

波形鋼板ウェブを用いた合成P C箱桁の ねじり特性について

Torsional Behavior of Composite PC Box Girders with Corrugated Steel Webs

依田 照彦* 大浦 隆**

By Teruhiko YODA and Takashi OHURA

The present study is concerned with an analytical consideration on the torsional behavior of composite PC box girders in which corrugated steel webs are used to decrease the total weight of the PC box girders. The proposed composite PC box girders have distinct features such that:(1)the corrugated steel webs have enough strength against buckling enabling us to use the minimum plate thickness;(2)prestress can be introduced effectively into the concrete flanges due to the low axial rigidity of the corrugated steel webs;(3)the effects of creep, shrinkage and thermal changes become small due to the flexibility of corrugated steel webs;(4)esthetic highness can be expected to the waved configuration. On the contrary, the present composite PC box girders have weakness for profile deformation accompanied by torsional deformation. Analytical consideration on the torsional behavior shows that fewer diaphragms yield unnegligible warping stresses in the concrete slabs and nearly doubled torsional shearing stresses in the corrugated steel webs, and that attention should be paid to the torsional behavior of composite PC box girders with corrugated steel webs.

1. まえがき

波形鋼板を構造要素に使用するという考え方は、古くから外国の建築物に見られ、最近でも鋼板ウェブのせん断強度を高める目的から波形鋼板の利用が、欧米特にドイツを中心に検討されている。また、鋼とコンクリートとからなる合成構造の分野においても、外ケーブル方式のプレストレッシングを利用したP C橋のウェブに波形鋼板が使われている¹⁾。このような波形鋼板とプレストレストコンクリートを用いた新しいタイプの合成構造では、波形鋼板ウェブを用いることにより、主桁の重量の軽減が図れ、鋼製箱桁に比べてウェブのせん断座屈強度が増大するので、ウェブの板厚を薄くすることができるなど多くの利点が指摘されている。しかしながら、我が国では、ウェブに波形鋼板を用い、プレストレスとして通常の内ケーブルに加えて外ケーブルを利用した鋼・コンクリート合成構造のP C橋を検討するための設計基準類は現在のところ準備されていない。

本論文は、新潟県に建設予定の新開橋を例に、波形鋼板ウェブを用いた合成P C箱桁のねじり特性について検討を加えたものである。構造一般図は図-1に示すとおりであり、その構造的特徴を示せば、下記のようなものである²⁾。

- ①コンクリートと鋼の合成構造である。
- ②主桁のウェブに波形鋼板を用いたP C単純箱桁である。
- ③主桁の下床版に配置する内ケーブルと箱桁内に配置する外ケーブルを併用した構造である。
- ④外ケーブルは取り替え可能な構造である。
- ⑤中間横桁を有しない2主桁構造である。

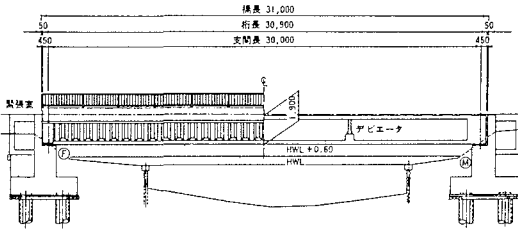
* 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

** 工修 株式会社 ピー・エス第一技術部(〒170 東京都豊島区南大塚3-20-6)

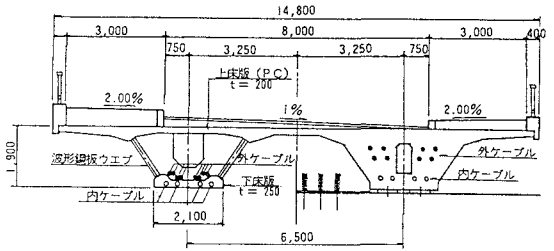
⑥斜角 70° の斜橋である。

これらの特徴をもつ波形鋼板ウェブを用いたPC橋については、以下のような効果が期待できる。

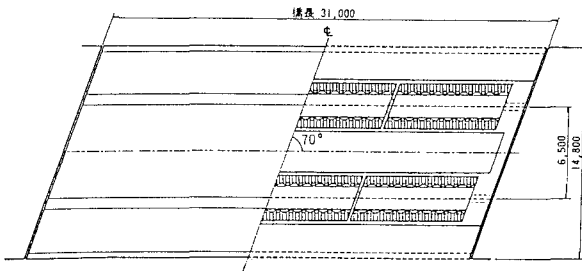
側面図



断面図



平面図



波形鋼板ウェブ

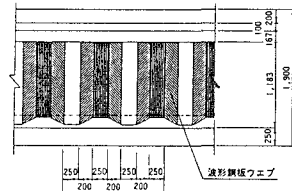


図-1 構造一般図

(A) 波形鋼板ウェブを用いた利点²⁾

- ①ウェブの重量が主桁全体の重量の20～30%を占めるPC橋に比べて主桁重量をかなり減少できる。
- ②鋼箱桁に比べてウェブのせん断座屈強度が著しく増大する。板厚として設計基準類で規定される最小板厚を利用することができ、座屈強度は波形の高さを高くすることにより増大させることができる。
- ③プレストレスを与えると、軸力に抵抗できない波形鋼板のアコーディオン効果により、ウェブに応力が流れず、コンクリート床版に効率よくプレストレスが導入できる。
- ④波形鋼板ウェブの軸方向拘束が非常に小さいため、コンクリート床版はクリープ、乾燥収縮や温度変化の影響を受けにくい。
- ⑤ウェブの波形模様は橋梁の美観上からも評価できる。

(B) 外ケーブルを用いた利点²⁾

- ①ウェブ内の煩雑なシース配置がなくなり、省力化が図れる。
- ②カンバーをプレストレスにより与えることができ、通常の鋼桁に必要な製作そりを必ずしも必要とせず、仮に必要としても波形鋼板の可とう性のため、その作業は容易になる。
- ③必要に応じて、外ケーブルの補修、補強ができる。

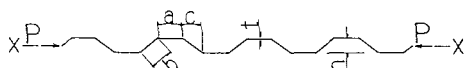
波形鋼板ウェブと外ケーブルを用いることにより、上記のような有利な面が発揮できるが、その一方で、鋼箱桁あるいはPC箱桁と異なり、特別な配慮が必要であることも指摘されている¹⁾。つまり、波形鋼板ウェブを用いたために、次のような構造特性が現れてくる。

- (1) 波形鋼板ウェブの軸方向剛性は、コンクリート床版の軸方向剛性に比べて無視できる程度に小さい。
- (2) 波形鋼板ウェブの曲げ剛性はコンクリート床版の曲げ剛性に比べてかなり小さい。

(1)について、図-2に示すような波形鋼板に軸方向荷重が作用したとき、みかけのヤング係数を求めると、

$$E_x = \frac{a+c}{3a+b} E_o \left(\frac{t}{h} \right)^2 \dots\dots\dots(1)$$

と表される。ここに、 E_o ：鋼のヤング係数、 t ：鋼板の板厚、 h ：波形鋼板の波の高さである。今、 $a=25\text{cm}$ 、 $b=25\text{cm}$ 、 $c=20\text{cm}$ 、 $h=15\text{cm}$ 、 $t=0.9\text{cm}$ とすると、 $E_x=E_o/617$ となり、軸方向剛性の低下が著しいことがわかる。



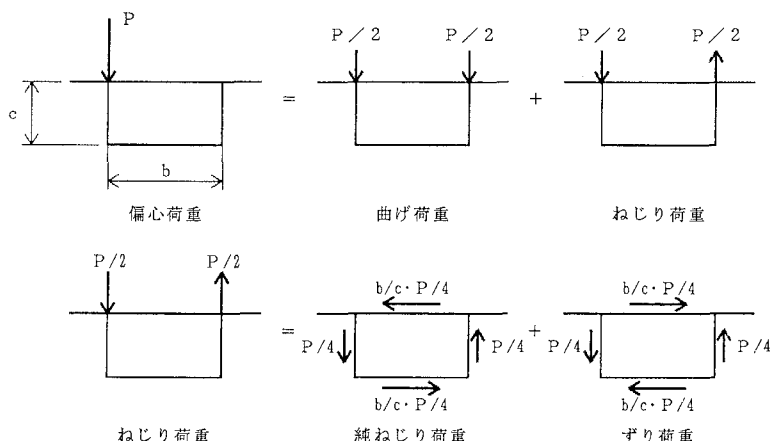
図－２ 波形鋼板ウェブの軸方向剛性

したがって、はりのウェブとして波形鋼板を用いる場合には、せん断力は伝達するが、軸方向剛性がほとんどないので、曲げモーメントには抵抗しない。このような波形鋼板ウェブの特性を考慮すれば、曲げ応力の計算に用いる断面定数はウェブを無視した断面を用いて算出することになる。その妥当性は有限要素解析の結果からも確認できる²⁾。

その一方で、コンクリートに比べて軸方向剛性の小さい波形鋼板ウェブを用いるため、鋼あるいはPCのみで製作されていた箱桁では特に大きな問題とはならなかったねじりや断面変形の問題が大きく前面に出てくる。このねじりに伴うせん断応力やそり応力の変化を調べるのが本論文の目的である。

2. 波形鋼板ウェブを持つ箱桁の基本的なねじり特性

ここでは、偏心荷重を受ける箱桁を例にとり、ウェブに波形鋼板を利用したときの力学的挙動について考察する。



図－３ 通常の箱桁の場合の偏心荷重の分解

まず、図－３に示すような偏心荷重を受ける箱桁について考える。従来の薄肉閉断面理論によれば、偏心荷重は図－３に示すように対称成分と非対称成分に分けられ、それぞれ「曲げ荷重」、「ねじり荷重」と呼ばれる³⁾。後者のねじり荷重は箱桁の場合、「純ねじり荷重」と「ずり荷重」とに分解される³⁾。通常の箱桁では、純ねじり荷重が純ねじりによるせん断流を生じさせ(断面寸法によっては、そりねじり応力も生じる)、ずり荷重が断面変形とそれに伴う軸方向そり応力を生じさせる。このそり応力の値は、断面の寸法形状によって多少差異はあるものの、PC箱桁では一般にその値は小さいものとして設計では無視しており、鋼製箱桁でも中間にダイアフラムを適切な数だけ入れることを前提にそり応力の影響を設計では考慮しない場合が多い⁴⁾。したがって、ねじりに伴う断面変形の影響は、鋼製箱桁についてのみ考えれば良いとの共通認識があったように思われる。

しかるに、波形鋼板ウェブを持つ合成PC箱桁の場合には、設計基準としてはPC橋や鋼橋の設計基準に準拠するのは当然のこととして、ねじりやそり応力に対する配慮をせずにすむかどうかは検討の余地がある。

そこで、ずり荷重に注目すると、ウェブに波形鋼板を用いているため、ウェブは軸方向剛性を持たないものと安全側に仮定でき、その結果軸方向そり応力をウェブは分担できない。それ故、ウェブに作用する荷重は、せん断力としてウェブが受け持たねばなくなる。前提条件としては、ウェブが軸方向剛性を持たないことと、ウェブやフランジのせん断変形が無視できることが挙げられる。結局、ずり荷重は、波形鋼板ウェブを持つ合成PC箱桁の場合、近似的に図-4のように分解できる。

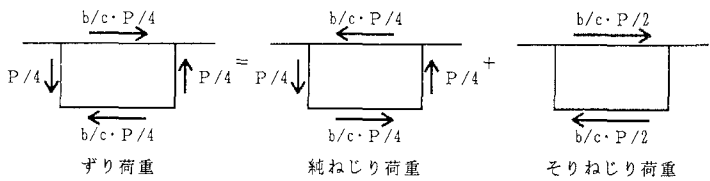


図-4 ウェブがせん断剛性のみを有する場合のずり荷重の分解

図-4のずり荷重の分解では、純ねじり荷重が断面内にせん断力の流れを生じさせ、そりねじり荷重が断面変形とともにコンクリート床版に軸方向そり応力を生じさせることになる。したがって、設計の際問題となるねじり荷重は、波形鋼板ウェブを持つ合成PC箱桁の場合、図-5のように分解できる。このため、断面変形を抑えるダイアフラムのない場合には、ねじりによるウェブのせん断応力は作用ねじりモーメントによる値よりも大きな値(この場合には2倍)をもとに計算しなければならない。

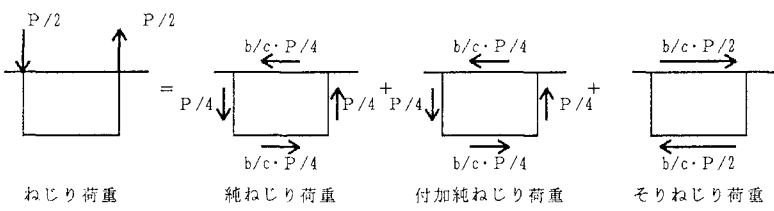


図-5 ウェブがせん断剛性のみを有する場合のねじり荷重の分解

図-5では代表的な箱桁断面を用いるので、本論文で扱うような台形断面箱桁の場合には、値そのものは変化することに注意する必要がある。いずれにしても、波形鋼板ウェブを用いた合成PC箱桁では、ねじり荷重が作用したときのウェブのせん断応力やフランジのそり応力については古典的な薄肉閉断面理論の解析方法がそのまま適用できるとは考えられず、値そのものも古典的理論に基づく場合と比較して大きくなる。したがって、設計では、これらの応力について検討するとともに、断面変形を抑えるためにダイアフラムを適切に配置し、波形鋼板ウェブのせん断応力とフランジのそり応力の低減を図る必要が生じる。

3. 実橋におけるねじり特性の検討

3.1 設計断面力の算出

断面力の算出にあたって、主桁の自重による断面力は、はり理論を用いて計算し、図-6に示すような橋体完成後の作用荷重による断面力は、2主桁橋であることを考慮して格子理論を用いて計算した。格子計算に用いた骨組みは、図-7に示すとおりである。ここに、考慮した設計荷重は、死荷重、活荷重(TL-20)、雪荷重である。

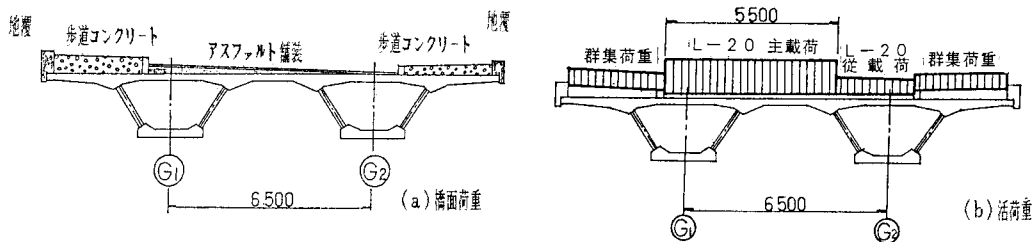


図-6 橋面荷重および活荷重の载荷状態

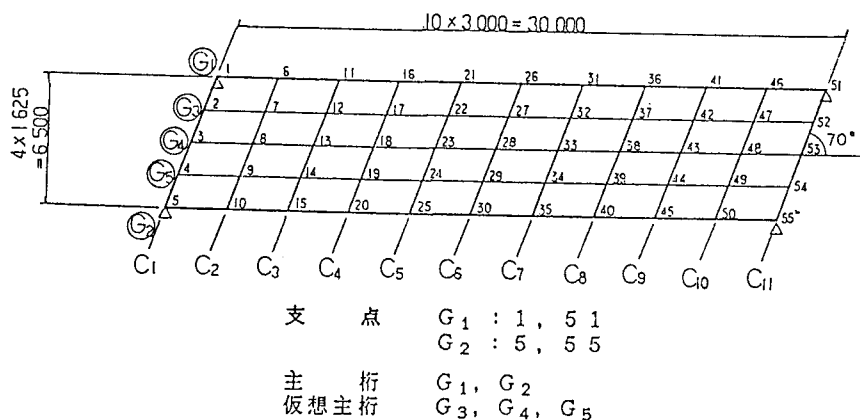


図-7 断面力計算に用いた格子骨組み

3.2 ねじり荷重の算出

2章における考察を前提にねじりに対する検討を行うためには、2主桁をそれぞれ分解して、一つの主桁として台形断面箱桁を考える必要がある。そこで、格子計算結果を用いて(G_1 および G_2)のねじりモーメントを算出する。ここでは、橋面荷重、雪荷重、活荷重による各節点の左右のねじりモーメントの差、つまり主桁軸線上での床版の主桁軸回りの曲げモーメントをねじり荷重とした。自重およびプレストレスは主桁軸線上に作用するものとした。このことは、各台形箱桁の断面を左右対称断面としたことに他な

表-1 ねじりモーメントの集計結果

G ₁ 主桁					単位 tf・m			
節点	自 重	橋面工	雪荷重	プレストレス	活 荷 重		合 計	
					最 大	最 小	最 大	最 小
1 L	—	—	—	—	—	—	—	—
1 R	-52	131	10	124	42	-23	255	190
6 L	-52	131	10	124	42	-23	255	190
6 R	-52	112	9	124	40	-17	233	176
11 L	-52	112	9	124	40	-17	233	176
11 R	-52	92	8	124	41	-12	213	160
16 L	-52	92	8	124	41	-12	213	160
16 R	-52	72	7	124	42	-9	193	142
21 L	-52	72	7	124	42	-9	193	142
21 R	-52	52	6	124	42	-7	172	123
26 L	-52	52	6	124	42	-7	172	123
26 R	-52	33	6	124	43	-7	154	104
31 L	-52	33	6	124	43	-7	154	104
31 R	-52	14	5	124	44	-8	135	83
36 L	-52	14	5	124	44	-8	135	83
36 R	-52	-3	4	124	45	-11	118	62
41 L	-52	-3	4	124	45	-11	118	62
41 R	-52	-20	3	124	46	-14	101	41
46 L	-52	-20	3	124	46	-14	101	41
46 R	-52	-36	2	124	48	-18	86	20
51 L	-52	-36	2	124	48	-18	86	20
51 R	—	—	—	—	—	—	—	—

らない。活荷重については、格子計算により、各節点の最大(最小)値を抽出し、それらをすべて同時に主桁に作用させてねじりモーメントを算出した。ねじりに対して厳しいG1桁のねじりモーメントの計算結果は表-1に示すとおりである。

3.3 ねじり荷重によるそり応力およびせん断応力の算出

ねじり荷重の算出結果をもとに、図-5に見られるそりねじり荷重に対するそり応力を計算する。波形鋼板を用いていることから、次の2つの仮定、すなわち、

- (1)断面変形に伴うフランジやウェブのせん断変形は無視できる。
- (2)コンクリート床版と波形鋼板ウェブの接合部は解析上ヒンジと仮定できる。

により、慣用的なBeamアナロジーがそり応力の計算に利用できる⁵⁾。このBeamアナロジーに従えば、主桁の端部や中間部に配置されるダイアフラムの効果が、それぞれBeamアナロジーにおける支点やバネ支承として評価でき、そり応力度の算出が容易になる⁵⁾。

本論文で対象としている合成P C箱桁では、桁端部の拘束条件は、端部のダイアフラムの厚さが1.4mであることから、そり変形を拘束する固定支持条件と考えられる。さらに、最大そり応力を低減させるために、中間にデビエータを兼ねた中間ダイアフラムを設けた。結局、Beamアナロジーモデルは、ずり荷重を外力としたときに図-8のようなはりモデルで表現され、ずり荷重によって生じた断面の応力がそり応力に対応することになる。

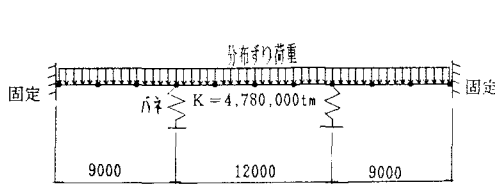


図-8 Beamアナロジーモデル

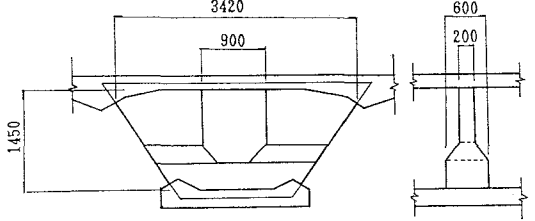


図-9 中間ダイアフラム

図-8のBeamアナロジーモデルにおける曲げ剛性に相当するものが、ずり荷重に対するそり剛性であり、曲げモーメントに対応するものがそりモーメントである。したがって、そり応力は次式より算出できる⁵⁾。

$$\sigma_{DW} = \frac{M_w}{I_{DW}} \phi \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ_{DW} ：そり応力、 M_w ：そりモーメント、 I_{DW} ：そり定数、 ϕ ：そり関数である。

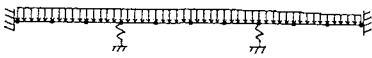
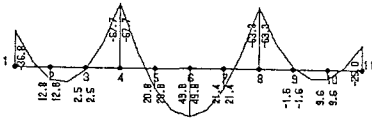
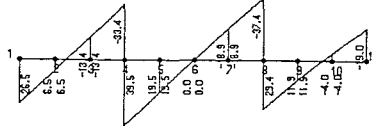
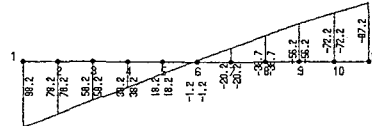
さらに、中間ダイアフラムのずり荷重に対するバネ定数Kは、鋼道路橋設計便覧⁶⁾に従い図-9を用いて、板厚20cmの等厚板形式のダイアフラムの剛度として次式により計算できる。すなわち、

$$K = 4GA t = 4,780,000 \text{ t} \cdot \text{m} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、K：バネ定数、G：コンクリートのせん断弾性係数、A：ダイアフラムの断面積、t：ダイアフラムの板厚である。

以上のBeamアナロジーモデルに基づき、中間ダイアフラムの有無による断面力の差異を比較すると、表-2が得られる。縮尺に差があるので、表-2から視覚的に中間ダイアフラムの有無の差異を把握するのは難しいが、今回の計算結果によれば、中間ダイアフラムのない場合のそりモーメントの最大値はある場合の最大値の約7倍であり、この比率はそり応力に対しても当てはまるので、中間ダイアフラムの効果が著しいことが分かる。

表－２ 中間ダイアフラムの有無による断面力の比較

	中間ダイアフラムを設ける場合	中間ダイアフラムを設けない場合
構 造		
荷 重	橋面荷重 6.7tm/m~5.0tm/m 	橋面荷重 6.7tm/m~5.0tm/m 
そりモーメント分 布		
ずりせん断力分 布		

中間ダイアフラムを2箇所に入れたときのそり応力を、式(2)より計算した結果を表－３に示す。表－３の結果から判断すると、中間ダイアフラムを2箇所に入れたとしても、下床版のコンクリート中に発生するそり応力は必ずしも無視できるオーダになっていない。すなわち、波形鋼板ウェブを用いた合成P C箱桁がねじりを受ける場合には、そり応力度に対する配慮が不可欠であるといえる。

一方、せん断応力については、波形鋼板ウェブが検討の対象となり、ウェブのせん断応力度の合計は次式で表される。

$$\tau = \tau_a + \tau_{t1} + \tau_{t2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

τ_a : 曲げ荷重によるせん断応力度

τ_{t1} : ねじりモーメントによるせん断応力度

τ_{t2} : 付加ねじりモーメントによるせん断応力度

である。曲げ荷重によるせん断応力度 τ_a と純ねじり荷重によるせん断応力度 τ_{t1} の計算については、それぞれ合成箱桁の全断面を有効として、古典的な薄肉閉断面理論を用いて計算をおこなえばよい³⁾。

問題となるのは、付加ねじり荷重による場合であり、この場合にもそり応力の算出と同様に、表－２に示したずりせん断力の分布から付加ねじりモーメントによるせん断応力度を求めれば良いことになる。すなわち、

表－３ そり応力度の値

節 点	そりモーメント	位 置	単位 そりモーメント t f・m そり応力度 kgf/cm ²
			そり応力度
1	-61	上 床 版	± 1.4
		下 床 版	±10.4
6	19	上 床 版	± 0.4
		下 床 版	± 3.3
11	14	上 床 版	± 0.3
		下 床 版	± 2.4
16	-97	上 床 版	± 2.2
		下 床 版	±16.6
21	34	上 床 版	± 0.8
		下 床 版	± 5.8
26	75	上 床 版	± 1.7
		下 床 版	±12.8
31	34	上 床 版	± 0.8
		下 床 版	± 5.8
36	-92	上 床 版	± 2.1
		下 床 版	±15.8
41	12	上 床 版	± 0.3
		下 床 版	± 2.1
46	16	上 床 版	± 0.4
		下 床 版	± 2.7
51	-49	上 床 版	± 1.1
		下 床 版	± 8.4

中間ダイアフラムの有無によるせん断応力度の差は、ずりせん断力の分布の差から求められる。数値計算結果は示さないが、一般には曲げ荷重に伴うせん断応力が卓越することになる。

4. おわりに

本論文では、ウェブに波形鋼板を用いてP C箱桁全体の重量を軽くするとともに、波形鋼板の軸方向剛性がほぼ零に等しいという性質を利用してプレストレスの床版への導入を効率的にした合成P C箱桁のねじり特性について検討を加えた。その結果、波形鋼板ウェブを用いた合成P C箱桁では、ねじりに伴う断面変形やそり応力は必ずしも無視できず、特別な配慮が必要であることが分かった。それ故、このような構造物を従来の設計基準⁷⁾の範囲内で設計するには、ねじり荷重が小さくなるような構造上の工夫が必要である。その反面、曲げ荷重のみを受ける構造としては、波形鋼板ウェブを持つ合成P C箱桁は理想的であるとの判断も可能である。

ここでは、ねじりを受ける合成P C箱桁の設計に重点を置き、安全側の仮定をもとに応力度の算出を試みた。ねじりに対する汎用性のある解析法あるいは詳細な解析法については今後の課題としたい。

最後に、本研究をまとめるにあたって、新潟県土木部の佐藤靖氏、吉田茂氏および(株)ピー・エスの服部政昭氏には、貴重なご意見を賜りました。記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Jacques Combault(大浦隆訳)：シャロール近くのモープレ高架橋、プレストレストコンクリート、Vol. 34, No. 1, プレストレストコンクリート技術協会、1992年1月、PP. 63～71.
- 2) 服部政昭・大浦隆：波形鋼板ウェブを用いたP C単純桁の一試設計、第2回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、プレストレストコンクリート技術協会、1991年11月、PP. 53～58.
- 3) Vlasov, V. Z. (奥村敏恵他訳)：薄肉弾性ばりの理論、技報堂、1967年.
- 4) 依田照彦・平嶋政治・坂元浩幸：薄肉鋼製箱桁橋における中間ダイアフラムの間隔と必要剛度の簡易決定法について、構造工学論文集、Vol. 31A, 1985年3月、PP. 155～162.
- 5) 坂井藤一・長井正嗣：鋼箱桁橋の中間ダイアフラム設計法に関する一試案、土木学会論文報告集、No. 261, 1977年5月、PP. 21～34.
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧、1980年.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書(I 共通編、II 鋼橋編、III コンクリート橋編)、1991年2月.

(1992年9月21日受付)