I-297　垂直補剛材を有するプレートガーダーの有限要素法によるせん断強度解析

新日本製鉄(株)　正会員　沢田嘉弘
東京大学工学部　正会員　伊藤　学

1. まえがき・・・・プレートガーダーのせん断耐荷力解析は、幾何学的非線形性と材料非線形性をともに含む、複雑な非線形問題である。そのために、簡明な崩壊機構を仮定するモデル解析が行なわれてきた。せん断耐荷力理論は数多く発表されているが、Basler理論[1]はＡＩＳＣの設計基準に採用されている点で、Rockey・Skaloud理論[2]は崩壊機構として仮定したフランジの塑性関節が、その後多くの理論に採用されている点で、耐荷力理論の中で中心的な位置を占めている。プレートガーダーのせん断崩壊は複雑であるため未知の面が多いが、本報告では崩壊機構及び崩壊時の部材力について考察するために、材料非線形性のみを含む力学的近似モデルを提案し、それを有限要素法で解析した。又、その結果をもとに、Basler理論, Rockey・Skaloud理論に基礎的な検討を加えた。

2. 解析法・・・・座屈前のウェブは、初期たわみがなければ平面応力状態にあり、膜要素を適用できる。ここでは標準的な定ひずみ三角形要素を使用した。せん断座屈荷重は、ウェブを周辺単純支持の板と仮定して、解析的に求めた。座屈後のウェブは、膜応力と曲げ応力の共存状態となるが、崩壊を解析する場合には膜応力が支配的なので、曲げ応力の影響は無視する。座屈後のウェブには、Fig.1に示すように、一般に引張方向の対角線に平行に、座屈波形が生じる。そのため座屈後は、引張方向の対角線に平行な引張応力が主として増加して、外力の増加に抵抗するが（張力場作用）、これと直角方向の圧縮応力はわずかしか増加しない。そこで座屈後の荷重増加に対し、ウェブを引張方向の対角線に平行な引張応力にのみ剛性を持つ異方性板と仮定し、次のひずみ―応力関係式に従う異方性の膜要素を使用する。

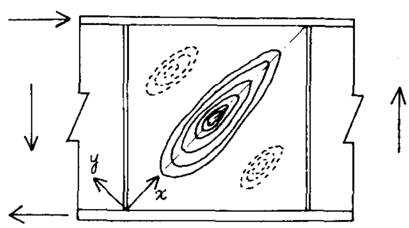

Fig.1　Buckling Waves

$$\begin{Bmatrix} d\epsilon_x^e \\ d\epsilon_y^e \\ d\gamma_{xy}^e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/\eta E & 0 \\ 0 & 0 & 1/\eta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} \cdots (1)$$

ここで、Eは弾性定数，Gはせん断弾性定数，νはポアッソン比、添字eは弾性成分であることを表わす。座標系はFig.1に示す。(1)式でηを零とすれば引張応力σ_xの増分にのみ剛性を持ち、仮定に忠実であるが、分母が零となるので、ηには零に近い小さな値を代入する。計算例ではすべて$\eta=10^{-2}$として計算している。降伏はMisesの降伏条件により判定する。塑性化した要素の剛性マトリックスを得るためには、塑性変形における応力―ひずみ関係式が必要であるが、これは塑性流れ理論から次のように導ける。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\eta\nu^2}-\frac{S_1^2}{S} & \eta\frac{\nu E}{1-\eta\nu^2}-\frac{S_1S_2}{S} & -\frac{S_1S_3}{S} \\ \eta\frac{\nu E}{1-\eta\nu^2}-\frac{S_1S_2}{S} & \eta\frac{E}{1-\eta\nu^2}-\frac{S_2^2}{S} & -\frac{S_2S_3}{S} \\ -\frac{S_1S_3}{S} & -\frac{S_2S_3}{S} & -\frac{S_3^2}{S} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \cdots (2)$$

ここで　$S_1=\frac{E}{1-\eta\nu^2}\sigma_x'+\eta\frac{\nu E}{1-\eta\nu^2}\sigma_y'$,　$S_2=\eta\frac{\nu E}{1-\eta\nu^2}\sigma_x'+\eta\frac{E}{1-\eta\nu^2}\sigma_y'$,　$S_3=2\eta G\tau_{xy}'$

$$S=\frac{4}{9}\bar{\sigma}^2H'+S_1\sigma_x'+S_2\sigma_y'+2S_3\tau_{xy}'$$

であり、$\sigma_x', \sigma_y', \tau_{xy}'$は偏差応力、$\bar{\sigma}$は相当応力、$H'$はひずみ硬化率を表わす。

フランジ，垂直補剛材には、標準的な梁要素を使用した。節点力が、軸力を考慮した降伏条件を満足した節点は、塑性流れ理論に従う塑性関節として扱う。以上のモデルに対し、崩壊するまで荷重増分法に従って計算する。

3. 数値計算結果及び考察・・・・ Fig・2はリーハイ大学のせん断耐荷力実験[3]で用いられた試験桁H1-T2と、その崩壊荷重及びこり線から判断した崩壊部分を示す。2で述べた解析法に従い、H1-T2桁の右半分のみを解析して得た、崩壊時の荷重及び塑性領域をFig・3に示す。ウェブの、引張方向対角線領域部が塑性化し、フランジの、引張方向対角線両端部が塑性関節化して、崩壊していることがわかる。

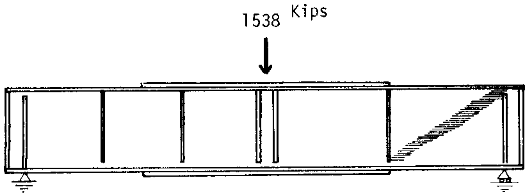

Fig.2 Maximum Load and Location of Failures of H1-T2 Girder

Fig・4はRockey・Skaloudによる崩壊機構を表わすが、フランジのA, B両点に塑性関節が形成されることを仮定している。しかしそのような塑性関節は、有限要素法による解析では崩壊時に形成されず、又、崩壊後の除荷過程においてせん断変形が加えられると形成されることが、実験的に報告されており[4]、Rockey・Skaloudのモデルは、崩壊時のモデルとして問題があろう。理論耐荷力V_{ult}^{th}と実験耐荷力V_{ult}^{ex}の比をTable・1に示したが、Rockey・Skaloud理論は、有限要素法及びBasler理論に比べ、全体的に精度がよくない。

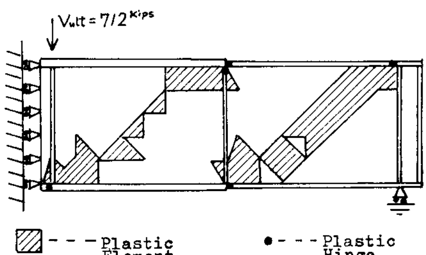

Fig.3 Collapse Mode by the Finite Element Method

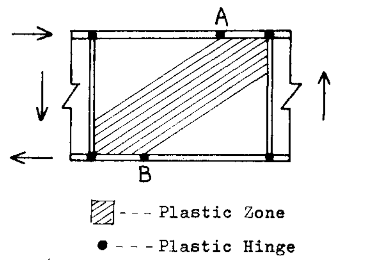

Fig.4 Collapse Mechanism Proposed by Rockey and Skaloud

Girder No.[3]	V_{ult}^{ex} (Kips)	$V_{ult}^{th}/V_{ult}^{ex}$ F.E.M.	Basler	Rockey・Skaloud	F_s/V_t F.E.M.	Basler	Rockey・Skaloud
H1-T1	630	1.04	0.75	1.15	No Intermediate Stiffner		
H1-T2	769	0.93	0.92	1.38	0.65	0.45	1.00
H2-T1	917	0.86	0.95	1.25	0.87	0.41	1.00
H2-T2	1125	0.99	1.01	1.04	0.90	0.31	1.00

Table.1

垂直補剛材の崩壊時の軸力Fsを正しく求めることは、必要断面積を求めるために重要である。張力場作用は力学的にプラットトラスに似ており、Fig・5に示すようにFsは後座屈強度Vtに等しいとするのが妥当であろう。Basler理論の、力のつり合い式に、矛盾が含まれていることはすでに指摘されているが、その結果常にFsは$\frac{1}{2}V_t$より小さく、Basler理論による垂直補剛材の断面積の設計基準は安全側にないと思われる。実際のプレートガーダーでは、垂直補剛材の周囲のウェブが協力して軸力に抵抗するので、垂直補剛材には後座屈強度より小さな軸力が働くことになるが、ウェブの協力作用の大きさが不明なので、垂直補剛材には後座屈強度に等しい軸力が働くとして設計すべきであろう。

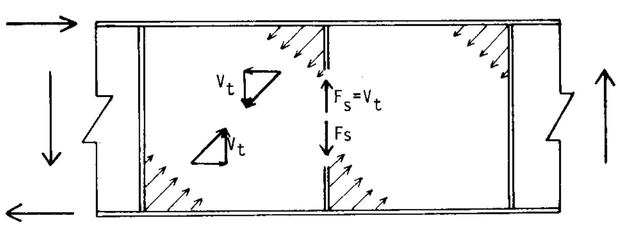

Fig.5 Tension Field Action

参考文献 1). Basler, K. : Strength of plate girders in shear, Proc. ASCE, ST 7, Vol.87, Oct. 1961.
2) Rockey, K.C. and M. Skaloud : The ultimate load behavior of plate girders in shear, The Structural Engineer, No.1, Vol.50, Jan. 1972.
3). Cooper, P.B., H.S. Lew and B.T. Yen : Welded construction alloy steel plate girders, Proc. ASCE, ST1, Vol.90, Feb. 1964.
4). 森脇・藤野：初期不整を有するプレートガーダーのせん断強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第249号，1976年5月.