

波形鋼板ウェブのせん断耐力評価

角谷 務*1・青木 圭一*2・富本 信*3・狩野 正人*4

1. はじめに

近年、複合構造橋梁の一つとして、波形鋼板ウェブを用いたPC箱桁橋の施工実績が増えてきている。しかし、波形鋼板のせん断座屈挙動については、十分に説明されたとは言えないのが現状である。波形鋼板ウェブの座屈安全性の照査は、局部座屈、全体座屈を個別に取り扱い、それぞれについて、弾性座屈強度をもとに照査が行われている。全体座屈については、Easleyの式¹⁾による弾性座屈強度に対して、非弾性域を考慮した算定式も提案されている²⁾が、連成座屈挙動については研究段階である。このような現状を踏まえ、本研究では、最初に、波形鋼板ウェブの変形状確認を行うために、有限変位解析と微小変位解析の比較を行った。次に、有限変位解析によるパラメトリック解析を行い、耐荷力評価のための検討を行った。そして、最後に、パラメトリック解析に基づいて、実験モデルを選定し、耐荷力実験を行い、座屈荷重、鉛直方向変位、面外方向変位などの比較検討をして、有限変位解析との検証を行った。

2. 波形鋼板ウェブの有限変位性状

波形鋼板ウェブに面内曲げモーメントが作用すると、図-1に示すような挙動を呈す。そこで、図-2に示すモデルに基づいて、波形鋼板ウェブの変形状を確認するために、弾塑性有限変位解析、弾性有限変位解析、弾性微小変位解析を行った。図-2に示す点において、鉛直方向変位と面外方向変位の比較を行い、その結果について波高20 mmの場合

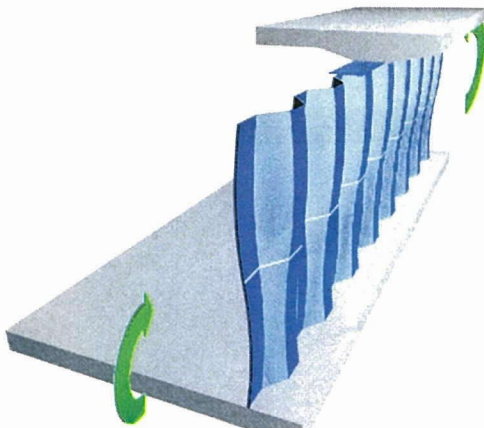


図-1 波形ウェブ橋変形挙動

を図-3に、波高60 mmの場合を図-4に示す。

図-3、図-4ともに鉛直方向変位に関しては、座屈に至るまでは、ほぼ線形挙動を示すのが分かる。また、面外方向変位について波高60 mmでは、鉛直方向変位と同様にほ

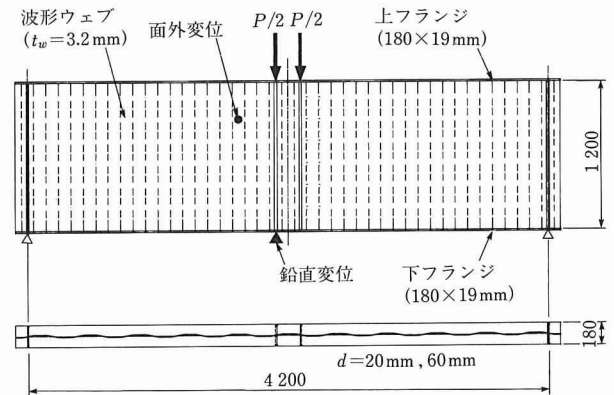
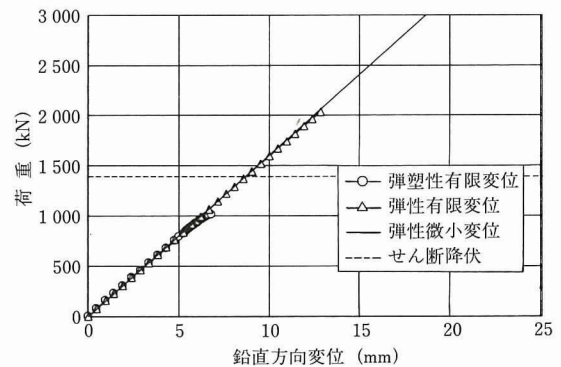
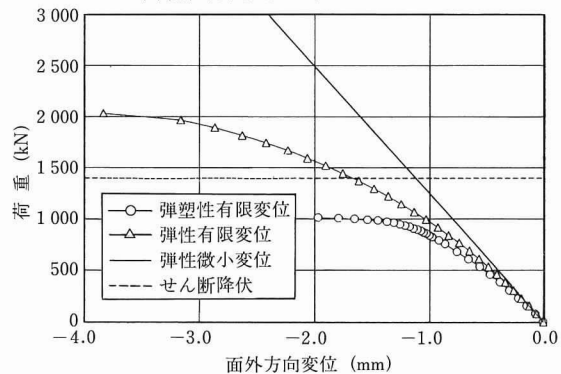


図-2 解析モデル



(a) 鉛直方向変位 (d=20mm)



(b) 面外方向変位 (d=20mm)

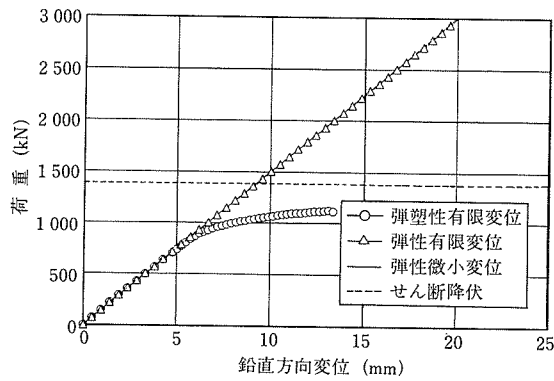
図-3 波高20 mmの鉛直・面外方向変位

*1 Tsutomu KADOTANI：日本道路公団 技術部 構造技術課長

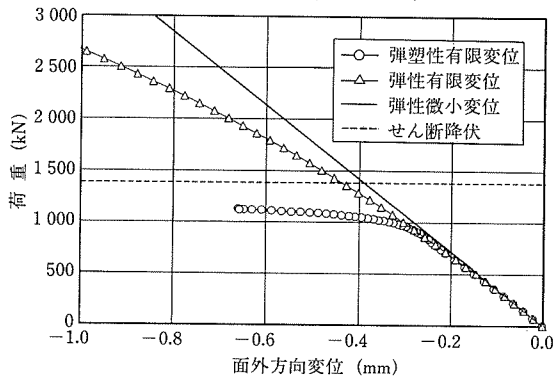
*2 Keiichi AOKI：日本道路公団 技術部 構造技術課

*3 Makoto TOMIMOTO：(株)春本鐵工 本社 設計部 技術課長

*4 Masato KANO：日本構研情報(株) 研究開発室長



(a) 鉛直方向変位 ($d=60\text{mm}$)



(b) 面外方向変位 ($d=60\text{mm}$)

図-4 波高60mmの鉛直・面外方向変位

は線形挙動を示している。しかし、波高 20 mm の面外方向変位を見ると、荷重レベルの低い範囲から、弾性微小変位より大きくなり、顕著な有限変位挙動を示しているのが分かる。この理由としては以下のことが考えられる。波高 60 mm に関しては、実橋のほぼ 1/4 モデルであり、面外剛性が高くなっている。その反面、波高 20 mm に関しては波高が低いいため面外剛性が小さくなり、面外方向変位が増大したものと考えられる。

今後、実橋の設計・施工において、支間長が長大化し、桁高が大きくなる方向にあると考えられるが、桁高、ウェブ厚に見合った波高を選定しなければ、通常の設計において考慮していない過大な変形が発生することが予想される。

なお、有限変位解析には、鋼補剛板構造の弾塑性有限変位解析プログラムUSSP³⁾を使用した。

3. 有限変位解析によるパラメトリック解析⁴⁾

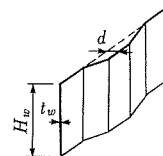
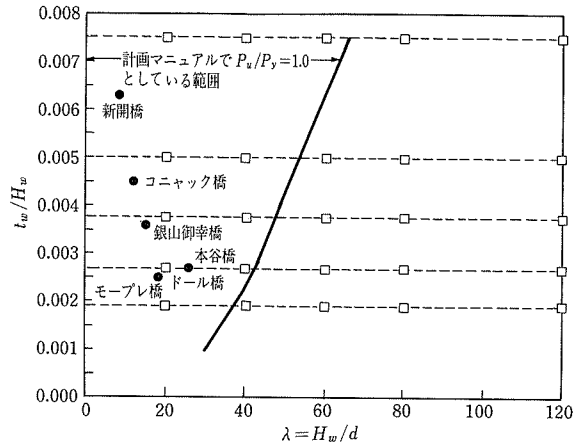
3.1 解析の目的

波形鋼板ウェブに有限変位性状が顕著に現れる可能性があることは、2章において示したが、本章では、さらに解析を進めて、波高、ウェブ厚をパラメーターと考え、パラメトリック解析を行った。そして、実橋ケースとの比較を行って、実橋の現状および問題点に考察を加えた。

3.2 解析モデル

図-5にパラメトリック解析の範囲を示す。

図-5に示すように実橋においては H_w/d が20以下になっていることが分かる。そこで、表-1に示すように、板厚および波高を5種類に変化させてパラメーター解析を行った



H_w : ウェブ高 (1200mm)
 t_w : ウェブ厚 (2.3, 3.2, 4.5, 6, 9mm)
 d : 波高 (10, 15, 20, 30, 60mm)

図-5 パラメトリック解析の範囲

表-1 パラメトリック解析の解析モデル諸元

スパン L (mm)	ウェブ(SS400)			フランジ(SM490Y)			
	高さ H_w (mm)	厚さ t_w (mm)	降伏応力 σ_y (MPa)	幅 b_f (mm)	厚さ t_f (mm)	降伏応力 σ_y (MPa)	
A	4 200	1 200	2.3	245	180	11	365
B	4 200	1 200	3.2	245	180	14	365
C	4 200	1 200	4.5	245	180	21	355
D	4 200	1 200	6.0	245	180	28	355
E	4 200	1 200	9.0	245	180	42	355

各モデルともに5種類の波高(d)を使用した。 $d=10, 15, 20, 30, 60\text{mm}$

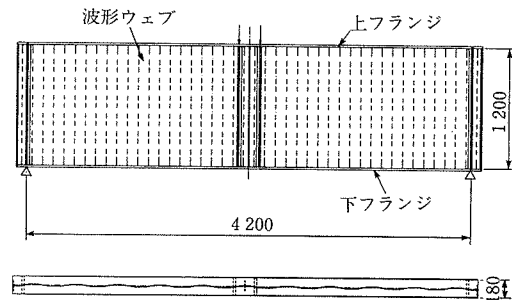


図-6 解析モデル

解析モデルを図-6に示す。

3.3 解析結果

パラメトリック解析の結果、板厚3.2mmの場合における荷重と鉛直方向変位の関係を図-7に、荷重と面外方向変位の関係を図-8に示す。座屈荷重と降伏荷重の比(P_u/P_y)と桁高波高比(H_w/d)の関係を図-9に、(P_u/P_y)と $\lambda_s (= \sqrt{\tau_y / \tau_{cr,G}})$ の関係を図-10に示す。ここに、 τ_y はせん断降伏点応力度を示し、 $\tau_{cr,G}$ は全体座屈強度を示す。

4. 耐荷力実験⁵⁾

4.1 実験供試体

3章のパラメトリック解析結果および波形鋼板ウェブの

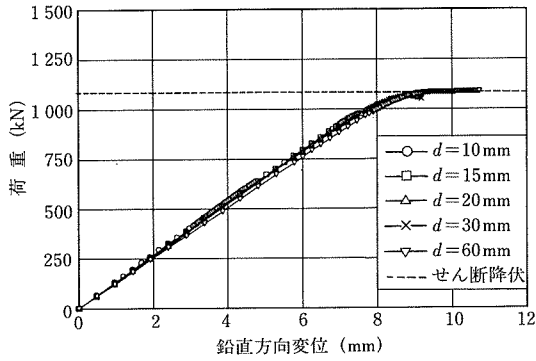


図-7 荷重と鉛直方向変位との関係 (Bシリーズ)

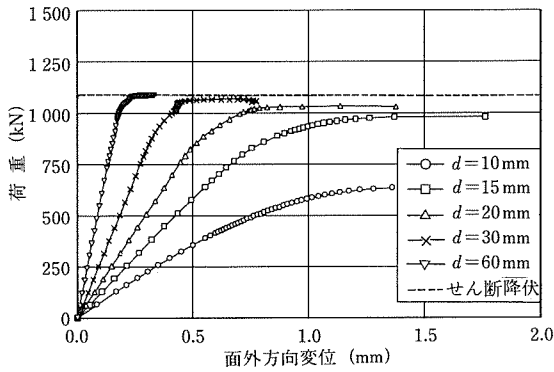


図-8 荷重と面外方向変位との関係 (Bシリーズ)

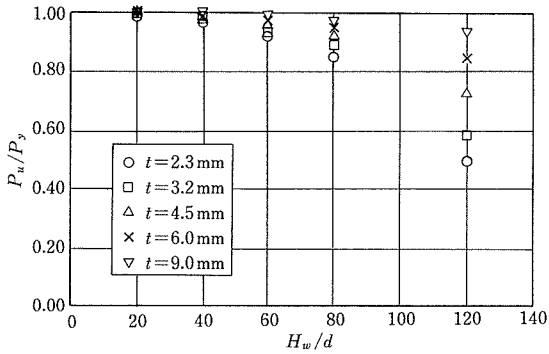


図-9 P_u/P_y と H_w/d との関係

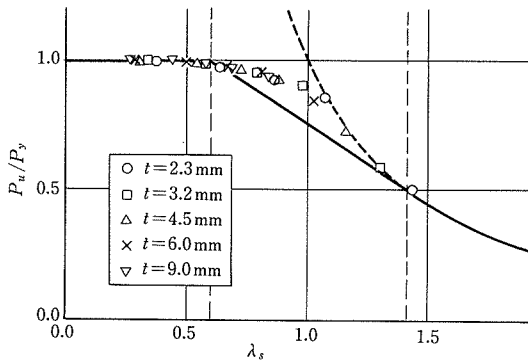


図-10 P_u/P_y と λ_s との関係

製作性を考慮した結果、Bシリーズに示す板厚 $t=3.2$ mmの波形ウェブに関して、波高 d をパラメータとして、 $d=20$ mm, 30 mm, 60 mmの3種類の供試体を製作し実験を行った。図-11に実験供試体を示す。

実験供試体の状態を正確に有限変位解析に反映するため

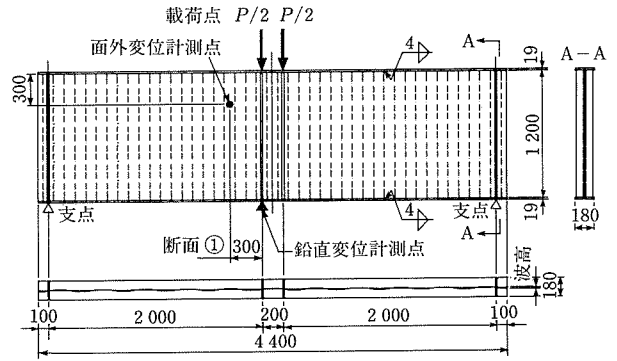


図-11 実験供試体

に、材料特性、残留応力、初期たわみについて計測・測定を行った。

4.2 材料特性の導入

図-12に実験供試体と同じ鋼板から採取した材料試験片による材料試験結果を示す。この試験結果から計算したヤング率、ポアソン比、および降伏点を表-2に示す。降伏点は、図-12から分かるように降伏棚のない材料であるため、0.2%オフセット法により求めた。

ミルシートによれば、供試体 $d=20$ mmに使用した材料の降伏点は315(MPa)、供試体 $d=30$ mm, 60 mmに使用した材料の降伏点は312(MPa)であるが、鋼板の巻取り等の影響により、このような特性となったと考えられる。

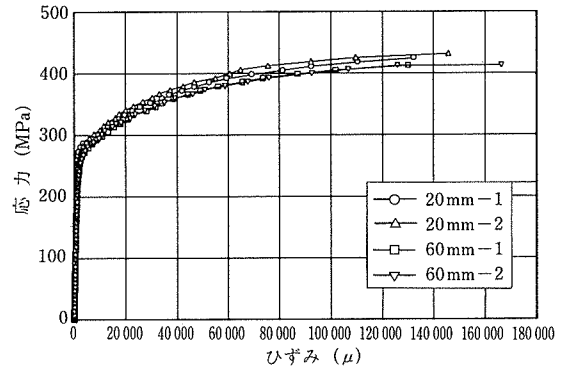


図-12 材料試験結果

表-2 材料定数

	ヤング率 (MPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)	降伏ひずみ (μ)	備考
20 mm-1	207 139	0.274	284.94	—	
20 mm-2	216 066	0.270	281.80	—	
平均	211 603	0.272	283.37	3 339	タイプ1
60 mm-1	197 841	0.260	267.44	—	
60 mm-2	208 162	0.262	265.07	—	
平均	203 002	0.261	266.26	3 312	タイプ2

降伏ひずみ=平均降伏応力/平均ヤング率

図-13および図-14に解析に用いた応力-ひずみ関係を示す。曲線で表される応力-ひずみ関係を再現するために、2曲面モデル⁶⁾を用いた。

4.3 残留応力の導入

残留応力分布については、計測された供試体の残留応

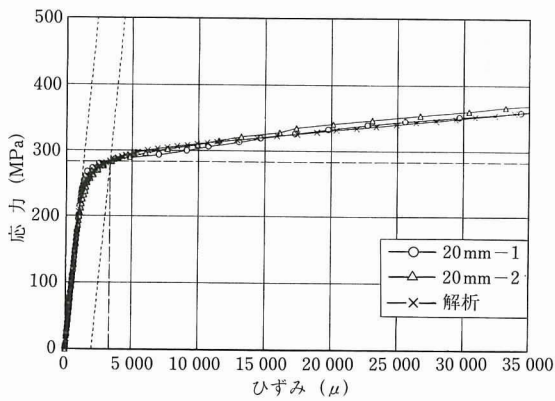


図 - 13 応力-ひずみ関係(タイプ1)

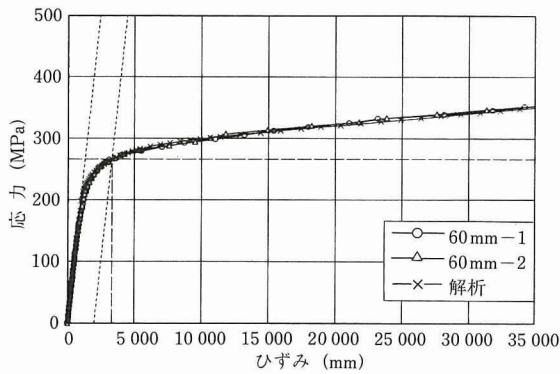


図 - 14 応力-ひずみ関係(タイプ2)

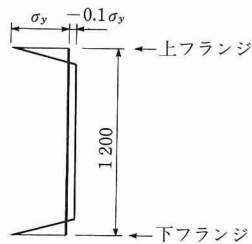


図 - 15 仮定した残留応力分布

力分布を直接導入するのではなく、供試体特有の残留応力分布を規定したうえで、その大きさを供試体の計測結果と整合させるのが有効である。

しかし、鋼フランジを有する波形鋼板ウェブについては、一般的な残留応力分布が明確ではない。したがって、本解析においては、プレートガーダーの弾塑性解析において通常用いられる三角形分布の残留応力分布を仮定し、解析モデルに導入した。これを図 - 15に示す。

4.4 初期たわみ

実験供試体には、製作誤差や溶接の影響による初期たわみが存在すると考えられる。そこで、波高、波幅などの誤差を計測した。その結果、波高などの誤差は小さく、有限変位解析での影響は小さいと判断し、解析には考慮しなかった。

5. 耐荷力実験の結果とその考察

5.1 座屈荷重

実験モデルの波高の種類と図中表記の対応を表 - 3に、実験の座屈荷重を表 - 4に示す。

表 - 3 図中対比表

波高	ケース番号	図中表記
波高20 mm	モデル1	実験20-1
	モデル2	実験20-2
	有限変位解析	解析
波高30 mm	モデル3	実験30-1
	モデル4	実験30-2
	有限変位解析	解析
波高60 mm	モデル5	実験60-1
	モデル6	実験60-2
	有限変位解析	解析

表 - 4 座屈荷重

モデル	実験値		有限変位解析	
	tf	kN	tf	kN
1	92.5	907.1	103.2	1 012.0
2	96.4	945.4	103.2	1 012.0
3	111.8	1 096.4	112.5	1 103.2
4	111.1	1 089.5	112.5	1 103.2
5	117.6	1 153.3	114.7	1 125.2
6	118.2	1 159.1	114.7	1 125.2

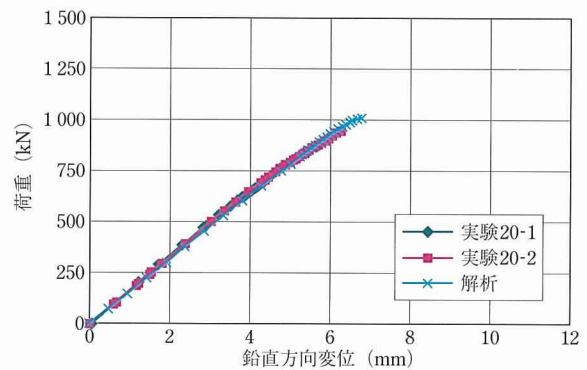


図 - 16 波高20 mm鉛直方向変位

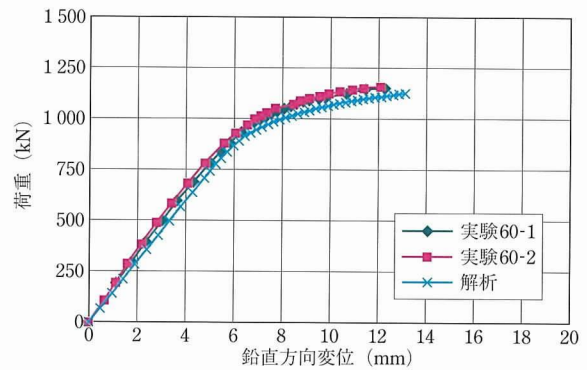


図 - 17 波高60 mm鉛直方向変位

表に示すとおり、座屈荷重は、解析値と実験値は、最大で10%程度の差となっており、よく一致しているのが分かる。

5.2 鉛直方向変位の比較

図 - 11に示す計測点について比較を行い、図 - 16に波高20 mmの結果、図 - 17に波高60 mmの結果を示す。両方の図を見るとよく一致していることが分かる。

5.3 面外方向変位の比較

図 - 11に示す計測点について比較を行い、図 - 18に波高20mmの結果、図 - 19に波高60 mmの結果を示す。実験値と解析値との間に若干の差異が見られる部分もあるが、お

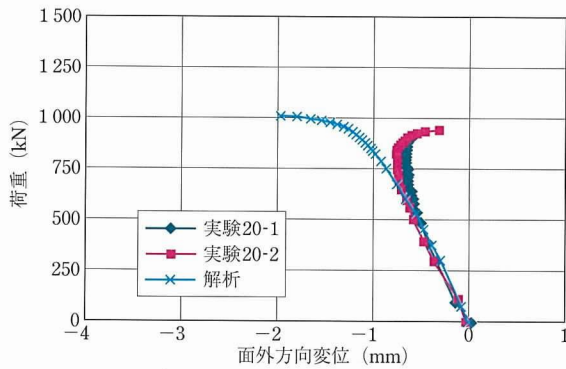


図 - 18 波高20 mm面外方向変位

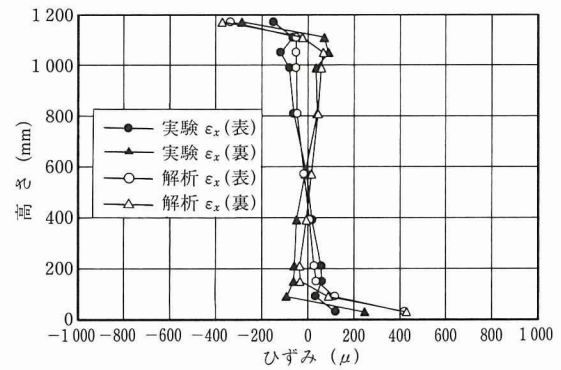


図 - 21 ひずみ分布

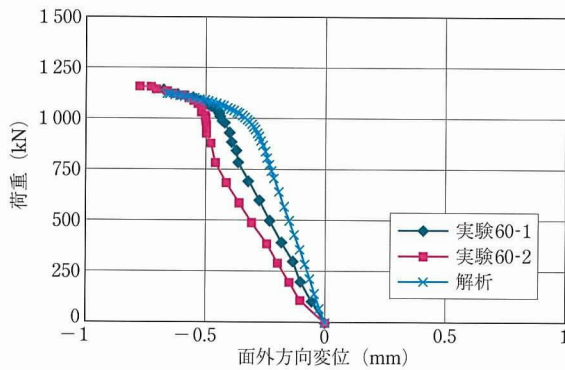


図 - 19 波高60 mm面外方向変位

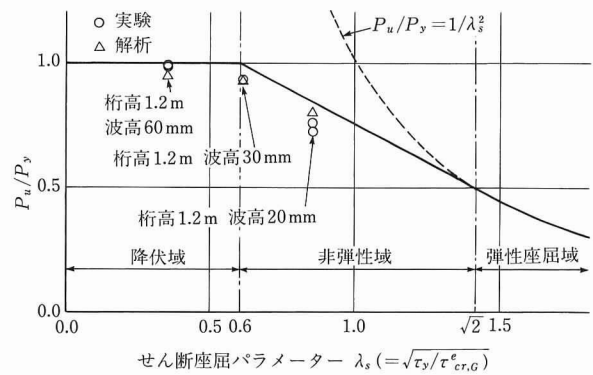


図 - 22 セン断座屈強度曲線

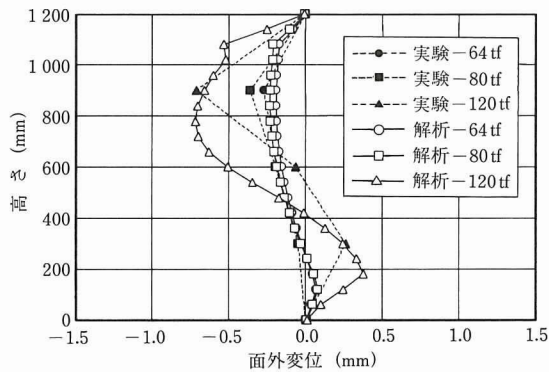


図 - 20 面外たわみモード

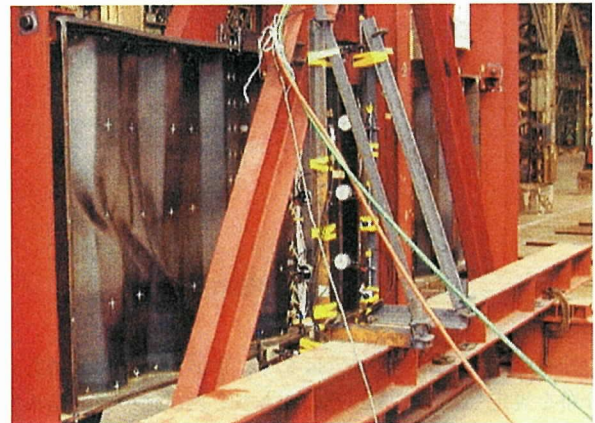


写真 - 1 波高60 mm座屈状況

おむね一致していることが分かる。また、図 - 11 断面①における、面外たわみモードの波高60 mmについての一例を図 - 20に示す。面外たわみモードも解析と実験がよく一致しているのが分かる。

5.4 ひずみ分布の比較

図 - 11 断面①における $P = 64\text{tf}$ でのひずみ分布の波高60 mmについての一例を、図 - 21に示す。ひずみ分布についても、解析と実験がおおむね一致しているのが分かる。

5.5 セン断耐荷力の比較

今回の実験結果を、文献²⁾計画マニュアルに示されるせん断座屈強度曲線上にプロットし、図 - 22に示す。この図を見ると、実験の方が、計画マニュアルよりやや小さくなっていることが分かる。

5.6 座屈状況

波高60 mmにおける座屈状況を写真 - 1に示す。

6. おわりに

パラメトリック解析の結果、 H_w/d が20を超える範囲では、座屈荷重が降伏荷重を下回ることが分かった。フランスのドール橋をはじめとして実橋においては、標準的な構造で $H_w/d = 18$ 以下となっており、座屈荷重と降伏荷重の比 (P_u/P_y) はおおむね1.0であることが分かる。また、鉛直方向変位は、いずれの波高においても線形性が見られるが、面外方向変位は、波高の小さいものにおいては荷重の低い部分で非線形性が現れ、変形量が大きくなるのが分かる。今後、波形ウェブ橋の支間長が長くなり桁高が高くなる際には、振動問題も含め、波高の選定には注意をする必要がある。

有限変位解析と耐荷力実験との比較検討結果を踏まえ、

以下のことが分かる。

鉛直方向変位については、耐荷力実験と有限変位解析はほぼ一致している。面外方向変位については、やや異なる部分もあるが、おおむね一致している。座屈荷重についても、ほぼ一致している。実験結果および有限変位解析結果が文献²⁾計画マニュアルよりも小さくなっているのが分かる。

以上より、耐荷力実験と有限変位解析がよく一致しており、今後、波形ウェブ橋の耐荷力を検討する際には、有限変位解析による解析を行えばよいことが分かった。今後の課題としては、波形鋼板ウェブ橋の鋼桁部分だけでなく、床版を含めた主桁全体系での解析を行う必要があると考えられている。

本報告は、(財)高速道路道路技術センターの委員会「波形鋼板ウェブを有する鋼コンクリート複合構造橋梁の長支間化に伴う技術検討(委員長:渡邊英一 京都大学大学院教授)」において検討されたものをまとめたものである。本報告をまとめるにあたり、ご指導、ご尽力をいただいた渡邊

委員長をはじめ、関係各位の皆さまに厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) Easley : Buckling Formulas for Corrugated Metal Shear Diaphragms, Journal of the Structural Division, ASCE, No. ST7, pp.1 403~1 417, 1975.7
- 2) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会: 波形鋼板ウェブPC橋計画マニュアル(案), 1998.12
- 3) Kano, Yamano, Nibu, Kitada : A Computer Program, USSP, for Analyzing Ultimate Strength of Steel Plated Structures, Proceedings of the 5th International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, pp.763~770, 1997
- 4) 青木, 渡邊, 角谷, 富本: 有限変位解析による波形ウェブの耐荷力評価, 土木学会第55回年次学術講演会, 2000.9
- 5) Watanabe, Kadotani, Miyauchi, Tomimoto, Kano : Shear Buckling of Corrugated Steel Web, The First International Conference on Structural Stability and Dynamics, December 7~9, Taipei, Taiwan, 2000.12
- 6) Dafalias, Popov : Plastic Internal Variables Formalism of Cyclic Plasticity, Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, pp.645~651, 1976.12

【2000年11月2日受付】



刊行物案内

PPC構造設計規準(案)

外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準(案)

プレストレストコンクリート橋の耐久性向上 のための設計・施工マニュアル(案)ー抜粋ー

(平成8年3月)

頒布価格: 3点セット 5 000円 (送料600円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会