矩形形状を有する波形鋼板のせん断弾性座屈耐力評価

EVALUATION OF ELASTIC BUCKLING STRENGTH OF
RECTANGULAR CORRUGATE PLATE UNDER SHEAR LOADING

五十嵐 規矩夫*, 藤澤 逸志**, 清水 信孝***

Kikuo IKARASHI, Masashi FUJISAWA and Nobutaka SHIMIZU

This report deals with the parametric analysis of elastic shear buckling done by F.E.M. program in order to evaluate shear buckling behavior of rectangular corrugate plates accurately. The results calculated by F.E.M. program are compared with those given by existing formula and calculated by energy method analysis and the differences between rectangular corrugate plates and anisotropic plates are examined. Furthermore, using ratio of the moment of inertia, the influences of cross-sectional shapes and boundary conditions of rectangular corrugate plates are understood in some degree, and new approximate formulas to evaluate the elastic buckling strength are suggested.

Keywords: Rectangular corrugate plate, Elastic shear buckling, F.E.M. analysis, Energy method analysis, Coupled buckling, Boundary condition

矩形波形鋼板, せん断弾性座屈, 有限要素法解析, エネルギー法解析, 連成座屈, 境界条件

1. 序

薄鋼板を折り曲げ形成してなる折板や波板に代表される波形鋼板はその幾何学的形状特性から, 従来積雪や風力等の面外力に抗する目的で, 屋根材や壁材など建築構造物における面材として利用されてきた。近年では, せん断特性における高い剛性, 強度を有効活用する試みも見られ, 欧米においては「**Stressed Skin Diaphragm Design**」が確立され, 屋根材へ適用することで水平ブレースを省略した設計が可能となっている^{1,2)}。また, 土木分野においては合理的かつ施工性に優れた波形鋼板ウェブPC複合橋がヨーロッパを皮切りに国内でも数多く建設され³⁾, それらを建物の, 制振, 耐震要素として使用するための研究も行われ始めている^{4~7)}。さらに, 薄鋼板を用いた構造材の新たな可能性の探求, 開発もなされてきており⁸⁾, 今後も波形鋼板は構造材料として発展が期待されている。

しかし, 波形鋼板のせん断挙動は複雑で未だ十分に明らかにされているとは言い難い。そのせん断座屈については理論的に材料異方性を有する平板として取り扱われている場合が多いものの, 現実には断面の崩れ等により材料異方性平板とは異なる挙動を示す可能性を有していると考えられる。例えば波形鋼板が面内せん断力を受けた場合, (a)全体座屈, (b)波形を構成する帯板内での局部座屈, (c)局部座屈と全体座屈による連成座屈, の発生状況は波形形状により異なる。特に(c)の連成座屈は危険性が指摘されているものの⁹⁾, そ

れらを詳細に検討した文献は著者の知る限り見受けられない。以上のように今後も波形鋼板のせん断座屈挙動については詳細に検討していく必要があると考えられる。

本研究では波形鋼板のせん断座屈耐力を正確に評価することを目的として, 矩形形状を有する波形鋼板について, 有限要素法を用いたパラメトリック解析を行う。種々の波形形状及び周辺支持条件がせん断弾性座屈耐力及び座屈モードに及ぼす影響について, 曲げ剛比を用いて検討する。特に本論文では, 全体座屈に着目し, 全体座屈挙動を把握するとともに, そのおこり得る範囲をある程度明確にした上で全体座屈耐力の近似評価を試みる。また, 既往の評価式や新たに行ったエネルギー法を用いた理論解析との比較を行うことにより, 波形鋼板のせん断弾性座屈耐力を理論的に異方性平板で取り扱うことが妥当であるかを検討し, 数値解析結果とそれら2つの評価手法の差異についても論じる。

2. 波形鋼板のせん断弾性座屈耐力に関する既往の評価式

通常, 波形鋼板の全体座屈は, 直交異方性平板として取り扱うことにより座屈耐力の評価が試みられることが多い。例えば, Easleyら¹⁰⁾は四辺単純支持の場合について, そのせん断座屈応力度を次の式で与えている。

* 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)

** 元東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
修士(工学)

*** 新日本製鐵(株)鋼構造研究開発センター 主任研究員・工修
東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
博士後期課程(社会人コース)

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Senior Researcher, Steel Structure Development Center, Nippon Steel Corp., M. Eng.
Graduate Student, Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology

$$\tau_{cr} = 36 \sqrt{\frac{D_x^3 D_y}{A^2 t}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 A ：波に平行な方向のパネル長さ、 t ：板厚、 D_x 、 D_y ：強、弱軸の板の曲げ剛度である。式(1)は、四辺単純支持の座屈モードのたわみ W の一般式を以下の式(2)で仮定しエネルギー法を用い、さらに、 D_x が D_y よりも十分に大きいことからその算出式を減じ簡略化することで導かれたものである。

$$W = A_s \sin \frac{\pi x}{A} \sin \frac{n\pi}{B} (y - \rho x) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 A_s ：節線で区切られる半波の振幅、 B ：波に直行方向のパネル幅、 n ：節線で区切られる半波の数、 ρ ：節線勾配である。式(1)は $D_x/D_y > 200$ の範囲で単純化され得られたもので、簡略化しない場合との誤差は2%以下である。その後、Easleyは、式(1)とBergmannら¹⁰⁾及びHlavacek¹¹⁾の提唱する2式とを比較検討し、更に、実験を行うことで、上下端部を剛結した場合の座屈強度が、単純支持の場合の1.9倍となることから、上式を拡張させた以下のせん断座屈強度算定式を導いている¹²⁾。

$$\tau_{cr} = 36r \sqrt{\frac{D_x^3 D_y}{A^2 t}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 r は境界の回転拘束に関する係数であり、単純支持の場合 $r=1.0$ 、固定支持の場合 $r=1.9$ となる。なお、Easleyは、現実的な波形鋼板パネルの境界の回転拘束の度合は、周囲の剛体枠で囲まれるパネル縁の幅によるものとしている。また、強、弱軸の板剛度 D_x 、 D_y は実験的に以下の式で与えられる。

$$D_x = \frac{EI_x}{l}, \quad D_y = \frac{Et^3 l}{12w} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 I_x ：波形断面一山当たりの中立軸に対する断面二次モーメント、 l ：波形断面一山の波幅、 w ：波形断面一山の波の全長さである。局部座屈については、板の折り曲げ点をヒンジとした、四辺単純支持のせん断座屈として取り扱うことができ、以下の式で算出される¹³⁾。

$$\tau_{cr,L} = 4P k_{r,L} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{A} \right)^2 \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $4P k_{r,L}$ ：四辺単純支持のせん断座屈係数 ($4P k_{r,L} = 4.00 + 5.34/\lambda_k^2$)、 λ_k ：帯板の縦横比 ($\lambda_k = \max(a, b, 2d)/A$) である。

3. 有限要素法を用いた波形鋼板の数値解析概要

本研究における解析には汎用非線形構造解析プログラムABAQUS / Standard Version 6.5-6を用いている。以後、本論文では、このABAQUSによる解析を単に数値解析と呼ぶ。本研究で対象とする波形鋼板は矩形形状を有するものであり、解析モデルの一例を図1に示す。試験体は4節点シェル要素で構成し、試験体の各辺に十分に高い剛性を有する剛体枠を配し、試験体の隅角部と剛体枠をピン支持しせん断力を作用させた。波形を構成する帯板は、局部座屈の発生を考慮し、4要素以上に分割している。パネル形状は辺長比 $\lambda=1$ の正方形平板を対象とし、その強軸方向長さは $A=1000\text{mm}$ である。

図2に波形断面寸法を、図3に試験体名定義を示す。本研究では、図4及び表1に示すように試験的に5つの断面タイプのモデルを作成している。表1中の B は図1に示すように波に直行方向のパネル幅であり、 N は波数である。 l は単位波の幅であり、波数 N により異

図1 解析モデル例

図2 波形断面寸法定義

RCP_10.2_4P/SB	
断面タイプ RCP_10 RCP_8 RCP_8.2 RCP_5 RCP_5.2	応力状態 S:純せん断 SB:せん断曲げ
境界条件 4C:四辺固定 4P:四辺単純 2C2P:二固定二単純	

図3 試験体名定義

図4 断面タイプ

表1 断面タイプの寸法

Section	B [mm]	N	l [mm]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]
RCP_10	A	10	B/N	$l/2 (=50)$	h	0	$l/4$
RCP_8	A	8	B/N	$l/2$	h	0	$l/4$
RCP_8.2	A	8	B/N	50	h	0	$(l-a)/2$
RCP_5	A	5	B/N	$l/2$	h	0	$l/4$
RCP_5.2	A	5	B/N	50	h	0	$(l-a)/2$

図5 境界条件及び応力状態

なる。また a, b, c, d は、図2に示す波形断面の諸寸法である。波数 $N=10$ かつ上下帯板幅が等しいRCP_10を基本形とし、RCP_8、RCP_5は上下帯板幅の関係を等しくし波数を変化させ、RCP_8.2、RCP_5.2は上部帯板幅をRCP_10と等しく一定とし波数を変化させ

図6 座屈耐力-板厚

図7 座屈耐力-波高

ている。形状パラメータは、板厚 t 、波高 h であり、デッキプレート、屋根材から耐震壁に至るまで、現実的な板厚と波高の範囲を網羅するよう設定している。なお本研究で対象とする波形は矩形のみとし、図2において $c=0$ の場合のみを取り扱う。本論文では、波形の基本形として $c=0$ の場合を検討する必要があるという立場であり、その座屈性状を把握できれば、 $c=0$ 以外の場合も、 $c=0$ の結果をもとに評価可能であると考えている。その評価は今後の課題としたい。

境界条件は図5に示すように、基本形となる四辺固定(4C/S)、四辺単純(4P/S)に加え、それらの x 軸に平行な2辺の面内変位のみを許容した二辺固定二辺単純(2C2P/SB)、四辺単純(4P/SB)の計4つとしている。なお、波形断面端部を単純支持とする際には、平板としての挙動を十分に模す為、波形の下部帯板のみを単純支持とし、側部、上部は拘束していない。

また、材料のYoung率 $E=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、Poisson比 $\nu=0.3$ としている。以上のような数値解析から得られる線形固有値をもとに矩形形状を有する波板鋼板のせん断弾性座屈耐力を算出する。

4. 波形鋼板のせん断座屈耐力

4.1 波形形状がせん断座屈耐力に与える影響

数値解析より得られたせん断弾性座屈耐力について板厚、波高の影響を見る。図6にせん断座屈耐力と板厚の関係を示す。各試験体とも、板厚の増加に伴いせん断座屈耐力は放物線状に増加している。板厚の厚い範囲では波高が高い程座屈耐力は高くなっているが、板厚の薄い範囲では一部で波高が高いものの方がせん断座屈耐力が低くなっている。図7に示すよう、波高を横軸にとって見ると、板厚が厚いものでは、波高が増加するにつれ板厚と同様に放物線状に単調に増加が見られたが、板厚が薄いものについては、波高が増加するとある点を境に座屈耐力は減少していく傾向にある。これ

は、局部座屈ないし連成座屈が生じたためであり、形状によっては波高が高い方が連成の度合いが強くなり座屈耐力の低下を生じる危険性を有することを意味する。

これらの座屈耐力を板厚波高比(t/h)で整理する。板厚波高比は、波形鋼板の波形形状の度合を示す一指標であり、値が大きくなるほど平板に近い形状を意味する。図8は縦軸に平板と見なした場合の座屈耐力 Q_{cr1} で除した波形鋼板の座屈耐力を、横軸に板厚波高比をとっている。図より、RCP_10_4C/S、RCP_10_4P/Sでは、板厚波高比(t/h)が約0.03より大きい範囲において概ね反比例的に座屈耐力比は減少しており、RCP_5_4C/S、RCP_5_4P/S、RCP_5.2_4C/S、RCP_5.2_4P/Sでは板厚波高比が約0.07より大きい範囲において概ね反比例的に座屈耐力比は減少していることがわかる。この反比例的に座屈耐力が減少している範囲では、いずれの断面タイプにおいても全体座屈による崩壊である。

一方、RCP_10_4C/S、RCP_10_4P/Sは、板厚波高比が約0.03より

り小さい範囲において板厚波高比の増加とともに座屈耐力が上昇しており、RCP_5_4C/S, RCP_5_4P/S, RCP_5.2_4C/S, RCP_5.2_4P/Sでは板厚波高比が約0.07より小さい範囲においては、板厚波高比の増加とともに座屈耐力は緩やかに上昇あるいは、板厚波高比によらず座屈耐力はほぼ一定で推移している。この範囲では、いずれの断面タイプにおいても局部座屈あるいは連成座屈が生じている。しかし、この範囲における座屈耐力比と板厚波高比の関係は断面タイプにより異なる。

矩形波形鋼板が面内せん断力を受けた場合、この板厚波高比を用いることで、その波形鋼板が全体座屈するか否かは概ね判断でき、その範囲における座屈耐力の減少傾向も把握できる。しかし、その板厚波高比の境界値及び座屈耐力の減少割合は断面タイプにより異なり、それらを包括的に評価する指標を導入する必要がある。

4.2 せん断座屈耐力の既往の評価式との対応

図9に全試験体の解析結果から、全体座屈及び連成座屈(全体座屈が卓越しているものに限定)を形成する試験体における、数値解析結果とEasleyの評価式(3)との対応を示す。なお、モード判別は視認により行っており、座屈耐力に拘らず、座屈波形が試験体の波形に拘束されることなく全体にわたり生じているものを全体座屈、座屈波形が帯板の中のみに生じているものを局部座屈、それ以外のものを連成座屈としている。図より、境界条件が4C/S, 4P/Sともに、数値解析結果のうち、黒塗りプロットで示している全体座屈したものは、その座屈耐力が評価式を上回る結果となったが、相関性は有している。一方、白抜きプロットで示した連成座屈しているものは一部評価式を下回るものもある。これはEasleyの評価式が全体座屈する場合の座屈耐力を与える式であるためである。

ここで数値解析から得られた全体座屈する場合の座屈耐力がEasleyの評価式を上回る要因については、次のように考えている。Easleyの評価式は近似式であり、また、想定する座屈波形のたわみ関数についても、波形断面端部の境界については境界条件を満たすが他の二辺については条件を満たしていない。さらに、四辺固定支持の場合の座屈耐力は、四辺単純支持の場合から実験的に1.9倍するのみに留まっているため、若干正確性に欠けるおそれは否めない。従って、本研究では新たにエネルギー法による理論解析を行い、数値解析結果との対応をより精度良く評価することを試みる。

4.3 エネルギー法を用いた新たな理論解析と数値解析結果との対応

本研究で提案するエネルギー法による理論解析のモデルを図10に示す。また、その際に用いられるパラメーターの定義を表2に示す。板の面外変形に伴うひずみエネルギー ΔU 及び曲げせん断力がなす仕事 ΔT を次式で表す¹⁴⁾。

$$\Delta U = \frac{1}{2} \int_0^A \int_0^B \left[D_x \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + D_y \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2D_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2D_{xy} (1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad \dots (6)$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\beta} \tau_{cr} t \int_0^A \int_0^B \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} x \right) \left(1 - \frac{2}{B} y \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx dy + \frac{1}{2} \tau_{cr} t \int_0^A \int_0^B \left[1 - \frac{1}{6\eta} + \frac{y}{\eta B^2} (B-y) \right] \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} dx dy \quad \dots (7)$$

ここで、変位関数 W は以下のようにおく。

図9 数値解析結果とEasley式の対応

図10 理論解析モデル

表2 理論解析パラメーター設定

D_x, D_y : x, y 方向の板の単位幅当たりの曲げ剛性; D_{xy} : 捩り剛性;
λ : 辺長比 ($=A/B$); β : 曲げ勾配; η : せん断曲げ比 ($\eta = \frac{A_f}{A_w} + \frac{1}{6}$);
α : 応力比 ($\alpha = \eta\beta/\lambda$); A_f, A_w : フランジ, ウェブの断面積;
I_f, I_w : フランジ, ウェブの断面二次モーメント
$\sigma(x, y)$: 曲げ応力度分布: $\sigma(x, y) = \sigma \cdot (1 - \frac{\beta}{A} x) (1 - \frac{2}{B} y)$;
$\tau(x, y)$: せん断応力度分布: $\tau(x, y) = \frac{\beta}{\lambda} \left\{ \left(\eta - \frac{1}{6} \right) + \frac{y}{B^2} (B - y) \right\} \sigma$;
$\bar{\tau}$: 平均せん断応力度: $\bar{\tau} = \frac{\beta\eta\sigma}{\lambda}$;

$$W = \sum_m \sum_n a_{mn} u_m v_n \quad \dots (8)$$

$$\text{四辺固定(4C/S)}: u_m = \sin \frac{m\pi x}{A} \sin \frac{\pi x}{A}; v_n = \sin \frac{n\pi y}{B} \sin \frac{\pi y}{B} \quad (9)$$

$$\text{四辺単純(4P/S)}: u_m = \sin \frac{m\pi x}{A}; v_n = \sin \frac{n\pi y}{B} \quad \dots (10)$$

ここで、 m, n はそれぞれ x, y 方向の半波の数、 a_{mn} は各級数項における係数である。本研究では、純せん断及び逆対称曲げを対象としているため、曲げ勾配は $\beta=2$ とする。せん断曲げ比 η は、応力度分布における平均せん断応力度と最大曲げ応力度の関係に寄与するものである¹⁵⁾。境界条件が4C/S及び4P/Sの場合、純せん断場を想定しているため、せん断曲げ比 η は無量大としていた。式(6)と式(7)からせん断弾性座屈応力度 τ_{cr} を最小にする条件より、式(8)中の係数 a_{mn} からなる一次同時方程式の係数行列を作り、その行列より一般化固有値問題としてせん断弾性座屈耐力を求める。以後、このエネルギー法による理論解析を本論文では単に理論解析と呼ぶ。

本理論解析は、Easleyの評価式に比して以下の点でより正確且つ汎用的に評価可能であると考えられる。

1. 曲げ剛比の大きさによらない。
2. 四辺単純支持を、波形断面に垂直な二辺の境界条件も考慮。
3. 四辺固定についてもたわみ関数を提示。
4. 辺長比の長い試験体についても対応。

この理論解析結果と数値解析結果の対応を図11に示す。図より、一部連成座屈する場合に理論解析結果を下回るものもあるが、四辺固定、四辺単純とも黒塗りプロットで示した数値解析から得られた全体座屈する場合の座屈耐力は理論解析結果よりも高く、図9に示すEasleyの評価式との場合と対応が概ね一致した。従って、波形鋼板のせん断座屈耐力は、曲げ剛性を考慮した異方性平板と見なした理論解析値よりも高い値を示すことが確認できる。

ここで、Easley評価式において四辺固定、四辺単純の比を1.9倍としていることについて若干ながら言及する。図12に数値解析結果及び理論解析結果の、同形状における4C/S、4P/Sの座屈耐力比 $4CQ_{cr,G}/4PQ_{cr,G}$ と板剛度比 D_x/D_y の関係を示す。図中には、Easley評価式の座屈耐力比(=1.90)及び、平板の場合の座屈耐力比(=1.55)も実線で示してある。図より、数値解析結果、理論解析結果ともに、板剛度比が大きくなるほど座屈耐力比が大きくなる傾向にあり、Easleyは実験等の比較によりその比を一律に1.9としているが、理論解析結果では板剛度比が低い場合1.75、高い場合でも1.8程度とする必要があると考えられる。数値解析結果について見ると、数値解析結果も理論解析結果と同様の傾向を呈し、板剛度比が大きい範囲ではその比は1.8に近づくが、板剛度比が小さい範囲では1.75を下回り、平板の場合の1.55をも下回る試験体も見られた。これは、数値解析において四辺単純支持は波形の下部帯板のみを支持しているからであり、異方性の度合いが弱くなるほど下部帯板のみを支持することによる座屈耐力の低下の影響が大きくなる。

4.4 数値解析結果が理論解析結果を上回る要因の検討

数値解析より得られる波形鋼板のせん断座屈耐力が異方性平板の理論解析結果を上回る要因について検討する。図13に理論解析結果に対する数値解析結果の比と板剛度比の関係を示す。座屈モードが全体座屈を形成するものについて見ると、板剛度比が小さいものほど、即ち形状が平板に近いものほど数値解析結果と理論解析結果の相対的な差は小さく、板剛度比が大きいものほどその差は大きくなり、およそ2倍弱に収束していく。連成座屈するものに関しては、全体座屈の場合とは異なり板剛度比が大きくなるにしたがい座屈耐力が低下していく。この傾向は、断面タイプごとに捉えられるが、統一的な傾向を捉えるのは難しい。

続いて、荷重偏心が座屈耐力に及ぼす影響について考察する。本研究で対象としている試験体は荷重作用軸と波形断面の中立軸が異なる上、板の2辺の中立軸位置もそれぞれ異なる。4C/Sの場合には波形断面の節点は全て剛体枠に剛結されているため影響はないが、4P/Sの場合には波形溝帯板のみしか単純支持されていないため、面外曲げ等の荷重偏心の影響を受けるおそれがある。従って、図14に示すようにRCP_10を基に、中立軸と荷重作用軸と波形断面の中立軸が等しい、面外二方向に凸の形状のRCP_10'を同数作製(但し、板剛度比は異なる)し、解析を行った。その結果を図15に示す。図より、4C/S、4P/SともにRCP_10とRCP_10'それぞれの理論解析結

図11 数値解析結果と理論解析結果の対応

図12 エネルギー法解析結果と Easley式の比較

図13 四辺単純と四辺固定の比

図14 荷重偏心を考慮した断面タイプ

図15 荷重偏心の影響

果との対応はほぼ同様の傾向を呈した。したがって、荷重偏心の影響は殆どないと考えられる。二方向に凸のRCP_10'では、複数の隣接する帯板にまたがった局部座屈あるいは連成座屈が生じたものが多く見られた。上下に凸あるいは台形波形のような帯板間のヒンジの度合いが弱い形状のものは、上述のような座屈傾向を示し、一方に凸のようなヒンジの度合いが強いものに比べ、全体座屈を形成しにくい傾向があり、座屈モードを考慮した設計を行う上で注意する必要がある。

また、振り剛性の影響についても検討する。波形鋼板の場合、異方性平板にはない特有の振り剛性の影響により、座屈耐力が上昇する可能性があるが、評価式(3)自体には振り剛性の影響は考慮されていない。そこで振り剛性がせん断座屈耐力に及ぼす影響について考察するため、板剛度比が $D_x/D_y=1, 100, 1000$ それぞれの場合、振り剛性をパラメータとして理論解析を行った。図16はせん断座屈係数と振り剛性の関係について示している。振り剛性は平板の振り剛性 D で除している。図より、全ての板剛度比の場合について、振り剛性の増加に伴うせん断座屈係数の変化は小さく、本理論解析の範囲では、振り剛性がせん断座屈係数に与える影響は小さいことがわかる。

最後に、波形鋼板の波形断面端部を全て単純支持とした場合のせん断座屈耐力に及ぼす影響について見る。本研究では、4P/Sにおける波形断面端部の支持を、平板としての挙動を模すため、溝部のみを単純支持しているが、今回新たに波形断面端部の全ての節点を単純支持した場合の境界条件4P/Sを作成し、数値解析を行った。境界条件4P/Sは、Easleyの示す四辺単純支持により近い。それらと四辺固定支持(4C/S)の比を図17に示す。図より、全ての波形断面端部の節点を単純支持した場合、今回検討対象としている波形形状の範囲においては、全ての試験体について4C/Sと座屈耐力はほぼ等しく、曲げ剛比が低い場合においてもその差は2%程度である。したがって、全ての波形断面端部を単純支持とすると、側帯板の存在により、平板としての単純支持の挙動よりも高い値を示し、Easleyが提唱する座屈耐力値を大きく上回る。

数値解析結果が理論解析結果を上回る要因を現段階では十分に把握しきれていない。これは、理論解析がある程度の仮定の上で成り立っているためであり、現段階では、理論解析に組み込んでいない波板の側面のせん断抵抗すなわちパネルの面外抵抗の存在がその可能性としてあげられる。また本理論解析では振り抵抗を既往の研究¹⁰⁾と同様に与えているが、波板の現実的な振り抵抗を理論解析に取り込む場合についても、その算定値について未だ不明確な部分もあるのは確かである。従って、今後はこれらの影響について検討、評価する必要があると考えている。

5. 曲げ剛比を用いたせん断座屈耐力評価

5.1 板厚、波高の影響

前章より、波形鋼板のせん断座屈耐力は異方性平板として扱う理論解析値よりも高い値を示すことが確認された。本章では数値解析により波形鋼板のせん断座屈耐力を曲げ剛比を用いて評価することを試みる。座屈耐力は以下で与えられるせん断座屈係数 k_τ で表す。

$$k_\tau = \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 E \bar{A}_w} \left(\frac{B}{t} \right)^2 Q_{cr} \quad \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 $\bar{A}_w$ ：試験体の波形端部断面を平板と見なした場合の断面積(=Bt)である。また、曲げ剛比は波形鋼板の強、弱軸方向の波形一山当たりの断面二次モーメントの比とし、以下の式で表される。

$$\frac{I_x}{I_y} = \frac{(a+2d)t^2 + 2bh^2 + 3b(h-2e)^2 + 12a(h-e)^2}{h^2} \quad \dots \dots (12)$$

ここで、 e ：波形断面における波形溝部から中立軸までの距離であり、その他の波形形状に関する記号については図2を参照されたい。

まず、せん断座屈耐力が曲げ剛比 I_x/I_y を用いて評価可能かを検討

図16 振り剛性 D_{xy} の影響

図17 全ての境界条件をピン支持とした場合

(a) せん断座屈係数-板厚 (b) せん断座屈係数-波高

図18 曲げ剛比によるせん断座屈係数評価

するため、曲げ剛比 I_x/I_y を一定とし、板厚 t 、波高 h を変化させ、せん断座屈係数 k_τ への影響を見る。図18は、RCP_10_4P/S試験体において、 $I_x/I_y=10, 100, 200, 500$ の4つの値をとるように板厚、波高をそれぞれ調整したものである。この曲げ剛比の範囲は、全体座屈、局部座屈が混在し問題が煩雑になることを避けるため、ある程度、全体座屈を形成するであろう範囲に限定している。図より、曲げ剛比 $I_x/I_y=500$ では、せん断座屈係数 k_τ に若干のばらつきがあるものの、板厚、波高に拘らず、せん断座屈係数 k_τ は、曲げ剛比 I_x/I_y を用いて評価することが可能であると言える。

図19は、代表的な断面タイプ、境界条件における全ての板厚、波高のせん断座屈係数 k_τ と曲げ剛比 I_x/I_y の関係を表している。又、波形鋼板の局部座屈の指標となる帯板の四辺単純支持及び四辺固定支持¹⁵⁾におけるせん断座屈係数 $4P_{cr,L}, 4C_{cr,L}$ も同図中に併せて示している。座屈モードは前述の3種に分けてある。図より、波形鋼板のせん断座屈耐力は、曲げ剛比が小さい範囲では、全ての試験体において板厚、波高によらず曲げ剛比の増加に伴い座屈耐力が上昇する傾向にあることがわかる。その後は連成座屈が生じ始めるにつれ、曲げ剛比に伴う座屈耐力上昇の度合は低下し、4C/Sではある一定の値を保つものの、4P/Sでは、曲げ剛比の増加に伴い座屈耐力は減少していく。局部座屈について見ると、波形鋼板の局部座屈は通常、帯板の折線をヒンジと見なした四辺単純支持のせん断座屈として取り扱われるが、4C/Sではそれ以上の境界条件の拘束が得られているものの、4P/Sではその評価式は局部座屈を過大評価するため検討が必要になる。

また、図20に示すように、先の面外二方向に凸のRCP_10'について、せん断座屈係数に対する曲げ剛比の影響を見ると、曲げ剛比(I_x/I_y)が四辺固定では約500以下、四辺単純では約100以下の範囲

図19 セン断座屈係数-曲げ剛比(板厚, 波高の影響)

図20 セン断座屈係数-曲げ剛比(荷重偏心の影響)

図21 座屈モード及び断面変形状

では、四辺固定、四辺単純ともに、RCP_10と同一線上に乗っている。ただし、RCP_10より曲げ剛比が低い範囲で連成座屈が生じ始め、座屈耐力の上昇度合が低下していくのが確認できる。

上述の曲げ剛比に伴う座屈耐力上昇の傾向について座屈モードとの関係から詳細に調べる。図21は1次モードの面外変形及び中央部(太線)、端部付近(細線)の波形断面形状を示している。曲げ剛比が等しい場合、波形、断面ともにほぼ等しいが((a),(b))、曲げ剛比が増加すると、座屈波形の数が増える((a),(c))。これは強軸方向の剛性の相対的な増加により低次モードの座屈が拘束されたためと考えられる。また、(c)は波形側面の振れも大きい。断面タイプの異なるものについて比較すると((c),(d))、曲げ剛比がほぼ等しいにも拘らず(d)は波形断面端部付近で局部座屈を形成している。

5.2 断面タイプの影響及び座屈耐力近似評価

これら断面タイプが座屈耐力に及ぼす影響について考察する。全ての試験体の全体座屈及び連成座屈のせん断座屈係数-曲げ剛比関係を図22に示す。図より、矩形波形鋼板の座屈耐力は、四辺固定、四辺単純ともに、全体座屈を形成する範囲においては断面タイプによらず曲げ剛比に伴いほぼ同一線上に座屈耐力が上昇していく傾向

にあり、波密度が荒く波幅が不均等なものほど、曲げ剛比が低い範囲で連成座屈を生じ始める。全体座屈耐力について、上述の傾向を近似評価すると以下のような近似式が得られ、その対応関係を図23に示している。

$$4C k_{\tau,G} = 5.95 \times \left(\frac{I_x}{I_y} - 1 \right)^{0.82} + 14.58 \quad \dots \dots \dots (13)$$

$$4P k_{\tau,G} = 4.38 \times \left(\frac{I_x}{I_y} - 1 \right)^{0.79} + 9.43 \quad \dots \dots \dots (14)$$

上式は曲げ剛比が1のとき、平板のせん断座屈係数を満たす。ただし、連成座屈モードを形成し始め、曲げ剛比に伴う座屈耐力の上昇の度合が低下しない範囲、すなわち、式(13)、(14)が適用できる範囲は断面タイプにより異なるが、4C/S、4P/Sともに、帯板の四辺単純支持の場合のせん断座屈係数を用いて概ね次の式で表される。

$$I_x / I_y \leq 0.167(4P k_{\tau,L} - 9.34) + 0.00058(4P k_{\tau,L} - 9.34)^2 + 1 \quad (15)$$

図22 セン断座屈係数-曲げ剛比(断面タイプの影響)

図23 座屈耐力近似評価式

5.3 境界条件の影響

最後に、図24において境界条件が座屈耐力に及ぼす影響について検討する。全体座屈を形成する曲げ剛比の小さい範囲においては、座屈耐力の上昇度合いは異なるものの全ての境界条件で一定の傾向で増加していくが、2C2P/SB、4P/SBは曲げ応力の影響により曲げ剛比が比較的小さい範囲で座屈耐力上昇の度合いが低下している。全体座屈を形成する試験体に関して、図25に示すよう4C/Sと2C2P/SB及び4P/Sと4P/SBの対応を見ると、面内変形を許容した場合、座屈耐力は純せん断の耐力に0.8を乗ずればよいことがわかる。但し、同形状の試験体でも境界条件により連成座屈の生じ易さは異なる。

6. 結

本研究では、矩形形状を有する波形鋼板について、有限要素法によるパラメトリック解析を行い、種々の波形形状及び周辺支持条件におけるせん断座屈耐力の評価を試みた。

波形鋼板のせん断座屈耐力は、板厚の増加とともに放物線的に増加し、波高の増加に従いせん断座屈耐力は上昇するが、連成、局部座屈が生じる場合には、同じ板厚でも波高が高い試験体の方が逆にせん断座屈耐力が低い値を示す。

全体座屈が生じる試験体を視認により選別し、そのせん断座屈耐力を現行の評価式及びエネルギー法を用いた理論解析と比較検討したところ、数値解析結果はこれら二つの評価法よりも高い値を示した。その相対的な差は板剛度比が高い程大きくなる傾向がある。波形鋼板の座屈耐力が異方性平板として扱った場合のそれを上回る要因としては、現状、側部帯板によるせん断抵抗や捩り剛性評価の違いが可能性として挙げられる。

波形鋼板のせん断座屈耐力を適切に評価するに当たり、曲げ剛比を用いて評価することを試みた。結果、板厚、波高の影響によらず座屈耐力は、曲げ剛比が大きくなるにつれて連成、局部座屈を含めて一定の上昇傾向を示すことが明らかとなった。全体座屈耐力に関しては、四辺固定、四辺単純ともに、断面タイプ、即ち波数及び波形の上下帯板幅によらず曲げ剛比を用いて評価でき、曲げ剛比を用いた簡便な近似評価式を提案した。これらの式は、等方性平板の場合にも適用できるように考慮したものであり、十分な精度を有している。また、波形断面と垂直な二辺の面内変位を許容した場合、全体座屈を形成するものに関しては座屈耐力は波形断面端部の固定、単純支持にかかわらず、ともに0.8を乗ずれば十分に評価できることを示した。

なお本論文では数値解析による検討を中心に考察を進めてきたが、この結果と実験との対応なども今後検討していく必要があると考えている。

参考文献

- 1) European Recommendations for the Application of Metal Sheeting Acting as a Diaphragm, European Convention for Construction Steelwork, 1995
- 2) Diaphragm Design Manual Third Edition, Steel Deck Institute, 2004.9
- 3) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブPC橋 設計実例集2006, 2006.5
- 4) 帖佐和人, 柏井康彦, 河野進, 渡邊史夫：波形鋼板ウェブを耐震壁として用いるための基礎的研究, 日本建築学会大会学術梗概集 C- I , pp.721-722, 2006.9

図24 せん断座屈係数-曲げ剛比(境界条件の影響)

図25 曲げの影響による座屈耐力減衰率

- 5) 麻生直木 他：波形鋼板耐震壁の力学性状に関する研究 (その1、その2), 日本建築学会大会学術梗概集 C- I , pp.1123-1126, 2006.9
- 6) 池田崇 他：波形鋼板耐震壁の力学性状に関する研究 (その3～その5), 日本建築学会大会学術梗概集 C- I , pp.1121-1126, 2007.8
- 7) 笠直介, 市岡有香子, 花房広哉, 河野進, 渡邊史夫, 太田義弘：波形鋼板ダンパーを組み込んだプレキャストPC門型架構の力学的性状 (その1～その3), 日本建築学会大会学術梗概集 C- I , pp.839-844, 2007.8
- 8) 富澤義人, 五十嵐規矩夫 他12名：薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発, 鋼構造シンポジウム2007 特別セッション2, 日本鋼構造協会, 2007.11
- 9) Easley J. T., and McFarland D. E. : Buckling of Light-Gage Corrugated Metal Shear Diaphragms, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.95, No.ST7, Proc. Paper 6683, July, 1969, pp.1497-1516
- 10) Bergmann V. S. and Reissner H. : Neuere Probleme aus der Flugzeugstatik, Zeitschrift Flugtech und Motorluftsch, Vol.20, 1929
- 11) Hlavacek V. : Shear Instability of Orthotropic Panels, Acta Technica CSAV, Prague, Czechoslovakia, No.1, 1968
- 12) Easley J. T. : Buckling Formulas for Corrugated Metal Shear Diaphragms, Journal of The Structural Division, ASCE, No.ST7, pp.1403-1417, July 1975.7
- 13) Bleich Friedrich : Buckling Strength of Metal Structures, Engineering Society Monographs, Mc-GRAW-HILL, pp.390-399, 1952
- 14) 呂 華峰, 五十嵐 規矩夫, 王 韜, 藤澤 逸志 : 材料異方性を持つ平板の弾性座屈耐力に与える剛性及び境界条件の影響, 日本建築学会大会学術講演集 C- I , pp.661-662, 2007.8
- 15) 五十嵐規矩夫, 鈴木琢也：逆対称曲げを受けるウェブ平板の弾性座屈耐力に及ぼす境界条件の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第571号, pp.145-152, 2003.9
- 16) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針, 1996.1

(2008年3月10日原稿受理, 2008年7月15日採用決定)