

(128) コンクリート構造物の橋梁構造形式の違いによる耐震性能比較

日本大学 大学院 工修 正会員 ○河野 弘来  
 (株)ピーシー 技術第一部 吉田 千品  
 (株)安部工業所 中部支店 工務部 金森 晃年  
 日本大学 理工学部 工博 正会員 山崎 淳

1. はじめに

コンクリート構造物の種々ある橋梁構造形式について、各々の動的応答挙動を調べ、その差異を検討することによりRC橋梁の構造形式の違いによる耐震性能の優劣を知ることを研究の目的としている。橋梁の計画段階から始まる最適な構造形式選定の判断要因は、従来では建設コスト、スパン長によるすみ分け、景観性等である。これに対して本研究の目指すところとして、より耐震性能の高い構造形式を判定する手法を導き、その判断要因の中に組み込むことである。本論では、その目的の一助とするべく、PC斜張橋、エクストラードズド橋、PC桁橋の3種類のコンクリート橋梁の構造形式に着目し、線形動的FEM解析により、極めて限られた範囲ではあるが、その動的応答挙動の差異について検討する。

2. 検討対象とする橋梁モデル

本論では、既存のコンクリート構造橋梁を参照して、以下に示す同一の条件設定に従いスパン長、桁断面等の構造諸元を変更し、検討用のモデルを作成した。

2.1 設計条件

橋長480m、3スパン連続ラーメン（120m+240m+120m）とする。従来、中央径間240mはPC斜張橋が有利というすみ分けとなっているが、PC桁橋にもこれに近いスパン割のものが存在すること（浜名大橋）、また、これと同程度のエクストラードズド橋が現在計画されていることから、このスパン割を今回の対象とした。

それぞれ異った構造形式について動的応答挙動の比較を行うため、合致可能な構造諸元について設計条件を決めた。幅員：10m、橋脚基部から桁上面までの高さ：30m、橋脚及び主塔の橋軸方向の幅：4.0m、橋脚の橋軸直角方向の幅：6.2m、PC斜張橋及びエクストラードズド橋については独立の2つの主塔による2面吊りとし、1主塔の橋軸直角方向の幅：1.8mとした。

2.2 材料特性

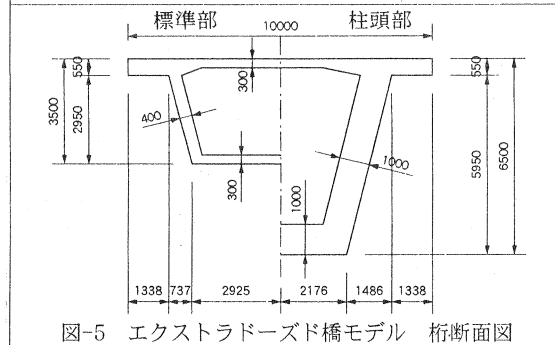
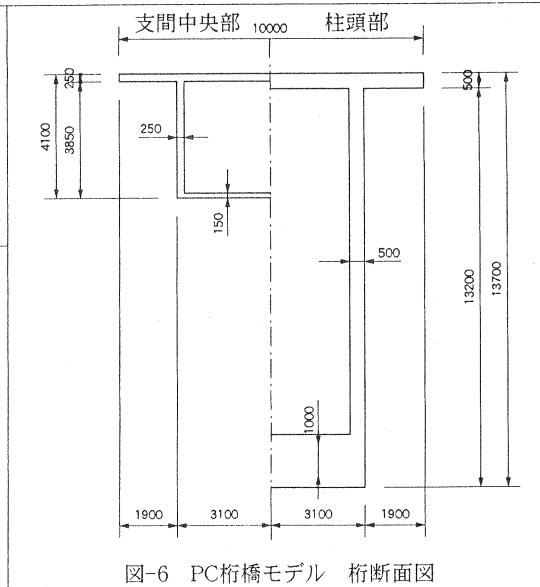
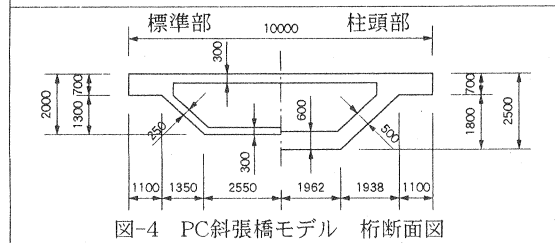
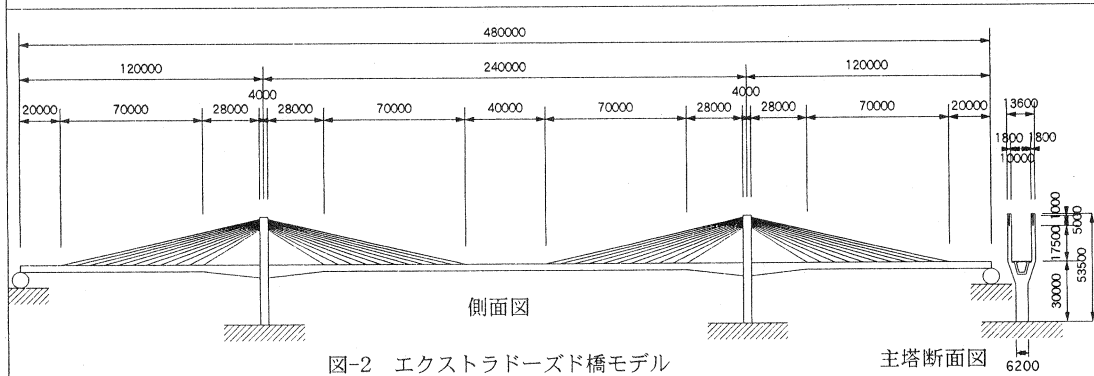
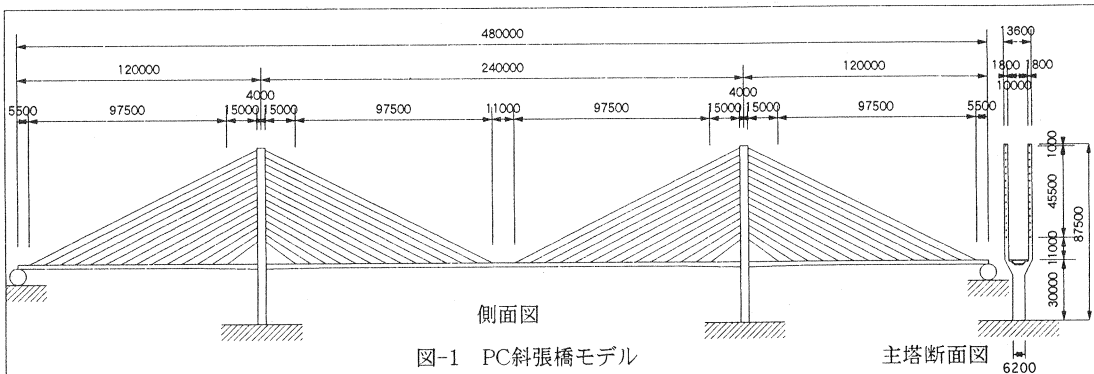
解析に用いる材料特性を表-1に示す。

表-1 材料特性

RC桁 PC桁 橋脚 主塔	設計規準強度	40 N/mm <sup>2</sup>	斜ケーブル	PC鋼より線	27S15.2
	単位体積質量	2.5 ton/m <sup>3</sup>		引張強度	1880 N/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数	31 kN/mm <sup>2</sup>		断面積	3744.9 mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	0.2		ヤング係数	200 kN/mm <sup>2</sup>
				ポアソン比	0.3

2.3 解析モデル

今回設計したPC斜張橋モデルの側面図を図-1に、橋脚柱頭部と標準部（支間中央）の桁断面図を図-4に示す。同様にエクストラードズド橋モデルについては図-2、図-5、PC桁橋については図-3、図-6に示す。



### 2.4 FEM解析モデル化

PC桁、RC桁、橋脚、主塔をソリッド要素で、斜材は3次元トラス要素でFEMメッシュ分割を行い、2.1で定めた材料特性を各要素に設定した。尚、斜材の質量については、全体の振動モードに多くの斜材単体の振動モードが加わることを避けるため、今回の解析では無視した。境界条件は2つの橋脚基部を完全固定とし、橋桁両端の桁断面下縁に橋軸方向のローラー支点 (X軸方向：自由、Y軸・Z軸方向：固定) とした。

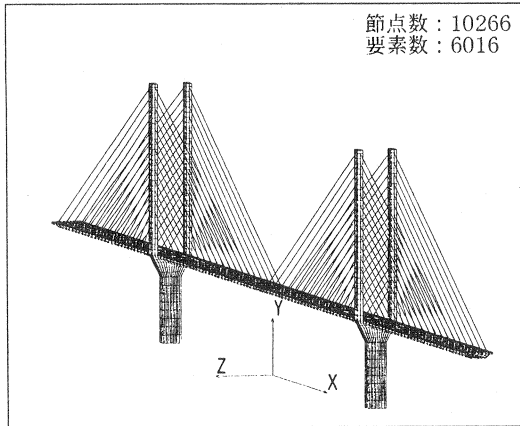


図-7 PC斜張橋モデル FEMメッシュ

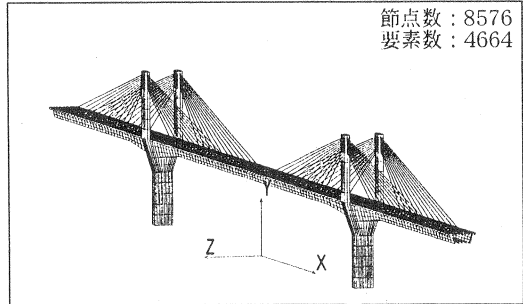


図-8 エクストラドーズド橋モデル FEMメッシュ

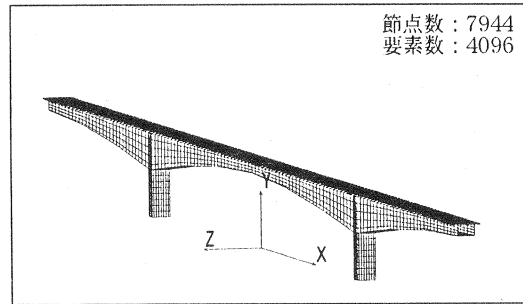


図-9 PC桁橋モデル FEMメッシュ

### 3. 入力地震波

入力地盤加速度波形として、1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台NS加速度成分を用いた。(図-10) この入力波を、1つのモデルに対して、橋軸(X軸)方向と橋軸直角(Z軸)方向の2ケース、3モデル×2ケース：計6ケースの解析を行った。今回の解析では、直交2軸方向の地震波成分の重ね合わせ等は取り扱っていない。

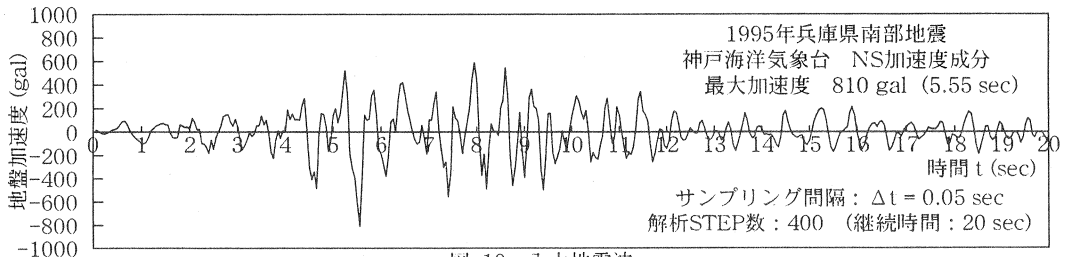


図-10 入力地震波

### 4. 解析ソフト 及び 解析方法

今回の一連の解析には、汎用FEM解析ソフト：COSMOS/M ver2.5を使用した。本ソフトの解析モジュールASTARを用いて、設定した入力地震波に対するモーダル時刻歴応答解析を実施した。また、モーダル時刻歴応答解析を実施する際には、これに先立って固有値解析を同ソフト解析モジュールDSTARを用いて実施し、30次までの振動モードを別途検討した結果から、10次までの振動モードをモーダル時刻歴応答解析に用いることとした。

### 5. 解析結果

解析によって得られた応答値に対して、着目点 (柱頭部桁上面の中心点、センタースパンの支間中央桁断面上縁の中央の点、主塔最上面の中心点) を設定し、この着目点における時刻歴応答変位及び応答加速度の最大値を調べた。変形図、応力コンター図については、着目点の応答変位が最大値となった時点を図示した。

5.1 橋軸方向解析結果

地震波を橋軸(X軸)方向に入力した解析ケース(3モデル分)について結果を表と図で示す。この解析ケースに於いては、着目点におけるX軸方向変位( $\delta_x$ )、X軸方向の応答加速度( $a_x$ )の数値、及び、X軸方向の応力( $\sigma_x$ )分布を調べた。PC斜張橋モデルの橋軸方向に地震波を入力し解析した結果の着目点における応答値を表-2に示す。

着目点：支間中央上面においてX軸方向変位(以下 $\delta_x$ )が最大値( $\delta_x$ :-219 mm)となるとき( $t=8.80\text{sec}$ )のX軸方向の応力(以下 $\sigma_x$ )分布を図-11に示す。図-11では、変形の状態を視認し易くするために、変形量を200倍に誇張した。柱頭部上面における $\delta_x$ が最大(-156 mm)となるとき( $t=18.80\text{sec}$ )の $\sigma_x$ 分布を図-12に示す。本論では、解析結果の図化については変位の最大値に対してのみ示しているが、表-2にX軸方向の応答加速度(以下 $a_x$ )が最大となった時の値とその時刻を示している。この解析ケースでは、図-11に示した時刻( $t=8.80\text{sec}$ )の時に柱頭部上面における( $a_x=550\text{gal}$ )がこの点における最大の値を示している。図-11、図-12に示す応力( $\sigma_x$ )のコンター図については、白色が引張を、黒色が圧縮を示す。またその応力の値については、引張を正とし、図中右側のラベルの数値を1000で除した値となっている。

表-2 PC斜張橋モデル 橋軸方向(X軸)解析結果

	節点番号	最大応答変位( $\delta_x$ )	最大応答加速度( $a_x$ )
柱頭部桁上面	893	-156 mm	550 gal
		18.80 sec	18.80 sec
支間中央桁上面	41	-219 mm	-263 gal
		8.80 sec	18.20 sec
主塔上面	1032	178 mm	525 gal
		18.20 sec	18.70 sec

ケーブルの最大応力度

引張： 148 N/mm<sup>2</sup>

圧縮： -148 N/mm<sup>2</sup>

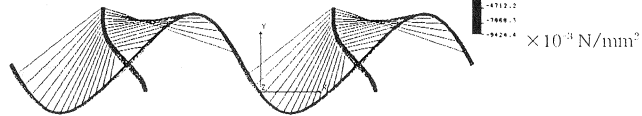


図-11 橋軸方向応力 ( $\sigma_x$ ) コンター図 ( $t=8.80\text{ sec}$ ) (変形200倍表示)

ケーブルの最大応力度

引張： 144 N/mm<sup>2</sup>

圧縮： -143 N/mm<sup>2</sup>

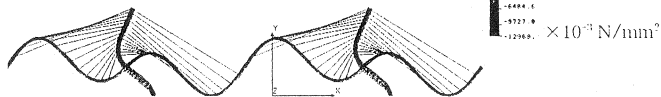


図-12 橋軸方向応力 ( $\sigma_x$ ) コンター図 ( $t=18.80\text{ sec}$ ) (変形200倍表示)

図-11における引張応力 $\sigma_x$ の最大値は9.4 N/mm<sup>2</sup>であり、支間中央から右側へ約1/4スパンの距離(約60m)の桁断面下縁付近で生じている。斜ケーブルに作用する応力度の引張強度( $f_{tm}=1880\text{ N/mm}^2$ )に対する応力変動率は7.9%であった。

エクストラードロード橋モデルの橋軸方向の結果については表-3、図-13に示す。最大の $\sigma_x$ は最下段の斜材が桁に定着する位置(主塔から30m距離)の桁断面下縁で生じており、時刻( $t=20.0\text{ sec}$ )において20.2 N/mm<sup>2</sup>

表-3 エクストラードロード橋モデル 橋軸方向(X軸)解析結果

	節点番号	最大応答変位( $\delta_x$ )	最大応答加速度( $a_x$ )
柱頭部桁上面	1	-463 mm	3120 gal
		20.00 sec	20.00 sec
支間中央桁上面	823	-434 mm	2940 gal
		20.00 sec	20.00 sec
主塔上面	929	-430 mm	2700 gal
		20.00 sec	19.00 sec

ケーブルの最大応力度

引張： 114 N/mm<sup>2</sup>

圧縮： -115 N/mm<sup>2</sup>

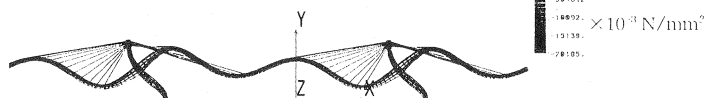


図-13 橋軸方向応力 ( $\sigma_x$ ) コンター図 ( $t=20.0\text{ sec}$ ) (変形200倍表示)

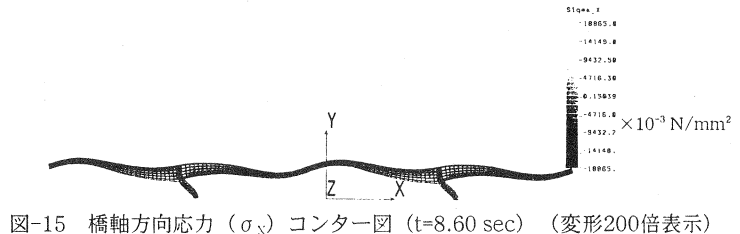
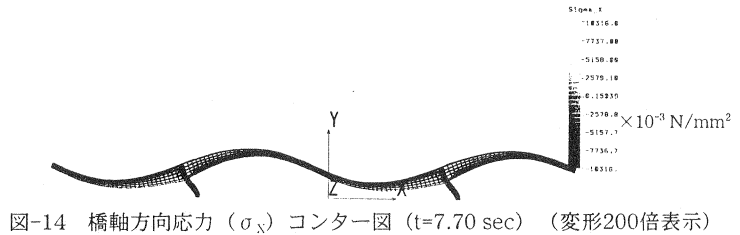
であった。ケーブルの応力変動率は6.1%であった。

PC桁橋モデルの橋軸方向の結果については表-4、図-14、図-15に示す。図-14、図-15とも最大の $\sigma_x$ が生じている場所は橋脚と桁の接合部であり、図-14 ( $t = 7.70 \text{ sec}$ ) において  $10.3 \text{ N/mm}^2$ 、図-15 ( $t = 8.60 \text{ sec}$ ) において  $18.8 \text{ N/mm}^2$  であった。

橋軸方向解析における、PC斜張橋の地震時応力の最大値は、エクストラード橋、PC桁橋の半分程度であった。支間中央における $\delta_x$ の最大値は、PC桁橋に対してエクストラード橋で約2倍、PC斜張橋で約4倍であった。また、いずれも構造形式でも $\delta_x$ の最大値は負側で生じた。

表-4 PC桁橋モデル 橋軸方向 (X軸) 解析結果

	節点番号	最大応答変位 ( $\delta_x$ )	最大応答加速度 ( $a_x$ )
柱頭部桁上面	1	-107 mm	1850 gal
		8.60 sec	8.60 sec
支間中央桁上面	947	-103 mm	1700 gal
		7.70 sec	8.60 sec



5.2 橋軸直角方向解析結果

地震波を橋軸直角(Z軸)方向に入力した解析ケース (3モデル分) について結果を表と図で示す。この解析ケースでは、着目点におけるZ軸方向変位(以下 $\delta_z$ )、Z軸方向の応答加速度(以下 $a_z$ )の数値、及び、Y軸方向の応力(以下 $\sigma_y$ )分布を調べた。応力の検討方向をY軸方向とした根拠は、橋脚及び主塔に生ずる曲げ変形による応力を調べるためである。

PC斜張橋モデルの橋軸直角方向の結果については表-5、図-16に示す。最大の応力 $\sigma_y$ が生じている場所は時刻(16.30sec)において、橋脚基部と主塔の付根部分(桁上面より1メッシュ分上方の位置)であり  $19.2 \text{ N/mm}^2$  であった。また柱頭部の応答変位 $\delta_z$ はほとんど発生せず、最大で19mm程度であった。3つの着目点における応答加速度 $a_z$ の最大値は発生時刻は異なるが、その値はほぼ同程度 (526gal) であった。ケーブルの応力変動率は1.1%であった。

エクストラード橋モデルの橋軸直角方向の結果について

表-5 PC斜張橋モデル 橋軸直角方向 (Z軸) 解析結果

	節点番号	最大応答変位 ( $\delta_z$ )	最大応答加速度 ( $a_z$ )
柱頭部桁上面	893	19 mm	526 gal
		36.50 sec	8.00 sec
支間中央桁上面	41	-476 mm	526 gal
		16.30 sec	10.60 sec
主塔上面	1032	-1030 mm	524 gal
		9.50 sec	9.40 sec

ケーブルの最大応力度

引張:  $21 \text{ N/mm}^2$

圧縮:  $-21 \text{ N/mm}^2$

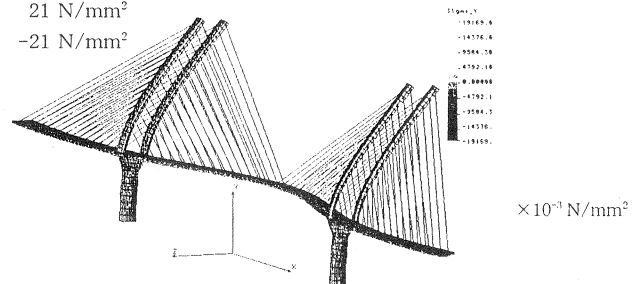


図-16 鉛直方向応力 ( $\sigma_y$ ) コンター図 ( $t=16.30 \text{ sec}$ ) (変形50倍表示)

は表-6、図-17に示す。最大の応力 $\sigma_y$ が生じている場所は時刻( $t=10.50\text{sec}$ )のとき、橋脚基部で $41.3\text{ N/mm}^2$ であった。ケーブルの応力変動率は1.9%であった。

PC桁橋モデルの橋軸直角方向の結果については表-7、図-18、図-19に示す。図-18(時刻16.30 sec)において、応力 $\sigma_y$ の最大値は、橋脚基部において $5.7\text{ N/mm}^2$ 程度であった。図には表現されていないが、支間中央の桁の上フランジ外縁に応力が集中しており、VonMises応力で $30\text{ N/mm}^2$ であった。図-19(時刻:18.80 sec)において応力 $\sigma_y$ の最大値が生じている場所は橋桁両端の水平ローラー(X軸方向Free) 支承部において $93\text{ N/mm}^2$ であった。

橋軸直角方向解析における、支間中央での $\delta_z$ の最大値は、エクストラード橋に対して、PC桁橋で約1.8倍、PC斜張橋で約3.4倍であった。

### 6. おわりに

PC斜張橋、エクストラード橋、PC桁橋の3種類のコンクリート橋梁の構造形式について、極めて限られた条件下ではあるが、線形動的FEM解析によりその動的応答挙動の差異について調べることができた。

今回の解析ではコンクリート桁における、地震波の入力軸方向に沿った、応力及びケーブルの地震時応力変動率に着目し検討した。今後は、スパン長を変化させた場合、主塔と橋脚と桁の結合方法を変えた場合、等の検討を実施する予定である。

表-6 エクストラード橋モデル 橋軸直角方向 (Z軸) 解析結果

	節点番号	最大応答変位( $\delta_z$ )	最大応答加速度( $a_z$ )
柱頭部桁上面	1	-560 mm	998 gal
		10.50 sec	10.50 sec
支間中央桁上面	823	140 mm	587 gal
		20.00 sec	10.50 sec
主塔上面	929	635 mm	-3240 gal
		20.00 sec	20.00 sec

ケーブルの最大応力度

引張:  $35\text{ N/mm}^2$   
 圧縮:  $-35\text{ N/mm}^2$

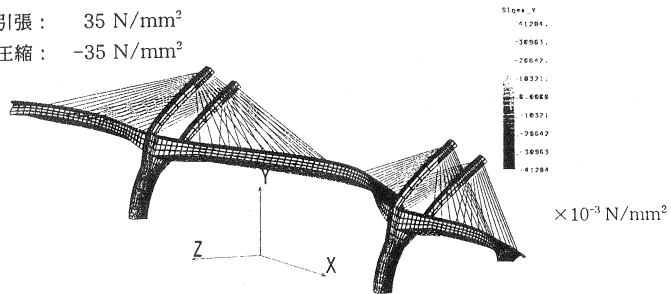


図-17 鉛直方向応力 ( $\sigma_y$ ) コンター図 ( $t=10.50\text{ sec}$ ) (変形100倍表示)

表-7 PC桁橋モデル 橋軸直角方向 (Z軸) 解析結果

	節点番号	最大応答変位( $\delta_z$ )	最大応答加速度( $a_z$ )
柱頭部桁上面	1	-489 mm	1530 gal
		10.70 sec	16.80 sec
支間中央桁上面	947	-250 mm	1490 gal
		18.80 sec	19.80 sec

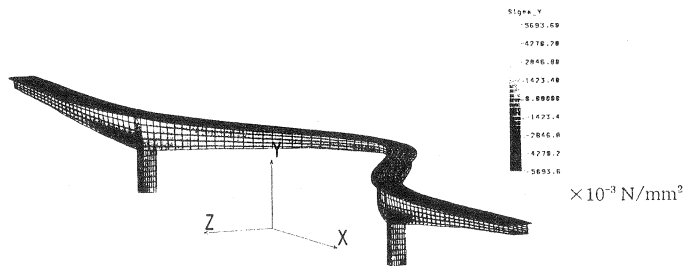


図-18 鉛直方向応力 ( $\sigma_y$ ) コンター図 ( $t=10.70\text{ sec}$ ) (変形100倍表示)

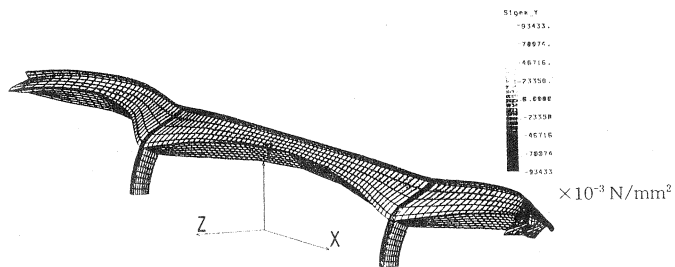


図-19 鉛直方向応力 ( $\sigma_y$ ) コンター図 ( $t=18.80\text{ sec}$ ) (変形100倍表示)