軸方向の卓越振動周期は $T=4.3$ 秒であり、橋梁全体が免震構造となっている。しかし、レベル2地震動（図-5.1）による橋軸方向変位は $\delta_c \approx 2.0$ m と大きくなる。このため、下記に示す2点が橋軸地震時の要求性能であり、耐震補強対策の重要な課題となるため、図-5.2 に示すフローに基づき検討を行った。

① 主桁と端・中間橋脚の相対変位量を可能移動量（ $\Delta \delta_s = 0.9$ m）以下とする。

② 端・中間橋脚および塔基部の応答曲げモーメントをアンカー部の曲げ耐力以下とする。

橋軸地震応答値が許容値を超過する箇所を図-5.3 に示す。これらの桁と橋脚・塔との相対変位量および塔基部の曲げモーメントの許容値を表-5.1～表-5.2 に示す。

6. 変位制御装置に関する検討

ケーブル形式の変位制御装置を塔部に設置した場合について、遊間 e_s および既設のベンダンパーの効果（0, 50, 100%）をパラメータに動的解析を行った。その結果、別途ダンパーを設置し、減衰機能を付与させることが必要となった。

表-4.1 耐震補強の基本方針

補強区分	補強箇所		補強構造・補強部材	補強内容	
変位制御	塔部		橋軸変位制御装置（ケーブル形式）	主桁と橋脚の相対変位量が既設支承等の可能移動量以下となるように橋軸方向変位を制御する。	図-4.1
支承補強	塔および端・中間橋脚		ウインド支承の補強	ウインド支承の耐力補強を行い、直角地震時水平反力に十分抵抗できる降伏水平耐力を確保する。	図-4.3
じん性補強	端橋脚	柱部材	コンクリート充填補強	コンクリート充填補強により、隣接高架橋からの橋軸地震力による局部座屈を防止する。	図-4.4
		梁部材	縦補剛材の設置	板パネルを縦補剛材で補強し、曲げ圧縮に対する座屈強度の低下を防止する。	
		梁部材	水平補剛材の設置	腹板に水平補剛材を設置し、せん断座屈強度の低下を防止する。	
	中間橋脚	梁部材	水平補剛材の設置	同上	
フェイルセーフ	端橋脚		負反力ケーブル支承	万が一、ペンデル支承が損傷した時に桁の浮上を防止するため、負反力ケーブル支承を端橋脚に設置する。	図-4.2
	塔部		緩衝装置	万が一、塔部ウインド支承が損傷した場合に主桁と塔柱とが衝突する可能性があるため、塔柱に緩衝装置を設置し、衝突力を緩和させる。	図-4.1

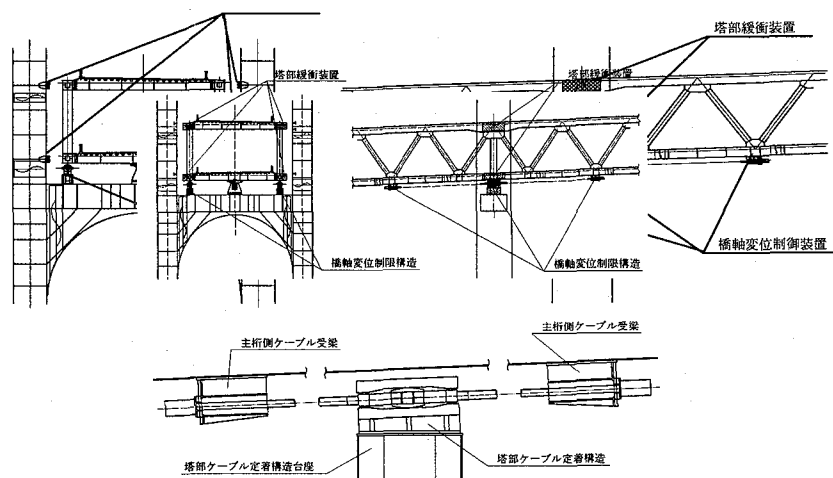
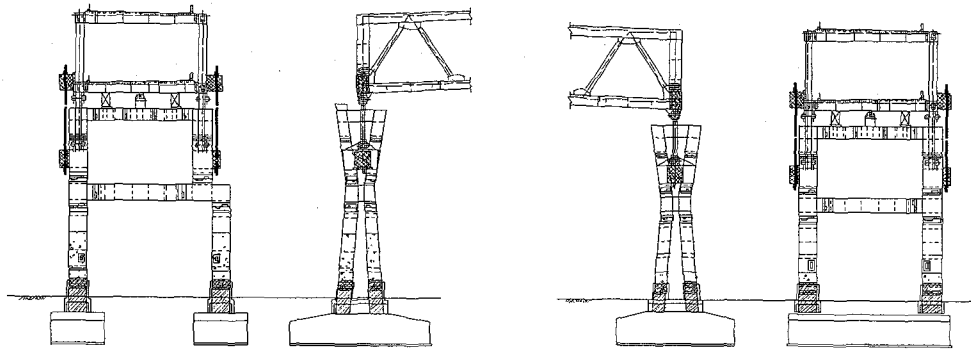


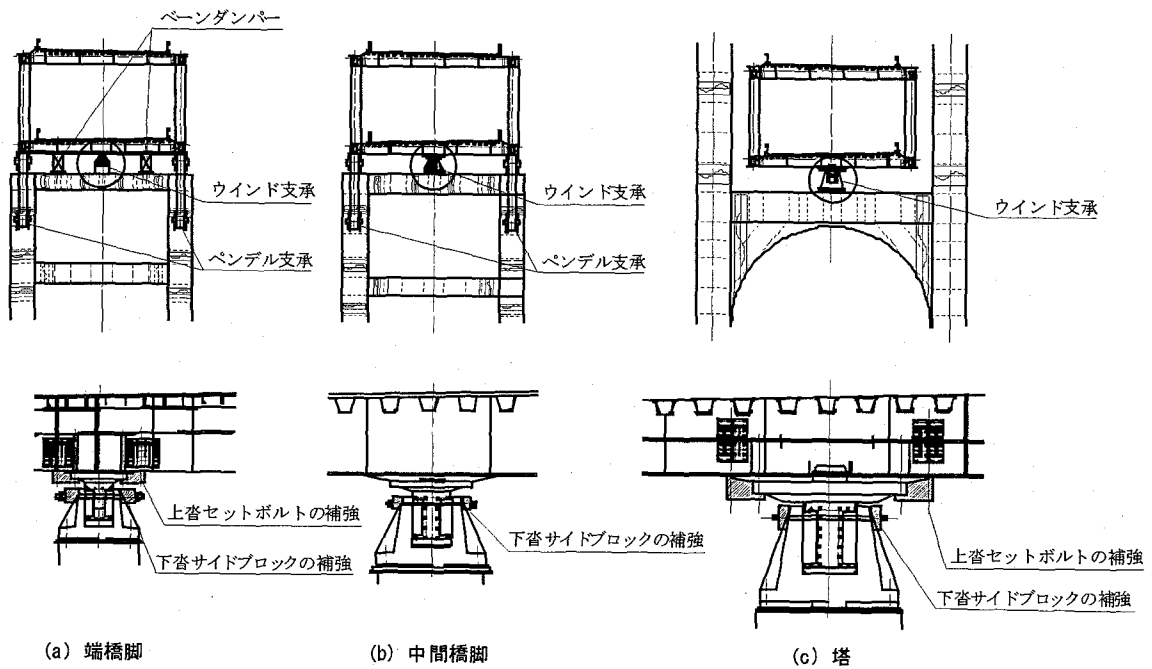
図-4.1 塔部の橋軸変位制御装置および緩衝装置



(a) 海 P187 端橋脚

(b) 海 P187 端橋脚

図-4.2 端橋脚負反力ケーブル支承

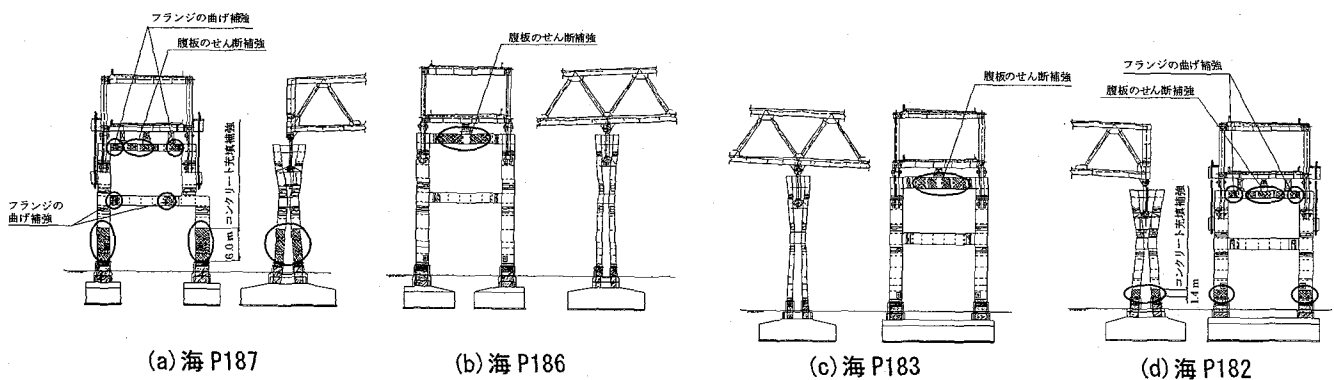


(a) 端橋脚

(b) 中間橋脚

(c) 塔

図-4.3 ウインド支承の補強



(a) 海 P187

(b) 海 P186

(c) 海 P183

(d) 海 P182

図-4.4 端・中間橋脚部材の補強

表-5.1 桁と橋脚・塔との許容変位量 $\Delta \sigma$ (mm)

項目	端橋脚	中間橋脚	塔部
ペンデル支承	1,330		—
ダンパー支承		—	—
ウィンド支承	990	990	
伸縮装置	950	—	—
桁遊間	1,450	—	—

表-5.2 塔基部の曲げ耐力 M (kN・m/塔柱)

部材	種類	曲げ耐力	備考
塔柱基部	M_{y1}	$1,110 \times 10^3$	$N_{D+PS} = 81,000 \text{ KN}$
	M_{y2}	$1,350 \times 10^3$	
	M_a	$1,550 \times 10^3$	
アンカー部	M_y	916×10^3	$T = T_y$ (ボルト)
	M_a	$1,235 \times 10^3$	$\epsilon_s = 1/10 \epsilon_E$

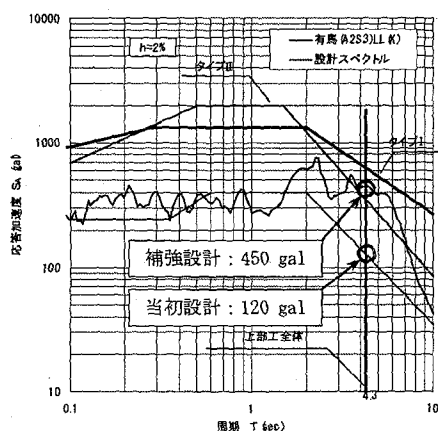


図-5.1 設計スペクトルとレベル2地震動との比較

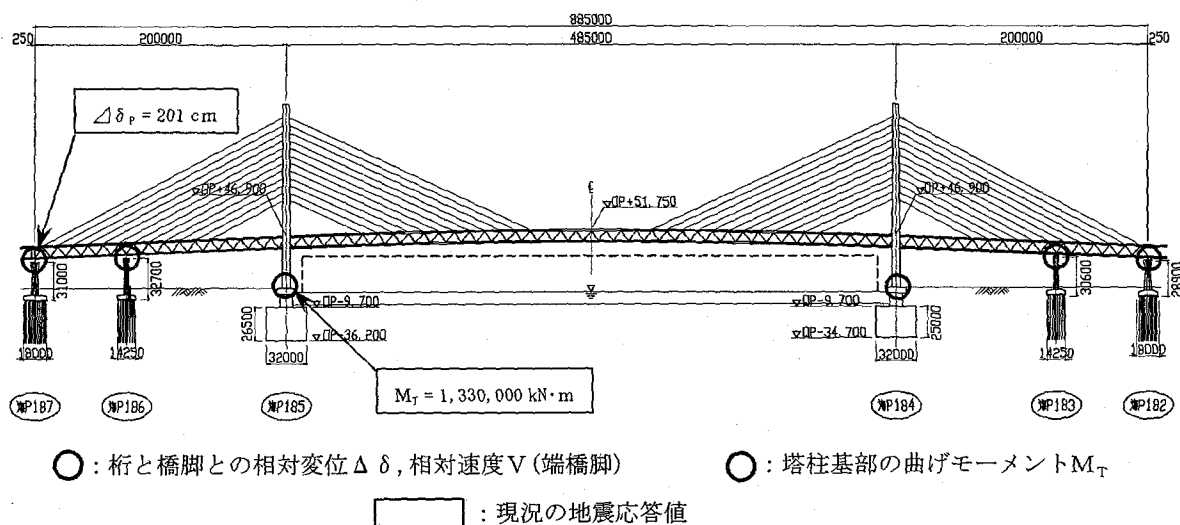


図-5.3 橋軸地震応答値が許容値を超過する箇所

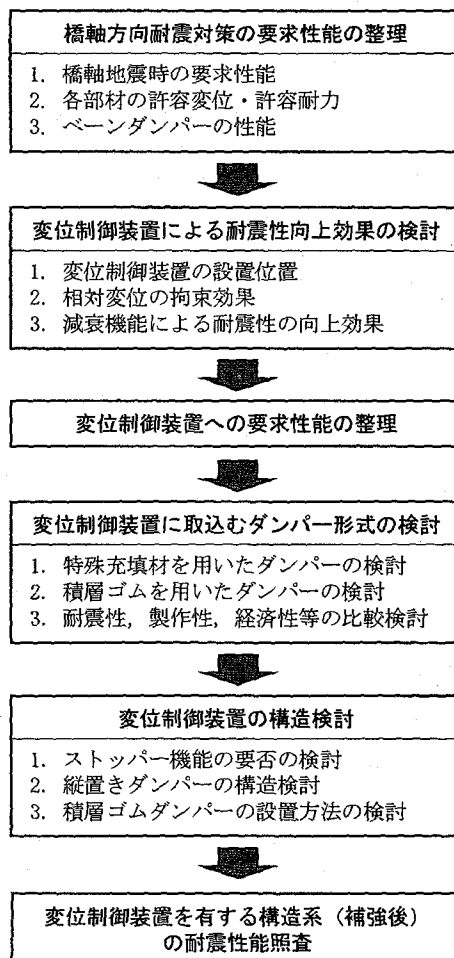


図-5.2 橋軸方向変位制御対策の検討フロー

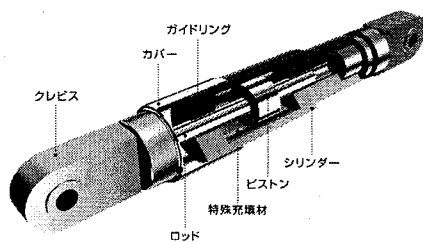
橋軸方向地震時の耐震性向上の検討結果より、変位制御装置の設置および構造に関する条件を整理すると、つぎのようになった。

- ① 端・中間橋脚の水平耐力は小さいため、変位制御装置は塔部に設置する。
- ② 変位制御装置の遊間は $e_s \approx 50 \text{ cm}$ 程度とする。（主桁と端・中間橋脚の相対変位を可能移動量以下とする条件より）
- ③ 要求性能 ①, ② を満足させるため、変位制御装置には減衰機能を付加させる。
- ④ 変位制御装置の形式について、桁と塔とを繋ぐ連結材にはケーブルを用いる。
- ⑤ 桁側のケーブル定着構造は H.T. ボルトで下弦材に取付ける構造で計画しているため、ケーブルの最大断面は、H.T. ボルトの設置本数、および下弦材に生じる応力より、断面構成 $\phi 7\text{mm} \times 283$ 本程度 ($T_y = 12,600 \text{ kN}$) となる。

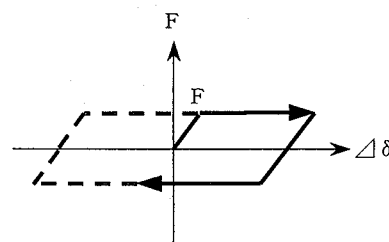
なお、塔部での設置スペースの関係から、変位制御装置と減衰装置（ダンパー）とを一体化させた構造とする。

7. 変位制御装置に組込むダンパー形式の検討

特殊充填材を用いた減衰装置（特殊充填材ダンパー）（図-7.1参照）と積層ゴムダンパー（図-7.2参照）の比較を行った。

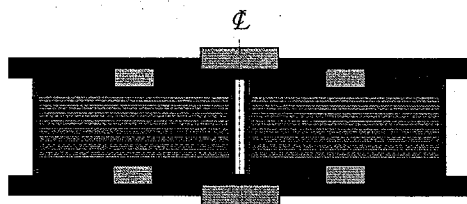


(a) 特殊充填材ダンパー

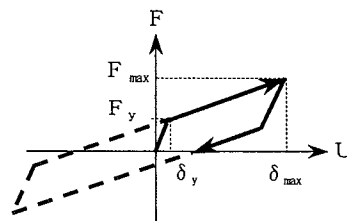


(b) 履歴曲線

図-7.1 特殊充填材を用いた減衰装置の構造と機能



(a) 積層ゴムダンパー



(b) 履歴曲線

図-7.2 積層ゴムを用いた減衰装置の構造と機能

この2形式のダンパーを有する変位制御装置の耐震性、製作性、施工性、および経済性について検討した。その比較を表-7.1に示す。

要求性能を満足できる特殊充填材ダンパーの規模は、既製品に比べてかなり大きくなるため、現状では特殊充填材ダンパーを用いた場合の変位制御装置の製作費は、積層ゴムダンパーの場合の約2倍と高くなっている。

このことから、ダンパー形式は積層ゴムダンパーを採用することとした。

8. 変位制御装置の構造検討

変位制御装置について、積層ゴムの寸法を若干大きくすることによって、ストッパーが不要になり、台座寸法がかなり小さくできることにより、製作費を約10%程度低減できることから、ストッパーは設置しないこととした。

変位制御装置に用いる積層ゴムダンパーの設置方法としては、積層ゴムを横置きする横置きタイプと、積層ゴムを縦置きする縦置きタイプが考えられる。積層ゴムの必要寸法は $1.9 \times 1.9 \text{ m}$ と大きくなるため、製作能力から図-8.1に示すように分割して製作した4個の積層ゴム ($950 \times 950 \times 200 \text{ mm}$) を鋼板で一体化させる構造とした。

縦置きタイプの構造としては、ケーブルを連結板にピン定着する構造を採用することとした。

表-7.1 変位制御装置に組み込むダンパー形式の比較

		特殊充填材ダンパー		積層ゴムダンパー																																										
構造図																																														
	温度変化の影響	温度変化による主桁と塔との相対変位は、非常に緩やかに生じるため、ダンパーの拘束力は発生しない。	◎	温度変化により主桁と塔間に約80mmの相対変位が働くが、これによる積層ゴムダンパーの拘束力は小さく、塔基部の応力への影響はほとんどない。	○																																									
耐震性		要求性能はすべて満足している	◎	要求性能はすべて満足している	◎																																									
製作性	減衰装置	最大ストロークが既製品最大値の2倍と大きい。開発が必要となる。また、ストロークがeS=50cmのとき、製作上等の理由から最大拘束力Fmax=1,500kNとなる。このため、要求性能を満足させるには1箇所(1基)あたりダンパーを2本設置する必要がある。	△	要求性能を満足する積層ゴムダンパーの平面寸法は、1.75×1.75mとなる。この寸法は、実績の最大値に相当する大きな寸法である。	△																																									
	変位制御装置	ダンパーを包み込む変位制御シリンダーの構造は、大きな鋼製となり、かつ機械加工が多い	△	ケーブルの定着ブロックは鋼製となるが、他の部材はすべて溶接構造で製作可能である	○																																									
施工性	新設装置の設置	最大ブロック重量は、ダンパーを包み込むシリンダー構造(上下2分割)の下層部で、約20tと重い	△	最大ブロック重量は、積層ゴムダンパーであり、10t程度となる。	○																																									
	既設部材の補強	追加の補強は不要	○	追加の補強は不要	○																																									
経済性		2本のダンパーを包み込むシリンダーの製作費が高いため、全体製作費が形式-Bの約2倍となっている。	△	溶接構造が主体となっており、全体製作費は形式-Aより安くできる。	○																																									
		<table><caption>変位制御装置全体の製作費</caption><thead><tr><th>部材</th><th>製作費</th><th>備考</th></tr></thead><tbody><tr><td>ケーブル</td><td>0.23</td><td>2×φ7mm×241本</td></tr><tr><td>桁梁定着構造</td><td>0.06</td><td></td></tr><tr><td>減衰装置</td><td>0.72</td><td>2本×1,250kg</td></tr><tr><td>変位制御装置</td><td>0.89</td><td>鋼製シリンダー</td></tr><tr><td>台座</td><td>0.05</td><td></td></tr><tr><td>合計</td><td>1.95</td><td></td></tr></tbody></table> 製作費は、形式-Bのものを1.0とした時の比率で表している	部材	製作費	備考	ケーブル	0.23	2×φ7mm×241本	桁梁定着構造	0.06		減衰装置	0.72	2本×1,250kg	変位制御装置	0.89	鋼製シリンダー	台座	0.05		合計	1.95			<table><caption>変位制御装置全体の製作費</caption><thead><tr><th>部材</th><th>製作費</th><th>備考</th></tr></thead><tbody><tr><td>ケーブル</td><td>0.27</td><td>2×φ7mm×243本</td></tr><tr><td>桁梁定着構造</td><td>0.06</td><td></td></tr><tr><td>減衰装置</td><td>0.44</td><td>Fmax=2,000kgに準じた防振装置</td></tr><tr><td>変位制御装置</td><td>0.14</td><td>ストッパー、定着ブロック</td></tr><tr><td>台座</td><td>0.09</td><td></td></tr><tr><td>合計</td><td>1.00</td><td></td></tr></tbody></table>	部材	製作費	備考	ケーブル	0.27	2×φ7mm×243本	桁梁定着構造	0.06		減衰装置	0.44	Fmax=2,000kgに準じた防振装置	変位制御装置	0.14	ストッパー、定着ブロック	台座	0.09		合計	1.00	
部材	製作費	備考																																												
ケーブル	0.23	2×φ7mm×241本																																												
桁梁定着構造	0.06																																													
減衰装置	0.72	2本×1,250kg																																												
変位制御装置	0.89	鋼製シリンダー																																												
台座	0.05																																													
合計	1.95																																													
部材	製作費	備考																																												
ケーブル	0.27	2×φ7mm×243本																																												
桁梁定着構造	0.06																																													
減衰装置	0.44	Fmax=2,000kgに準じた防振装置																																												
変位制御装置	0.14	ストッパー、定着ブロック																																												
台座	0.09																																													
合計	1.00																																													
総評		並列配置する2本のダンパーが地震時に一体となって機能する構造の実現性、および安価な鋼製シリンダー構造が開発、の2点がポイントとなる。	△	偏心曲げが作用する状態で、ゴムダンパーが所定の機能を発揮できるかがポイントであり、積層ゴムダンパーの設置方法、変位制御装置への取付方法など構造全体について検討が必要	○																																									

積層ゴムダンパーの縦置きタイプと横置きタイプについて、構造的（ダンパーの機能）、製作性、施工性、経済性について検討した。その比較を表-8.1に示すが、総括すると次のようになる。

- ① 横置きタイプではケーブル張力が作用する際、積層ゴムダンパーに水平力とともに偏心曲げモーメントが作用する。この曲げにより積層ゴムに回転変位が生じ、ダンパーのスムーズな動きが阻害される。
- ② 製作性については、両方で優位差はない。
- ③ 最大ブロック重量は、縦置きタイプの方が軽くできるが、現地での組立については、横置きの方が若干有利である。
- ④ 経済性については、縦置きタイプの方が製作費が10%程度安くなる。

以上より、積層ゴムダンパーの設置方法については、ダンパーの機能性、経済性で有利な縦置きタイプを採用することとした。

積層ゴムダンパーを用いた変位制御装置を設置したときの主要点の地震応答値を表-8.2に、変位制御装置の構造図を図-8.1に示す。

9. まとめ

東神戸大橋を対象として、シナリオ地震波形および兵庫県南部地震時に東神戸大橋で観測された観測

波を用いて、橋梁全体系モデルを用いた非線形時刻歴応答解析を行うことにより、橋軸方向の変位制御対策等の耐震補強対策を検討した。以下に知見を示す。

- ・ 東神戸大橋におけるレベル2の橋軸地震時における要求性能は、以下の2点となった。
 - ① 主桁と端・中間橋脚の相対変位量を可能移動量($\Delta\delta_s=0.9\text{m}$)以下とする。
 - ② 端・中間橋脚および塔基部の応答曲げモーメントをアンカー部の曲げ耐力以下とする。
- ・ ケーブルとダンパーとを組合せた変位制御装置を主塔梁部に設置することにより、上記①、②を満足することが確認された。
- ・ なお、変位制御装置に組み込むダンパーとしては、積層ゴムダンパーを採用することとし、ダンパーの設置方法については、機能性、経済性で有利な縦置きタイプを採用することとした。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：東神戸大橋工事誌、1994.5
- 2) 土木学会 阪神淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 橋梁、pp.313-324、1996.12
- 3) 阪神高速道路公団・（財）地域地盤環境研究所：大阪湾岸部における長周期構造物用入力地震動検討業務報告書、2003.3

表-8.1 積層ゴムダンパーの設置方法による比較

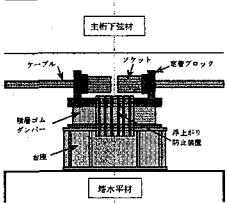
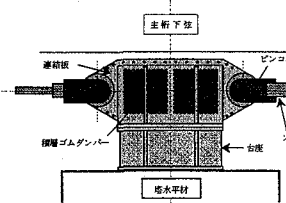
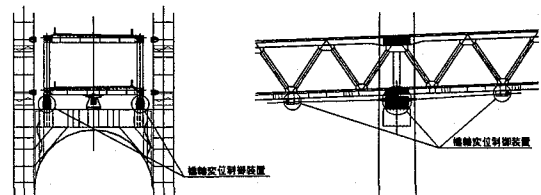
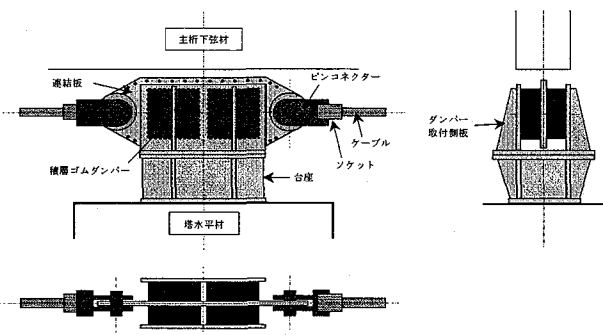
	横置きタイプ	縦置きタイプ																																													
構造図																																															
耐震性	要求性能はすべて満足している	要求性能はすべて満足している																																													
構造性	下図に示すように、ケーブル張力により積層ゴムダンパーには偏心曲げが作用する。浮上がり防止装置を設置しているが、回転変位が生じるため、ダンパーのスムーズな動き(水平移動)が阻害される。 	作用位置(T)に対して積層ゴムが対称に配置されていることから、偏心曲げがほとんど作用せず、積層ゴムダンパーはスムーズに水平移動できる。 																																													
製作性	・4個の積層ゴムダンパーをせん断キーと鋼板で一体化させる。 ・ケーブルの定着ブロックは鉄鋼製とする。	・2個の積層ゴムをせん断キーと鋼板で一体化させる。 ・一体化した2組みの(連結板+積層ゴム+鋼板)をH.T.ボルトで連結する。																																													
施工性	新設装置の設置 最大ブロック重量は積層ゴムダンパーであり、約12 t(4個を一体化した重量)と重い。 既設部材の補強 補強は不要	新設装置の設置 最大ブロック重量は、積層ゴムダンパーを2分割することにより約5t(2倍軽い)。 既設部材の補強 補強は不要																																													
経済性	積層ゴムダンパーの平面寸法が大きいこと、定着ブロックが鉄鋼品であること、浮上がり防止装置が必要となること、等により全体製作費は縦置きタイプより高くなる。 変位制御装置全体の製作費 <table border="1"> <thead> <tr> <th>部材</th> <th>製作費</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ケーブル</td> <td>0.30</td> <td>φ7mm×120本</td> </tr> <tr> <td>定着ブロック</td> <td>0.12</td> <td>φ7mm×120本</td> </tr> <tr> <td>新設変位制御装置</td> <td>0.05</td> <td>φ7mm×120本</td> </tr> <tr> <td>積層ゴムダンパー</td> <td>0.12</td> <td>上・下鋼板を含む</td> </tr> <tr> <td>浮上がり防止装置</td> <td>0.03</td> <td></td> </tr> <tr> <td>台座</td> <td>0.07</td> <td></td> </tr> <tr> <td>合計</td> <td>1.09</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> 製作費は、縦置きタイプの合計を1.0として、横置きの比率で図している。	部材	製作費	備考	ケーブル	0.30	φ7mm×120本	定着ブロック	0.12	φ7mm×120本	新設変位制御装置	0.05	φ7mm×120本	積層ゴムダンパー	0.12	上・下鋼板を含む	浮上がり防止装置	0.03		台座	0.07		合計	1.09		ケーブルのピンコネクターの製作費が高いが、全体製作費は若干安くできる。 変位制御装置全体の製作費 <table border="1"> <thead> <tr> <th>部材</th> <th>製作費</th> <th>備考</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ケーブル</td> <td>0.30</td> <td>φ7mm×120本</td> </tr> <tr> <td>新設変位制御装置</td> <td>0.05</td> <td>φ7mm×120本</td> </tr> <tr> <td>積層ゴムダンパー</td> <td>0.02</td> <td>連結板を含む</td> </tr> <tr> <td>ピンコネクター</td> <td>0.03</td> <td></td> </tr> <tr> <td>台座</td> <td>0.04</td> <td></td> </tr> <tr> <td>合計</td> <td>1.04</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	部材	製作費	備考	ケーブル	0.30	φ7mm×120本	新設変位制御装置	0.05	φ7mm×120本	積層ゴムダンパー	0.02	連結板を含む	ピンコネクター	0.03		台座	0.04		合計	1.04	
部材	製作費	備考																																													
ケーブル	0.30	φ7mm×120本																																													
定着ブロック	0.12	φ7mm×120本																																													
新設変位制御装置	0.05	φ7mm×120本																																													
積層ゴムダンパー	0.12	上・下鋼板を含む																																													
浮上がり防止装置	0.03																																														
台座	0.07																																														
合計	1.09																																														
部材	製作費	備考																																													
ケーブル	0.30	φ7mm×120本																																													
新設変位制御装置	0.05	φ7mm×120本																																													
積層ゴムダンパー	0.02	連結板を含む																																													
ピンコネクター	0.03																																														
台座	0.04																																														
合計	1.04																																														
総評	・偏心曲げが作用するため、積層ゴムダンパーの機能性は形式-Aに比べ劣る。 ・製作費が縦置きタイプより高くなる。	・積層ゴムダンパーには偏心曲げがほとんど作用しないことから、積層ゴムダンパーの水平移動はスムーズであり、構造性に優れる。 ・経済性において、若干優位である。																																													

表-8.2 橋軸方向地震による応答値

項目 / 着目点		記号	単位	応答値	許容値	
加速度 (中央径間中央)		A_G	gal	309		
水平変位 (中央径間中央)		δ_c	m	0.722		
水平変位	海 P187	δ_{P1}	m	0.013	$\Delta \delta_{P1a}=0.09$	
	海 P186	δ_{P2}	"	0.035	$\Delta \delta_{P2a}=0.11$	
	海 P185	δ_T	"	0.164		
相対変位	海 P187	$\Delta \delta_{P1}$	m	0.720	$< \Delta \delta_{P1a}=0.90$	
	海 P186	$\Delta \delta_{P2}$	"	0.684	$< \Delta \delta_{P2a}=0.94$	
	海 P185	$\Delta \delta_T$	"	0.458	$< \Delta \delta_{Ta}=1.00$	
ケーブル 張力	側	11 段目	T_{c11}	kN	1,710	$< T_{EQa}=11,790$
		12 段目	T_{c12}	"	3,820	$< T_{EQa}=12,580$
	中	12 段目	T_{c12}'	"	3,570	$< T_{EQa}=12,580$
		11 段目	T_{c11}'	"	1,500	$< T_{EQa}=11,790$
ケーブル張力		T_S	kN	11,200	$< T_v = 12,600$	
積層ゴムの水平変位		$\Delta \delta_D$	m	0.458	$< \Delta \delta_{Da}=0.50$	
塔基部の水平力		H_T	kN	19,800		
塔基部の曲げモーメント		M_T	kN・m	756,000	$< M_v = 916,000$	
塔基部の応答曲率		ϕ_T	1/m	0.408×10^{-3}	$< \phi_v=0.60 \times 10^{-3}$	
塔ケース基礎	水平変位	δ_f	mm	1.64		
	回転角	θ_f	mrads	0.260	$< \theta_{fa} = 3.0$	



(a) 変位制御装置の全体構造



(b) 積層ゴムを用いた減衰機能(ダンパー)

図-8.1 橋軸方向変位制御装置の構造