

# 兵庫県南部地震における地震力を用いた免震橋梁の設計

入江 達雄\*

松田 泰治\*\*

兵庫県南部地震では、支承部に損傷の発生した橋梁が多くみられた。このため、道路橋の復旧のための仕様（兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様<sup>1)</sup>）では移動方向が自由であるゴム支承、特にエネルギー吸収性能のある免震支承の採用が望ましいとされている。免震支承を採用することにより下部構造に作用する地震力の低減を図れるが、長周期化により地震時の変位は増加する。本論文では、震度法レベル・地震時保有水平耐力レベルで設計・照査された高減衰積層ゴム支承を用いた4径間連続PC箱桁橋に兵庫県南部地震で観測された地震力を作用させ、地震時振動特性の研究を行うものである。

## 1.はじめに

近年、橋梁においては走行性の向上や維持管理の省力化等のために上部構造の連続化・多径間化が図られている。これにより増大する下部工に作用する地震時慣性力を低減・分散化するために免震支承を採用する橋梁が増加している。免震支承とは、アイソレーターにより上部構造を柔らかく支持し、地震力がある一定値以上になると固有周期を長くして地震力を低減するとともに、ダンパーによる減衰性能の増大により慣性力の低減を行うものである。免震支承を採用することにより下部構造に作用する地震力の低減を図れるが、長周期化により地震時の変位は増加する。平成7年1月に発生した兵庫県南部地震では、支承部に損傷の発生した橋梁が多くみられた。このため、道路橋の復旧のための仕様（兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様<sup>1)</sup>）

（以下、復旧仕様）では移動方向が自由であるゴム支承、特にエネルギー吸収性能のある免震支承の採用が望ましいとされている。また、復旧仕様では変形性能の照査に対応した動的解析（非線形の効果<sup>2)</sup>を考慮）には兵庫県南部地震で観測された地震力を用いるとされている。兵庫県南部地震で観測された地震力は従来の保有水平耐力照査用地震力の2倍に

キーワード：免震設計、動的解析、

高減衰積層ゴム支承

\* (株)建設技術研究所 福岡支社技術第2部  
092-714-2211

\*\*九州大学工学部建設都市工学科  
092-641-1100

近い値を示している。このため従来よりもより大きな応答値（変位・慣性力等）が予測される。本論文では震度法レベル・地震時保有水平耐力レベルで設計・照査された免震橋梁に対し、兵庫県南部地震で観測された地震力を作用させ各部材の応答値の算出を行う。ここで対象とする橋梁は高減衰積層ゴム支承を用いて橋軸・橋軸直角方向を免震化した4径間連続PC箱桁橋である。

## 2. 橋梁概要

### (1)橋梁概要

検討対象とした橋梁の諸元は以下の通りであり、橋梁一般図を図-1に示す。

橋 長：292.0m(61.0+2@85.0+61.0)

有効幅員：10.5m(3.0(歩道)+7.5(車道))

上部工形式：4径間連続PC箱桁橋

下部工形式：逆T式橋台(A1橋台・A2橋台)  
小判型橋脚(P1橋脚・P2橋脚・P3橋脚)

基礎工形式：場所打ち杭基礎(A1橋台・P1橋脚・P2橋脚・P3橋脚)

直接基礎(A2橋台)

地盤種別：II種地盤(A1橋台・P1橋脚・P2橋脚・P3橋脚)

I種地盤(A2橋台)

支承形式：2方向すべり支承(A1橋台・A2橋台)

2方向免震支承(P1橋脚・

P2橋脚・P3橋脚)

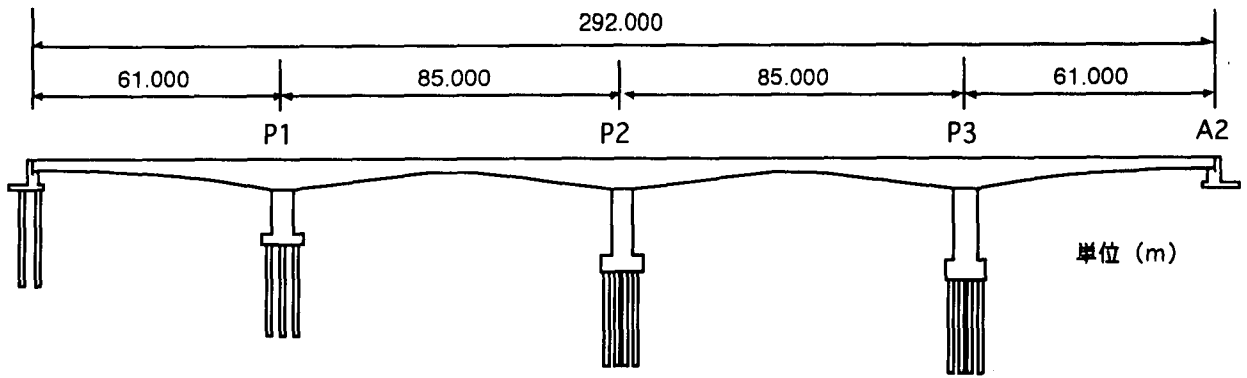


図-1 橋梁一般図

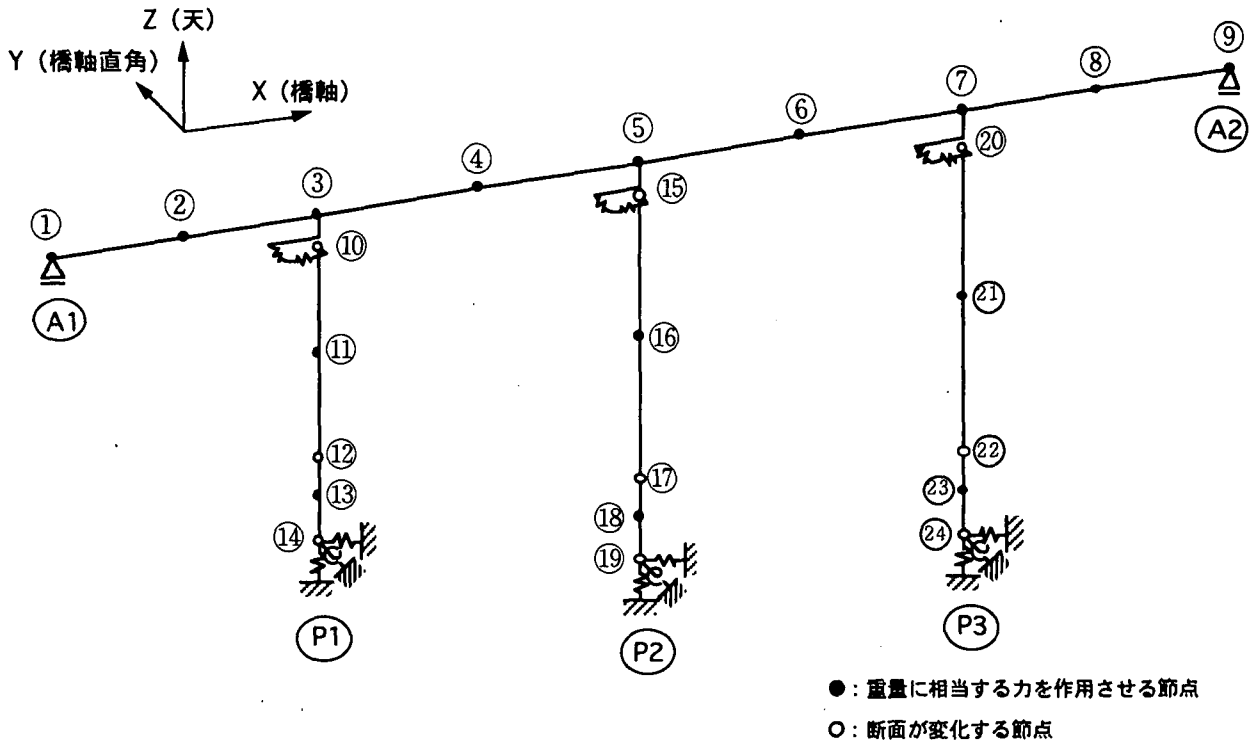


図-2 骨組みモデル図

## (2) 支承概要

震度法レベルおよび地震時保有水平耐力レベルで照査・設計された免震支承の諸元は以下の通りである。支承は各橋脚2支承で、支承形状はP1橋脚・P2橋脚・P3橋脚すべての橋脚において同一形状の支承を用いている。

支承形式：高減衰積層ゴム支承

ゴム部外寸法：1600×1600

×266 (高さ) mm

内部補強鋼板寸法：1580×1580

×4.5 (厚さ) mm

積層構造：36.0mm×6層=180mm

## 3. 解析方法

### (1) 解析手法

本検討では、次の5種類の解析手法を用いて橋軸および橋軸直角方向の検討を行った。

#### ① 1質点系モデルによる静的解析

橋梁上部工重量を1質点として免震支承・下部工・基礎工の剛性および減衰定数を合成し、全体系を1質点系モデルとして静的解析を行う。各橋脚の応答値は、剛性比率により配分し求める。

#### ② 骨組みモデルによる静的解析

図-2に示す骨組みモデルを用いて静的解析を行う。

#### ③ 骨組みモデルによる応答スペクトル解析

図-2に示す骨組みモデルを用いて応答スペクトル法による動的解析を行う。免震支承は等価剛性・等価減衰定数を用いた等価線形化モデルとして取り扱い、上部工・下部工・基礎工は線形バネとして取

り扱う。

#### ④骨組みモデルによる線形時刻歴解析

図-2に示す骨組みモデルを用いて線形の時刻歴応答解析を行う。免震支承は、等価剛性・等価減衰定数を用いた等価線形化モデルとして取り扱い、上部工・下部工・基礎工は、線形バネとして取り扱う。

#### ⑤骨組みモデルによる非線形時刻歴解析

図-2に示す骨組みモデルを用いて非線形の時刻歴応答解析を行う。免震支承はバイリニア型の非線形モデルとして取り扱い、上部工・下部工・基礎工は線形バネとして取り扱う。

#### (2)検討地震力

検討は、次の3種類の地震力レベルを用いて行う。

①震度法レベル度法による設計を行うレベルで、設計地震力は道路橋示方書V耐震設計編<sup>2)</sup>・道路橋免震設計法マニュアル(案)<sup>3)</sup>に示される。応答スペクトル法に用いるⅡ種地盤の標準加速度応答スペクトルを図-3に、時刻歴応答解析に用いるⅡ種地盤の標準加速度波形を図-6に示す。

#### ②地震時保有水平耐力法レベル

地震時の変形性能の照査を行うレベルで、照査用地震力は道路橋示方書V耐震設計編・道路橋免震設計法マニュアル(案)に示される。応答スペクトル法に用いるⅡ種地盤の標準加速度応答スペクトルを図-4に、時刻歴応答解析に用いるⅡ種地盤の標準加速度波形を図-7に示す。

#### ③復旧仕様動解レベル

復旧仕様で示される地震時の変形性能の照査を行うレベルで、動的解析(非線形の効果を考慮)を行う場合は兵庫県南部地震で観測された地震記録を用いることとされている。Ⅱ種地盤においては、JR西日本鷹取駅<sup>4)</sup>での波形が推奨されているためこの波形を用いる。図-8に加速度波形を示す。加速度応答スペクトルは示されていないが、震度法レベル・地震時保有水平耐力法レベルでは長周期領域において固有周期の逆数に比例して低減するように設定されているため本検討でも同様に設定した。図-5に本検討で用いる加速度応答スペクトルとJR西日本鷹取駅での波形の加速度応答スペクトルを示す。なお、すべての解析において地域係数0.85を考慮した。

#### (3)免震支承の動的特性

高減衰積層ゴム支承の動的特性はひずみに依存するため、等価線形モデル・非線形モデルはひずみの関数として与えられる。

$$K_B = A_R \cdot G(\gamma) / \Sigma t_e \quad (1)$$

$K_B$  : 免震支承の等価剛性

$A_R$  : ゴムの支圧面積

$G(\gamma)$  : ゴムのせん断弾性係数

$$G(\gamma) = 45.3 - 72.7\gamma + 57.33\gamma^2 - 18.99\gamma^3 + 2.18\gamma^4 \quad \gamma \leq 2 \quad (2)$$

$$G(\gamma) = 12.2 \quad 2 < \gamma < 2.5 \quad (3)$$

$\gamma$  : ゴムの有効せん断ひずみ

$$h_B = 0.1543 + 0.03834\gamma - 0.4448\gamma^2 + 0.00858\gamma^3 \quad \gamma < 2.5 \quad (4)$$

$h_B$  : 免震支承の等価減衰定

$$K_1 = A_R \cdot G_1 / \Sigma t_e \quad (5)$$

$$K_2 = A_R \cdot G_2 / \Sigma t_e \quad (6)$$

$$G_1 = \frac{C(\gamma) - \pi/2 \cdot h_B + C(\gamma) \cdot \pi/2 \cdot h_B}{C(\gamma) - \pi/2 \cdot h_B} \cdot G(\gamma) \quad (7)$$

$$G_2 = (1 - C(\gamma)) \cdot G(\gamma) \quad (8)$$

$$C(\gamma) = 0.331 + 0.006919\gamma - 0.05778\gamma^2 + 0.009403\gamma^3 \quad 0.1 \leq \gamma \leq 2 \quad (9)$$

$K_1$  : 免震支承の一次剛性

$K_2$  : 免震支承の二次剛性

$G_1$  : 免震支承の一次剛性に関する高減衰ゴムのせん断弾性係数

$G_2$  : 免震支承の二次剛性に関する高減衰ゴムのせん断弾性係数

$C(\gamma)$  : せん断ひずみによる係数

本検討で用いるひずみは、1質点系の静的解析で得られた有効せん断ひずみを用いる。免震支承は保有水平耐力レベルで設計されているため復旧仕様動解レベルではひずみが大きくなり式の適用範囲を越える。このためひずみを2.0、剛性比率 $K_1/K_2 = 8$ と仮定して特性値を定める。

#### 4. 解析結果

震度法レベル・地震時保有水平耐力法レベル・復旧仕様動解レベルにおける各解析手法による応答値を表-1、図-9、図-10に示す。

・復旧仕様動解レベルにおける応答値は、保有水平耐力レベルにおける応答値の3割～5割増となっている。

・橋軸直角方向は、静的解析ではP1橋脚・P3橋脚が動的解析ではP2橋脚で大きな応答値を示している。この原因は、上部工が一体となって振動する免震系のモードの他に桁のみが曲げ振動するモードが橋軸直角方向に現れることによる。しかし、今回の解析では桁の曲げ振動モードの影響は非線形時刻歴解析を行った際には小さくなる傾向が見られた。

・橋軸方向では、静的解析も動的解析も応答値でほぼ同様の傾向を示し、静的解析の応答値が動的解析の応答値を上回っている。

・今回設定した復旧仕様動解レベルの加速度応答スペクトルは、長周期領域において鷹取の加速度応答スペクトルよりも大きいため、応答スペクトル法は時刻歴解析法よりも大きな応答値を示している。

## 5. 結論

本研究で行った解析の結果より得られた結論を以下にまとめる。

1) 復旧仕様動解レベルと保有水平耐力レベルで比較した場合、応答値の増加率は地震力の増加率に比べ小さく、免震支承が有効に作用していると考えられる。

2) 2方向免震とした場合、橋軸方向と橋軸直角方向では橋梁の地震時挙動の傾向は異なる。

3) 橋軸方向は、1次の振動モードが卓越するため静的解析によっても比較的良い結果が得られる。

4) 橋軸直角方向は、支承条件・上部工剛性・下部工剛性等により1次の振動モードあるいは一つの振動モードが卓越するとは限らない。このため、動的解析を行うことが望ましい。

5) 免震支承のせん断ひずみが2程度の場合、等価剛性がほとんど変化しないため保有水平耐力レベル・復旧仕様動解レベルで各モードにおける固有周期の差はほとんど見られない。

6) 今回の解析では、特に、橋軸直角方向で免震支承の非線形性を考慮することにより橋梁全体として応答値の低減がみられた。

## 謝辞

本論文をまとめるに当たり宮崎県西都市役所からは貴重な資料を提供いただきました。ここに、関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様、1995年
- 2) (社)日本道路協会、道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1990年
- 3) (財)土木研究センター、建設省道路橋の免震設計法マニュアル(案)、1992年
- 4) (社)日本道路協会、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)、1995年

# DESIGN OF MENSIN BRIDGE CONSIDERING HYOUGOKEN-NANBU SEISMIC FORCE

Tatsuo IRIE, Taiji MAZDA

After the Hyougoken-nanbu Earthquake, it was found that there were many bridges suffered damages in its bearings. Subsequently, this suggests that the use of rubber bearings, especially seismically isolation bearings is desirable in bridge design. This paper discusses the vibrational characteristics of a four-span continuous box girder (prestressed concrete) bridge during an earthquake. The bridge uses high damping laminated rubber bearings and was checked and designed according to seismic coefficient method level and design ultimate horizontal strength level during an earthquake. The Hyougoken-nanbu Earthquake record was considered as seismic load.

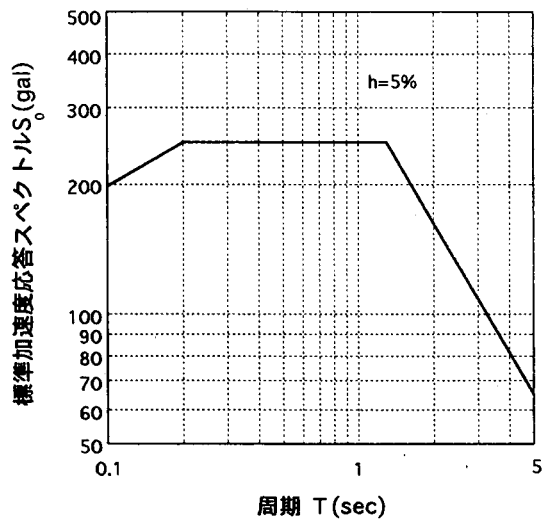


図-3 震度法レベル加速度応答スペクトル

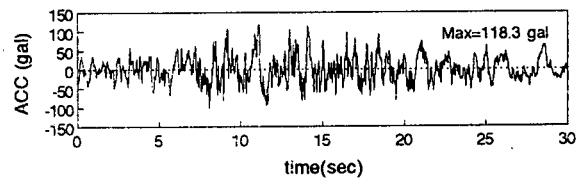


図-6 震度法レベル地震波形

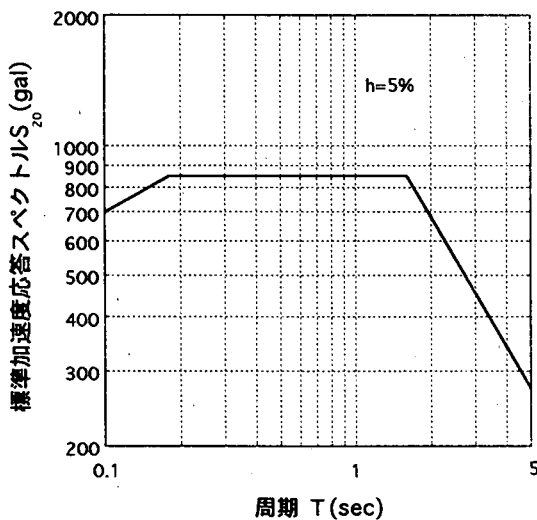


図-4 保有水平耐力法レベル加速度応答スペクトル

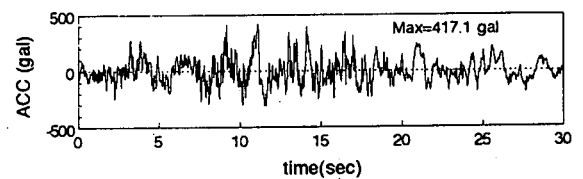


図-7 保有水平耐力法レベル地震波形

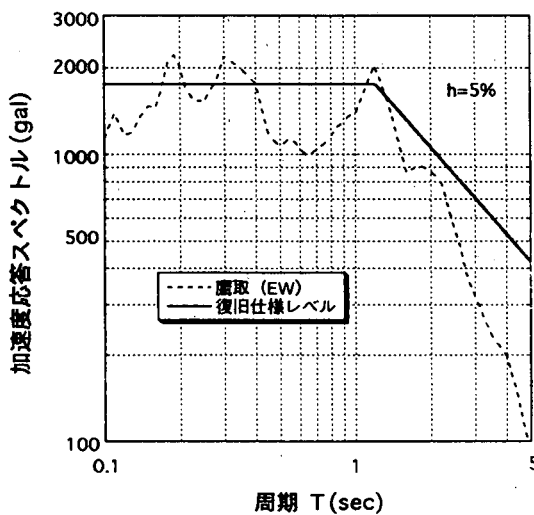


図-5 復旧仕様動解レベル加速度応答スペクトル

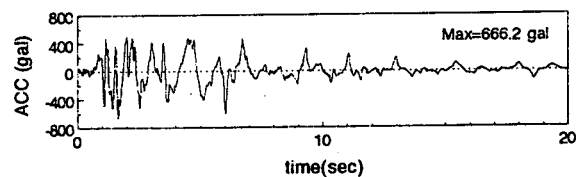
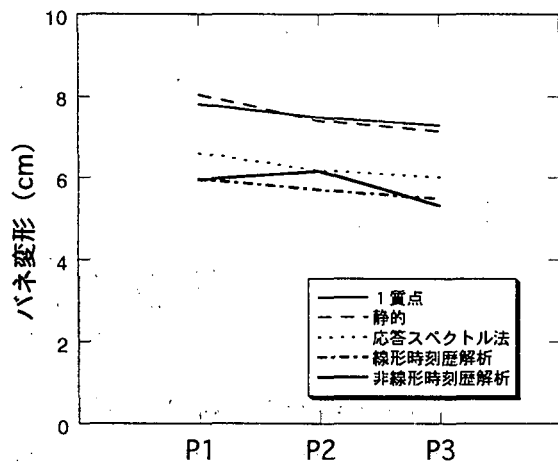


図-8 復旧仕様動解レベル地震波形

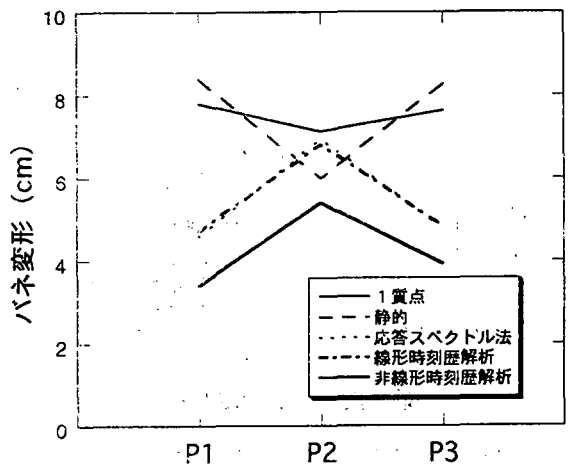
表-1 解析結果一覽表

橋軸方向	震度法レベル						保有水平耐力法レベル						復旧仕様動解レベル								
	固有周期 (sec)	1 質点	静的	応答スペクトル	線形時刻歴		非線形時刻歴		1 質点	静的	応答スペクトル	線形時刻歴		非線形時刻歴		1 質点	応答スペクトル	線形時刻歴		非線形時刻歴	
					線形時刻歴	非線形時刻歴	線形時刻歴	非線形時刻歴				線形時刻歴	非線形時刻歴	線形時刻歴	非線形時刻歴						
ハネ変形 (cm)	1次	1.42	1.52	1.40					1.99	2.03	2.02					2.00	2.02				
	P 1	7.80	8.05	6.60	5.95	5.94			43.60	45.38	43.90	37.60	39.10			59.28	68.00	52.40			46.60
	P 2	7.48	7.41	6.19	5.70	6.16			42.68	41.33	40.70	35.00	35.00			58.03	63.20	49.60			43.40
下部天端 水平力 (tf)	P 3	7.29	7.16	6.02	5.49	5.32			42.14	39.44	39.30	34.40	34.60			57.30	61.10	47.60			43.30
	P 1	496.10	515.00	509.50	459.10	446.00			1464.80	1524.80	1486.00	1273.90	1259.30			1991.80	2284.60	1761.50			1498.80
	P 2	488.00	485.00	486.80	447.90	460.30			1434.00	1388.50	1378.20	1183.20	1143.90			1949.80	2124.90	1665.30			1409.90
桁変位 (cm)	P 3	483.00	475.00	479.00	436.30	420.10			1416.00	1325.20	1328.60	1163.00	1092.50			1925.30	2051.90	1599.00			1407.40
	A 1	9.77	10.48	8.30	7.59	7.36			49.40	52.75	48.90	42.20	41.40			67.17	75.80	58.10			51.20
	P 1	9.77	10.45	8.27	7.55	7.32			49.40	52.65	48.80	42.10	41.30			67.17	75.60	58.00			51.10
	P 2	9.77	10.44	8.27	7.55	7.29			49.40	52.66	48.80	42.10	41.20			67.17	75.60	58.00			51.10
	P 3	9.77	10.46	8.28	7.55	7.29			49.40	52.71	48.90	42.10	41.20			67.17	75.70	58.00			51.10
	A 2	9.77	10.49	8.31	7.58	7.32			49.40	52.81	49.00	42.20	41.30			67.17	75.80	58.20			51.30

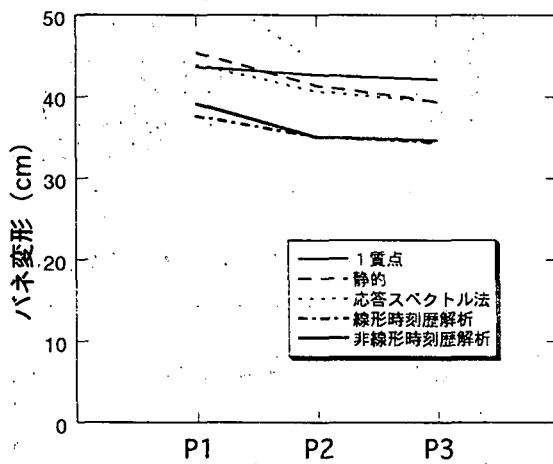
橋軸直角方向	震度法レベル						保有水平耐力法レベル						復旧仕様動解レベル								
	固有周期 (sec)	1 質点	静的	応答スペクトル	線形時刻歴		非線形時刻歴		1 質点	静的	応答スペクトル	線形時刻歴		非線形時刻歴		1 質点	応答スペクトル	線形時刻歴		非線形時刻歴	
					線形時刻歴	非線形時刻歴	線形時刻歴	非線形時刻歴				線形時刻歴	非線形時刻歴	線形時刻歴	非線形時刻歴						
ハネ変形 (cm)	1次	1.35	1.53	2.14					1.94	2.01	2.65					1.95	2.66				
	P 1	7.81	8.41	4.60	4.71	3.40			44.50	45.93	39.64	28.46	21.00			61.28	61.40	35.10			34.20
	P 2	7.13	6.00	6.93	6.79	5.40			44.50	37.04	43.32	41.86	31.40			58.53	67.00	52.30			44.70
下部天端 水平力 (tf)	P 3	7.63	8.28	4.77	4.83	3.91			43.98	45.75	31.75	27.51	20.20			60.56	49.70	33.80			32.70
	P 1	496.40	535.00	354.80	362.90	314.60			1459.30	1543.20	1344.50	965.10	786.80			2059.00	2061.60	1180.70			1160.70
	P 2	478.60	405.00	556.70	544.90	422.50			1428.20	1244.60	1465.30	1415.90	1048.90			1966.60	2252.40	1755.60			1445.50
桁変位 (cm)	P 3	492.00	535.00	371.30	376.50	334.20			1477.70	1537.20	1076.10	932.40	853.30			2034.80	1668.40	1135.20			1120.10
	A 1	8.97	12.72	13.88	13.87	13.01			47.99	59.12	120.70	85.70	48.40			66.09	186.40	87.70			79.70
	P 1	8.97	9.83	5.37	5.33	4.16			47.99	50.05	42.40	30.20	22.90			66.09	65.60	37.00			36.20
	P 2	8.97	8.15	9.04	8.94	7.26			47.99	43.83	48.90	47.30	35.30			66.09	75.50	58.70			50.40
	P 3	8.97	10.18	5.75	5.56	4.85			47.99	51.89	34.90	30.20	22.40			66.09	54.50	36.90			36.00
A 2	8.97	13.16	15.99	14.49	13.76			47.99	61.44	96.50	86.80	46.20			66.09	150.90	88.10			81.60	



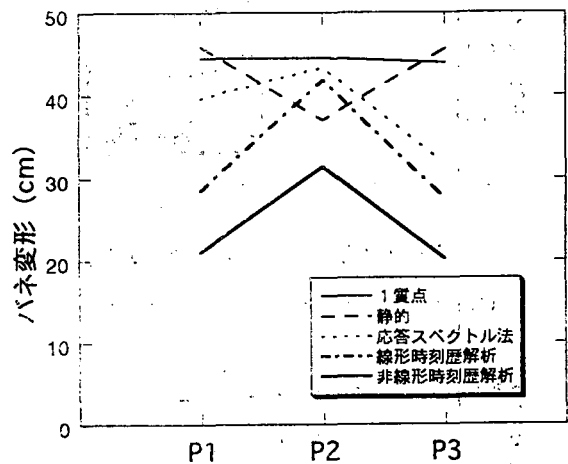
震度法レベル (橋軸方向)



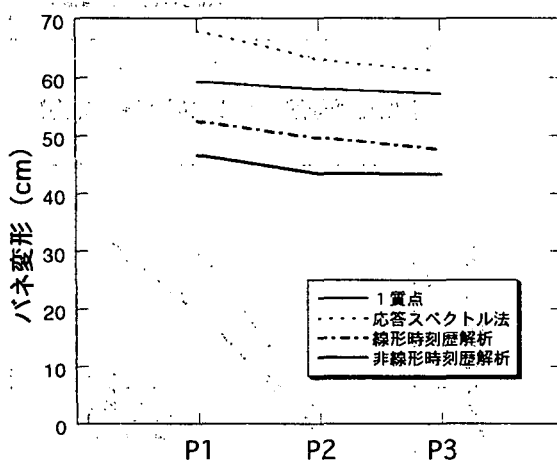
震度法レベル (橋軸直角方向)



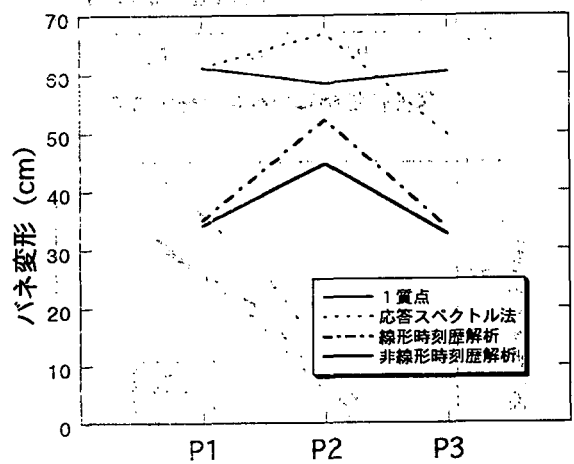
保有水平耐力法レベル (橋軸方向)



保有水平耐力法レベル (橋軸直角方向)

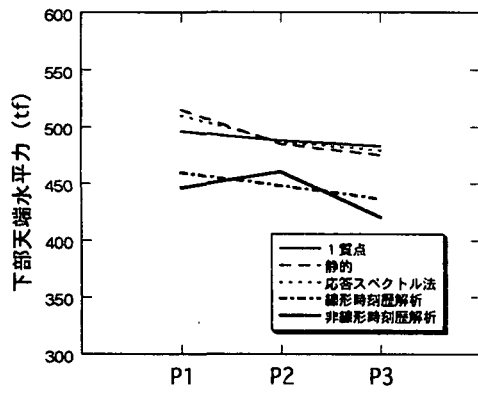


復旧仕様動解レベル (橋軸方向)

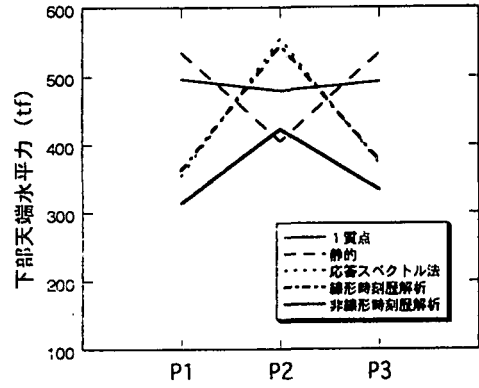


復旧仕様動解レベル (橋軸直角方向)

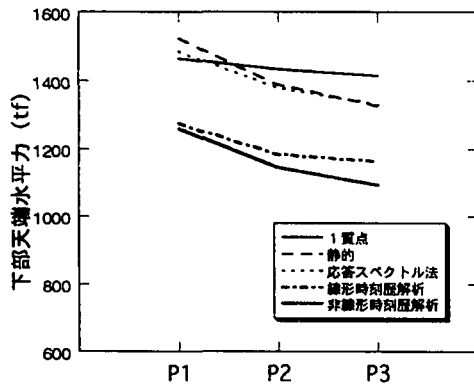
図-9 バネ変形



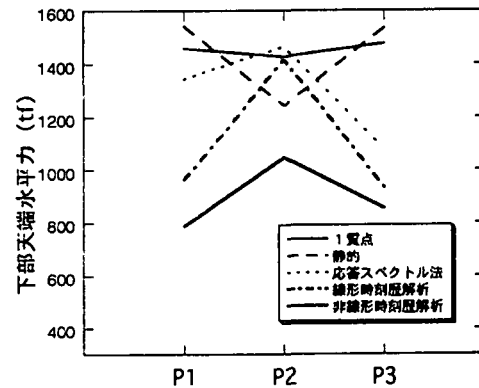
震度法レベル (橋軸方向)



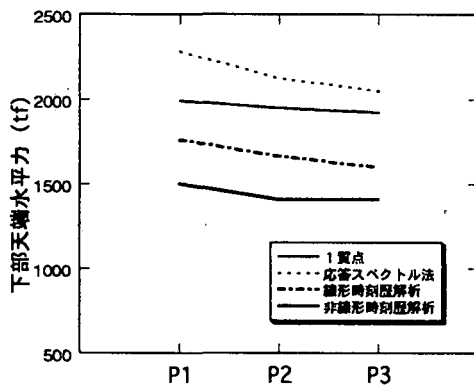
震度法レベル (橋軸直角方向)



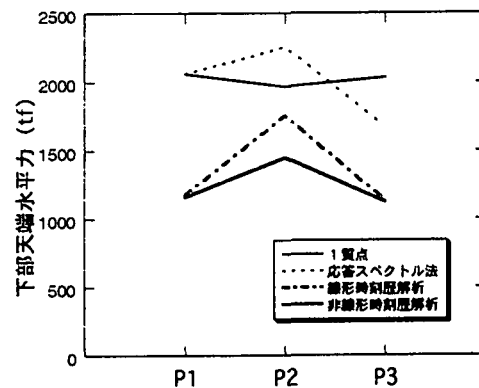
保有水平耐力法レベル (橋軸方向)



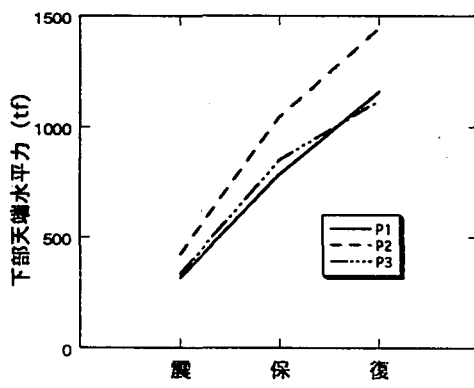
保有水平耐力法レベル (橋軸直角方向)



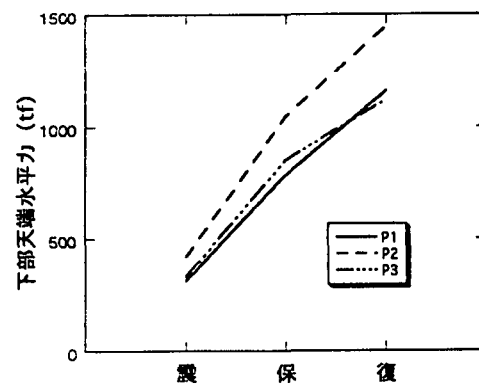
復旧仕様動解レベル (橋軸方向)



復旧仕様動解レベル (橋軸直角方向)



橋軸方向



橋軸直角方向

図-10 下部天端水平力