

(158) 東九州自動車道小河内川橋 (波形鋼板ウェブPC橋) の設計について

日本道路公団九州支社 構造技術課 前田良文  
 ドーピー建設工業(株) 九州支店 正会員 津田敏行  
 ドーピー建設工業(株) 九州支店 正会員 和田教志  
 ドーピー建設工業(株) 九州支店 正会員 足立大介

1. はじめに

小河内川橋 P3~A2 径間は、東九州自動車の白杵 I C から津久見 I C 間に建設中の T ラーメン部橋長 157.0 m、有効幅員 9.81 m の PC 2 径間連続ラーメン箱桁橋である (図-1 参照)。本橋の特徴は、①ウェブには波形鋼板を採用し、②架設時および完成時の主桁鋼材には透明シースを用いた全外ケーブルを採用したこと、③架設時には外ケーブルと総ねじ PC 鋼棒を併用して張出施工を行うことが挙げられる。

本報告には、本橋に波形鋼板ウェブを採用するに当たり以下の A~C 案の構造比較、B 案での有限要素法による上下床版と波形鋼板ウェブのせん断力分担率の検討および、B 案、C 案での定着部付近での有限要素解析を行った結果を報告する。

- (1) 全外ケーブルを用いたコンクリートウェブ案 (外ケーブルコンクリートウェブ A 案)
- (2) 全外ケーブルを用いた波形鋼板ウェブの毎ブロック定着案 (外ケーブル波形鋼板ウェブ B 案)
- (3) 全外ケーブルを用いた波形鋼板ウェブの 2 または 3 ブロック定着案 (外ケーブル波形鋼板ウェブ C 案)

2. 橋梁概要

道路区分：第 1 種第 2 級

使用材料

構造形式：PC 2 径間連続ラーメン箱桁  
 (波形鋼板ウェブ構造)

コンクリート：設計基準強度  $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$

鉄筋：SD345

橋長：157.000m (道路中心)

鋼板：SM490YA (C 案)

支間：77.750+77.750m

PC 鋼材：主桁外ケーブル SWPR7BL 19S15.2

有効幅員：9.810m

(C 案) 架設時主桁内鋼棒 総ねじ鋼棒 PC  $\phi 36$

横断勾配：2.00% 縦断勾配：3.00%

平面曲線：R=7000m

架設方法：張出し架設工法 (側径間は吊り支保工施工)

設計震度：Kh=0.11 (橋軸方向)

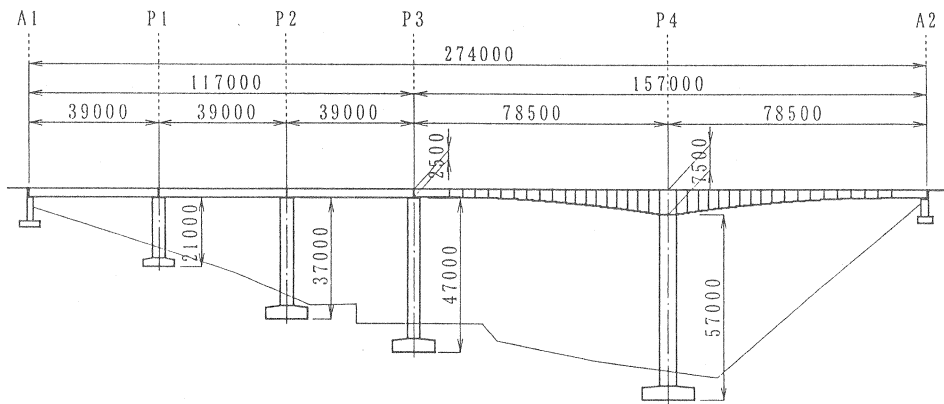


図-1 橋梁全体図

### 3. 構造比較

#### 3.1 構造形式の比較

本橋に波形鋼板ウェブを採用するに当たり、全外ケーブルのコンクリートウェブA案と波形鋼板ウェブB、C案の比較を行った。波形鋼板ウェブの2案は、B案として波形鋼板ウェブ高を最大で5.0mに抑えて、外ケーブルに12S15.2を用いた毎ブロック定着案、C案として波形鋼板ウェブ高を桁高の変化とともに変化させ、外ケーブルに19S15.2を用いた2または3セグメント定着案とした。C案において波形鋼板ウェブ高が5.0mを超えるセグメントにおいては、座屈に対する安全性を兼ねて、波形鋼板ウェブの内側にコンクリートウェブを設置することとした。張出架設のセグメント数、A案は19セグメント、B案は17セグメント、C案は16セグメントとなった。

上記3案の桁高は、桁端ではA1～P3径間の合成桁の桁高に合わせて2.50m、柱頭部では7.50mとなる。また、外ケーブルの緊張セグメントについては、内ケーブルとして総ねじPC鋼棒を用いて緊張を行うが、A案、C案では、2または3ブロック毎に緊張と解放を繰り返してPC鋼棒を移動するものとする。B案では緊張力の解放は構造系完成後に行い、緊張力の解放後曲げ破壊抵抗鋼材として使用する。A案の内ケーブル(12S15.2)は、緊張力解放後曲げ破壊抵抗鋼材として使用する。A～C案のケーブル配置は以下のとおりとする。

(1)コンクリートウェブA案—張出架設時の外ケーブルに19S15.2、内ケーブルに12S15.2を使用する。構造系完成後の連続ケーブルには19S15.2を使用する。内ケーブルは、構造系完成後緊張力を解放するものとする。

(2)波形鋼板ウェブB案—張出架設時の外ケーブルに12S15.2と総ねじPC鋼棒を使用し、毎セグメント定着する。構造系完成後の連続ケーブルは19S15.2を使用する。

(3)波形鋼板ウェブC案—張出架設時は、外ケーブルの19S15.2を2または3セグメント毎に4本ずつ定着する。外ケーブルを定着しないセグメントについては総ねじPC鋼棒を使用し、張出し架設を行うものとする。構造系完成後の連続ケーブルは19S15.2を使用する。

#### 3.2 波形鋼板の形状とコンクリートと波形鋼板の接合

本橋は、桁高が7.50mと高く、支間が77.750mと大きいため、横方向の剛性を大きくする必要があり波形鋼板の形状は、耐久性の実績もある図-3のドール橋の波形形状を採用した。コンクリートと波形鋼板ウェブの接合方法についても、同橋と同じL型アンクルによる方法を採用した。L型アンクルのずれせん断耐力は、既往の実験<sup>1)</sup>で確認されている。

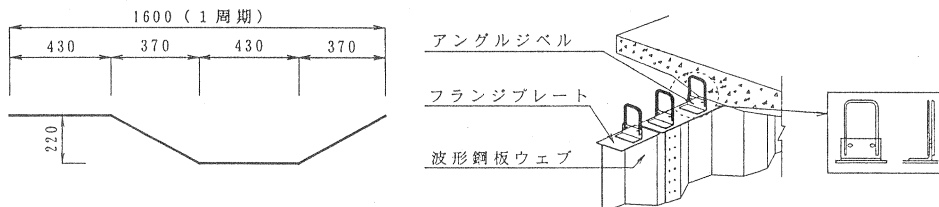


図-3 波形鋼板形状 コンクリートと鋼板の接合方法

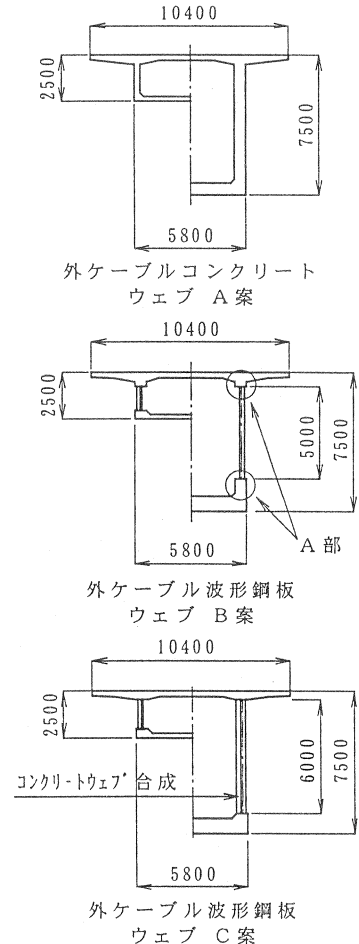


図-2 主桁断面図

### 3.3 定着突起形状

外ケーブル定着突起形状を図-4に示す。コンクリートウェブA案では外ケーブルの定着突起をウェブと上床版の角部に取り付けた。波形鋼板ウェブB案ではプレストレス力により上床版に作用する力を小さくするようにコンクリートウェブを打ち下げることとした。また、毎セグメント定着とすることで1カ所当たりのプレストレス力を小さくした。波形鋼板ウェブC案では、2または3セグメント定着とするために、1セグメントでの定着本数は19S15.2ケーブルが4本となった。定着体をB案と同様に上床版とウェブの角に設置すると、プレストレス力の上床版に与える影響が大きく、定着突起の下側にウェブを設けることによりプレストレス力を上下床版に伝達する構造とした。

### 3.4 数量比較

検討の結果、数量比較表を以下に示す。コンクリート数量は波形鋼板ウェブを採用することによりコンクリートウェブA案の80%程度に低減された。B案、C案における鉄筋量の差は、B案では架設時のPC鋼

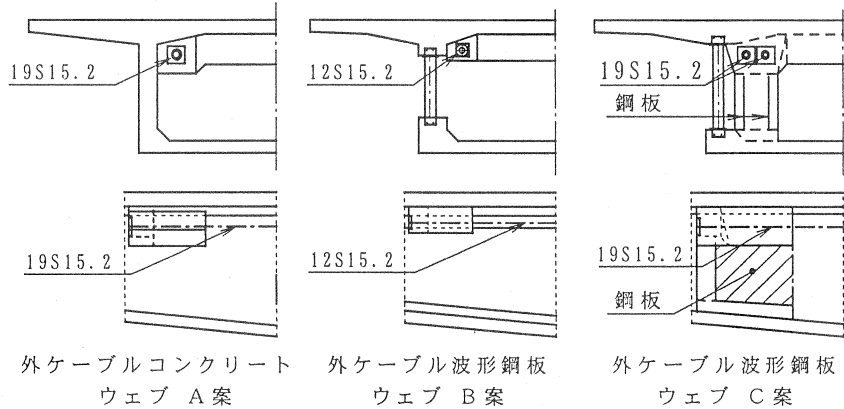


図-4 定着部構造図

棒を緊張力の解放後、曲げ破壊抵抗鋼材として使用するために生じた。主桁のPC鋼材の総量は、波形鋼板ウェブB、C案において、コンクリートウェブA案に対して75%程度となった。波形鋼板の数量は、B案で波形鋼板の高さを5.0mと制限したため、C案に比較し減少した。

表-1 数量比較表

構造形式による数量比較			※ ( ) 内は、外ケーブルコンクリートウェブとの比率を示す。				
項目	種別	単位	外ケーブルコンクリートウェブ A案	外ケーブル波形鋼板ウェブ B案	外ケーブル波形鋼板ウェブ C案	備考	
コンクリート	$\sigma_{ck}=40N/mm^2$	m <sup>3</sup>	1,739.8 ( 1.00 )	1,334.6 ( 0.77 )	1,385.4 ( 0.80 )	主桁部のみ	
型枠		m <sup>2</sup>	4,898.3 ( 1.00 )	3,386.5 ( 0.69 )	3,404.8 ( 0.70 )	主桁部のみ	
鉄筋	SD345	t	251.3 ( 1.00 )	211.7 ( 0.84 )	227.3 ( 0.90 )		
鋼板	SM490Y	t	---	139.8	147.2		
PC鋼材	主鋼材	(12S15.2B)	kg	19,634.9	0.0	0.0	SWPR7B 内ケーブル
		(12S15.2B)	kg	0.0	34,865.9	0.0	SWPR7B 外ケーブル
		(19S15.2B)	kg	76,005.3	27,087.4	69,081.4	SWPR7B 外ケーブル
	小計		kg	95,640.2 ( 1.00 )	61,953.3 ( 0.65 )	69,081.4 ( 0.72 )	
	架設PC鋼材	異形鋼棒φ36	kg	1,455.6	12,173.4	1,455.6	総ねじPC鋼棒
	主方向合計			97,095.8 ( 1.00 )	74,126.7 ( 0.76 )	70,537.0 ( 0.73 )	
	床版横締め	(1S21.8S)	kg	4,355.4 ( 1.00 )	6,584.8 ( 1.51 )	7,253.1 ( 1.67 )	SWPR19

### 4. 上下床版と波形鋼板ウェブのせん断力分担率

波形鋼板ウェブB案を検討するに当たり、上下床版から波板に接続するまでのコンクリートウェブの部分(図-2のA部)のせん断力分担率を算出する必要が生じた。そこで本橋を図-5に示すような1/2モデルで有限要素解析を行い、上床版、下床版、上床版コンクリートウェブ、下床版コンクリートウェブ、波形

鋼板ウェブのせん断力の分担率を求めた。せん断力の分担率を算出するモデルは、1) 最大張出時の自重と2) 一体施工時の自重とする。この2ケースの比較を行い、せん断力の分担率を決定した。モデル図を図-5に示す。

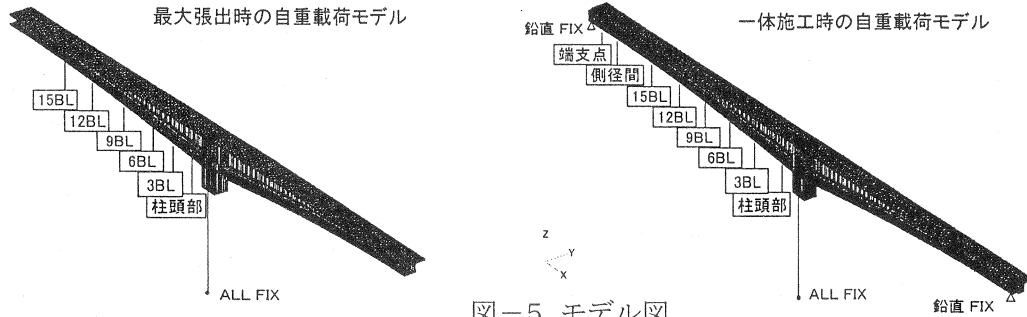


図-5 モデル図

4.1 せん断力の分担率の算出部材と分担率

図-6にせん断力の算出部材を示す。

分担率算出部材

- ①上床版
- ②上床版コンクリートウェブ
- ③波形鋼板ウェブ
- ④下床版コンクリートウェブ
- ⑤下床版

FEM解析による各セグメントのせん断力分担率は表-2のようになった。

解析した構造系の違いによりせん断力の分担率は異なる傾向となった。下床版のせん断力分担率は、下床版断面積が減少するに伴って減少する。上床版のせん断力分担率は、最大張出時の解析においては10%程度であるが、一体施工時の解析では8%~0%と変化する。これらは、せん断力、曲げモーメントの正負により変化するものと考えられる。

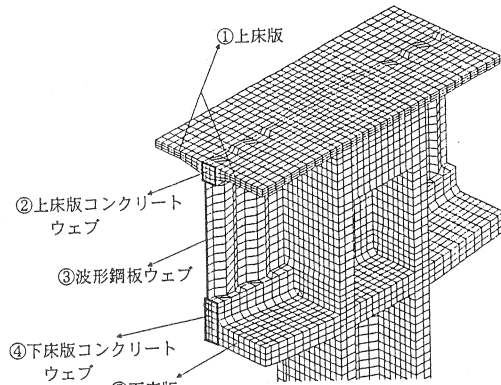


図-6 せん断力の抽出要素

表-2のFEM解析の結果より、以下の仮定を設けて検討に用いるせん断力の分担率を決定した。

- ①主桁のせん断力は、上下床版とコンクリートウェブ・波形鋼板ウェブで受け持つとする。
- ②使用時に着目すると一体施工時の分担率に近いと考える。
- ③トータルのせん断力は、安全側をみて105%とする。

表-3に検討に用いた、せん断力の分担率を示す。

表-2 FEM解析から抽出したせん断力(kN)およびせん断力分担率

一体施工時(主桁自重)														
荷重位置	柱頭部BL		3BL		6BL		9BL		12BL		15BL		側径間中央	端支点
	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率
上床版	641	8%	438	7%	244	4%	10	0%	200	7%	309	20%	202	8%
上床版コンクリートウェブ	491	6%	440	7%	373	7%	273	8%	88	3%	259	16%	588	22%
波形鋼板ウェブ	3945	48%	3185	50%	3478	64%	2005	80%	2361	85%	892	57%	1713	64%
下床版コンクリートウェブ	1603	19%	1309	21%	895	16%	340	9%	8	0%	83	5%	52	2%
下床版	1605	19%	984	15%	479	9%	83	2%	131	5%	28	2%	116	4%
合計	8284	1.00	6357	1.00	5469	1.00	3612	1.00	2788	1.00	1571	1.00	2671	1.00
最大張出時(主桁自重)														
荷重位置	柱頭部BL		3BL		6BL		9BL		12BL		15BL			
	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率	せん断力	分担率		
上床版	1238	11%	1046	12%	864	11%	635	11%	375	11%	121	9%		
上床版コンクリートウェブ	638	6%	582	7%	533	7%	489	9%	423	12%	212	15%		
波形鋼板ウェブ	3945	36%	3341	39%	3569	46%	2929	53%	2193	63%	932	67%		
下床版コンクリートウェブ	2155	19%	1666	19%	1227	16%	725	13%	277	8%	122	9%		
下床版	3079	28%	2216	25%	1525	20%	748	14%	211	6%	9	1%		
合計	11056	1.00	8851	1.00	7719	1.00	5526	1.00	3479	1.00	1395	1.00		

注) 単位 せん断力:kN

表-3 検討に用いたせん断力の分担率

荷重位置	柱頭部	3BL	6BL	9BL	12BL	15BL	側径間	端支点
上床版	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
上床版コンクリートウェブ	5%	6%	7%	9%	10%	16%	22%	25%
波形鋼板ウェブ	55%	62%	69%	76%	85%	79%	73%	70%
下床版コンクリートウェブ	20%	16%	12%	7%	0%	0%	0%	0%
下床版	20%	16%	12%	7%	5%	5%	5%	5%
合計	105%	105%	104%	104%	105%	105%	105%	105%

5. 柱頭部の応力状態

柱頭部は、張出架設による自重の断面力、外ケーブルの定着による断面力により複雑な応力状態となる。よって、波形ウェブB案、C案において、柱頭部はFEM解析により検討を行った。

5.1 解析の結果

波形鋼板ウェブB案では、外ケーブル定着部付近、柱頭部の隔壁部、床版部、箱桁内において発生引張力はD19またはD16の鉄筋で対応できた。しかし、柱頭部の柱と主桁下床版の接合部端部で  $18\text{N/mm}^2$  の圧縮応力が発生した (図-7参照)。この圧縮応力に対して下床版部の幅または高さの変更、プレストレス力の増加等で対応する必要が生じた。柱頭部柱端部で  $2.4\text{N/mm}^2$  程度の引張力が発生した。

波形鋼板ウェブC案では、外ケーブル定着部付近、柱頭部の隔壁部、床版部、箱桁内においては発生引張力はD19の鉄筋で対応できた。また、B案で発生した柱頭部の柱と主桁下床版の接合部端部の応力は  $14\text{N/mm}^2$  の圧縮応力が発生した (図-8参照)。C案ではこの部分の応力が設計荷重時程度の応力となった。柱頭部柱端部で  $1.9\text{N/mm}^2$  程度の引張力が発生した。

架設時の外ケーブルによるプレストレス量はB案とC案を比較すると、C案が約1.5倍程度大きい。B案の下床版下縁に発生した  $18\text{N/mm}^2$  の圧縮応力度は、B案の外ケーブルによるプレストレス量がC案に比べ少ないために発生したものと考えられる。B案にC案程度のプレストレス力を入れた場合には、この圧縮応力度が  $14\text{N/mm}^2$  程度の応力となり、B案の下床版からのコンクリートウェブの立上げは、柱頭部付近主桁下縁の圧縮応力の低減に十分な機能を有する部材である。

6. 定着突起のFEM解析

波形鋼板ウェブにおいて外ケーブルの定着突起はコンクリートウェブの場合とちがいで2辺で固定となりづらい。B案ではウェブを打ち下ろして2辺固定に近い形状とした。C案では突起の下にさらにウェブを設けて直接床版や波形鋼板ウェブに力が作用しない構造としている (図-4参照)。また、C案で定着突起の下にコンクリートウェブおよび鋼板ウェブでの補強のないモデルをC'案としてC案との比較のためモデルを作成し、検討を行った。

6.1 解析の結果

B案では外ケーブルの定着突起からのプレストレスによる応力が図-9より上床版で橋軸方向に  $0.86\text{N/mm}^2$  程度の応力が

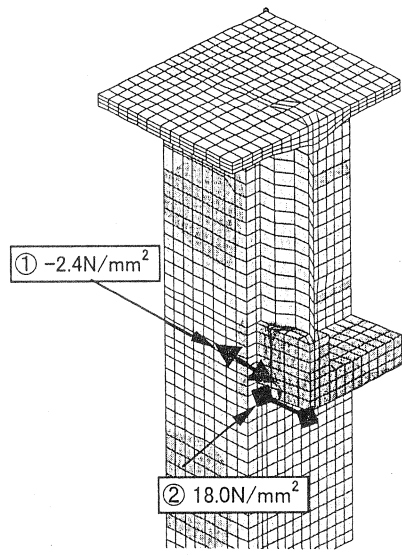


図-7 波形鋼板ウェブB案

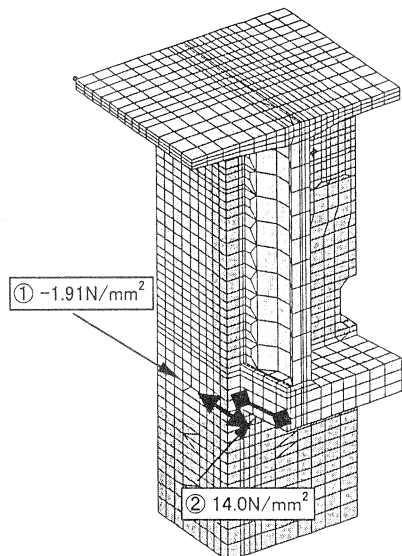


図-8 波形鋼板ウェブC案

発生している。橋軸直角方向に  $1.11\text{N/mm}^2$  程度の応力が発生している。これらの応力は鉄筋またはプレストレス力に対応できる応力と考えられる。波板の橋軸直角方向の変形量は、 $0.4\text{mm}$  程度であった。

C 案では外ケーブルの定着突起からのプレストレスによる応力が図-10 より上床版で橋軸方向に  $0.60\text{N/mm}^2$  程度の応力が発生している。橋軸直角方向に  $2.11\text{N/mm}^2$  程度の応力が発生している。これらの応力は鉄筋またはプレストレス力だけで対応できる応力と考えられる。波板の橋軸直角方向の変形量は、 $0.3\text{mm}$  程度であった。

C' 案の場合、外ケーブルの定着突起からのプレストレスによる応力が図-11 より上床版で橋軸方向に  $6.42\text{N/mm}^2$  程度の応力が発生している。橋軸直角方向に  $5.24\text{N/mm}^2$  程度の応力が発生している。これらの応力は鉄筋等で対応できる応力と考えられないので形状の変更、定着本数の変更が必要となる。波板の橋軸直角方向の変形量は、 $1.5\text{mm}$  程度であった。また、定着突起部とその上床版部の変形がB案、C案に比較し、3倍程度の発生している。このことより、定着突起下に取り付けられているコンクリートウェブと鋼板のウェブの補強は十分機能していると考えられる。

### 7. まとめ

本橋においては、施工セグメントが最小で、橋軸方向の鋼材量が最小となり、前谷橋の実験等で定着突起の挙動が確かめられている波形鋼板ウェブC案を採用した。

本橋の設計にあたり以下の事項が明らかとなった。

- ①波板高さを抑えた波形鋼板ウェブB案の上下床版と波形鋼板ウェブのせん断分担率は、桁高、下床版厚等により変化するが、おおむね上床版で 5%、波形鋼板ウェブで 70%~90%程度に分担率となった。
- ②B案の下床版からのコンクリートウェブの立上げは圧縮応力に十分な機能を有する部材である。
- ③C案での定着突起下の補強コンクリートウェブ、鋼板ウェブは、大容量の定着突起の補強部材として十分な機能するものである。

### 8. 終わりに

小河内川橋は、平成 13 年 7 月の竣工に向けて、現在張出施工を順次行っています。本橋の設計施工に際し多大なご指導およびご尽力をいただいた関係者各位にこの場を借りて感謝の意を表す次第であります。

### 参考文献

- 1) 立神、蛭名、上平、柳下：「アングルジベルのせん断耐力に関する基礎的研究」プレストレストコンクリート技術協会 第9回シンポジウム P74~84 平成 11 年 10 月

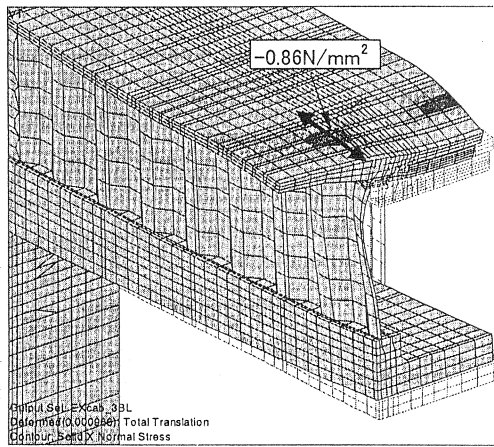


図-9 波形鋼板ウェブB案-橋軸方向応力

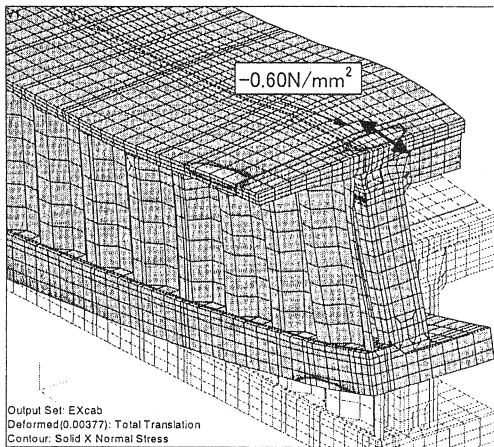


図-10 波形鋼板ウェブC案-橋軸方向応力

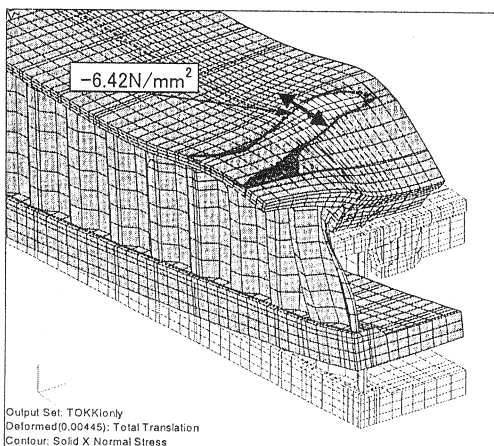


図-11 波形鋼板ウェブC'案-橋軸方向応力