

一定せん断流パネルを用いた波形鋼板ウェブ合成橋の解析法に関する検討

A Study of Analytical Method using "The Constant Shear Flow Panels"
for Composite Bridges with Corrugated Steel Webs

白水晃生*, 佐野泰如*, 尾下里治**

Akio Shirozu, Yasuyuki Sano, Satoji Oshita

*工修, (株) 横河ブリッジ, 橋梁本部技術部 (〒273-0026 船橋市山野町 27)

** 工博, (株) 横河ブリッジ, 橋梁本部技術部 (〒273-0026 船橋市山野町 27)

This study is concerned with an analytical method for pre-stressed concrete bridges with corrugated steel webs. This composite structure can't apply to the Bernoulli-Euler hypothesis owing to shear deformation. An analysis by means of the constant shear flow panels with which the airplane was designed takes account for this influence. In this study the method compares with FEM analysis and elastic theory under consideration of Bernoulli-Euler hypothesis and shows some design-examples of this kind of the bridges. Consequently, the proposed analysis is accurate enough and practical in design. This analysis could take into account for influences of shear lags and section distortion if 3 dimensional model were built.

Key Words: constant shear flow panel, corrugated steel webs, shear deformation

キーワード: 一定せん断流パネル, 波形鋼板ウェブ, せん断変形

1. まえがき

波形鋼板をウェブに用いた薄肉構造は, その形状により波長方向回りの高い剛性のためせん断座屈が生じにくい。その結果, 座屈に影響されないでせん断力に抵抗できることからコンテナの外殻構造やクレーンガーダー等の鋼構造に使われてきた。

コンクリート構造でも, 箱桁橋ウェブに波形鋼板を採用すれば, 自重の軽減や工期短縮および施工性の向上といった点で, コンクリート製のウェブに比べ優れている。さらに, コンクリート床版へのプレストレス導入に際し, 波形ウェブ特有の波長方向に剛性が低くなる, いわゆるアコーディオン効果により鋼板にプレストレスが導入されず, 効率がよい。こうして波形鋼板ウェブをもつ合成箱桁橋はその合理性が認められ, フランスや日本で建設され, さらにドイツでも計画されるに至っている^{1,2,3,4,5)}。

しかしながら, コンクリート床版を上下にもつ波形鋼板ウェブ合成橋は, 1980年代後半にフランスで開発され, その歴史は比較的浅い。その構造的な特徴として波形鋼板が曲げ応力を負担しないため, せん断変形の影響が大きいと指摘されている⁶⁾。こうした影響を考慮した解析法や設計法も報告されているものの⁷⁾, 実橋の設計においては初等梁理論に基づいて, この影響を別途考慮したりしているのが現状である⁸⁾。

一定せん断流パネルを用いた解析方法は, 図-1に示す薄い外板と断面積の大きな補剛材とを組み合わせた構

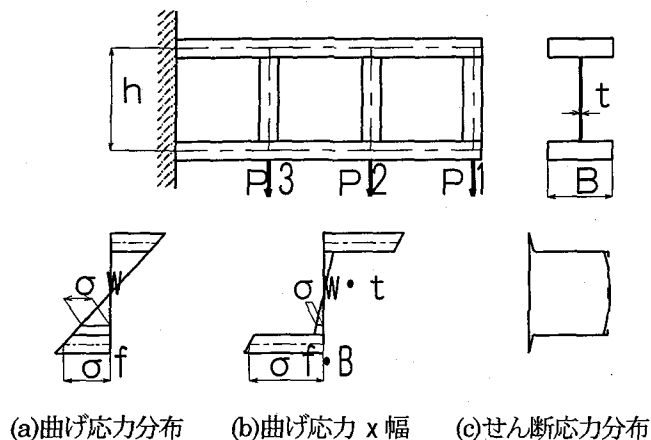


図-1 フランジ断面積が大きなプレート
ガーダーの応力分布イメージ図

造に対し解析の簡素化が図られることから, 航空機の構造解析の分野では“せん断場理論”と呼ばれ, 設計に用いられてきた。断面積の大きな上下コンクリートフランジと薄肉鋼板ウェブからなる波形鋼板ウェブ合成橋は, その特性よりウェブに曲げ応力が作用せず, ウェブに作用する高さ方向のせん断力がパネル間でほぼ一定となる⁹⁾。これより, ウェブはせん断応力について着目すれば純粋なせん断場にあると言える。したがって, 波形鋼板ウェブ合成橋に一定せん断流パネルを用いて解析することは, せん断変形の影響を考慮でき, しかもフランジとウェブ

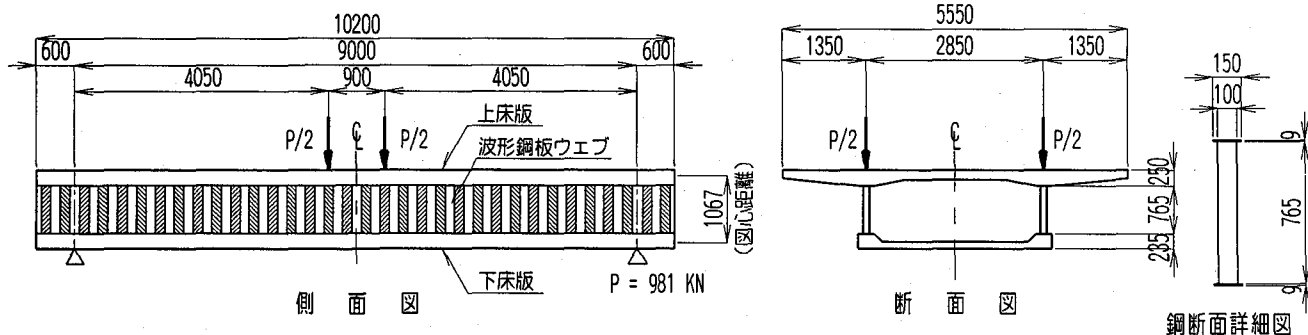


図-2 解析対象構造の一般図

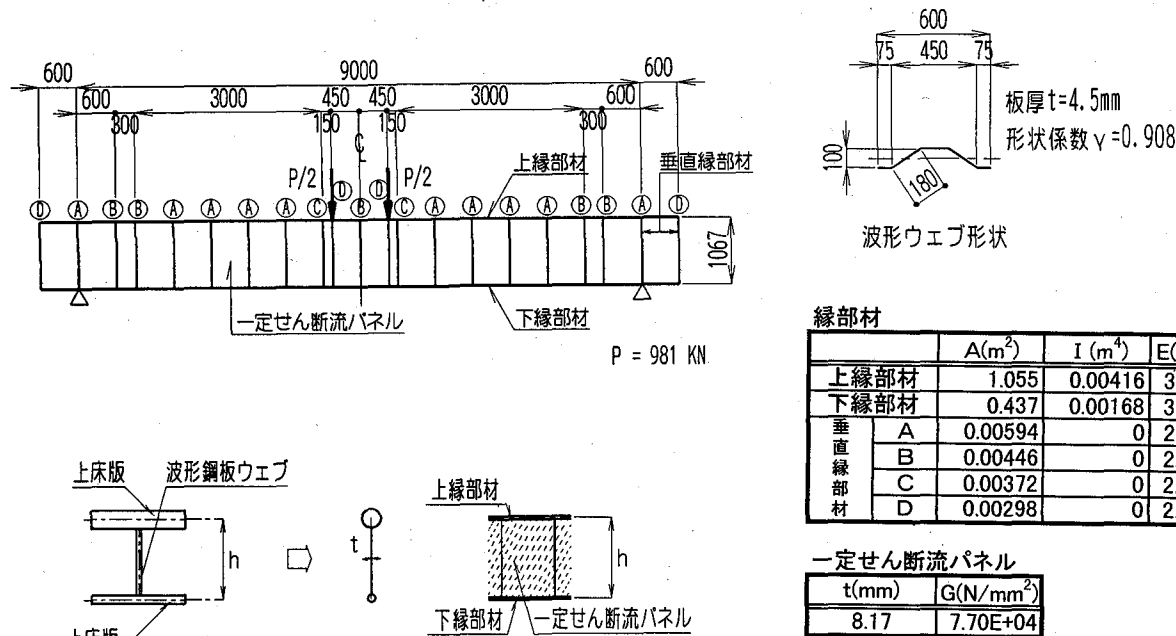


図-3 一定せん断流パネルを用いた解析モデル

に作用する水平せん断力をせん断流として直接得ることもできるといった利点がある。このため、設計上合理性があり、実務での適用も行いやすいと考え、報告する。

本文ではまず、一定せん断流パネルを用いた解析方法の適用について触れ、FEM解析および初等梁理論との比較を行う。次に実際の設計に適用した場合の解析例を初等梁理論と比較し、本解析法の有効性について述べる。

2. 各解析法と解析結果の比較

2.1 解析モデル

図-2に示す単純支持された鋼フランジのある波形鋼板ウェブ合成橋を例に、一定せん断流パネルを用いた解析、FEM解析、初等梁理論の3つを適用し、各解析法を比較する。

载荷荷重はウェブ上4箇所、均等な集中荷重を鉛直下向きに载荷した。荷重の大きさは1箇所あたり 245kN

とし、载荷位置は支間中央から 0.45m の位置とした。

2.2 一定せん断流パネルを用いた解析

(1) 解析法の概要

一定せん断流パネルとはせん断力のみを伝達する要素であり、本解析では、波形鋼板ウェブをこの要素でモデル化する。モデル化は上下コンクリート床版の図心間に一定せん断流パネルを挿入し、パネルの四辺に軸力が線形に変化する縁部材を取り付ける。ここで一定せん断流パネルは、床版間に作用するせん断力のみ負担し、縁部材は曲げに伴う垂直応力を負担するとともに上下床版間の間隔を保持している。この方法により、ウェブのせん断変形の影響を考慮した解析が行える。

一定せん断流パネルを用いた解析では、縁部材の軸力が始点と終点の間で線形変化するので、離散的な節点力とならず、軸力や曲げモーメントは節点位置で連続する。従って、要素分割は、せん断力の急変する部分を細かくすれば、通常の骨組み解析程度の要素分割数で十分であ

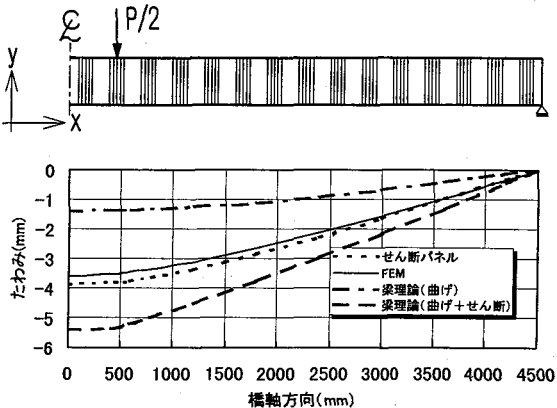
ここで一定せん断流パネルを用いた解析と FEM 解析それぞれの節点数および要素数を表— 1 にまとめる。

表— 1

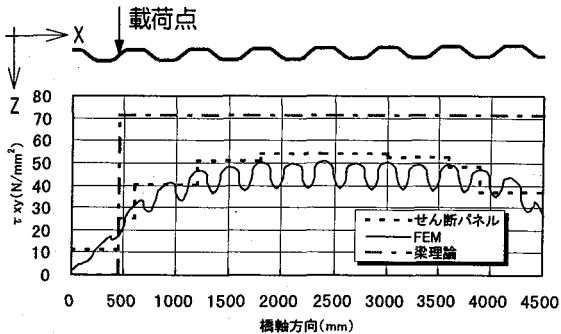
	FEM 解析	一定せん断流解析
節点数	16827	42
要素数	14047	81

2.4 初等梁理論による解析

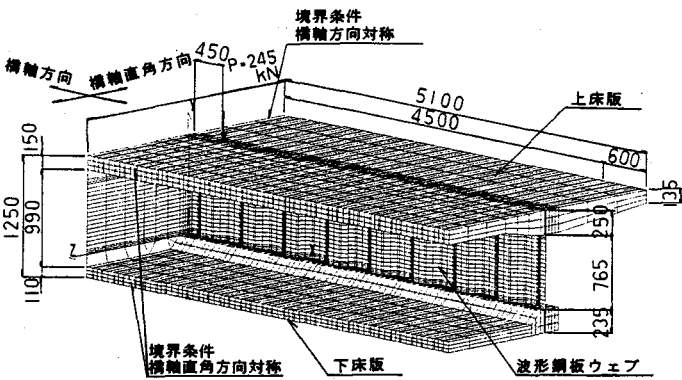
波形鋼板ウェブ合成箱桁橋の現在の設計は初等梁理論に基づいて行われている¹¹⁾。これはこの橋梁形式において平面保持の仮定が成立するとし、上下床版で曲げモーメントに抵抗し、ウェブでせん断力に抵抗するという考え方である。たわみについても曲げによるたわみは上下床版の曲げ剛性により、せん断変形によるたわみはウェブの形状係数 γ を考慮したせん断剛性により求めている。



図— 5 たわみの比較



図— 6 せん断応力度の比較



図— 4 FEM解析モデル

る⁹⁾。定式化については、文献9),10)を参照されたい。

(2) モデル化

モデル化は下記のように行い、図— 3に示す平面モデルとした。

- 1)上下コンクリート床版は、それぞれ、図心回りの断面2次モーメントと断面積を持つ梁とする。このとき、コンクリート床版は全断面有効とした。それを縁部材として図心位置に配置し、上下床版の図心間を一定せん断流パネルで結ぶ。
- 2)上下コンクリート床版間を結ぶ縁部材は、それに該当する区間の波形鋼板ウェブは断面積のみを、隔壁の場合は断面積と断面2次モーメントを考慮する。
- 3)一定せん断流パネルの厚さは以下に示す波形鋼板ウェブの形状係数 γ ¹¹⁾をその板厚に乘じたものとする。

$$\gamma = L / \Sigma I \tag{1}$$

ここで、 L は波形鋼板の水平長、 ΣI は波形鋼板を展開した実長である。

一定せん断流パネルを用いた解析では、縁部材は軸力、せん断力および曲げモーメントを、一定せん断流パネルからはせん断流を結果として得る。よって上下床版、ウェブ別々に断面力が算出されるので、個々の部材の応力状態が容易に得られる。

2.3 FEM解析

FEM 解析モデルは図— 2に示す単純梁の4分の1モデルとした。図— 4に解析モデルを示す。各要素はコンクリート床版を SOLID 要素、鋼桁（フランジ、波形ウェブ）を SHELL 要素としている。ここで、鋼桁とコンクリート床版とは完全合成としてモデル化し、断面形状保持のためスパン中央に SHELL 要素の隔壁を設けた。こ

2.5 結果の比較と考察

ここでは各解析法によるたわみ、せん断応力度分布、垂直応力度分布について比較する。

(1)たわみの比較

図一5に各解析法のたわみ分布の比較を示す。これより一定せん断流パネルの結果はFEM解析モデルの結果とほぼ等しい。しかし、初等梁理論では、せん断変形を考慮しないと小さく、考慮すると逆に大きくなる。せん断変形を考慮した場合に、たわみが大きく算出される理由は、すべてのせん断応力を波形鋼板ウェブに分担させているためと思われる。つまり、床版が分担するせん断力が評価されていないことによる。

(2)せん断応力度分布の比較

図一6に各解析法による橋軸方向および桁高方向のせん断応力度の分布を示す。橋軸方向に分布した応力度の算出位置はウェブ高の1/2点とした。FEM解析結果より、せん断応力の分布は波形形状となり、波形鋼板ウェブの水平部分でのせん断力の負担が大きいがわかる。また一定せん断流パネルを用いた解析は橋軸方向の応力分布性状もFEM解析と良く合う。

桁高方向に分布した応力度算出位置は支間1/4点付近で波形の水平部分とした。FEM解析の結果から、せん断応力度は桁高方向に均等に分布し、上下床版にも応力が生じることがわかる。初等梁理論に比べ他の解析のせん断応力度が小さいのは、上下床版がせん断力を多少なりとも負担するためである。一定せん断流パネルによる解析は上下床版をモデル化した縁部材により、この影響を考慮できる。よってFEMの解析結果と比較的に良く合うと考えられる。

(3)垂直応力度分布の比較

図一7には橋軸方向に作用する垂直応力度の高さ方向の分布を、各解析法と比較して表した。(a)には荷重集中荷

点近傍での分布を、(b)には荷重集中点より離れた、ほぼ支間4分の1点での分布を示す。これより荷重集中点において、FEM解析と一定せん断流パネルを用いた解析結果では、波形ウェブのせん断変形の影響が表れ、上床版に付加的な曲げ応力度(床版下端に引張)が生じている。一方、梁モデルではその影響を考慮できない。また荷重集中点から離れた、せん断応力の変化しない位置(支間1/4点付近)では、解析法による違いはほとんど見られない。

(4)比較結果のまとめ

たわみとせん断応力度はFEM解析結果と一定せん断流パネルを用いた解析結果の整合性が良い。一方、初等梁理論による解析で、すべてのせん断力を波形鋼板ウェブで分担するという仮定は、たわみやせん断応力度の算出において大きな誤差を生む可能性がある。曲げに伴う橋軸方向垂直応力度は従来、上下床版で抵抗してきた。しかし、局所的な荷重に対しては波形鋼板ウェブのせん断変形の影響が大きいので、平面保持の仮定が成立しない。その結果床版に付加曲げが生じ、FEM解析と一定せん断流パネルを用いた解析でその影響を考慮できることが分かった。

3. 設計への適用

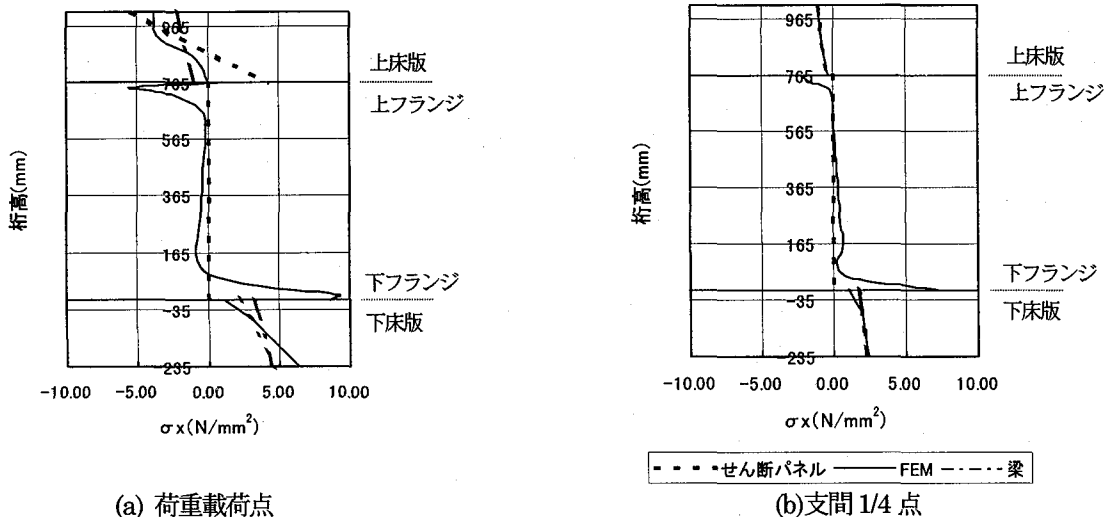
3.1 等断面単純支持モデルでの比較

(1)対象構造

ここでは、文献11)の設計例で用いた等断面の単純支持構造の橋梁を対象とし、一定せん断流パネルを用いた解析と初等梁理論で得られた結果を比較し、考察を行う。その一般図を図一8に示す。

(2)解析モデル

2.2で述べたモデル化に従い、図一9に示す解析モデルを作成した。2.3では考慮しなかったが実際の橋梁には、内ケーブルや外ケーブル、およびその偏向部や定着部が



図一7 垂直応力度の比較

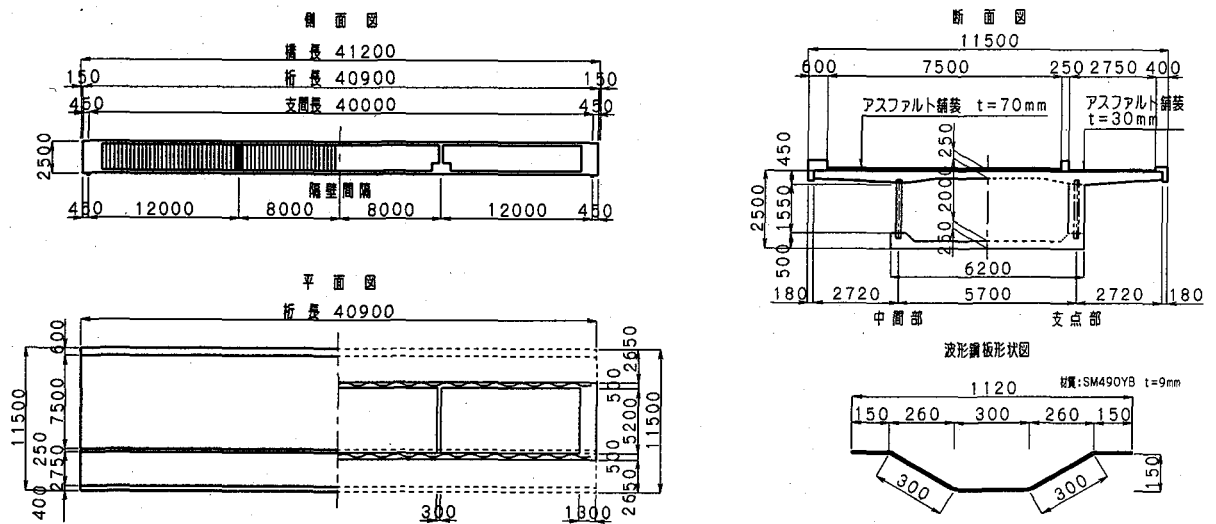


図-8 解析対象橋の一般図

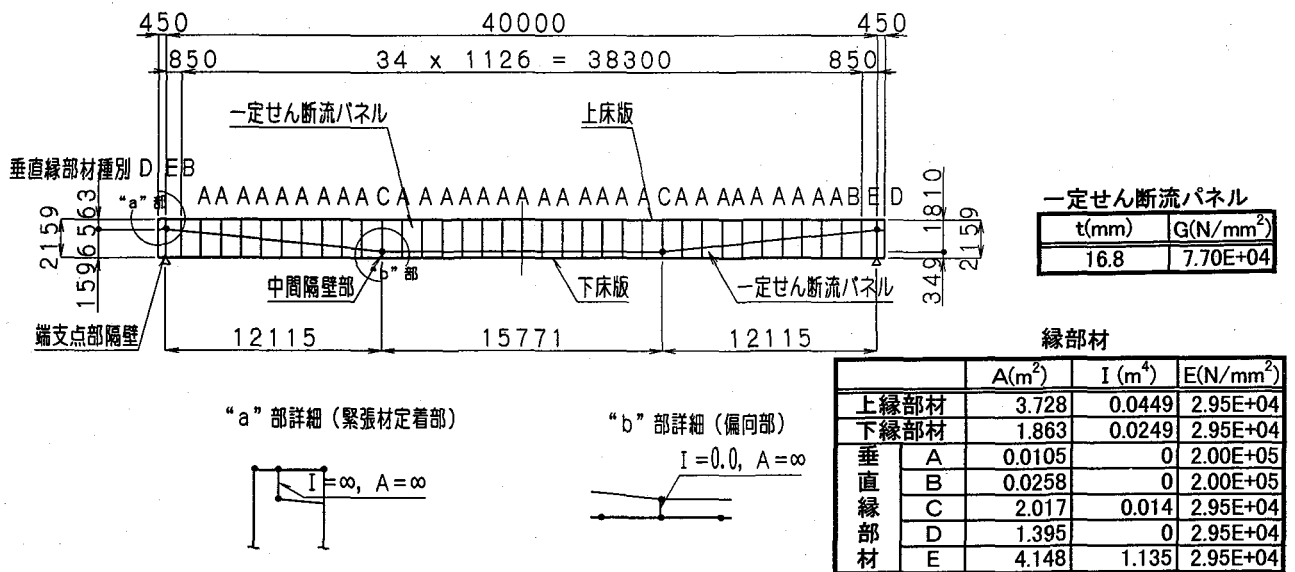


図-9 一定せん断流パネルを用いた解析モデル

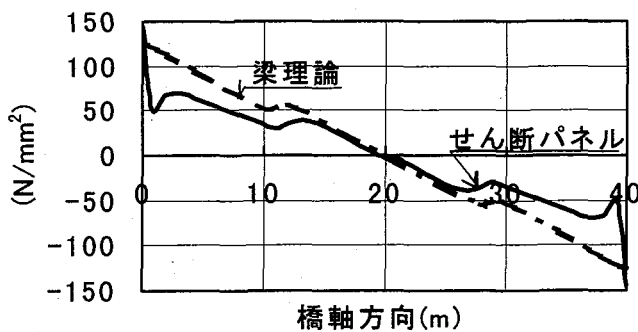


図-10 せん断応力度の分布

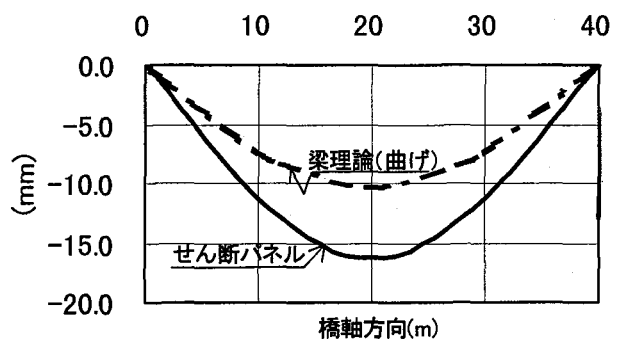


図-11 活荷重たわみの比較

ある。内ケーブルのモデル化は本橋が上路式単純桁であることより、下フランジ、ここでいう下縁部材のみ、その影響を考慮した。それには節点荷重により下縁部材にプレストレス力を与え、それによる張力を考慮した剛性評価を行った。外ケーブルのモデル化は本橋が単純桁であることから、定着部は桁端の上部に設けられ、偏向部

は正の曲げモーメントの卓越しはじめる支間長に対して4分の1点付近の下部に設けられる。定着点と端支点は剛な梁で結んだ。一方、偏向部はケーブルがその部材軸方向に移動できるように曲げ剛性はないが、断面積の大きな部材でモデル化を行った。

荷重として、i)主桁荷重、ii)下フランジに導入する内ケーブルによるプレストレス、iii)外ケーブルによるプレストレス、iv)後死荷重、v)活荷重を載荷した。このとき、外ケーブルは温度荷重により、他の荷重は節点荷重として与えた。また、それぞれの部材の断面性能は、図-9中に示した。

(3)初等梁理論との比較および考察

図-10には主桁自重から活荷重まで足し合わせたせん断力応力度の橋軸方向の分布を、図-11には活荷重によるたわみを比較した。また応力度の比較を表-2に示す。

図-10からは初等梁理論も一定せん断流パネルを用いた解析も外ケーブルに勾配を付けた範囲で一様にせん断応力度が低くシフトしている。これより、外ケーブルがせん断力を負担することもわかる。また図-11から活荷重たわみは、せん断変形の影響により、曲げ変形のみ考慮した梁理論に比べ5割ほど大きくなる。

応力度の比較からは、上床版で10%程度、下床版で5%前後の差が見られる。上床版の差が大きいのは、せん断変形により生じる曲げの影響があるものと考えられる。

せん断応力度は、梁モデルの7割程度である。これは、2.と同様、梁モデルでの応力照査には、波形鋼板ウェブの断面しか考慮していないが、実際には、コンクリート床版もせん断応力を負担しているためと考えられる。

設計荷重作用下では、曲げ応力度は梁理論とそれほど差はないが、せん断応力度やたわみに差が生じることがわかる。

表-2 応力度の比較

1. 上床版(支間中央)				
荷重載荷ケース	上縁応力度(N/mm ²)		①/② 比率	
	①せん断パネル	②梁理論		
i 主桁自重	-4.6	-4.4	1.04	
ii 内ケーブルプレストレス	0.5	0.7	0.84	
iii 外ケーブルプレストレス	-0.1	-0.1	1.06	
iv 橋面工	-1.1	-1.0	1.08	
v 活荷重	-2.3	-2.1	1.10	
vi 死荷重作用時(i+ii+iii+iv)	-5.2	-4.9	1.08	
vii 設計荷重作用時(v+vi)	-7.5	-7.0	1.08	

2. 下床版(支間中央)				
荷重載荷ケース	下縁応力度(N/mm ²)		①/② 比率	
	①せん断パネル	②梁理論		
i 主桁自重	8.1	8.0	1.01	
ii 内ケーブルプレストレス	-7.6	-7.8	0.98	
iii 外ケーブルプレストレス	-4.9	-4.9	0.99	
iv 橋面工	1.8	1.8	1.04	
v 活荷重	3.8	3.7	1.03	
vi 死荷重作用時(i+ii+iii+iv)	-2.6	-3.0	0.87	
vii 設計荷重作用時(v+vi)	1.2	0.7	1.73	

3. ウェブ(端支点から2.5m位置)				
荷重載荷ケース	せん断応力度(N/mm ²)		①/② 比率	
	①せん断パネル	②梁理論		
i 主桁自重	56.3	89.6	0.63	
ii 内ケーブルプレストレス	-	-	-	
iii 外ケーブルプレストレス	-23.8	-44.1	0.54	
iv 橋面工	12.8	20.5	0.63	
v 活荷重	23.6	43.5	0.54	
vi 死荷重作用時(i+ii+iii+iv)	45.3	66.0	0.69	
vii 設計荷重作用時(v+vi)	68.9	109.6	0.63	

3. 2変断面張出梁モデルでの比較

(1)対象構造

山岳部での橋梁工事は、作業空間が制約されることが多い。中間橋脚を利用した張出架設が行われることが多い。こうした架設方法による場合、変断面とした方が構造的にも経済的にも優位となる。ここでは、ワーゲンをを用いた架設系を想定し、図-12に示すような変断面の桁を解析対象とする。橋梁断面は簡単のため3.1で用いたものを利用する。また張り出し位置の先端にワーゲン荷重として1000kNの鉛直荷重を載荷する。主桁荷重は139kN/mの等分布荷重とする。張出架設時には上床版に緊張力を導入するが、ここでは、簡単のため考慮しない。

(2)解析モデル

一定せん断流パネルを用いた解析モデルを図-13に示す。このとき一定せん断流パネルは台形となるが、縁部材の傾斜分を考慮して釣り合うように誘導した剛性マトリックスを使用した。梁モデルは上下床版をフランジとする中立軸を軸芯とする。

(3)初等梁理論との比較および考察

図-14にせん断力分布の比較を、図-15にたわみの比較を行う。続いて表-3に固定端と張出先端からそれぞれ3mの位置でのせん断応力度を比較する。梁モデルのせん断応力度の算出は、2.4に基づいて行った。

一定せん断流パネルを用いた解析のせん断応力度は、梁理論値に比べて45~70%程度となり、かなり小さな値

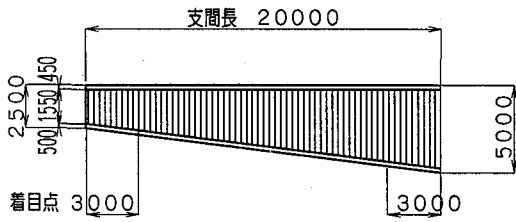
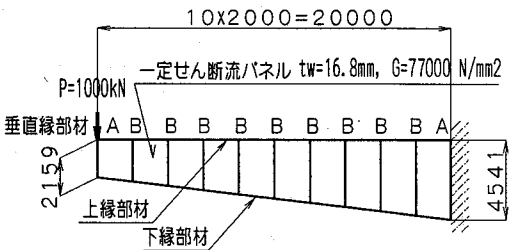


図-12 変断面桁の側面図



縁部材

	A(m ²)	I(m ⁴)	E(N/mm ²)
上縁部材	3.728	0.0449	2.95E+04
下縁部材	1.863	0.0249	2.95E+04
垂直部材	A	0.018	0
	B	0.036	0

図-13 一定せん断流パネルによる解析モデル

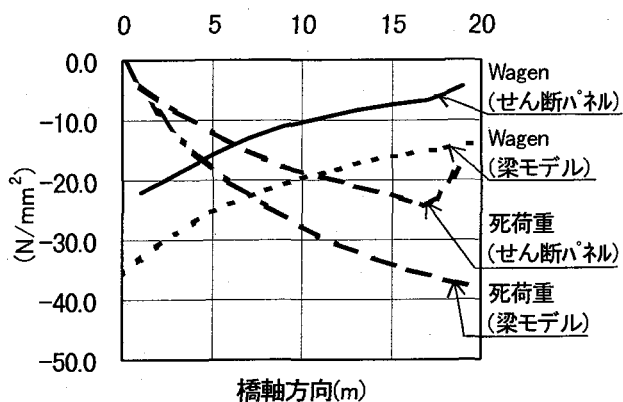


図-14 せん断応力度の比較

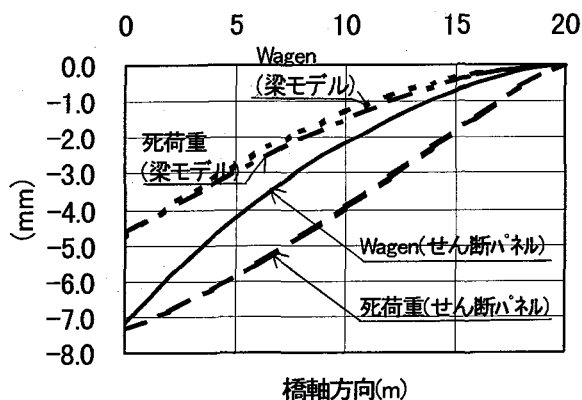


図-15 たわみの比較

表-3 せん断応力度の比較

		荷重ケース	せん断応力度 (N/mm ²)		①/② 比率
			①せん断パネル	②梁理論	
i	先端から	主桁自重	-8.2	-12.1	0.68
ii	3.0m	ワーゲン	-19.1	-28.8	0.66
iii	固定端から	主桁自重	-24.0	-35.9	0.67
iv	3.0m	ワーゲン	-6.8	-15.1	0.45

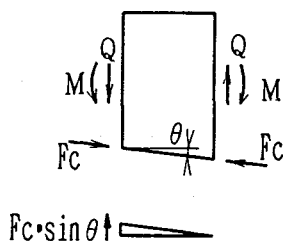


図-16 傾斜したフランジの影響

となった。これは、前述のように床版コンクリートが負担するせん断力を梁理論値では考慮できない点と、本例では下床版に勾配が付いている点が影響している。下床版に勾配があると、図-16 のように床版に働く圧縮力 F_c がせん断力を低減する方向に作用するからである。道路橋示方書Ⅱ鋼橋編¹²⁾では、このように傾斜したフランジ力の影響は考慮されていない。

図-15 より、たわみの結果は梁モデルに比べ一定せん断流パネルを用いた値の方が5割ほど大きい。これは、波形鋼板に作用するせん断力は、下フランジの傾斜や床版の負担するせん断力による減少を考慮しても、せん断変形による影響が大きいと考えられる。こうして、本解析法は課題¹³⁾とされていた張出架設時の性状も把握することが出来、形状管理にも有効であると考ええる。

4. まとめ

本文では、波形鋼板ウェブ合成橋の解析に一定せん断流パネルを用いることの妥当性をFEM解析や初等梁理論と比較して検証した。次に、実際の設計計算でもその有効性を示した。本解析法は以下の利点を持つと言える。

- (1) FEM解析に比べ平易であり、せん断変形による影響を考慮した部材毎の断面力を直接得ることが出来る。
- (2) 床版や波形鋼板の分担するせん断力を把握することが出来る。
- (3) すれ止めの作用力を一定せん断流パネルに働くせん断流より得ることが出来る。

2.2 では考慮しなかったものの、波形鋼板ウェブのせん断遅れによる影響や断面変形の影響を検討することは今後の課題である。これについても波形鋼板ウェブ合成橋の床版に一定せん断流パネルを用い、定着部の構造を反映した立体モデルを構築すれば、これらの影響を考慮できると考えている。

参考文献

- 1) J., 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, 1992年1月, pp.63-71
- 2) 近藤, 清水, 小林, 服部：波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋新開橋の設計と施工, 橋梁と基礎, 1994-9, pp.13-20
- 3) 石黒, 村田, 須合：松の木7号橋の設計と施工, プレストレストコンクリート Vol.38, No.5, pp.5-14, 1996.9
- 4) 水口, 芦塚, 古田, 大浦, 滝, 加藤：本谷橋の設計と施工, 橋梁と基礎, 1998-9, pp.2-10
- 5) H., Roesler, G., Denzer：Entwurf der Talbrücke Altwipfergrund mit Trapezblechstegen, Stahlbau 68(1999), Heft7, pp.576-582
- 6) 依田, 多田, 中島, 大内：波形鋼板ウェブを持つ合成桁の力学的挙動に関する実験研究, 鋼構造論文集, 第1巻第2号(1994年6月), pp.57-66
- 7) 谷口, 依田：波形鋼板ウェブを持つ合成桁の簡易曲げ解析法に関する研究, 土木学会論文集 No.577, I-41, 107-120, 1997.10

- 8) 山崎, 内田, 御子柴: 波形鋼板ウェブのせん断変形を考慮したコンクリートスラブの設計法の提案, 第7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, 1998.10, pp.25-33
 - 9) J.S.シエムニスキー: マトリックス構造解析の基礎理論, 培風館, 1971
 - 10) 尾下, 江川: 鋼床版合成型式橋梁の解析方法に関する一提案, 土木学会論文集 No.516/VI-27, 1995.6
 - 11) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会: 波形鋼板ウェブ PC 橋設計マニュアル (案), 平成 10 年 12 月
 - 12) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書Ⅱ鋼橋編, 平成 8 年 12 月
 - 13) 水口, 芦塚, 依田, 佐藤, 桜田, 日高: 本谷橋の模型実験と実橋載荷実験, 橋梁と基礎, 1998-10, pp.25-34
-

(1999 年 9 月 17 日受付)