

(85) ゴムの圧縮変形を利用した地震時水平力分散装置を用いた橋梁の設計施工

立命館大学理工学部土木工学科	工博 伊津野和行
ドーピー建設工業 (株) 大阪支店	正会員○小林 義信
ドーピー建設工業 (株) 大阪支店	正会員 白谷 智之
東京ファブリック工業 (株) 大阪営業所	吉野 伸

1. はじめに

橋梁を多径間連続化することにより、構造上の弱点である桁端部を減らすことや、走行性を改善することが可能である。しかし、支承の選定によっては、温度応力や地震時の水平力分散方法に問題が生じる。特に平成7年1月の阪神・淡路大震災以降、橋梁の地震時における挙動を改善するために、支承構造への要求性能が高まり、平成8年には道路橋示方書の改定に至っている。

現在タイプB支承のひとつとして、ゴムのせん断変形を利用した地震時水平力分散ゴム沓が多く用いられている。しかし、地震時水平力分散ゴム沓はゴム本体に鉛直荷重と地震時水平力を受け持たせるため、両者の機能を満足するように設計を行ったとき、沓本体が大きなものになってしまいコスト増加の傾向にある。

そこで、鉛直荷重と地震時水平力を受け持つ機能を分離し、その各々について支承構造を設計できれば、より合理的な設計とコスト縮減効果が期待できる。

本稿では、地震時水平力分散機能を有する機能分離型支承として、鉛直荷重はスライド沓に、地震時水平力は水平力分散装置に受け持たせる、DSR工法を採用した橋梁の設計施工を報告する。

2. 工事概要

2-1 橋梁概要

本橋は、兵庫県水上郡水上町横田地先に位置する、橋長 252.675m の 9 径間連続 PC 中空床版橋である (図-1)。平面線形 R=1105m の、緩やかなカーブ区間にある。

当初、支承構造に地震時水平力分散ゴム沓が計画されていたが、コスト縮減効果を含め、機能分離型支承の検討を行った結果、DSR工法が採用された。

橋 名：横田東高架橋	路 線：近畿豊岡自動車道 春日和田山道路
上 部 工：9 径間連続 PC 中空床版橋	下 部 工：逆 T 式 A 1 橋台 1 基、壁式橋脚 9 基
橋 長：252.675 m	支 間 長：26.000 + 4@26.600 + 3@30.000 + 29.475 m
有効幅員：10.500 m	桁 高：1.350 m
基 礎：場所打ち杭基礎 (第Ⅲ種地盤)	

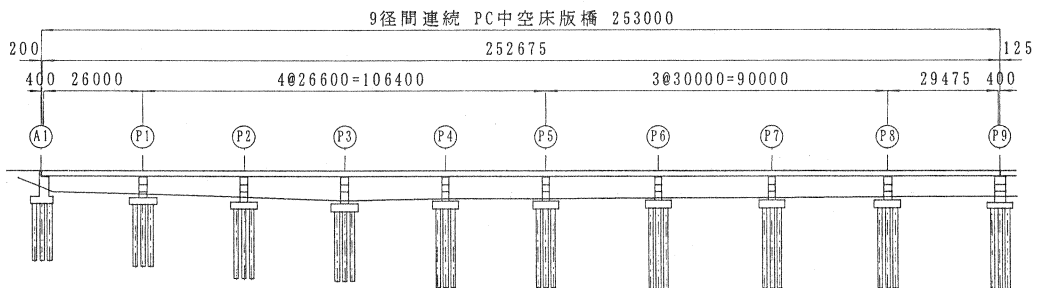


図-1 橋梁側面図

2-2 支承概要

DSR工法は支承に スライド沓などの可動沓を使用し、従来のアンカーボルトの部分に 地震時水平力分散装置であるDSR装置を設置する。

DSR装置の特徴は ゴムの圧縮バネを利用して各橋脚に水平力を分散させる構造にある。アンカーバーとアンカーキャップを矩形断面にし、アンカーバーを挟み橋軸方向両側に板状のゴムを配置する(図-2)。

このとき、板状のゴムをそのまま用いるとバネ定数が大きくなりすぎ、温度変化やコンクリートのクリープ・乾燥収縮による水平力も大きくなる。このままでは多径間の橋梁への適用が不可能になるため、数個の穴を開けバネ定数を調整した(図-3)。この板状の伸縮パッキンを更に重ね合わせ、バネ定数を適切に設定することで、地震時の挙動の改善と多径間の橋梁への適用を可能にできた。

横田東高架橋で採用されたスライド沓、DSR装置及び支承配置を下図に示す(図-4、図-5)。

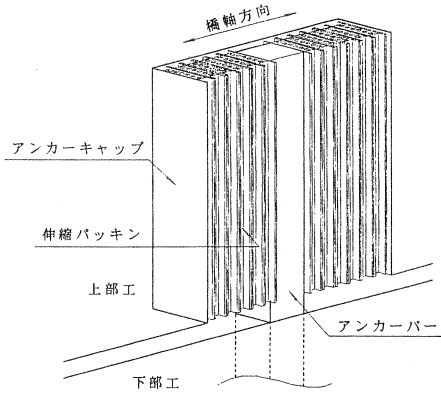


図-2 DSR装置概念図

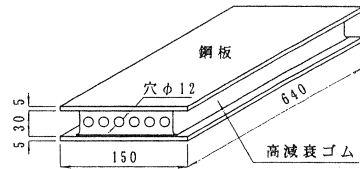


図-3 伸縮パッキン

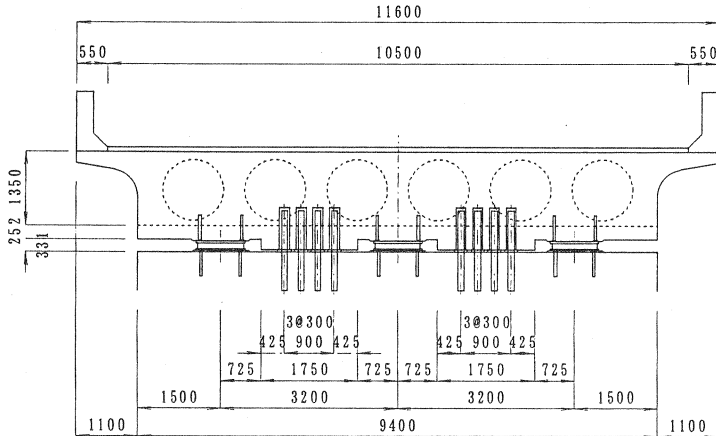


図-4 支承配置断面図

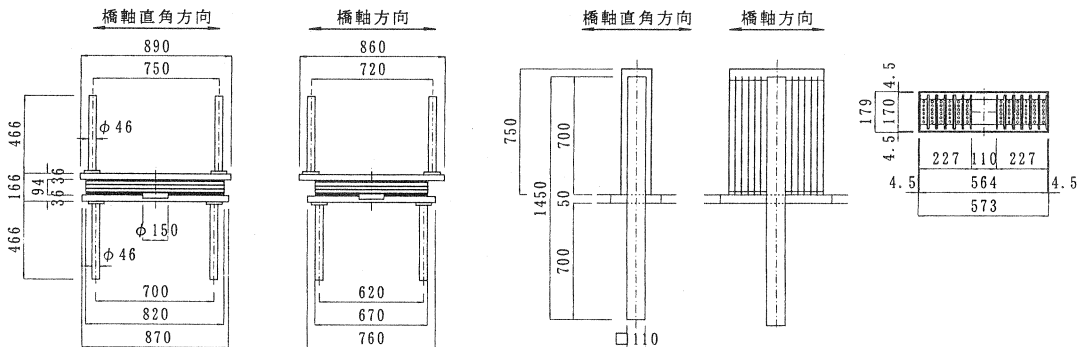


図-5 スライドゴム沓 および DSR装置

3. DSR装置の設計

3-1 DSR装置の地震応答

DSR装置の地震応答を図-6に示す。

ゴムの圧縮変形を用いた場合、せん断変形の場合に比べハードニング現象の影響が大きい。設計にあたっては、この地震応答を図-7に示すようなマルチリニア型履歴復元力特性にモデル化し、非線形バネとして評価することで、設計が可能である<sup>2)</sup>。

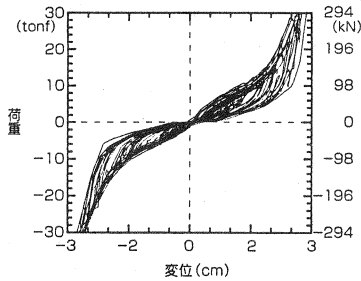


図-6 地震時保有水平耐力レベル波形に対する地震応答

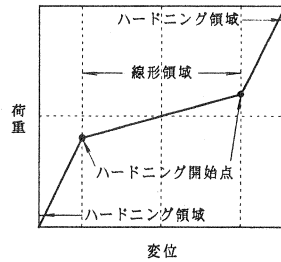


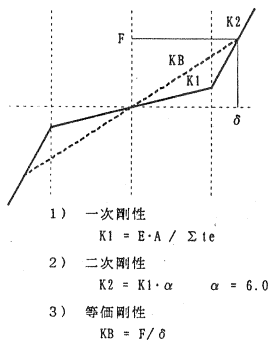
図-7 マルチリニア型履歴復元力特性

3-2 地震時水平力分散の計算

マルチリニア型モデルの係数はゴムの形状から初期剛性を定め、孔の直径をもとにハードニングを開始する変位を決定した。ハードニング開始変位はこれまでの載荷実験の結果から、ゴム厚の25%とした。第2剛性についても、実験結果から6倍となる剛性を評価した(図-8)。

水平力分散の計算フローを図-9に示す。分散率の計算は非線形バネから等価剛性を算定し、これに橋脚のパネを考慮した等価バネを算出することで、地震時水平力分散率などと同様の手順で算出した。

ただし、DSR装置の等価剛性は、設計水平震度、負担する水平力により変化するため、初期に仮定した設計水平震度、水平力と、分散率算出後の設計水平震度、水平力が一致するまで、繰り返し計算することにより求めた(表-1)。



- 1) 一次剛性  
 $K1 = E \cdot A / \Sigma t e$
- 2) 二次剛性  
 $K2 = K1 \cdot \alpha \quad \alpha = 6.0$
- 3) 等価剛性  
 $KB = F / \delta$

図-8 等価剛性

表-1 水平力分散の計算結果

橋脚	一次剛性 tf/cm	二次剛性 tf/cm	等価剛性 tf/cm	橋脚パネ tf/cm	合成パネ tf/cm	分散率 %
P1	31.104	186.616	69.800	150.000	47.634	13.49
P2	31.104	186.616	65.192	130.000	43.419	12.30
P3	31.104	186.616	58.936	110.000	38.375	10.87
P4	34.456	206.720	73.720	110.000	44.139	12.50
P5	34.456	206.720	73.424	110.000	44.033	12.47
P6	34.456	206.720	77.944	120.000	47.252	13.38
P7	33.496	200.976	67.544	130.000	44.449	12.59
P8	33.496	200.976	68.856	120.000	43.751	12.39
				合計	353.053	

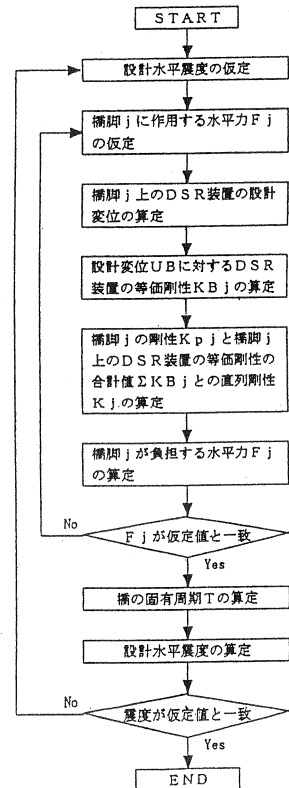


図-9 水平力分散の計算フロー

4. 動的解析

震度法及び地震時保有水平耐力法で耐震設計した安全性を、動的解析により照査した(図-10)。

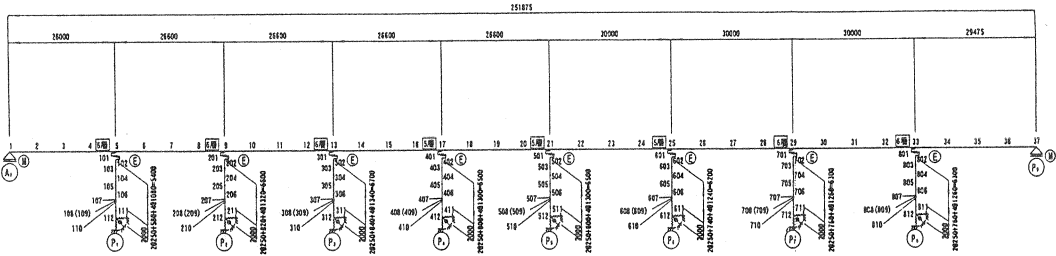


図-10 骨組みモデル

照査項目として、橋脚の塑性ヒンジ部の応答回転角と応答残留変位に着目した。

動的解析による減衰の評価方法は、道路橋示方書V耐震設計編に示される等価減衰数を用い個々のモード減衰を算出し、そのモード減衰と振動数によって算定されるレーリー減衰によって評価した。

解析に用いた等価減衰数は、上部構造：0.05、支承：0.06、下部構造：0.05、基礎構造：0.2とした。DSR装置は伸縮バックキンに高減衰ゴムを用い、6%の履歴減衰があるため、これを支承部に評価した。

また、スライド沓の最大静止摩擦係数 $\mu=0.1$ とし、最大静止摩擦力 $F=\mu \cdot R d$ を越えるとすべりだす(図-11)のような復元力特性を考慮した。スライド沓は完全塑性に近い履歴曲線を持ち、エネルギー吸収には有利な構造であるが、復元力を持っていない。これに復元力を持つDSR装置を併用することによって、その特性を有効に活かすことができる。

動的解析の結果を表-2、表-3に示す。橋脚塑性ヒンジ部の応答回転角及び応答残留変位は許容値以内となり、照査を満足する結果となった。橋脚のせん断力分担率についても、静的に求めた分散率と一致することを確認できた。

また、装置の最大応答変位は85.2mmとなり、地震時水平力分散ゴム沓などと比べ、かなり小さな値になった。これはハードニングにより変位応答が小さく抑えられた結果による。DSR装置は構造的にアンカーバーなどの落橋防止装置と同じ構造であるため、基本性能としての地震時水平力分散機能に加え、過大な変位を止める落橋防止機能を兼ね備えることも可能と考える。

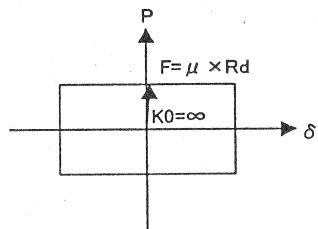


図-11 スライド沓の復元力特性

表-2 橋脚の塑性回転角 および 残留変位

(1) タイプ1地震動

	応答回転角				許容回転角 rad	応答値/ 許容値
	T11	T12	T13	平均		
P1	3.835E-03	4.277E-03	4.129E-03	4.080E-03	4.382E-03	0.93
P2	3.328E-03	3.587E-03	4.192E-03	3.702E-03	4.289E-03	0.86
P3	3.181E-03	3.425E-03	3.866E-03	3.491E-03	4.173E-03	0.84
P4	3.949E-03	4.357E-03	3.940E-03	4.149E-03	4.294E-03	0.97
P5	4.009E-03	3.145E-03	3.657E-03	3.604E-03	3.770E-03	0.96
P6	4.102E-03	3.651E-03	3.003E-03	3.585E-03	3.866E-03	0.93
P7	3.289E-03	3.607E-03	4.159E-03	3.685E-03	3.955E-03	0.93
P8	3.270E-03	3.787E-03	4.353E-03	3.803E-03	3.952E-03	0.96

(2) タイプ2地震動

	応答回転角				許容回転角 rad	応答値/ 許容値
	T11	T12	T13	平均		
P1	8.120E-03	7.122E-03	7.217E-03	7.486E-03	1.501E-02	0.50
P2	6.961E-03	6.341E-03	6.347E-03	6.550E-03	1.461E-02	0.45
P3	6.527E-03	6.021E-03	5.871E-03	6.140E-03	1.498E-02	0.41
P4	7.759E-03	7.109E-03	7.300E-03	7.389E-03	1.463E-02	0.51
P5	7.626E-03	7.011E-03	6.935E-03	7.191E-03	1.269E-02	0.57
P6	7.868E-03	7.214E-03	7.434E-03	7.505E-03	1.305E-02	0.58
P7	6.894E-03	6.439E-03	6.435E-03	6.596E-03	1.338E-02	0.49
P8	6.947E-03	6.473E-03	6.488E-03	6.636E-03	1.338E-02	0.50

	応答残留変位				許容残留変位 mm	応答値/ 許容値
	T11	T12	T13	平均		
P1	3.7	8.3	12.9	8.3	54	0.15
P2	4.2	10.5	10.6	8.4	66	0.13
P3	5.8	10.1	7.2	7.7	67	0.11
P4	4.5	14.3	11.7	10.2	65	0.16
P5	7.6	10.6	9.2	9.1	65	0.14
P6	6.9	14.2	10.4	10.5	62	0.17
P7	4.2	12.3	8.5	8.3	63	0.13
P8	5.6	14.5	13.4	11.2	63	0.18

	応答残留変位				許容残留変位 mm	応答値/ 許容値
	T11	T12	T13	平均		
P1	5.0	12.9	10.6	9.5	54	0.18
P2	6.9	11.6	11.6	10.0	66	0.15
P3	4.0	15.9	8.6	9.5	67	0.14
P4	1.9	17.0	12.1	10.3	65	0.16
P5	6.0	14.7	10.6	10.4	65	0.16
P6	4.2	17.0	15.4	12.2	62	0.20
P7	2.3	12.4	10.7	8.5	63	0.13
P8	4.0	13.7	13.2	10.3	63	0.16

表-3 分担せん断力およびD S R装置変位量 (最大応答値)

(1) タイプ1地震動

	分担力				比率 %
	T11	T12	T13	平均	
P1	720.2	612.6	678.5	670.4	14.05
P2	590.5	502.9	546.0	546.5	11.45
P3	569.1	468.0	519.9	519.0	10.87
P4	646.7	541.4	599.1	595.7	12.48
P5	664.7	547.2	612.7	608.2	12.74
P6	703.4	584.4	653.1	647.0	13.56
P7	643.2	550.5	589.5	594.4	12.45
P8	629.1	553.8	591.2	591.4	12.39
Σ	5166.9	4360.8	4790.0	4772.6	100.00

(2) タイプ2地震動

	分担力				比率 %
	T21	T22	T23	AVE	
P1	968.6	924.3	913.5	935.5	14.37
P2	796.9	737.6	725.7	753.4	11.58
P3	741.8	706.0	695.5	714.4	10.98
P4	841.2	794.5	778.2	804.6	12.36
P5	846.1	803.6	792.2	814.0	12.51
P6	903.0	861.8	849.5	871.4	13.39
P7	839.7	798.3	785.4	807.8	12.41
P8	841.4	791.7	788.7	807.3	12.40
Σ	6778.7	6417.8	6328.7	6508.4	100.00

	ゴム全厚	ゴム変位			
	mm	T11	T12	T13	平均
P1	180	71.3	69.7	69.2	70.1
P2	180	64.0	63.2	63.3	63.5
P3	180	62.1	62.5	62.4	62.3
P4	150	56.2	55.1	56.6	56.0
P5	150	56.2	56.1	57.7	56.7
P6	150	59.0	62.6	63.5	61.7
P7	180	63.4	61.3	61.9	62.2
P8	180	63.5	69.8	69.2	67.5

	ゴム全厚	ゴム変位			
	mm	T21	T22	T23	AVE
P1	180	85.2	83.0	73.9	80.7
P2	180	75.4	72.8	73.3	73.8
P3	180	73.1	71.2	72.0	72.1
P4	150	67.4	65.2	65.8	66.1
P5	150	66.2	64.5	65.1	65.3
P6	150	70.1	67.6	67.3	68.3
P7	180	75.2	72.9	73.0	73.7
P8	180	74.6	71.2	72.4	72.7

5. 施工

5-1 予備変形

本橋は桁長 252.675mのため、5分割施工を採用している。そこで、小型化と装置が中立状態に保たれることを目的に、予備変形を行った。

予備変形にはプレストレスによる弾性短縮量、クリープ・乾燥収縮量及び設置時期の温度を考慮し、上部工の標準温度、クリープ・乾燥収縮終了時に、中立状態になるよう設計した。

予備変形は製作時に工場内で実施し、アンカーキャップ頂部のせん断ボルトと、底部のせん断キーで仮固定する構造とした。仮固定の解放方法は、主桁プレストレス導入時にそれぞれの切断誘発用の切り込み位置で、破断する構造 (図-12) を採用した。

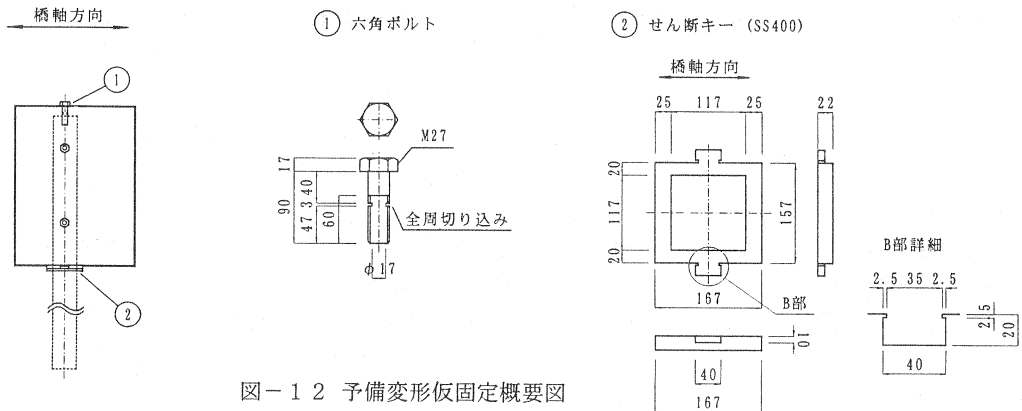


図-12 予備変形仮固定概要図

5-2 施工手順

D S R装置の設置方法は 従来のアンカーボルトの設置と同じ方法で行えた。作業手順を以下に示す。

- ① 下部工のアンカー孔にD S R装置を仮固定する。
- ② アンカー孔に無収縮モルタルを注入し固定する (写真-1)。
- ③ 上下部工の間には防食材を配置する (写真-2)。
- ④ 下部工に固定後、上部工の鉄筋・型枠を組み立ててコンクリートを打設する。

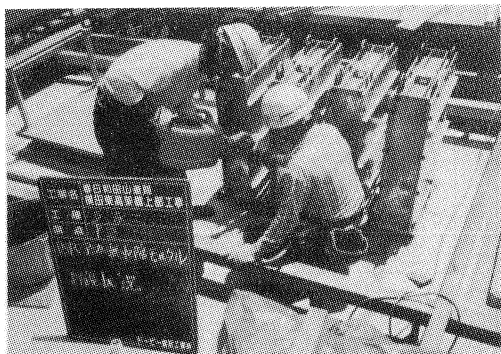


写真-1 無収縮モルタル注入状況

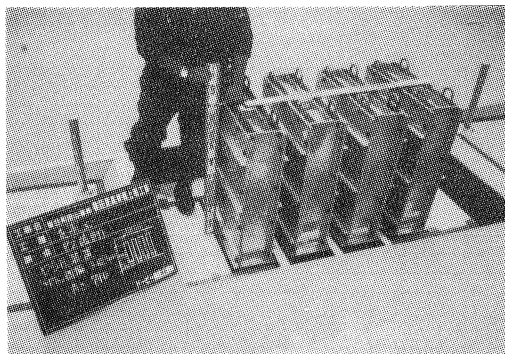


写真-2 DSR装置配置状況

## 6. おわりに

本橋は平成13年6月の竣工に向けて現在施工中である。これまでの施工を通じ、DSR装置の設計、動的解析、予備変形の対応、施工性、経済性など、一連の設計施工を確認することができた。

工費については、地震時水平力分散ゴム沓を用いたタイプB支承から約30%のコスト縮減が可能になり、これは全体工費に対しても約8%になった。機能分離型支承構造の採用で、各々の装置に要求性能を満足する設計が行え、特に沓本体を小さくできたことで工費縮減につながったと考える。

本橋ではPC中空床版橋へのDSR工法の採用であったが、プレテンションT桁やポストテンションT桁などのプレキャスト桁橋に採用した場合、施工安全性も改善できる。従来のタイプB沓では桁直下での支承設置作業が必要であるのに対し、これをスライド沓に変更することで、桁直下での作業を省略できる。そのため、より安全な架設作業が行なえる。

最後に、DSR工法の設計施工、開発にあたりご助力頂いた建設省をはじめとする関係各位に深くお礼申し上げるとともに、本橋の施工結果が支承構造選定のための有効な資料になることを期待する。

## 参考文献

- 1) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 濱田譲, 吉野伸: ゴム材の圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発, 土木学会論文集 No. 563/I-39, 71-78, 1997. 4
- 2) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 吉野伸: ゴム材の圧縮変形を利用した反力分散装置のハイブリッド地震応答実験, 土木学会論文集 No. 598/I-44, 299-309, 1998. 7
- 3) 伊津野和行, 吉野伸, 鈴木亮介, 和田教志: ゴム材の圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発とPC連結桁の一考察, プレストレストコンクリート技術協会 第6回シンポジウム論文集 (1996年10月)