

水平反力調整を用いた連続ラーメン橋の設計概要

前川 順道*¹・内海 敏*²・樋上 登志夫*³・和田 教志*⁴

1. はじめに

本橋は、阪神高速道路大阪池田線（延伸部）神田出入路料金所に建設される場所打ち張出し工法で架設される3径間連続ラーメン橋である。構造形式は、図-2に示すように、多重箱桁であり、上部工ラーメン脚頭部では横梁により上下線一体構造であるが、径間部では施工の都合上、上下線分離構造とした。

本橋架設位置は、図-1に示すように猪名川河川敷とダイハツ池田工場にはさまれた地域であり、路下条件および用地の関係から、フーチングおよび橋脚の大きさに制約を受けた構造となっている。PC連続ラーメン桁の場合、設計荷重、地震荷重以外にも、クリープ、乾燥収縮によりラーメン橋脚に大きな断面力が作用することとなる。高橋脚ラーメン橋の場合、これらの作用力は橋脚の変位として吸収されるため、連続ラーメン形式は一般に高橋脚に有利とされている。しかし、都市内高架橋の場合一般に橋脚高がそれほど高くないため、地震力等は橋脚に過大な断面力を発生させることがしばしばある。本橋の詳細設計にあたり、これらの断面力を軽減するた

め、張出し施工終了後主桁橋軸方向にジャッキで水平力を導入し、橋脚に発生する断面力と逆方向に断面力を与える水平反力調整工を採用して、橋脚に発生する断面力を緩和し橋脚断面の軽減を図った。

また、本橋橋面に設けられる料金所の線形条件から、総幅員が1径間内で52.80 m～35.70 mまで変化する。そこで、図-2に示すように、箱桁ウェブ数を1径間内で5～3ウェブに変化させた。このため、ⅢP 40橋脚付近でウェブが合流する構造となり、応力の乱れが懸念された。そこで、この応力状態を解明するため、ウェブ合流付近を対象に三次元有限要素解析を行った。

ここでは、本橋詳細設計の概要と水平反力調整工の考え方および三次元有限要素解析の概要について報告する。

2. 橋梁概要

本橋の橋梁概要を以下に示す。

路線名：阪神高速道路公団大阪池田線（延伸部）

工事名：池田工区（その5）PC桁工事の内ⅢP 38～41径間

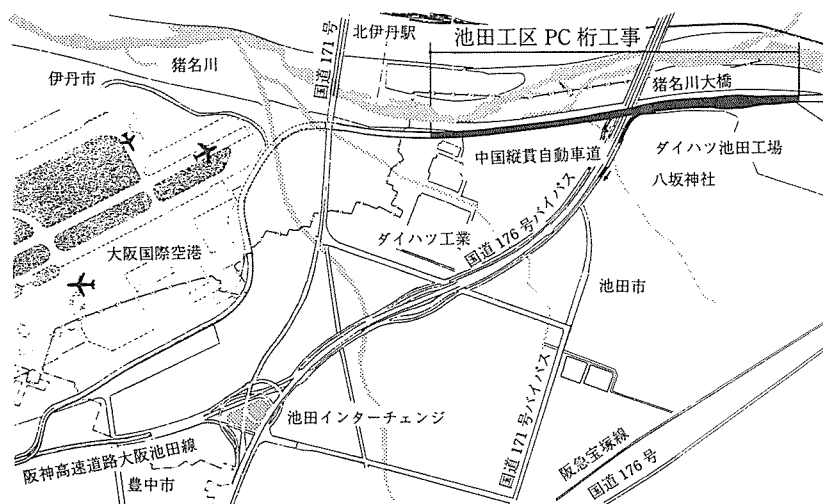


図-1 位置図

*¹ Yoshimichi MAEKAWA：阪神高速道路公団 大阪管理部 保全第一課長

*² Satoshi UTSUMI：阪神高速道路公団 計画部計画第一課 事業係長

*³ Toshio HIGAMI：ドーピー建設工業(株) 大阪支店 設計部長代理

*⁴ Takashi WADA：ドーピー建設工業(株) 大阪支店 設計課長代理

上り線
下り線

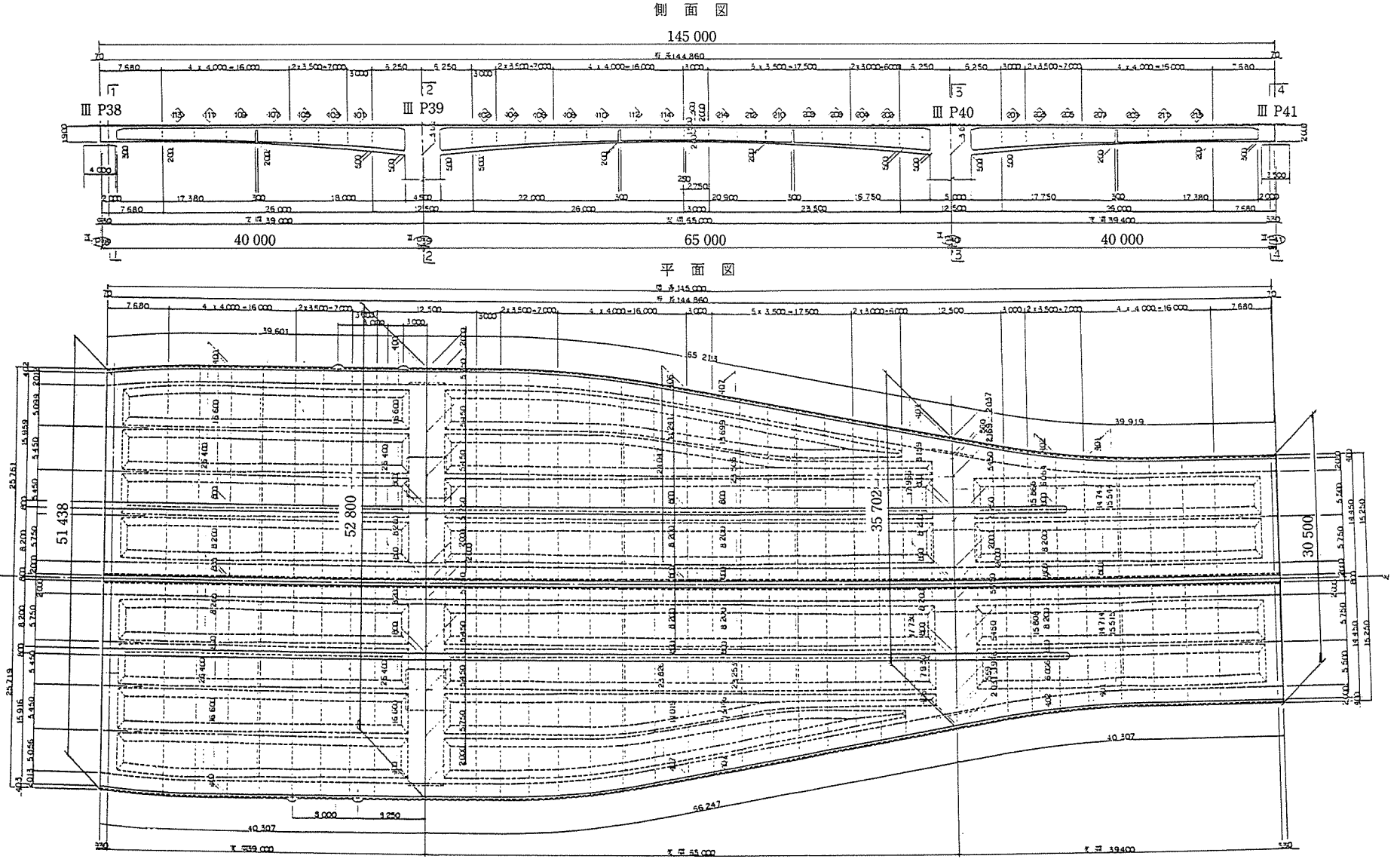
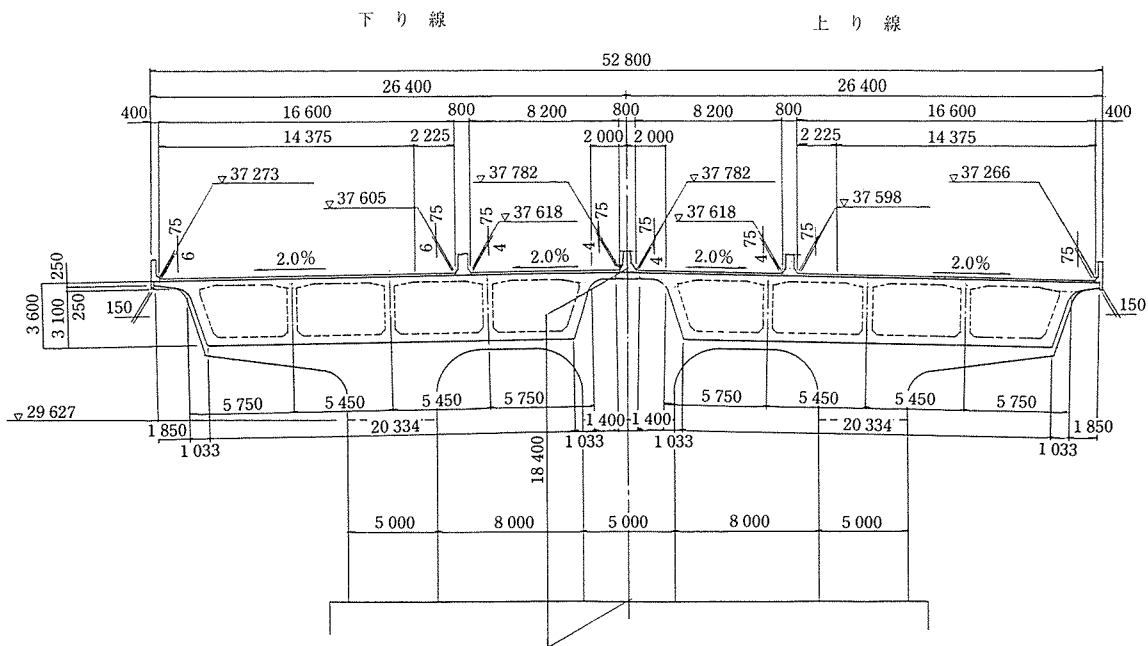


図-2(1) 橋梁一般図(側面図, 平面図)

Ⅲ P39 橋脚断面図



Ⅲ P40 橋脚断面図

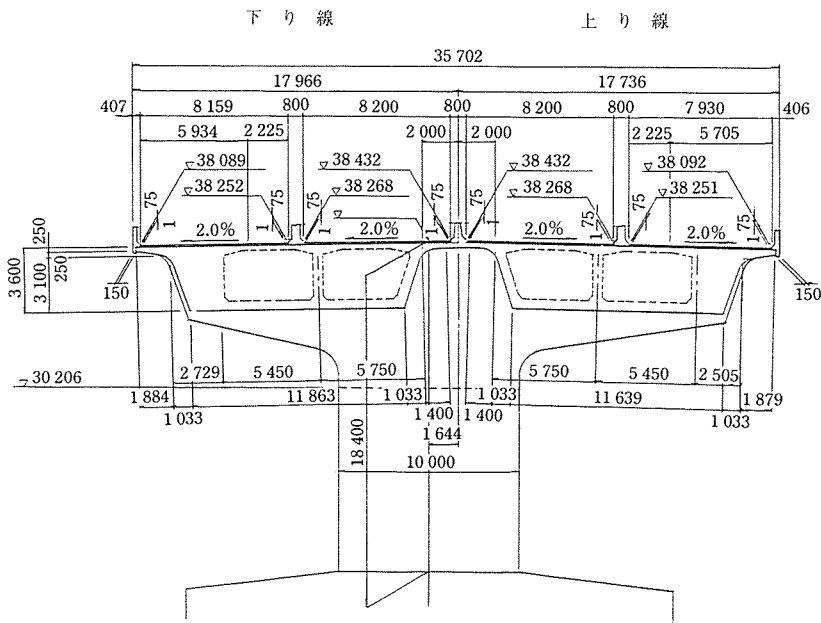


図-2 (2) 橋梁一般図 (断面図)

施 工：ドーピー・川田・昭和共同企業体

橋 格：1等橋 (TL-20)

橋脚間隔：40.00+65.00+40.00 m

幅 員：52.80~30.50 m

構造形式：

上部工

3径間連続ラーメン箱桁

支点部 上下線一体構造

径間部 上下線分離構造

Ⅲ P 38~39 径間 上下線各々 4室多重箱桁

Ⅲ P 39~40 径間 " 4~2室多重箱桁

Ⅲ P 40~41 径間 " 2室多重箱桁

下部工

Ⅲ P 39 3柱ラーメン橋脚 (対称系)

Ⅲ P 40 1柱ラーメン橋脚 (道路中心から 1.6 m 偏心)

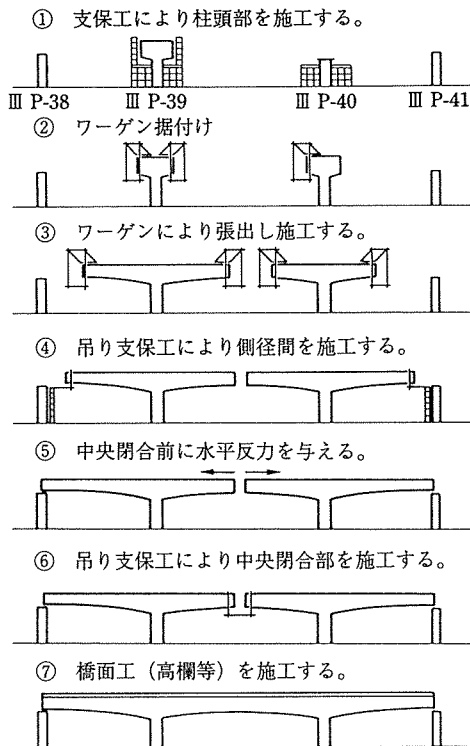


図-3 施工順序

3. 設計概要

3.1 断面力の算出

本橋の構造特性を考慮し、上部工設計用および下部工照査用断面力の算出は以下の要領で行った。

(1) 上部工設計用

- 平面骨組み構造：面内荷重と考えられる荷重に対して適用。
(主桁自重、クリープ、プレ2次、温度関係、乾燥収縮、地震荷重および基礎バネに対する検討)
- 立体格子構造：橋体完成後面外荷重として載荷される荷重に適用。上下線各1主桁構造とした。
(橋面荷重、活荷重、架設時照査用として主桁自重)

- 平面格子構造：柱頭部（中間橋脚）横桁および支承設計用。全主桁をモデル化。
(主桁自重、橋面荷重、活荷重)

(2) 下部工（橋脚）照査用

- 主桁自重、クリープ等
平面骨組み構造として算出した断面力を立体格子構造の主桁により発生する断面力比率で分配。
- 橋面荷重、活荷重、乾燥収縮、温度荷重、地震荷重
立体格子構造として解析。

3.2 上部工設計結果

上部工各主要点の主鋼棒本数および設計荷重時応力状態を、表-1に示す。

3.3 下部工の照査

上部工詳細設計後前項解析方法により算出した断面力を用いてラーメン橋脚の応力照査を行った。その結果によると、表-2に示すように各許容値を満足していない。

表-2 ラーメン橋脚発生応力

		Ⅲ P 39-2	Ⅲ P 39-3	Ⅲ P 40	許容値
断面力	M (tfm)	15 589.4	33 230.4	83 079.2	
	N (tf)	2 080.6	5 890.1	9 347.9	
	S (tf)	1 462.3	2 634.4	5 824.6	
応力度 (kgf/cm ²)	σ_c	89.1	179.6	183.3	148.5
	σ_s	2 726.2	4 444.1	5 408.6	3 300.0
	τ	6.0	10.8	10.9	6.9

その理由として、下部工詳細設計（上部工予備設計）と比べて次の差異があるためと考えられる。

- 乾燥収縮度 ϵ_s の値が異なる。
予備設計 詳細設計（平均材令）
 $-5 \times 10^{-5} \rightarrow -15 \times 10^{-5}$
- 予備設計では、一括施工として主桁断面力を算出している。この場合、構造系変化による二次断面力に相当する荷重として、中央閉合前に主桁に水平力を与え、閉合後この水平力を除荷しているため、実際の施工順序を反映できていない。

表-1 上部工主要点の設計結果

	(kgf/cm ²)									
	側径間 (38)		Ⅲ P 39 (265)		中央径間 (155)		Ⅲ P 40 (186)		側径間 (18)	
	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
静荷重時	18.0	16.2	15.1	75.4	45.4	23.1	20.0	54.7	4.7	34.7
設計荷重時	27.8	1.7	15.5	75.0	57.4	7.3	20.9	52.8	15.6	16.3
	16.3	18.9	7.6	83.2	44.1	24.6	10.2	67.3	2.0	39.7
温度荷重時	39.0	25.1	32.4	88.4	68.4	36.4	30.6	74.5	28.3	1.3
	12.1	-10.1	2.5	65.0	43.8	-12.2	9.6	45.8	-3.2	48.2
地震荷重時	22.7	6.9	20.2	66.6	44.7	22.5	30.1	38.2	0.0	45.0
	13.3	25.5	10.0	84.2	46.1	23.7	9.9	71.2	9.4	24.4

注) ()内数値は、各主要点での必要鋼棒本数を示す。

上表各段中 上段 下段
活荷重 Max Min
温度 + -
地震 右 左

◇設計報告◇

3.4 対応策

本橋の下部工は、工場用地および猪名川河川敷で施工範囲が限定されており、予備設計において水平反力調整工を採用して下部工形状寸法の軽減を行っている。しかしながら今回の上部工設計の結果により、橋脚の断面力が許容値を超えたため、施工済みの橋脚に対して対策が必要となった。

- ① 橋脚の許容値を超える部分を鋼板接着により補強する。
- ② 水平反力調整を見通す。

上記2案のうち、補強の有効性および施工直後の対応策という面から、施工例は少ないが、②の水平反力調整工を採用することとした。

4. 水平反力調整工

4.1 概要

3径間PC連続ラーメン橋の場合、クリープ、乾燥収縮の影響により中間橋脚には常に径間中央側への曲げモーメントが作用している。水平反力調整工とは、張出し施工終了時に主桁中央閉合部において側径間側にジャッキで水平力を与えることにより、常時橋脚に作用しているクリープ、乾燥収縮による断面力を低減しようとする手法である。

わが国での最近の実施例として、祖山橋（富山県， π ラーメン橋）がある。この橋梁の場合、設計段階から水平反力調整を積極的にとりいれ、ラーメン脚は非常にスレンダーな形状となっている。

しかし、本工区のように、橋脚高さの低い脚剛度の高いラーメン橋に対して水平反力調整を行った例は報告されていない。また、本橋は3脚と1脚のラーメン構造で

あり、かつ各車線ごとの多重箱桁であるため、水平力導入についてはさまざまな検討が必要である。水平反力調整に関する検討手順を以下に示す。

- ① 概算必要水平力を算出する。
- ② 概算導入力に対して、導入時期およびそのときの構造系について検討する。
- ③ 導入構造系を評価できるモデルにおいて、橋脚断面力に着目しつつ最終導入力を算出する。
- ④ 水平反力調整が上部工に与える影響を照査する。
- ⑤ 実際の水平力導入方法を検討する。

4.2 導入構造系の検討

上下線を一体としてモデル化した平面骨組み解析の結果、概略導入水平力として上下線当り $H=1\ 500\ \text{tf}$ の値を得た。この値を用いて水平力導入構造系の検討を行う。検討要素として、次の項目に対する組合せを行った。

(1) 検討項目

- ・水平力載荷時期
 - 1) 片車線張出し施工完了後
 - 2) 上下線張出し施工完了後
 - 3) 片車線側径間閉合後
 - 4) 上下線側径間閉合後
- ・水平力載荷構造
 - A) 各車線単独
 - B) 上下線同時
- ・水平力載荷部材
 - a) 主桁5ウェブ載荷
 - b) 主桁3ウェブ載荷

(2) 解析および着目要素

解析は、橋脚をバネ支点と考えた平面格子構造（図

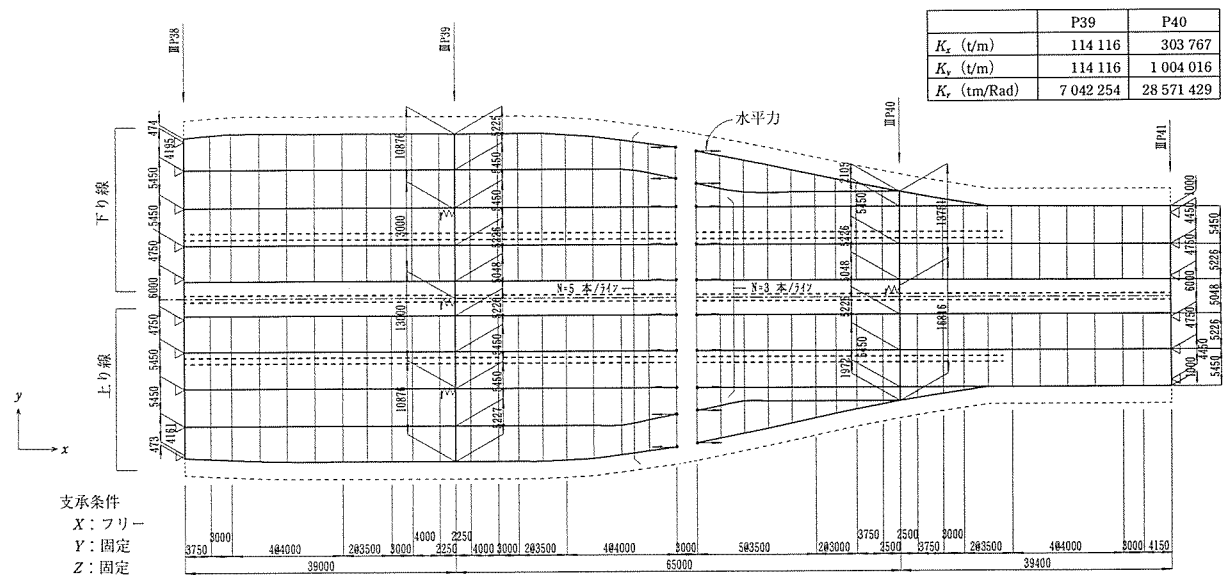


図-4 水平反力検討モデル

表-3 導入構造系の検討

CASE	モデル	組合せ	ねじりせん断応力度 $\tau_{ts}=4.2\text{kgf/cm}^2$			
			Ⅲ P39-1	Ⅲ P39-2	Ⅲ P39-3	Ⅲ P40
1		4Aa	-0.19	-0.46	-0.26	0.70
2		4Aa	0.26	0.46	0.20	-0.82
3		4Ba	0.08	0.01	-0.05	-0.11
4		3Aa	2.30	1.28	0.26	-2.08
5		2Aa	-2.21	-2.52	-2.71	6.12
6		2Aa	2.76	2.62	2.36	-9.71
7		2Ba	0.56	0.09	-0.35	-3.59
8		1Aa	2.51	2.66	2.39	-9.71
9		4Ab	-0.43	-0.58	-0.34	1.14
10		4Ab	0.34	0.58	0.45	-1.01
11		4Bb	-0.09	0.00	0.11	0.13
12		3Ab	2.32	1.48	0.57	-2.61
13		2Ab	-4.55	-3.92	-3.47	10.58
14		2Ab	3.52	4.00	4.68	-14.15
15		2Bb	-1.62	0.08	1.21	-3.58
16		1Ab	2.76	4.26	4.87	-14.13

-4 参照) に水平力を載荷し、支点に発生するねじり反力に対して橋脚断面に発生するねじりせん断応力度に着目し、水平力導入構造系を検討した。検討項目の組合せおよび発生応力度を表-3 に示す。

(3) 解析結果

前記検討ケースのうち、側径間閉合前に片車線ずつ導入すると許容値を満足しない。また、側径間閉合後導入すれば、片車線ずつあるいは5ウェブ、3ウェブ導入の

いずれの場合も許容値を満足する。以上の結果、施工性および発生応力の状態を考慮し、CASE 11 を採用した。

4.3 最終導入力の算出

前項までで導入構造系を決定し、立体格子解析にて必要水平力を試算した。試算結果を表-4 に示す。

この試算結果からも明らかのように、Ⅲ P 39 橋脚下端において水平反力調整による断面力は正の曲げモーメントとして発生するが、(地震+温度荷重時) 断面力は正負交番する。すなわち、Ⅲ P 39-2 橋脚 (+ ←) とⅢ P 39-3 橋脚 (- →) ただし、+-は温度変化を示し、→←は地震の方向を示す) の断面力バランスで必要導入水平力が決定される。試算の結果、設計荷重作用時での必要水平力は、上下線あたり $H=1\ 450\ \text{tf}$ となった。この時の橋脚下端応力状態を表-5 に示す。この状態では発生応力が許容値を若干超えるが、断面力のバランス上水平力の増減により応力調整を行うことは不可能である。

表-5 橋脚応力

		Ⅲ P 39-2	Ⅲ P 39-3	Ⅲ P 40	許容値
断面力	M (tfm)	19 623.2	26 216.5	61 936.5	
	N (tf)	2 076.9	5 844.1	9 292.0	
	S (tf)	1 129.0	2 113.2	4 374.0	
応力度 (kgf/cm ²)	σ_c	108.9	144.0	136.9	148.5
	σ_s	3 325.1	3 114.0	3 326.2	3 300.0
	τ	4.6	8.7	8.2	6.9

本橋は杭基礎構造であるが、設計上基礎バネを考慮した場合上下部工とも若干安全側の設計となるため、詳細設計では橋脚下端固定条件で解析を行っている。基礎バネを考慮した解析を行った場合鉄筋応力度がさらに $50\ \text{kgf/cm}^2$ 程度緩和されるため、許容値を満足できる。ゆえに、水平反力調整量は上下線当り $H=1\ 450\ \text{tf}$ と決定した。

4.4 上部工に与える影響

水平反力調整工により上部工に発生する曲げ応力度は、側径間で下縁 $-7.2\ \text{kgf/cm}^2$ 程度、中央径間では上下縁とも圧縮応力となる。これらの曲げ応力度はあくま

表-4 水平反力調整を考慮した橋脚断面力

		Ⅲ P 39-2			Ⅲ P 39-3			Ⅲ P 40		
		M (tfm)	N (tf)	S (tf)	M (tfm)	N (tf)	S (tf)	M (tfm)	N (tf)	S (tf)
地震+温度	(+ →)	-7 445.4	2 048.6	922.9	-23 574.9	5 798.1	1 829.1	-5 244.2	9 441.0	1 185.1
	(+ ←)	13 236.3	2 084.7	-719.2	1 344.6	5 788.0	-530.5	52 253.1	9 199.6	3 655.5
	(- →)	-15 589.4	2 080.6	1 462.3	-33 230.4	5 890.1	2 634.4	25 581.8	9 589.3	-983.9
	(- ←)	5 092.3	2 116.7	-179.8	-8 311.0	5 880.0	274.8	83 079.2	9 347.9	-5 824.6
水平反力調整		6 386.9	-7.8	-409.8	7 013.9	-46.0	-521.3	-21 142.7	-56.0	1 450.5
合計	(+ →)	-1 058.5	2 040.8	513.1	-16 561.0	5 752.1	1 307.8	-26 386.9	9 385.0	2 635.6
	(+ ←)	19 623.2	2 076.9	-1 129.0	8 358.5	5 742.0	-1 051.8	31 110.4	9 143.6	5 106.0
	(- →)	-9 202.5	2 072.8	1 052.5	-26 216.5	5 844.1	2 113.1	4 439.1	9 533.3	466.6
	(- ←)	11 479.2	2 108.9	-589.6	-1 297.1	5 834.0	-246.5	61 936.5	9 291.9	-4 374.1

表-6 上部工曲げ応力度詳細

(kgf/cm²)

		側径間 (38)		Ⅲ P 39 (265)		中央径間 (155)		Ⅲ P 40 (186)		側径間 (18)	
		上 縁	下 縁	上 縁	下 縁	上 縁	下 縁	上 縁	下 縁	上 縁	下 縁
荷重による 応力度	主桁自重	14.0	-20.7	-63.8	57.7	38.8	-55.6	-79.6	82.6	10.4	-17.3
	橋面工	12.6	-18.4	-12.4	12.7	8.3	-11.2	-8.6	10.2	3.7	-6.3
	水平力	3.1	-4.7	6.4	-6.2	0.2	9.9	1.3	6.5	6.6	-7.2
	プレ静定	6.3	33.2	109.5	-13.7	-15.2	131.2	99.1	-18.6	8.2	29.3
	プレ不静定	-14.9	22.1	-18.2	18.7	13.5	-41.3	9.1	-19.5	-17.6	29.0
	活荷重	9.8	-14.5	0.4	-0.4	12.0	-15.8	0.9	-1.9	10.9	-18.4
		-1.7	2.7	-7.5	7.8	-1.3	1.5	-9.8	12.6	-2.7	5.0
	温度荷重	11.2	-11.8	16.9	-10.0	10.4	4.1	9.7	7.2	12.7	-15.0
	2.8	0.6	6.7	0.4	11.0	-19.5	8.5	-6.8	2.3	2.0	
水平力無視	地震荷重	4.7	-9.3	5.1	-8.8	-0.7	-0.6	10.1	-16.5	-4.7	10.3
		-4.7	9.3	-5.1	8.8	0.7	0.6	-10.1	16.5	4.7	-10.3
	静荷重時	18.0	16.2	15.1	75.4	45.4	23.1	20.0	54.7	4.7	34.7
	設計荷重時	27.8	1.7	15.5	75.0	57.4	7.3	20.9	52.8	15.6	16.3
水平力考慮	温度荷重時	16.3	18.9	7.6	83.2	44.1	24.6	10.2	67.3	2.0	39.7
		39.0	25.1	32.4	88.4	68.4	36.4	30.6	74.5	28.3	1.3
		12.1	-10.1	2.5	65.0	43.8	-12.2	9.6	45.8	-3.2	48.2
	地震荷重時	22.7	6.9	20.2	66.6	44.7	22.5	30.1	38.2	0.0	45.0
	13.3	25.5	10.0	84.2	46.1	23.7	9.9	71.2	9.4	24.4	
水平力考慮	静荷重時	21.1	11.5	21.5	69.2	45.6	33.0	21.3	61.2	11.3	27.5
	設計荷重時	30.9	-3.0	21.9	68.8	57.6	17.2	22.2	59.3	22.2	9.1
		19.4	14.2	14.0	77.0	44.3	34.5	11.5	73.8	8.6	32.5
	温度荷重時	42.1	-14.8	38.8	58.8	68.6	-2.3	31.9	81.0	34.9	-5.9
	15.2	20.4	8.9	82.2	44.0	46.3	10.9	82.3	3.4	41.0	
	25.8	2.2	26.6	60.4	44.9	32.4	31.4	44.7	6.6	37.8	
	16.4	20.8	16.4	78.0	46.3	33.6	11.2	77.7	16.0	17.2	

注) () 内数値は、各主要点での必要鋼棒本数を示す。

主桁自重、プレ不静定にはクリープ、二次力等を含む。

上表各段中 上 段 下 段 許容応力度

活荷重 Max Min
 温度 + -
 地震 右 左

静荷重作用時 $140 > \sigma_c > 0$
 設計荷重作用時 $140 > \sigma_c > -15 (> 0)$
 温度荷重作用時 $161 > \sigma_c > -20$
 地震荷重作用時 $210 > \sigma_c > -30$

で二次的に発生するものと評価し、本詳細設計においては断面に対して不利に作用する場合のみ PC 鋼棒で補強することとした。

4.5 導入方法の検討

図-5 に中央閉合部での水平力導入要領を示す。

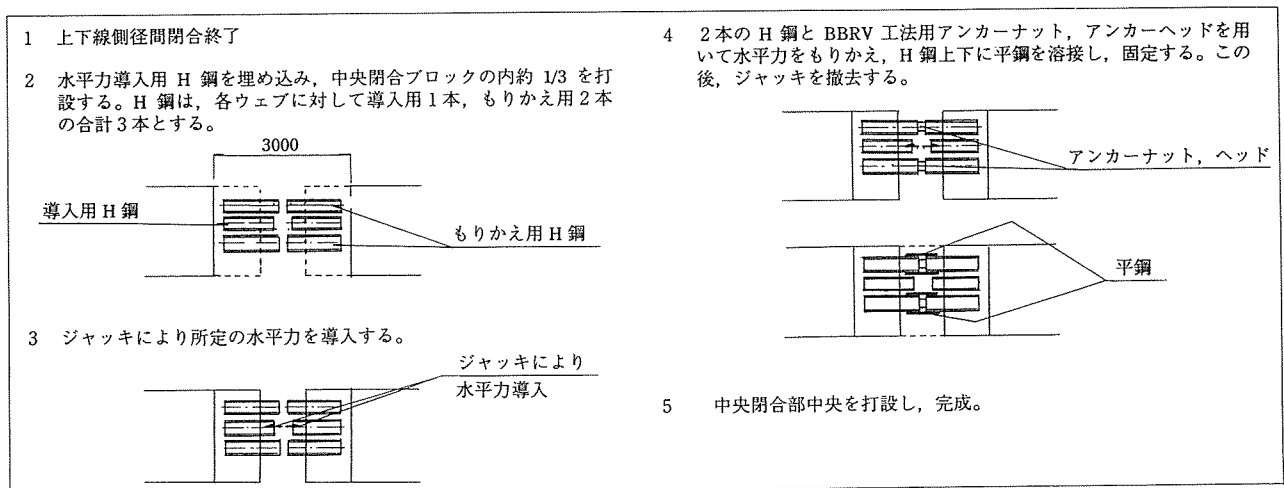


図-5 水平力導入要領

5. III P 40 橋脚ウェブ付近付け根付近の応力検討

5.1 概要

前述したように、本橋は幅員変化の影響により III P 40 橋脚付近で 5 ウェブから 3 ウェブに変化する。これによる応力の乱れを検証するため、下り線側 III P 40 付近を取り出し三次元 FEM 解析を行った。ここでは、その概要について述べることにする。

(1) 検討荷重

検討の対象とする荷重ケースは、以下のとおりである。

Case-1	静荷重時	自重 橋面死荷重 乾燥収縮 プレストレス 温度変化
--------	------	---------------------------------------

Case-2	温度荷重	
--------	------	--

(2) モデル化および使用要素

検討のためのモデル化は、以下の要領で行った。

- ・モデル化の範囲は、III P 40 橋脚をはさんで中間隔壁までとする。
- ・着目は下り線のみとし、モデル化もこの範囲とする。
- ・上下線は III P 40 橋脚の梁で結合しているの、上り線側の境界位置に対称条件を入れる。モデルは橋軸直角方向 1/2 モデルに理想化する。
- ・橋脚は、脚下端まですべてモデル化する。脚は途中から線材でモデル化し、その断面性能は骨組みモデルの 1/2 とする。
- ・解析は三次元解析とするが、その使用要素は以下のとおりとする。

ソリッド要素：着目部付近の上部工および橋脚

プレート要素：着目部以外の上部工

ビーム要素：着目部以外の橋脚

これら要素を組み合わせた要素全体のイメージ図を、

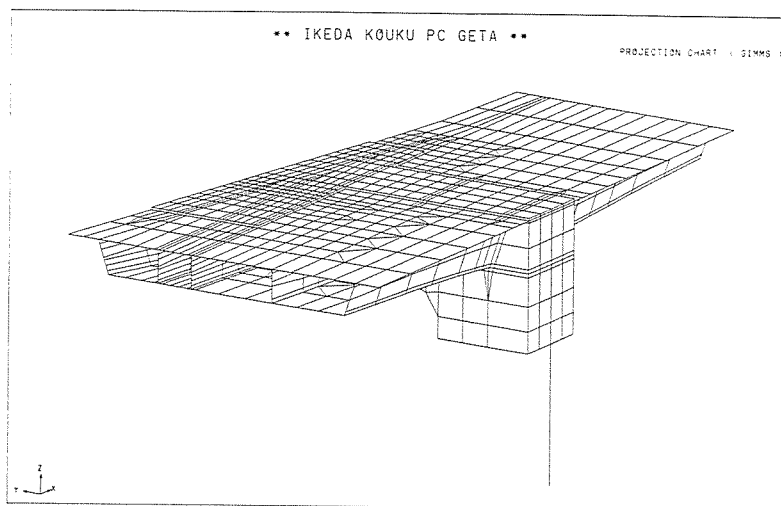


図-6 全体イメージ図

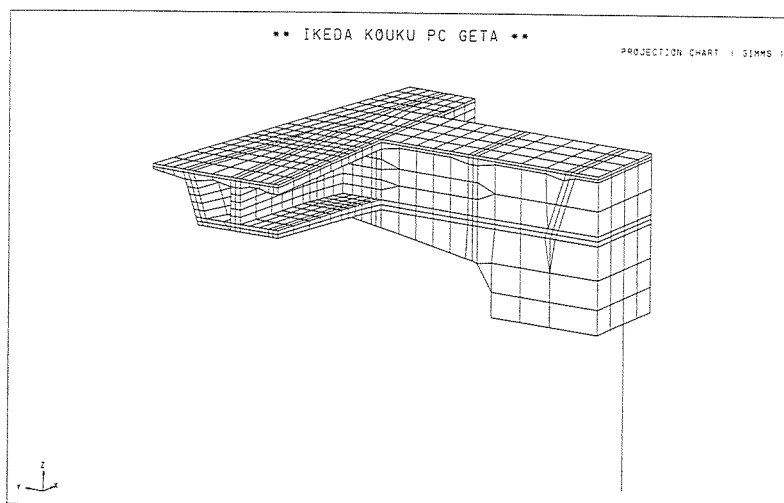


図-7 ソリッド要素イメージ図

◇設計報告◇

図-6 に示す。また、着目部付近のソリッド要素のみを取り出したイメージ図を、図-7 に示す。

5.2 検討結果

以上の条件で行った FEM 解析結果の概要を述べる。検討は、死荷重時、温度荷重に対して、変位および橋脚横梁、上床版、下床版、断面方向、ウェブでの応力に対して行ったが、ここでは、死荷重時について上床版、下床版および断面方向の応力度に着目した検討結果概要を述べる。各々の検討対象断面は、図-8 を参照されたい。

(1) 上床版の応力状態

主桁 G 3, G 4, G 5 がⅢP 40 橋脚に近づくに従って、各々の桁間隔が狭くなる。20 L 断面では G 4, G 5 が 1 本となり、ⅢP 40 橋脚横梁部で G 3 (G 4, G 5) が間隔約 2.2 m で剛結される。ⅢP 41 側では G 3 (G 4, G 5) が 1 本の主桁 G 3 となっている。図-9 に上床版主引張応力 (σ_1) を示すが、このほか σ_x , σ_y の応力分布図を見る限りでは応力集中や応力のみだれはない。

(2) 下床版の応力状態

上床版と同様に、図-10 に下床版主引張応力を示す

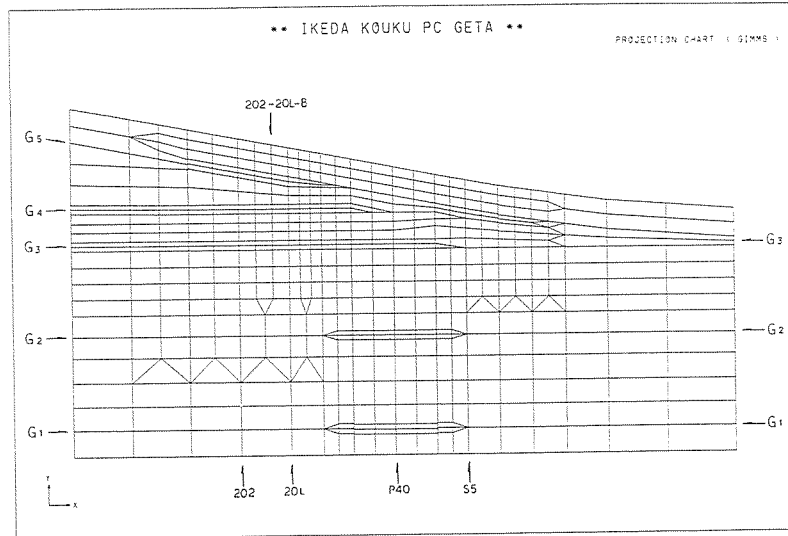


図-8 抽出断面位置図

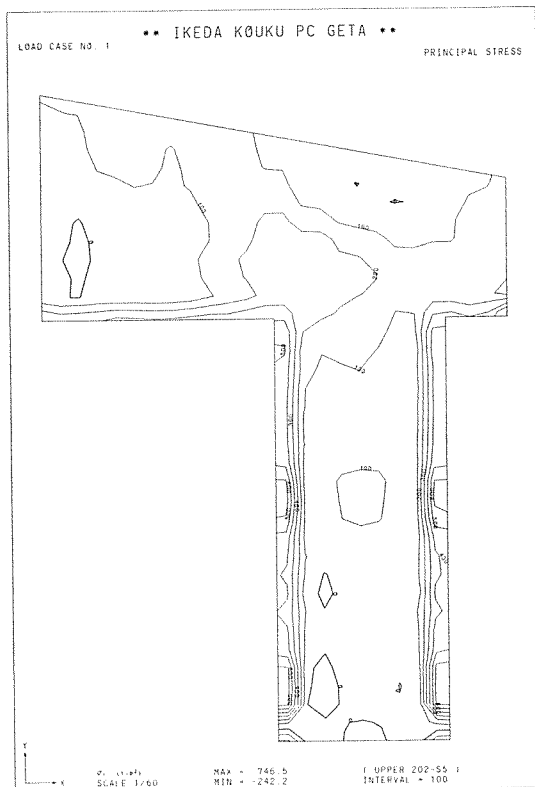


図-9 上床版主引張応力図

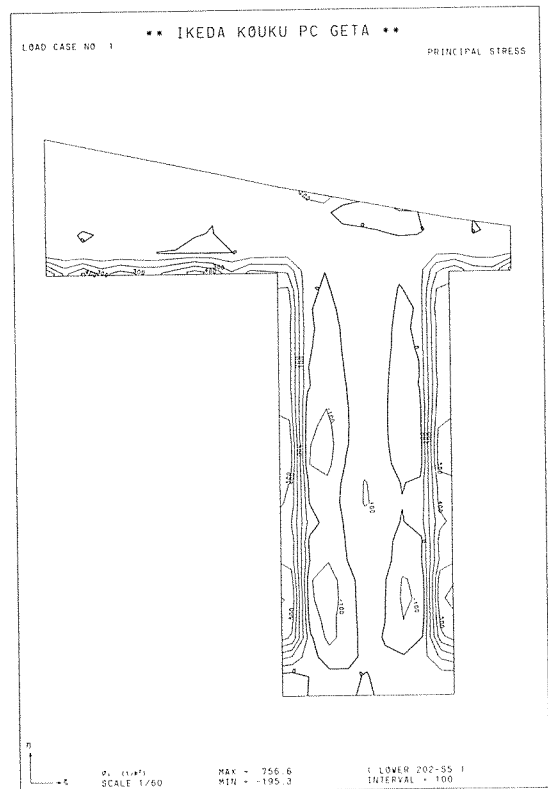


図-10 下床版主引張応力図

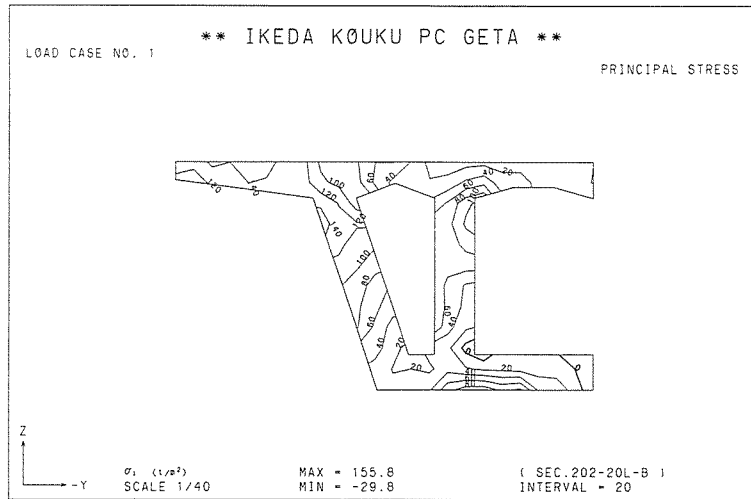


図-11 閉断面側主応力図

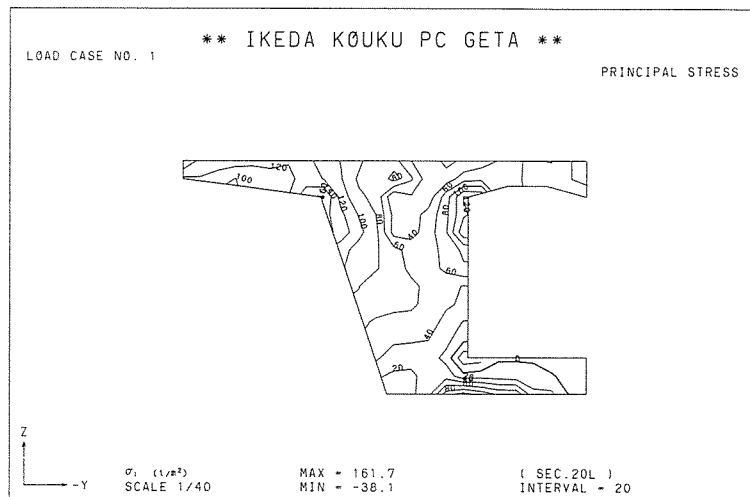


図-12 閉断面側主応力図

が、このほか σ 、 σ_x 、 σ_y の応力分布図を見る限りでは応力集中や応力のみだれはない。

(3) 断面方向での応力状態

20 L 断面では、G 4、G 5 桁が一体となり主桁本数が5本から4本に減少し、断面形状が変化する。図-11、12に20 L 断面前後の主引張応力状態を示すが、このほか σ 、 σ_x 、 σ_y とも応力状態に大きな変化はない。また、20 L 断面前後でのウェブと横桁壁との応力差は、2~3 kgf/cm²程度である。

5.3 応力解析に対する考察

今回のFEM解析の結果、施工性を考えて20 L断面前後でG 4、G 5主桁を一体化することは、特に大きな問題が発生しないことがわかった。

6. おわりに

本橋は、前述のように料金所の関係により1支間内で幅員が大きく変化している。そのため、上部工設計上も諸問題が発生した。移動作業車を用いての施工であるためウェブ配置を施工可能な状態に変更すること、ウェブの湾曲に対する検討、各ウェブに対する鋼材配置の考え方等ここに報告できなかった問題点も多い。ここでは、本橋での最大の問題点を2点にしぼって報告した。このうち、本報告で述べた水平反力調整は近年実施例も少なく、下部工施工完了以後での設計上での方策として有効な手法といえる。今回は、設計上の問題点の解決方法を紹介したが、時を変えて施工上の諸問題についても報告したい。

【1995年1月7日受付】