

琉球大学学術リポジトリ

折れ板断面鋼桁の強度評価に関する研究

メタデータ	言語: 出版者: 有住康則 公開日: 2009-12-11 キーワード (Ja): 折れ板断面桁, 終局強度, 耐荷力実験, 局部座屈, 有限要素法, 弾塑性有限変位解析, 景観, I形断面鋼桁 キーワード (En): Folded Steel Plate Girders, Ultimate Strength, Experimental Study, Local Buckling, Finite Element Method, Non-linear analysis 作成者: 有住, 康則, 矢吹, 哲哉, 山田, 義智, Arizumi, Yasunori, Yabuki, Tetsuya, Yamada, Yoshitomo メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/13847

第1章 序論

近年、社会基盤施設に対して、経済性と景観性の両者を兼ね備えた構造物の構築が強く望まれている。一般に、社会基盤施設は、公共性、スケールの大きさ、周辺の景観との調和により、地域のランドマーク的な存在になり得る物であり、特に、橋梁構造物はそのような特性を強く有している。こうした背景の下、近年、橋梁構造物の場合、主要部材として活用でき、かつ造形にも配慮した部材の開発の要望が、益々強まっている。そこで本研究では、橋梁構造物の使用を目的とした新しい桁構造形式の一つとして、I形断面鋼板桁のウェブ部にデザイン線ともなる折れ鋼板材を用いた鋼桁の力学的特性について、検討を行った。折れ板断面桁は、I形断面桁のウェブ部に折れ鋼板材を用いることによって、折れ線上に光と影のラインを与え、桁高を低く見せる効果が有り、景観上優れた構造部材になり得るものと考えられる。更に、構造上の特性として、折れ鋼板材による側方への補剛効果が期待される。

鋼板桁は、橋梁構造物に広範囲に使用されている基本的な構造要素である。鋼板桁の耐荷力は、断面を構成する板要素の局部座屈、部材全体の横倒れ座屈及び局部座屈と横倒れ座屈との連成座屈によって支配されることが知られている。通常のI形断面を有する鋼桁の曲げ圧縮強度に関する各国の現行設計基準では、断面構成板要素の局部座屈強度と部材の横ねじれ座屈強度の小さい方で、面内曲げ部材強度を規定している¹⁴⁾。断面区分は板要素の座屈強度より、また、部材区分は横ねじれ座屈強度より、それぞれ独立に基準化されている。

新しく提案する折れ鋼板材を用いた鋼桁についても、その実用化を促進する為に、折れ線による補剛効果が終局強度に及ぼす影響、断面及び部材区分の基準化、折れ板要素の力学的特性の解明等が必要である。

そこで、本研究では、まず初めに、提案折れ板断面桁について模型桁を製作し、耐荷力試験を行い、その強度について実験的検討を行った。次に、面内曲げを受ける折れ板断面鋼桁の終局強度について、断面構成板の幅厚比、桁部材細長比、及び材料強度を種々変化させ、弾塑性有限変位理論に基づくパラメトリック解析を行い、折れ板断面鋼桁の終局強度特性について検討した。

以下に本論文の構成について述べる。第2章では、解析のための定式化と解析手法を述べる。第3章では、折れ板断面鋼桁の耐荷力試験を行い、耐荷力特性について述べる。第4章では、解析により得られた折れ板断面鋼桁の終局強度特性について検討し、終局状態での座屈崩壊様式の分類を行った。

第 2 章 弾塑性有限変位解析の定式化及び解析手順

本章では、初期たわみ、残留応力度といった初期不整の影響を考慮した折れ板断面を有する鋼桁の終局強度解析に必要な、幾何学的非線形及び材料非線形性を考慮したアイソパラメトリックシェル要素による弾塑性有限変位解析法について述べる。幾何学的非線形は、図 2-1 に示すように、変形を一段階進行させるごとに基準配置を更新していく Updated Lagrangian 法による増分理論を用いて評価した。また、材料非線形挙動は Von Mises の降伏条件式及び Plandtl-Reuss の塑性流れ理論に従い、材料は等質等方材料でひずみ硬化則及び線形除荷則に従う特性を有するものとした。非線形挙動は、Newton-Raphson 法を併用した変位増分法を用いて数値的に解析した。

アイソパラメトリックシェル要素では、中央面に対する法線を含む断面は、変形後も平面を保持されると仮定し、シェル中央法線方向の直ひずみは無視した。以下に、解析手法について示す。

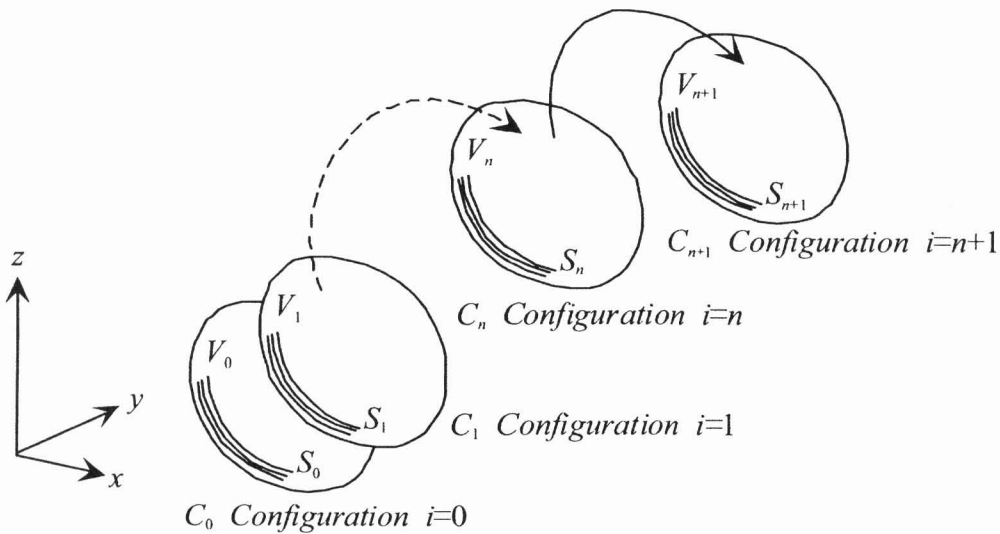


図 2-1 Updated Lagrangian 法

2-1 Updated Lagrangian 法による定式化

Updated Lagrangian 法においては、増分前の状態 C_n をもとに増分後の状態 C_{n+1} が定義される。仮想仕事の原理より、状態 C_{n+1} における釣り合い方程式は、第 2 種 Piola-Kirchhoff 応力 τ 、Green-Lagrange ひずみ ϵ 、外力 p 、及び、物体力 ρX とすると、次式のように与えられる。

$$\int_{V_n} \tau_{ij(n+1)} \delta \epsilon_{ij(n+1)} dV_{(n)} = \int_{S_n} p_{k(n+1)} \delta u_k dS_{(n)} + \int_{V_n} \rho_{(n)} X_{k(n+1)} \delta u_k dV_{(n)} \quad (2.1)$$

ここで、Piola-Kirchhoff 応力 τ_{ij} は、状態 C_n における Cauchy の応力 $\sigma_{ij(n)}$ 及び Piola-Kirchhoff の増分応力 $\Delta\tau_{ij}$ に分解し、次のように示される。

$$\tau_{ij(n+1)} = \sigma_{ij(n)} + \Delta\tau_{ij} \quad (2.2)$$

同様に、ひずみ成分 $\varepsilon_{ij(n+1)}$ は次式のように表せる。

$$\varepsilon_{ij(n+1)} = \varepsilon_{ij(n)} + \Delta\varepsilon_{ij} \quad (2.3)$$

式(2.3)の $\varepsilon_{ij(n)}$ は既知量であるので、上式より、

$$\delta\varepsilon_{ij(n+1)} = \delta\Delta\varepsilon_{ij} \quad (2.4)$$

さらに、式(2.4)の増分ひずみ $\Delta\varepsilon_{ij}$ は、線形ひずみ成分 $\Delta\varepsilon_{ij}^L$ と非線形ひずみ成分 $\Delta\varepsilon_{ij}^N$ に分解することが可能である。

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{ij}^L + \Delta\varepsilon_{ij}^N \quad (2.5)$$

ここで、

$$\Delta\varepsilon_{ij}^L = \frac{1}{2} (\Delta u_{i,j} + \Delta u_{j,i} + u_{k,i} \Delta u_{k,j} + u_{k,j} \Delta u_{k,i}) \quad (2.6)$$

$$\Delta\varepsilon_{ij}^N = \frac{1}{2} \Delta u_{k,j} \cdot \Delta u_{k,i} \quad (2.7)$$

$$\Delta u = u_{(n+1)} - u_{(n)} \quad (2.8)$$

$$\Delta u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_{j(n)}} \quad (2.9)$$

なお、 Δu は、状態 C_n から状態 C_{n+1} までの増分変位であり、 $x_{j(n)}$ は状態 C_n における座標系を表すものとする。

増分応力 $\Delta\tau_{ij}$ と増分ひずみ $\Delta\varepsilon_{ij}$ の関係は、応力-ひずみ関係のテンソル成分 $D_{ijrs(n)}$ を用いて、次のように書くことができる。

$$\Delta\tau_{ij} = D_{ijrs(n)} \Delta\varepsilon_{rs} \quad (2.10)$$

式(2.1)に式(2.2)～式(2.10)を用いると、釣り合い式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{V(n)} D_{ijrs(n)} \Delta \varepsilon_{rs} \delta \Delta \varepsilon_{ij} dV_{(n)} + \int_{V(n)} \Delta \tau_{ij(n)} \delta \Delta \varepsilon_{ij}^L dV_{(n)} + \int_{V(n)} \Delta \tau_{ij(n)} \delta \Delta \varepsilon_{ij}^N dV_{(n)} \\ & = \int_{S(n)} P_{k(n+1)} \delta \Delta u_k dS_{(n)} + \int_{V(n)} \rho_{(n)} X_{k(n+1)} \delta \Delta u_k dV_{(n)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

式(2.11)が、釣り合いに関する基礎方程式である。式(2.11)の右辺第一項は、 Δu_i に対して非線形であるので、実際の解析では、各増分区間で線形化して計算する必要がある。そのために、以下のような近似を行った。

$$\Delta \tau_{ij} \cong D_{ijrs(n)} \Delta \varepsilon_{rs}^L \quad (2.12)$$

$$\delta \Delta \varepsilon_{ij} \cong \Delta \varepsilon_{ij}^L \quad (2.13)$$

ゆえに、式(2.11)の左辺第1項は、次のように書き換えることができる。

$$\int_{V(n)} D_{ijrs(n+1)} \Delta \varepsilon_{rs} \delta \Delta \varepsilon_{ij} dV_{(n)} \cong \int_{V(n)} D_{ijrs(n+1)} \Delta \varepsilon_{rs}^L \delta \Delta \varepsilon_{rs}^L dV_{(n)} \quad (2.14)$$

従って、式(2.14)を用いて式(2.11)を書き改めると、式(2.11)は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \int_{V(n)} D_{ijrs(n)} \Delta \varepsilon_{rs} \delta \Delta \varepsilon_{ij} dV_{(n)} + \int_{V(n)} \Delta \tau_{ij(n)} \delta \Delta \varepsilon_{ij}^N dV_{(n)} \\ & = \int_{S(n)} P_{k(n+1)} \delta u_k dS_{(n)} + \int_{V(n)} \rho_{(n)} X_{k(n+1)} \delta u_k dV_{(n)} - \int_{V(n)} D_{ijrs(n+1)} \Delta \varepsilon_{rs}^L \delta \Delta \varepsilon_{rs}^L dV_{(n)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

式(2.15)が本解析で用いた基礎方程式である。

2-2 アイソパラメトリックシェル要素による定式化

(1) 要素の幾何学的形状の定義

本研究では、複雑な形状を有するシェルで構成された構造物を解析の対象とするため、図2-2に示すような、8節点を有するアイソパラメトリックシェル要素を用いて解析を行った。

図 2-3 に示すように、釣り合い状態 C_n における要素の任意点の全体座標系 (x, y, z) における形状は、要素中央面の曲線座標系 (ξ, η, ζ) で表された形状関数 $N_i(\xi, \eta)$ と、各節点の座標 (x_i, y_i, z_i) を用いて、以下のような形式に書き表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) \frac{\zeta}{2} t_i v_{3i} \quad (2.16)$$

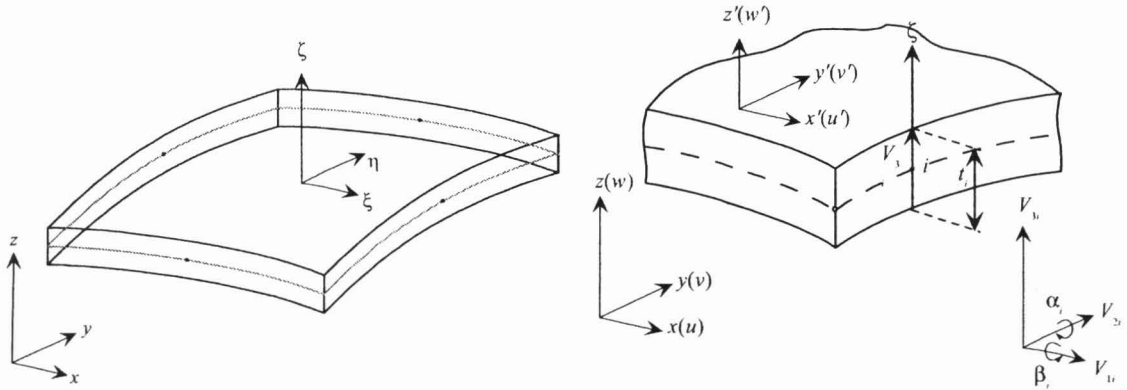


図 2-2 アイソパラメトリックシェル要素 図 2-3 座標形及び変位の定義

ここで、 $N_i(\xi, \eta)$ は曲線座標系によって定義された形状関数で、図 2-4 のような変形モードを示す。 t_i は節点 i におけるシェルの厚さ、 v_{3i} は節点 i のシェル中央面に垂直に定義された単位法線ベクトルである。

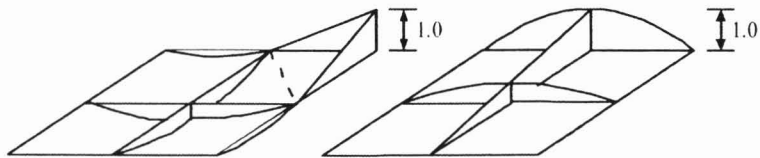


図 2-4 中立面の変形モード

(2) 変位の定義

中央面に垂直な方向のひずみは無視できると仮定している。従って、要素内における任意点の変位 (u, v, w) は、図 2-3 に示すように、シェル中央面上の節点変位の 3 つの直交座標成分 (u_i, v_i, w_i) 及び節点ベクトル $V_{3i} = t_i v_{3i}$ に垂直な 2 つのベクトル v_{1i}, v_{2i} によって定義される直交軸まわりの回転角成分 α_i, β_i を用いて、次のように表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta) \frac{\zeta}{2} t_i (v_{1i} \alpha_i - v_{2i} \beta_i) \quad (2.17)$$

上式を増分形で示すと、

$$\begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{Bmatrix} = \sum_i N_i(\xi, \eta) \begin{Bmatrix} \Delta u_i \\ \Delta v_i \\ \Delta w_i \end{Bmatrix} + \sum_i N_i(\xi, \eta) \frac{\zeta}{2} t_i (v_{1i} \Delta \alpha_i - v_{2i} \Delta \beta_i) \quad (2.18)$$

となる。

(3) ひずみ

一般にアイソパラメトリックシェル要素内の任意点におけるひずみは、板厚方向の直ひずみ ε_z を無視するので、次式に示す5つのひずみ成分から構成される。

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{zx} \quad \gamma_{yz}]^T \quad (2.19)$$

式(2.13)で示したように、一般の増分ひずみベクトル $\{\Delta\varepsilon\}$ は、線形成分と非線形成分とに分けて表すことができるので、以下のようになる。

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon^L\} + \{\Delta\varepsilon^N\} \quad (2.20)$$

図2-5に示すように、シェル中央面、すなわち、 $\zeta=0.0$ 面内の任意点で、面に垂直な z' 軸に直交し、かつ面に対して接線になるように x', y' を設定する。従って、任意点のひずみは、局所座標系に対する変位 (u', v', w') を局所座標系 (x', y', z') で偏微分した項により、次式のように定義することができる。

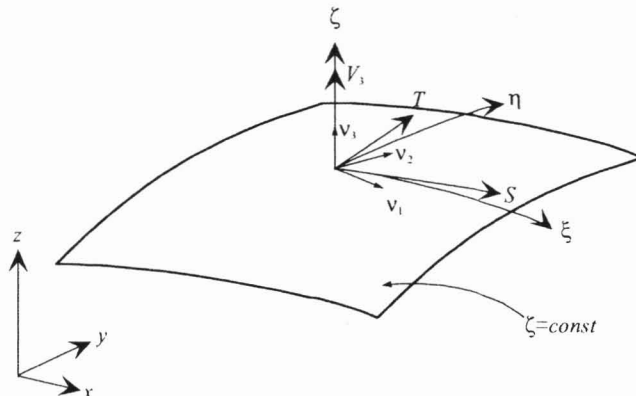


図2-5 座標形

$$\begin{aligned}
\{\Delta\varepsilon^L\} &= \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_{x'}^L \\ \Delta\varepsilon_{y'}^L \\ \Delta\tau_{x'y'}^L \\ \Delta\tau_{z'x'}^L \\ \Delta\tau_{y'z'}^L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial\Delta u'}{\partial x'} \\ \frac{\partial\Delta v'}{\partial y'} \\ \frac{\partial\Delta u'}{\partial y'} + \frac{\partial\Delta v'}{\partial x'} \\ \frac{\partial\Delta u'}{\partial z'} + \frac{\partial\Delta w'}{\partial x'} \\ \frac{\partial\Delta v'}{\partial z'} + \frac{\partial\Delta w'}{\partial y'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta\theta_x\} \\ \{\Delta\theta_y\} \\ \{\Delta\theta_z\} \end{Bmatrix} \\
&= [H] \{\Delta\theta\} \tag{2.21}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\{\Delta\varepsilon^N\} &= \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x^N \\ \Delta\varepsilon_y^N \\ \Delta\tau_{x'y'}^N \\ \Delta\tau_{z'x'}^N \\ \Delta\tau_{y'z'}^N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\Delta u'}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Delta v'}{\partial x'} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Delta w'}{\partial x'} \right)^2 \right] \\ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\Delta u'}{\partial y'} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Delta v'}{\partial y'} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Delta w'}{\partial y'} \right)^2 \right] \\ \frac{\partial\Delta u'}{\partial x'} \frac{\partial\Delta u'}{\partial y'} + \frac{\partial\Delta v'}{\partial x'} \frac{\partial\Delta v'}{\partial y'} + \frac{\partial\Delta w'}{\partial x'} \frac{\partial\Delta w'}{\partial y'} \\ \frac{\partial\Delta u'}{\partial z'} \frac{\partial\Delta u'}{\partial x'} + \frac{\partial\Delta v'}{\partial z'} \frac{\partial\Delta v'}{\partial x'} + \frac{\partial\Delta w'}{\partial z'} \frac{\partial\Delta w'}{\partial x'} \\ \frac{\partial\Delta u'}{\partial z'} \frac{\partial\Delta u'}{\partial y'} + \frac{\partial\Delta v'}{\partial z'} \frac{\partial\Delta v'}{\partial y'} + \frac{\partial\Delta w'}{\partial z'} \frac{\partial\Delta w'}{\partial y'} \end{Bmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \{\Delta\theta_x\}^T & 0 & 0 \\ 0 & \{\Delta\theta_y\}^T & 0 \\ \{\Delta\theta_y\}^T & \{\Delta\theta_x\}^T & 0 \\ \{\Delta\theta_z\}^T & 0 & \{\Delta\theta_x\}^T \\ 0 & \{\Delta\theta_z\}^T & \{\Delta\theta_y\}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} [A_\theta] \{\Delta\theta\} \tag{2.22}
\end{aligned}$$

$$\{\Delta\theta\}^T = [\{\Delta\theta_x\}, \{\Delta\theta_y\}, \{\Delta\theta_z\}] \tag{2.23a}$$

$$\{\Delta\theta_x\}^T = \left[\frac{\partial\Delta u'}{\partial x'} \quad \frac{\partial\Delta v'}{\partial x'} \quad \frac{\partial\Delta w'}{\partial x'} \right] \tag{2.23b}$$

式(2.23)の増分ひずみベクトル成分、すなわち、局所座標系に対する増分変位 $(\Delta u', \Delta v', \Delta w')$ を局所座標系 $(\Delta x', \Delta y', \Delta z')$ で偏微分した微係数項は、次式のように、全体座標系での増分変位 $(\Delta u, \Delta v, \Delta w)$ の曲線座標系による微係数項に変換することができる。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta u'}{\partial x'} & \frac{\partial \Delta v'}{\partial x'} & \frac{\partial \Delta w'}{\partial x'} \\ \frac{\partial \Delta u'}{\partial y'} & \frac{\partial \Delta v'}{\partial y'} & \frac{\partial \Delta w'}{\partial y'} \\ \frac{\partial \Delta u'}{\partial z'} & \frac{\partial \Delta v'}{\partial z'} & \frac{\partial \Delta w'}{\partial z'} \end{bmatrix} = [T]^T [J]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta u}{\partial \xi} & \frac{\partial \Delta v}{\partial \xi} & \frac{\partial \Delta w}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \Delta u}{\partial \eta} & \frac{\partial \Delta v}{\partial \eta} & \frac{\partial \Delta w}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \Delta u}{\partial \zeta} & \frac{\partial \Delta v}{\partial \zeta} & \frac{\partial \Delta w}{\partial \zeta} \end{bmatrix} [T] \quad (2.24)$$

ここで、 $[J]$ は Jacobian マトリックス、 $[T]$ は座標変換マトリックスであり、次のように与えられる。

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x}{\partial \xi} & \frac{\partial \Delta y}{\partial \xi} & \frac{\partial \Delta z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \Delta x}{\partial \eta} & \frac{\partial \Delta y}{\partial \eta} & \frac{\partial \Delta z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \Delta x}{\partial \zeta} & \frac{\partial \Delta y}{\partial \zeta} & \frac{\partial \Delta z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$[T] = [v_1 \ v_2 \ v_3] = \begin{bmatrix} \cos(x', x) & \cos(y', x) & \cos(z', x) \\ \cos(x', y) & \cos(y', y) & \cos(z', y) \\ \cos(x', z) & \cos(y', z) & \cos(z', z) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

式(2.24)の $[T]^T [J]^{-1}$ は、曲線座標系における ζ 軸と、局所座標系における z' 軸が一致すると仮定すると、次のように与えられる。

$$[A] = [T]^T [J]^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= v_1 \cdot (T \times v_3) / \|J\| \\ A_{12} &= v_1 \cdot (v_3 \times s) / \|J\| \\ A_{21} &= v_1 \cdot (T \times v_3) / \|J\| \\ A_{22} &= v_1 \cdot (v_3 \times s) / \|J\| \\ A_{33} &= v_1 \cdot (s \times T) / \|J\| \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

一方、式(2.24)の局所座標系での増分変位の微分変位の微係数 $\{\Delta \theta\}$ は次のように与えられる。

$$\{\Delta \theta\} = \sum_{i=1}^8 [G_i] \{\Delta \bar{d}\} \quad (2.29)$$

ここで、

$$[G_i] = \left[[B_i][T]^T : \frac{t_i}{2} (\zeta[B_i] + [H])[T]^T [\phi_i] \right] \quad (2.30a)$$

$$\{\Delta d\} = \{\Delta u_i, \Delta v_i, \Delta w_i, \Delta \alpha_i, \Delta \beta_i\} \quad (2.30b)$$

$$[B_i] = \begin{bmatrix} B_{1i} & 0 & 0 \\ 0 & B_{1i} & 0 \\ 0 & 0 & B_{1i} \\ B_{2i} & 0 & 0 \\ 0 & B_{2i} & 0 \\ 0 & 0 & B_{2i} \\ B_{3i} & 0 & 0 \\ 0 & B_{3i} & 0 \\ 0 & 0 & B_{3i} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$[H_i] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ C_{1i} & 0 & 0 \\ 0 & C_{1i} & 0 \\ 0 & 0 & C_{1i} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{1i} &= A_{11}N_i(\xi, \eta)_\xi + A_{12}N_i(\xi, \eta)_\eta \\ B_{2i} &= A_{21}N_i(\xi, \eta)_\xi + A_{22}N_i(\xi, \eta)_\eta \\ B_{3i} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{1i} &= A_{31}N_i(\xi, \eta)_\xi \\ N_i(\xi, \eta)_\xi &= \frac{\partial}{\partial \xi} N_i(\xi, \eta) \\ [\phi_i] &= [v_{1i}, -v_{2i}] \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

式(2.24)～式(2.34)を用いると、式(2.21)で定義された増分ひずみの線形項の変分 $\delta\{\Delta \varepsilon^L\}$ は、次のようになる。

$$\begin{aligned}\delta\{\Delta\varepsilon^L\} &= [H]\delta\{\Delta\theta\} = [H][G]\delta\{\Delta\bar{d}\} = [B^L]\delta\{\Delta\bar{d}\} \\ &= [B_1^L \quad B_2^L \quad \dots \quad B_8^L] \delta\{\Delta\bar{d}\}\end{aligned}\quad (2.35)$$

ここで、

$$[B^L] = [H][G] \quad (2.36)$$

$$[B_i^L] = \left[[G_i] \quad [T]^T : \frac{t_i}{2} (\zeta[G_i] + [C_i])[T]^T [\phi_i] \right] \quad (2.37)$$

$$[G_i] = \begin{bmatrix} B_{1i} & 0 & 0 \\ 0 & B_{2i} & 0 \\ B_{2i} & B_{1i} & 0 \\ 0 & 0 & B_{1i} \\ 0 & 0 & B_{2i} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$[C_i] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ C_{1i} & 0 & 0 \\ 0 & C_{1i} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

同様に、ひずみ増分の非線形項の変分 $\delta\{\Delta\varepsilon^N\}$ は、次のように与えられる。

$$\delta\{\Delta\varepsilon^N\} = \frac{1}{2}\delta[A_\theta]\{\Delta\theta\} + \frac{1}{2}[A_\theta]\delta\{\Delta\theta\} = [A_\theta]\{\Delta\theta\} \quad (2.40)$$

従って、式(2.40)は、次のようになる。

$$\delta\{\Delta\varepsilon^N\} = [A_\theta][G]\delta\{\Delta d\} = [B^N]\delta\{\Delta d\} \quad (2.41)$$

ここで、

$$[B^N] = [A_\theta]\{\Delta\theta\} \quad (2.42)$$

である。

(4) 要素の剛性マトリックスと幾何剛性マトリックス

要素の剛性マトリックス $[K_L]$ は、前節で示した関係式を用いると、次のようにマトリックス表示することができる。

$$[K_L] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B_i^t]^T [D^e [B_j^t] J] d\zeta d\eta d\xi \quad (2.43)$$

ここで、 $[D^e]$ は弾性係数マトリックスである。

同様に、要素の幾何剛性マトリックス $[K_G]$ は、次のように表すことができる。

$$[K_G] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [G_i]^T [M [G_j] J] d\xi d\eta d\zeta \quad (2.44)$$

ここで、 $[G], [M]$ は、次のように定義される。

$$\delta \Delta \varepsilon_{ij}^{-N} = [A_\theta] [G] \delta \{\Delta d\} \quad (2.45)$$

$$[A_\theta]^T \{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} I_3 & \sigma_{12} I_3 & \sigma_{13} I_3 \\ & \sigma_{22} I_3 & \sigma_{23} I_3 \\ sym. & & 0 \end{bmatrix} \{\Delta \theta\} = [M] [G] \{\Delta d\} \quad (2.46)$$

ここで、 I_3 は 3×3 の単位マトリックスである。

以上の結果より、増分の釣り合い式は、次のようにマトリックス表示される。

$$[{}^n K^T] \{\Delta d\} = \{{}^{n+1} F\} - \{{}^n R\} \quad (2.47)$$

$$[{}^n K^T] = [K_L] + [K_G] \quad (2.48)$$

ここで、 $[{}^n K^T]$ は状態 C_n における接線剛性マトリックス、 $\{{}^{n+1} F\}$ は状態 C_{n+1} における外力ベクトル、 $\{{}^n R\}$ は状態 C_n における応力によって評価される等価節点力である。なお、要素の剛性マトリックス及び幾何剛性マトリックスの計算において、積分は $2 \times 2 \times 5$ ($= \xi \cdot \eta \cdot \zeta$)の Gauss 数値積分を用いた。

2-3 降伏条件及び弾塑性剛性係数マトリックス

本解析では、降伏条件として von Mises の降伏条件を用いた。すなわち、

$$f^2 = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right\} = \sigma_Y^2 \quad (2.49)$$

ここで、 σ_Y は単軸引張試験で得られる降伏応力度である。塑性域における応力増分とひずみ増分の関係は、Plandtl-Reuss の塑性流れ則に von Mises の降伏条件式を用いると、次のように表せる。

$$\{d\sigma\} = [D^{ep}] \{d\varepsilon\} \quad (2.50)$$

ここで、 $[D^{ep}]$ は、弾塑性剛性マトリックスであり、

$$[D^{ep}] = [D^e] - \frac{[D^e] \{ \partial f / \partial \sigma \} \{ \partial f / \partial \sigma \}^T [D^e]}{H' + \{ \partial f / \partial \sigma \}^T [D^e] \{ \partial f / \partial \sigma \}} \quad (2.51)$$

となる。上式中で、 H' はひずみ硬化率、 $[D^e]$ は弾性剛性マトリックスであり、次のように表せる。

$$[D^e] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & (1-\nu)/2 & 0 & 0 \\ & & & (1-\nu)/2 & 0 \\ sym. & & & & (1-\nu)/2k \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

ここで、 E はヤング係数、 ν はポアソン比、 k はせん断変形に対する近似を補正するため導入された係数であり、本解析では、板要素を対象としていることから、 $k=1.2$ を用いた。

2-4 変位増分法

非線形方程式の解法として、増分法に Newton-Raphson 法を併用した数値計算を採用した。図 2-6 に、その逐次収束アルゴリズムを示す。

一般に、増分法における釣り合い式は、次のように示される。

$$[{}^n K_r^{i-1}] \{\Delta d^i\} = \{{}^n F^i\} - \{{}^n R^{i-1}\} \quad (2.53)$$

ここで、右辺の外力項 $\{{}^n F^i\}$ を、状態 C_n の反復回数 $(i-1)$ 回目から i 回目への増分量とに分解して表すと、

$$\{{}^n F^i\} = \{{}^n F^{i-1}\} + \{\Delta F^i\} \quad (2.54)$$

となる。また構造物に作用する荷重 $\{F\}$ は、その分布形状 $\{f_r\}$ は変わらず大きさだけが增大していくとすると、次のように与えられる。

$$\{F\} = \lambda \{f_r\} \quad (2.55)$$

式(2.55)を書き換えると、次式のようになる。

$$\{{}^n f^i\} = {}^n \lambda^{i-1} \{f_r\} + \Delta \lambda^i \{f_r\} \quad (2.56)$$

式(2.54)、(2.56)を(2.53)に代入して式を書き換えると、次のようになる。

$$\begin{aligned} [{}^n K_r^{i-1}] \{\Delta d^i\} &= {}^n \lambda^{i-1} \{f_r\} + \Delta \lambda^i \{f_r\} - \{{}^n R^{i-1}\} \\ &= \Delta \lambda^i \{f_r\} + \{{}^n \Omega^{i-1}\} \end{aligned} \quad (2.57)$$

ここで、 $\{{}^n \Omega^{i-1}\}$ は状態の反復回数 $(i-1)$ 回目における残差不平衡力である。変位増分法における釣り合い方程式では、式(2.53)における $\{\Delta d^i\}$ の変位増分成分のうち、1成分が制御されるため、式(2.57)を次のように書き改める。

$$\begin{bmatrix} K_{11}^{i-1} & K_{12}^{i-1} \\ K_{21}^{i-1} & K_{22}^{i-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d_1^i \\ \Delta d_2^i \end{bmatrix} = \Delta \lambda^i \begin{bmatrix} f_{r1} \\ f_{r2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Omega_1^{i-1} \\ \Omega_2^{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

ここで、 $\{\Delta d_2^i\}$ が制御変位（強制変位）で、既知量（入力データ）となる。本解析では、強制変位 Δd_2^i を作用する節点以外に外力は作用していないと仮定しているため、 $f_{r1}=0$ となり、式(2.57)は、次のように書き改められる。

$$[K_{11}^{i-1}]\{\Delta d_1^{i-1}\} = \{\Omega_1^{i-1}\} - [K_{12}^{i-1}]\{\Delta d_2^{i-1}\} \quad (2.59)$$

なお、上式の収束計算の過程において、 Δd_2^i は初期値に固定されるので、Newton-Raphson 法の繰り返し計算の 1 回目だけに意味を持ち、2 回目以降は零となる。

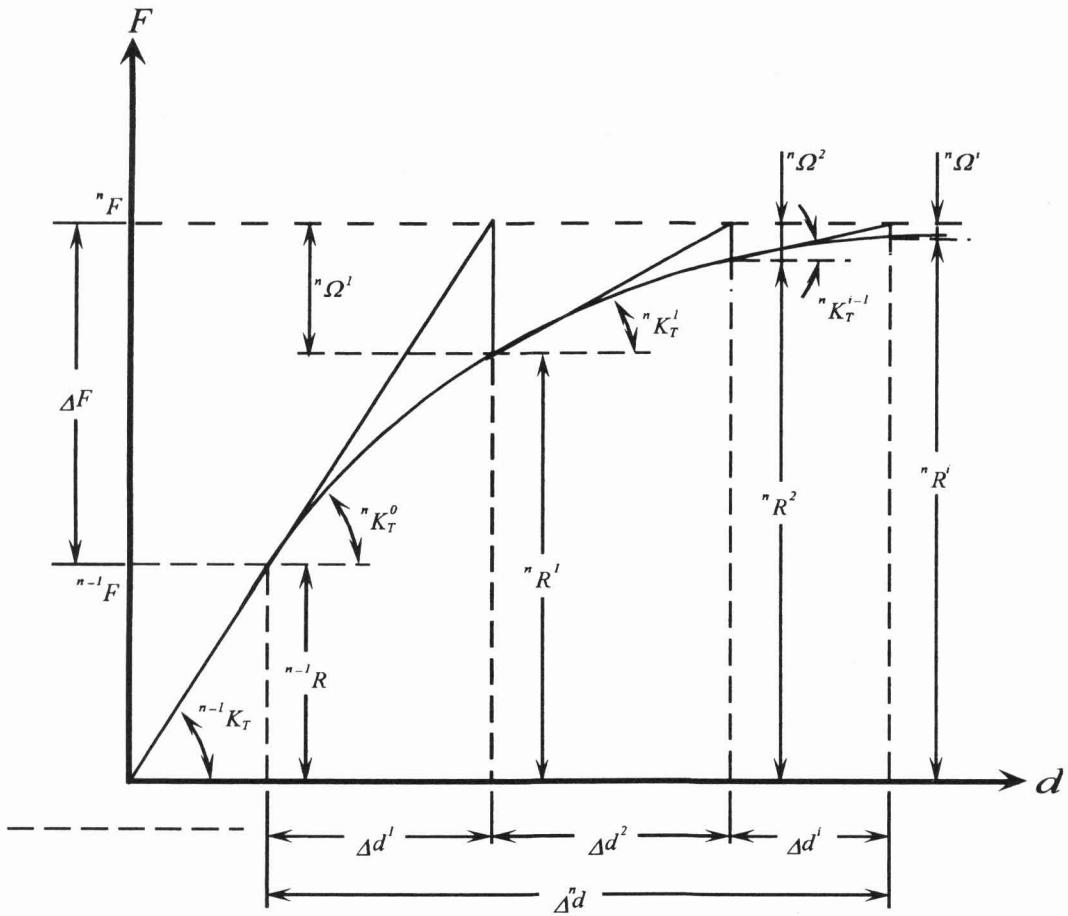


図 2-6 本解析における逐次収束アルゴリズム

2-5 解析手順

強制変位増分法を用いた終局強度解析における計算過程を示すと、次の通りである。なお、解析手順のフローチャートを図2-7に示す。

- 1) 解析に必要な構造物の断面特性、境界条件及び初期強制増分変位量 Δd_2^i を入力する。
- 2) 入力データにより、初期応力状態 $\{\sigma_0\}$ を定める。
- 3) 先行状態での部材断面内の塑性域の広がりを調べて、弾塑性剛性係数マトリックス $[D^{ep}]$ を求める。
- 4) 塑性域の広がりを考慮した部材の断面剛度及び部材の断面力を用いて接線剛性マトリックス $[{}^n K_T^{i-1}]$ を求める。
- 5) 接線剛性マトリックス $[{}^n K_T^{i-1}]$ を、次のように、4つの要素に分解する。

$$[{}^n K_T^{i-1}] = \begin{bmatrix} {}^n K_{T11}^{i-1} & {}^n K_{T12}^{i-1} \\ {}^n K_{T21}^{i-1} & {}^n K_{T22}^{i-1} \end{bmatrix}$$

- 6) 式(2.59)より、上式のマトリックスを用いて各節点の変位増分量 Δd_1^i を求める。
- 7) 変位増分 Δd_1^i を用いて、式(2.58)により荷重増分 ΔF^i を求め、変形前の全外力 ${}^n F^{i-1}$ に加える。

$${}^n F^i = {}^n F^{i-1} + \Delta F^i$$

- 8) 式(2.20)を用いて、ひずみ増分 $\Delta \varepsilon^i$ を求める。
- 9) 各部材断面の降伏条件の評価を行う。それにより、部材断面を弾性域、塑性域、除荷域に分類し、塑性域においては、相当応力 σ_{eq} が降伏応力 σ_Y になるように、応力成分の再配分を行う。
- 10) 座標を変形後の状態に置き換えた後、8) で求めた $\Delta \varepsilon^i$ 、 $\Delta \sigma^i$ を変形後の座標系に変換して、それらを先行状態の全ひずみ ε_n^{i-1} 及び σ_n^{i-1} に加える。

$$\begin{aligned} \varepsilon_n^i &= \varepsilon_n^{i-1} + \Delta \varepsilon^i \\ \sigma_n^i &= \sigma_n^{i-1} + \Delta \sigma^i \end{aligned}$$

- 11) 内部応力による等価節点力 ${}^n R^i$ を求める。
- 12) 釣り合いが定められた収束条件を満足しているか否かを調べる。収束の判定

式は、増分区間での変位増分 Δd_1^i とその釣り合い状態に至るまでの変位増分の総和 $\Delta d_n^i = \sum d_1^i$ とのノルム比を用いて、次のように定義する。

$$\sqrt{\frac{\{\Delta d_1^i\}^T \{\Delta d_1^i\}}{\{\Delta d_n^i\}^T \{\Delta d_n^i\}}} \leq \varepsilon_1$$

もし、上式を満足しないならば、残差不平衡力 $\{\Omega^i\}=\{F^i\}-\{R^i\}$ を求めて、再度、この状態を先行状態として $\Delta d_2^i=0$ とし、3)に戻る。

1 3) 載荷辺での応力分布が規定の応力分布に収束しているか否かを照査する。もし収束していなければ、修正変位増分 Δd_2^{*i} を求めて、それを新しい強制変位増分とし、3)に戻る。

1 4) 強制変位増分量の増分回数が既定値に達したならば、計算を終了する。もし、達してなければ、新しい強制変位増分

$$\Delta d_2^{*i} = \Delta d_2^i + \sum \Delta d_2^{*i}$$

とし、3)に戻る。

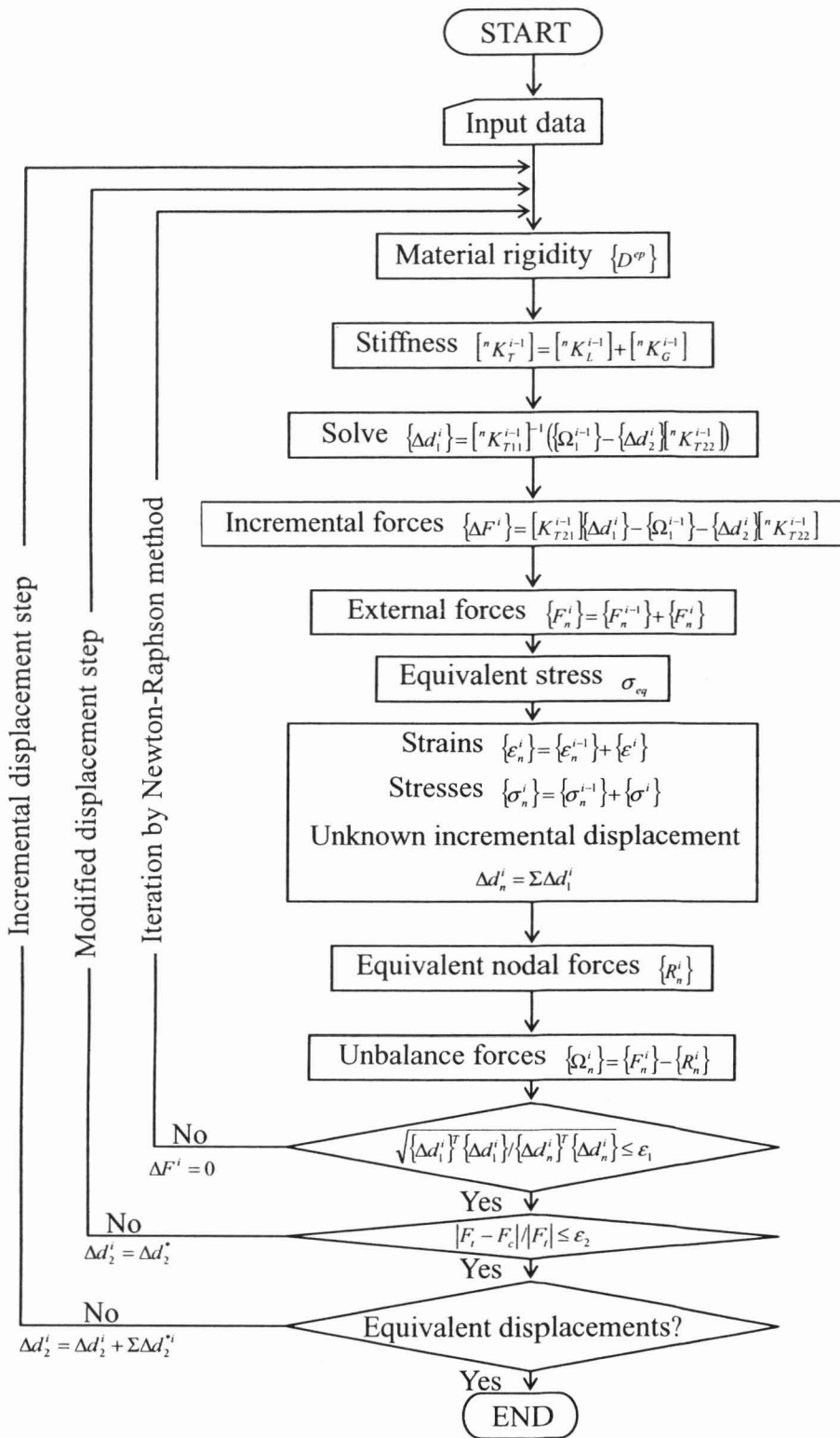


図 2-7 変位増分解法のフローチャート

第3章 折れ板鋼桁の耐荷力試験

本章では、新しい構造形式の一つとして提案した I 形断面のウェブ部を用いた折れ板鋼桁の模型桁を製作して載荷試験を行い、その力学的特性討を行った。

鋼桁の基本となる I 形断面を有する鋼桁の耐荷力は、断面を構成する板座屈、部材全体の横倒れ座屈、及び局部座屈と横倒れ座屈との連成座屈にされることが知られている。そこで、本載荷試験では著者らが提案した I 崩壊様式の区分¹⁵⁾を基に、崩壊の主要因が、断面を構成する板要素の局材全体の横倒れ座屈、局部座屈と横倒れ座屈との連成座屈となるような I ヲウェブ部を折り曲げた折れ板断面鋼桁を製作し、耐荷力試験を行った。次い面桁実験結果との比較を行い、折れ板断面桁の耐荷力特性を検討した。まをアイソパラメトリックシェル要素でモデル化して、弾塑性有限変位法に解析を行い、載荷試験結果と解析結果の比較検討を行った。

3-1 試験方法

(1) 実験供試体

図 3-1 に示すように、折れ角 $\theta=0^\circ$ の I 形断面桁 (TYPE-A) と折れ角 θ 鋼板を用いた桁 (TYPE-B) の 2 種の折れ板断面鋼桁をそれぞれ 3 体づつ 荷試験を行った。ウェブを折り曲げる位置は、道路橋示方書³⁾で規定され 補剛材を一段用いる場合の取り付け位置とした。なお、表 3-1 に断面諸 示す。

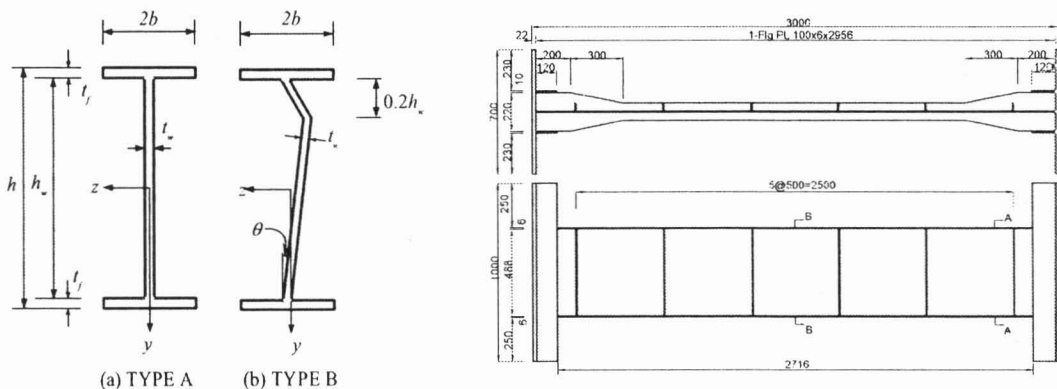


図 3-1 実験供試体詳細図

表 3-1 断面諸量

TYPE		A1	A2	A3	B1	B2	B3
σ_Y (kgf/cm ²)		3393	3745	3336	3590	4042	3949
Web	h_w (cm)	48.8	49.1	49.36	48.8	49.1	49.36
	t_w (cm)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	A_w (cm ²)	29.3	29.5	29.6	29.7	29.9	30.1
	h_w/t_w (cm)	81.3	81.8	82.3	81.3	81.8	82.3
	$\bar{\lambda}_{web}$	0.721	0.757	0.715	0.741	0.787	0.777
Flange	b_f (cm)	10	14	20	10	14	20
	t_f (cm)	0.6	0.45	0.32	0.6	0.45	0.32
	A_f (cm ²)	6	6.3	6.4	6	6.3	6.4
	$b_f/2/t_f$	8.3	15.6	31.3	8.3	15.6	31.3
	$\bar{\lambda}_{flange}$	0.540	1.060	2.010	0.556	1.101	2.186
L (cm)		300	300	300	300	300	300
I_z (cm ⁴)		101	207	428	127	234	455
I_y (cm ⁴)		13132	13653	13911	13279	13802	14064
C_w (cm ⁶)		61009	126320	263264	70838	136930	274408
$\bar{\lambda}_{section}$		0.709	1.164	2.061	0.729	1.210	2.242
M_Y (tf.m)		17.825	20.450	18.565	18.954	22.181	22.080
M_P (tf.m)		22.179	25.232	22.802	23.737	27.544	27.295
M_E (tf.m)		28.686	58.140	119.887	34.571	64.339	126.258
$\bar{\lambda}_{beam}$		0.879	0.618	0.430	0.829	0.607	0.434

α : ウェブの折れ角が $\begin{cases} \theta = 0^\circ \rightarrow A \\ \theta = 5^\circ \rightarrow B \end{cases}$

TYPE-[α][β]

β : 鋼桁の崩壊の主要因が $\begin{cases} \text{全体座屈} \rightarrow 1 \\ \text{連成座屈} \rightarrow 2 \\ \text{局部座屈} \rightarrow 3 \end{cases}$

表 3-1 中、 σ_Y は材料試験結果で得られた降伏応力度である。また $\bar{\lambda}_{web}$ はウェブの幅厚比パラメータ、 $\bar{\lambda}_{flange}$ はフランジの幅厚比パラメータ、 $\bar{\lambda}_{section}$ は断面パラメータであり、これらは次式で定義される。

$$\bar{\lambda}_{web} = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_Y}{23.9\pi^2 E}} \quad , \quad \bar{\lambda}_{flange} = \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_Y}{0.425\pi^2 E}} \quad (3.1, 3.2)$$

$$\bar{\lambda}_{section} = \sqrt{\bar{\lambda}_{flange}^2 + (\phi \bar{\lambda}_{web})^2} \quad (3.3)$$

$$\phi = \frac{R_{cr}^c}{R_{cr}^b} = \frac{0.7}{1.0} \quad , \quad b = b_f/2 \quad (3.4)$$

ここで、 ν はポアソン比、 E はヤング係数であり、これらはSS400材の公称値を用いて計算した。また、 R_{cr}^c は道路橋示方書³⁾に示されている純圧縮に対する限界幅厚比パラメータ、 R_{cr}^b は純曲げに対する限界幅厚比パラメータである。また、表3-1において、 M_y は降伏モーメント、 M_p は全塑性モーメントである。また M_E は弾性横倒れ座屈モーメント、 $\bar{\lambda}_{beam}$ ははりの細長比パラメータであり、これらは次式で表される。

$$M_E = \sqrt{\left(\frac{\pi}{L/2}\right)^2 EI_y GJ + \left(\frac{\pi}{L/2}\right)^4 EI_y EC_w} \quad (3.4)$$

$$\bar{\lambda}_{beam} = \sqrt{\frac{M_p}{M_E}} \quad (3.5)$$

ここで、 I_y は y 軸まわりの断面二次モーメント、 GJ はSt.Venantのねじり剛性、 EC_w は曲げねじり剛性である。

(2) 載荷装置

試験に用いた載荷装置を、図3-2及び写真3-1に、それぞれ示す。試験では、図3-2に示すように、曲げに対して単純支持、ねじれに対して回転変形を拘束する条件をそれぞれ満足するように、支点上に支持桁を設置し、それに支承を取り付ける方式を採用した。支承は、支持桁の両端に写真3-2に示すように、2個の固定及び可動ベアリングプレート支承を取り付けることにより、桁軸方向の移動に対して一端は固定とし他端は可動とした。

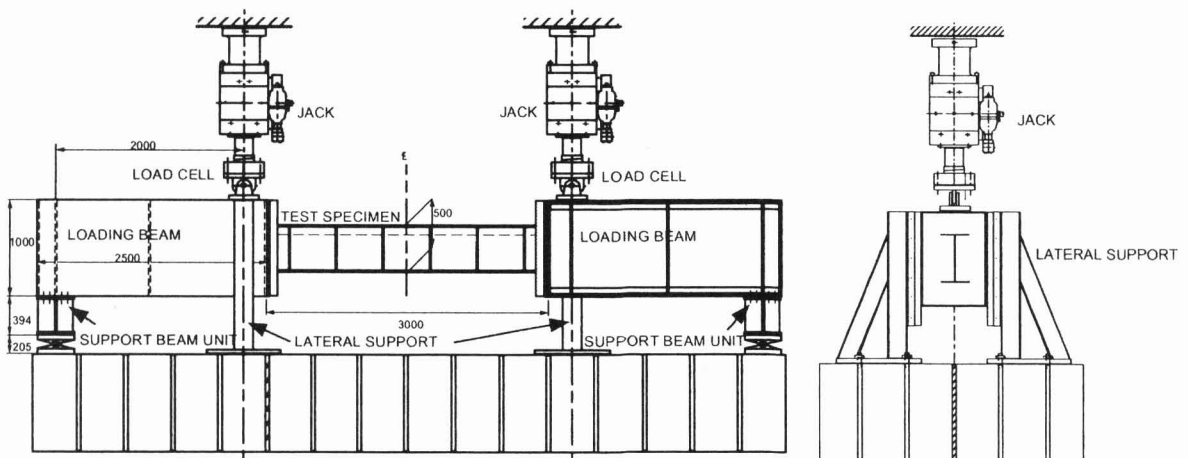


図3-2 実験装置の設置状況

試験桁と載荷桁の接合部における回転を拘束するために、載荷桁の接合部近傍に横倒れ防止枠を計4体設置した。載荷は、試験桁の両端に加力ジャッキを設置し、加力ジャッキに同等の集中荷重を載荷することによって、等曲げモーメントを作用させた。

なお、写真3-3に示すように、試験桁と載荷桁の間に、試験桁端部にエンドプレートを設け、それらを高力ボルトで接合した。

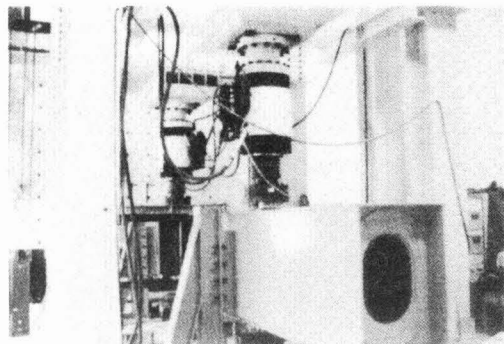
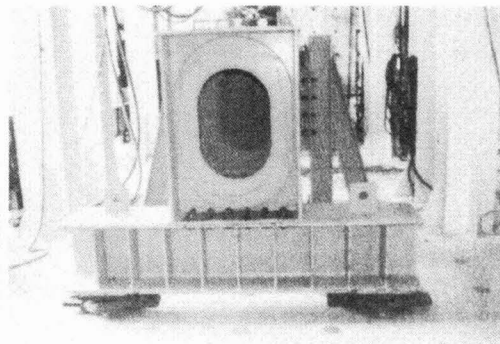


写真3-1 載荷装置写真



3-2 載荷桁の支点部

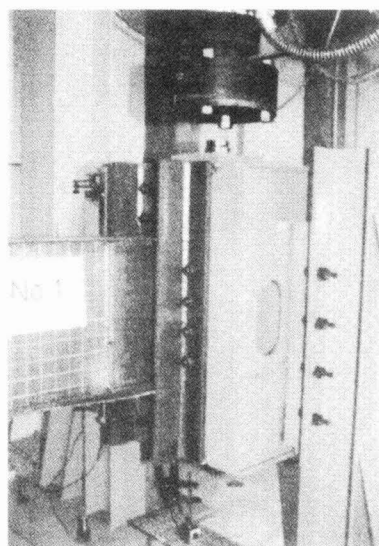
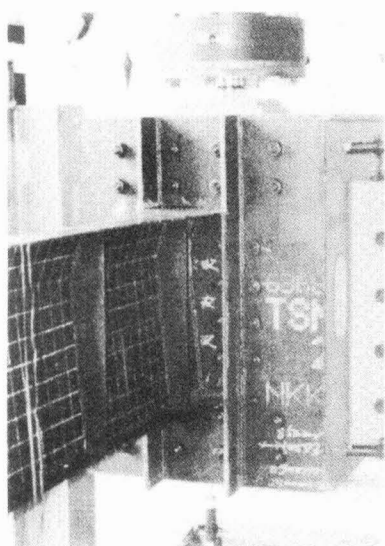


写真3-3 試験桁と載荷桁の接合部

(3) 変位の測定

本試験では、図3-3、写真3-4に示すように、試験桁中間部のフランジ及びウェブに変位計を設置し、鉛直及び側方方向の変位を測定した。

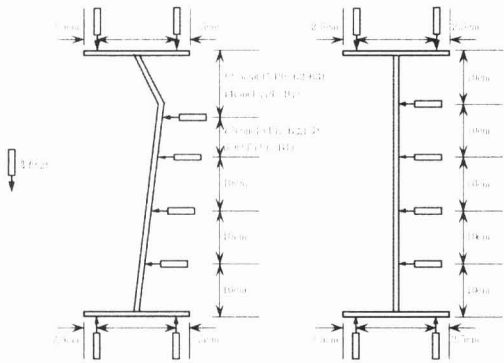
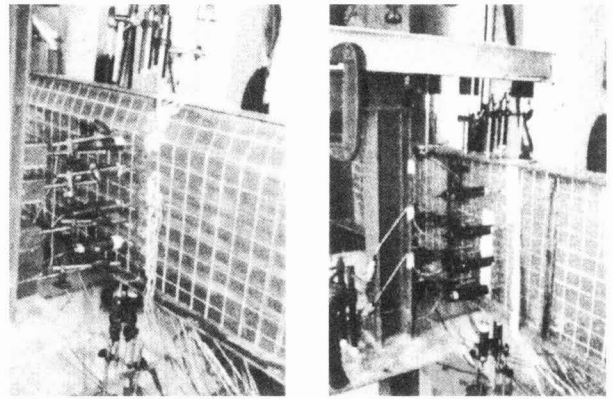


図 3-3 変位計の設置状況写真



3-4 変位計及びひずみゲージの設置状況

(4) ひずみの測定

本試験では、図 3-4 に示すように、試験桁中央部の上下フランジに 3 個ずつ一軸ひずみゲージを取り付けた。また、図 3-5 に示すように試験桁中央部のウェブ両面に 6 個ずつ一軸ひずみゲージを取り付け、圧縮部では図 3-6 のような三軸ひずみゲージを 3 個ずつ取り付け、ひずみの測定を行った。

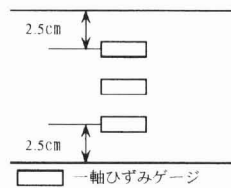


図 3-4 フランジのひずみゲージの位置

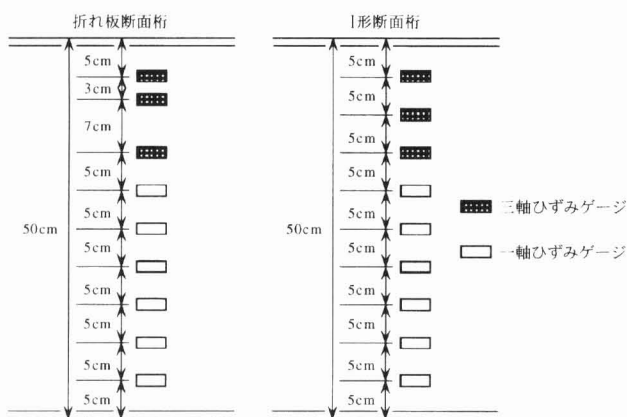
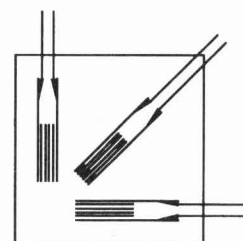


図 3-5 ウェブのひずみゲージの位置図



3-6 三軸ひずみゲージ

3-2 試験桁の解析モデル化

解析モデルを図 3-7 に示す。解析では、対称性を考慮して、桁の半分とした。メッシュは、残留応力度分布を考慮するため不等メッシュとし、要フランジ部分を 4×6、ウェブ部分を 8×6 とした。また、TYPE-B3 の桁はフランジの複雑なたわみ波形を再現するため、要素分割は、フランジ部分を 4ブ部分を 8×10 とした。

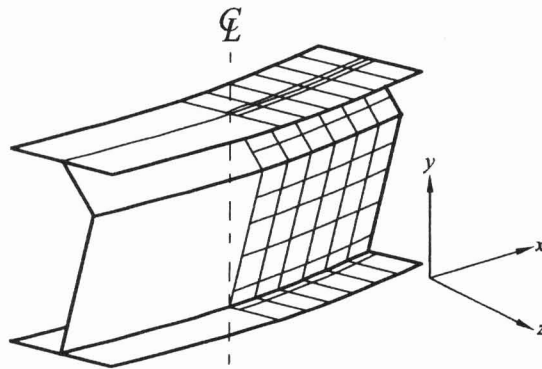


図 3-7 解析モデル

(1) 初期不整

(a) 初期たわみ

初期たわみは、図 3-8 に示すように、z 軸方向にスパン中央部が最大に一次波形で仮定した。最大初期たわみは、表 3-2 に示す実測値を用いて定した。

$$w_0 = \bar{w} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right)$$

表 3-2 最大初期たわみの実測値

TYPE	B1	B2	B3
$\bar{w} (mm)$	2.05	2.90	2.10

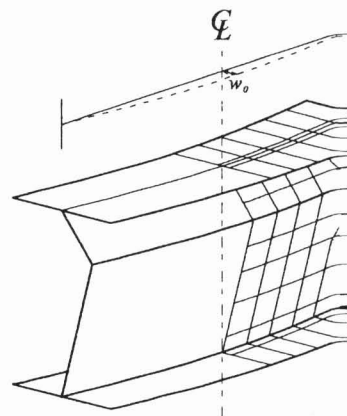


図 3-8 初期たわ

また、TYPE-B3 の桁に関しては、圧縮フランジに数波にわたる初期たわみが実測されたため、圧縮フランジ板の幅方向に直線分布で、軸方向に正弦 13 次波形の初期たわみを仮定した。

(b) 残留応力度

残留応力度の分布は、図 3-9 に示すように、軸方向及び厚さ方向に一定値を持つ分布で仮定した。

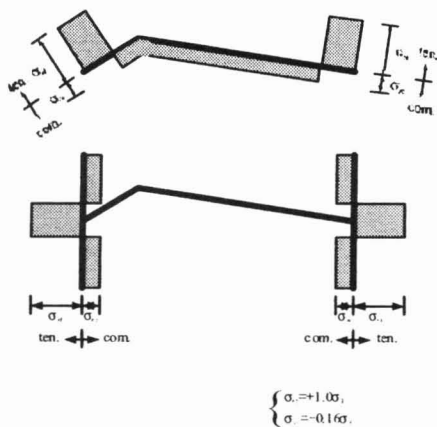


図 3-9 残留応力度

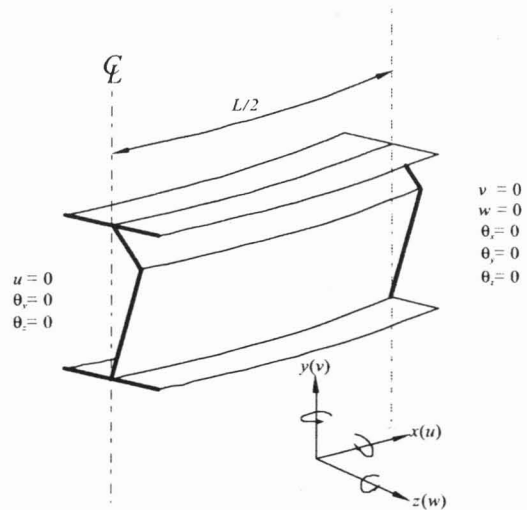


図 3-10 支持条件

(2) 支持条件

実験における支持条件を再現するため、図 3-10 に示すように、桁の端部では、鉛直変位 v 、横倒れの変位 w 、及び回転角 θ_x 、 θ_y 、 θ_z を拘束し、スパン中央部では解析の対称性を考慮して、水平変位 u 、回転角 θ_y 、 θ_z を拘束した。

(3) 強制変位置

実験における荷重条件を再現するため、図 3-11 に示すように、スパン端部のフランジには全域に同一の軸方向変位を、ウェブにはウェブの高さの 1/2 の部位を中心に線形変化する軸方向変位を、それぞれ強制変位として与えた。

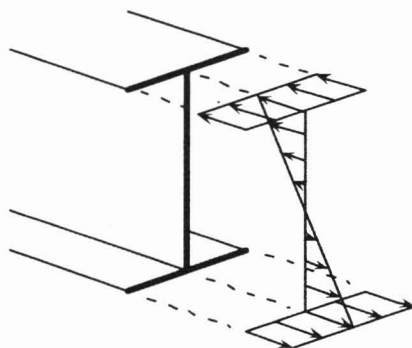


図 3-11 強制変位

3-3 載荷試験結果

(1) 折れ板断面桁とI形断面桁の比較

試験で得られた曲げモーメントとスパン中央部の鉛直変位の関係を図 3-12、15、18 に、曲げモーメントとスパン中央部の水平変位の関係を図 3-13、16、19 に、曲げモーメントと圧縮フランジのひずみの関係を図 3-14、17、20 に、それぞれ示す。各図中の縦軸は、曲げモーメントを全塑性曲げモーメント M_p で除して無次元化して示してある。横軸の変位は mm で示し、ひずみについては、測定したひずみを、全塑性曲げモーメントに対応する線形量として算定した ϵ_p で除して無次元化して示してある。また、図には、折れ角 $\theta=5^\circ$ の折れ板断面桁を白抜きの凡例で、I形断面桁 ($\theta=0^\circ$) を黒塗りの凡例で、それぞれ示した。また、載荷試験終了後の桁の様子を写真 3-11 ~17 に示す。

(a) TYPE-1

TYPE-1 桁の曲げモーメントとスパン中央部の鉛直変位の関係を図 3-12 に、曲げモーメントとスパン中央部の水平変位の関係を図 3-13 に、曲げモーメントと圧縮フランジのひずみの関係を図 3-14 に、それぞれ示す。また、載荷試験終了後の桁の様子を写真 3-11、12 に示す。図から明らかなように、折れ角 $\theta=5^\circ$ を有する折れ板断面桁では、 $M/M_p=0.62$ 付近で側方変位が増大し、 $M/M_p=0.85$ で最大曲げモーメントに達した後、急激に強度が低下している。写真 3-11、12 より明らかなように、桁が側方へ倒れこむ横倒れ座屈崩壊を呈している。折れ角 $\theta=5^\circ$ の折れ板断面桁は、I形断面桁 ($\theta=0^\circ$) よりも高い荷重レベルで不安定現象が起こっており、その結果、終局強度はI形断面桁 ($\theta=0^\circ$) よりも上昇している。また、同じ荷重レベルの側方変位は、折れ角 $\theta=5^\circ$ の折れ板断面桁のほうが小さい。

(b) TYPE-2

TYPE-2 桁の曲げモーメントとスパン中央部の鉛直変位の関係を図 3-15 に、曲げモーメントとスパン中央部の水平変位の関係を図 3-16 に、曲げモーメントと圧縮フランジのひずみの関係を図 3-17 に、それぞれ示す。また、載荷試験終了後の桁の様子を写真 3-13、14 に示す。図から明らかなように、折れ角 $\theta=5^\circ$ の折れ板断面桁 $M/M_p=0.41$ 付近で剛性が緩やかに低下し、 $M/M_p=0.6$ 付近から徐々に側方変位が増大している。 $M/M_p=0.78$ で最大曲げモーメントに達し、崩壊に至っている。写真 3-13 より明らかなように、崩壊は、圧縮フランジに局部的な座屈が生じ、また、写真 3-14 より桁が側方へ倒れこんでいることから、局部座屈と横倒れ座屈が連成した連成座屈崩壊を呈している事が解る。TYPE-1 と同様に、折れ角 $\theta=5^\circ$ の折れ板断面桁は、I形

断面桁 ($\theta=0^\circ$) よりも高い荷重レベルで不安定現象が起こっており、その結果、終局強度は I 形断面桁よりも上昇している。

(c) TYPE-3

TYPE-3 桁の曲げモーメントとスパン中央部の鉛直変位の関係を図 3-18 に、曲げモーメントとスパン中央部の水平変位の関係を図 3-19 に、曲げモーメントと圧縮フランジのひずみの関係を図 3-20 に、それぞれ示す。また、載荷試験終了後の桁の様子を写真 3-15、16 に示す。図から明らかなように、 $M/M_p=0.53$ 付近で圧縮フランジの局部変形により剛性が低下し、 $M/M_p=0.64$ で最大曲げモーメントに達し、崩壊に至っている。写真 3-15、16 より明らかなように、TYPE-3 桁の崩壊モードは、圧縮フランジに複数の局部座屈波が見られ、この桁は、局部座屈崩壊を呈している。折れ角 $\theta=5^\circ$ の折れ板断面桁の終局強度は、I 形断面桁 ($\theta=0^\circ$) よりも上昇しているが、TYPE-B1 及びTYPE-B2 の桁ほど終局強度の上昇は見られなかった。これは、TYPE-B3 桁の崩壊の主要因が圧縮フランジの局部座屈である為と考えられる。

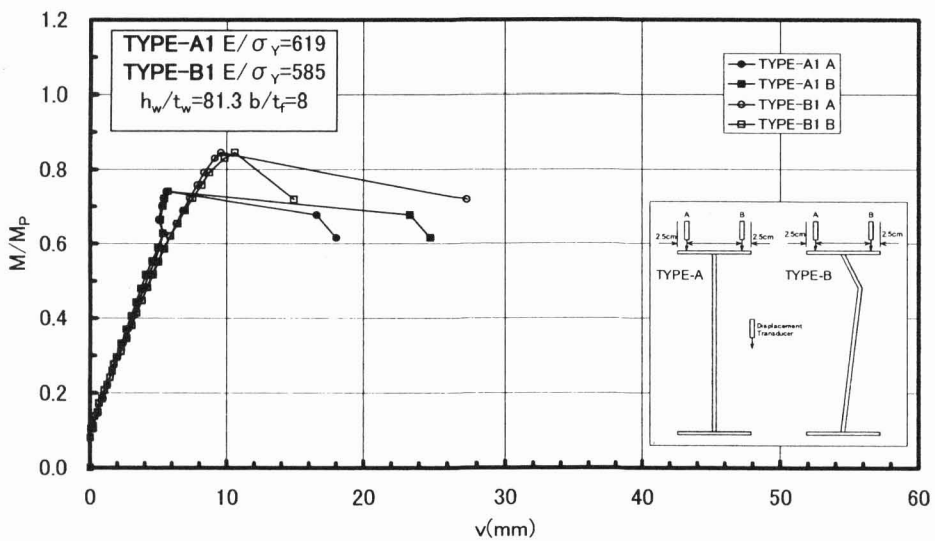


図3-12 曲げモーメントと変位の関係

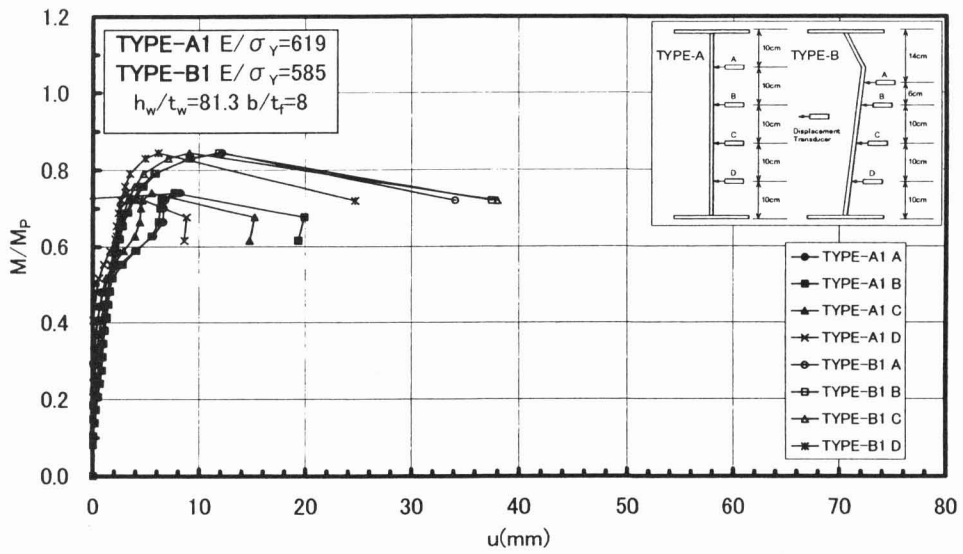


図3-13 曲げモーメントと変位の関係

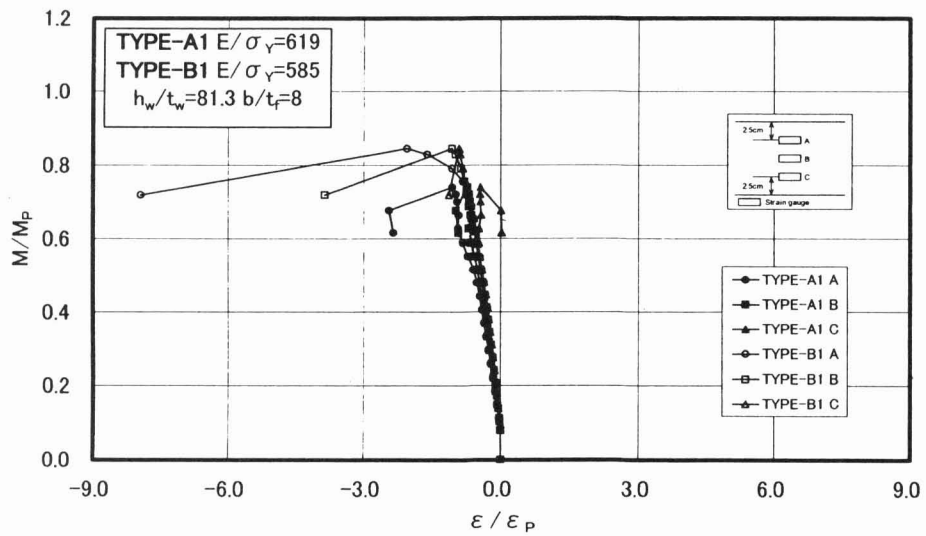


図3-14 曲げモーメントとひずみの関係

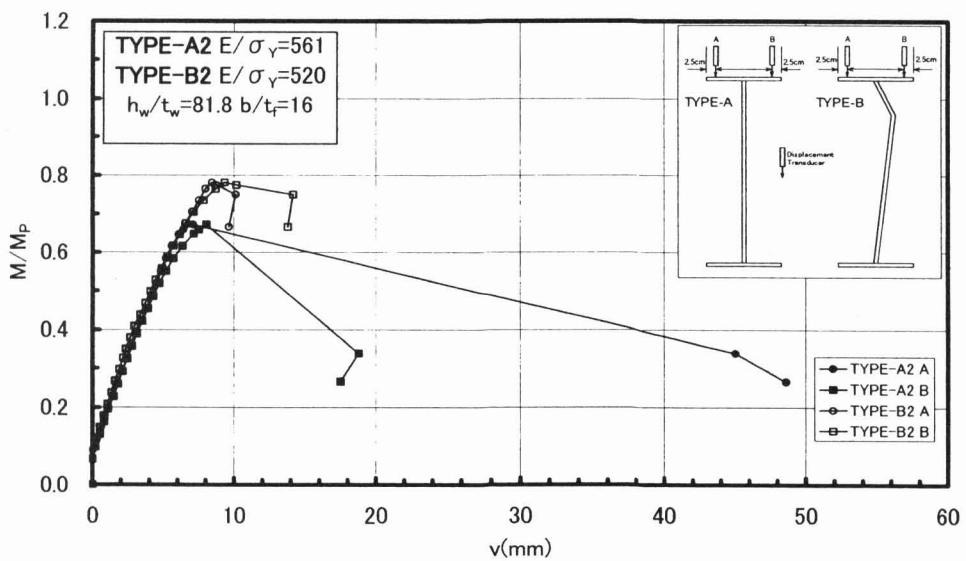


図3-15 曲げモーメントと変位の関係

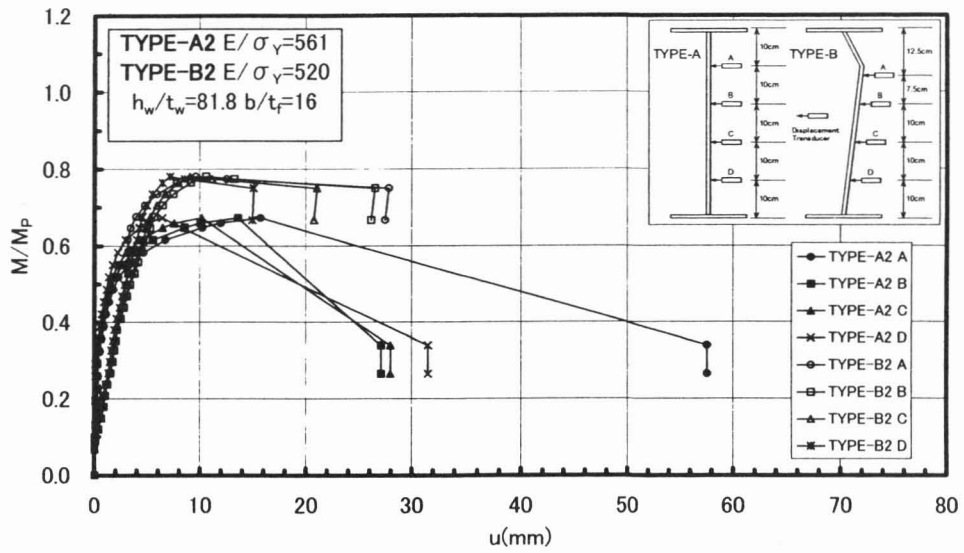


図3-16 曲げモーメントと変位の関係

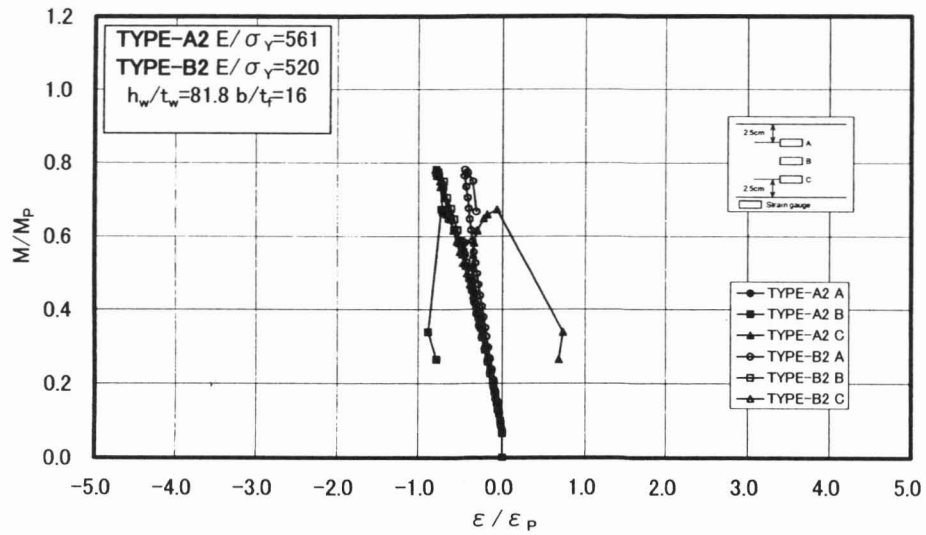


図3-17 曲げモーメントとひずみの関係

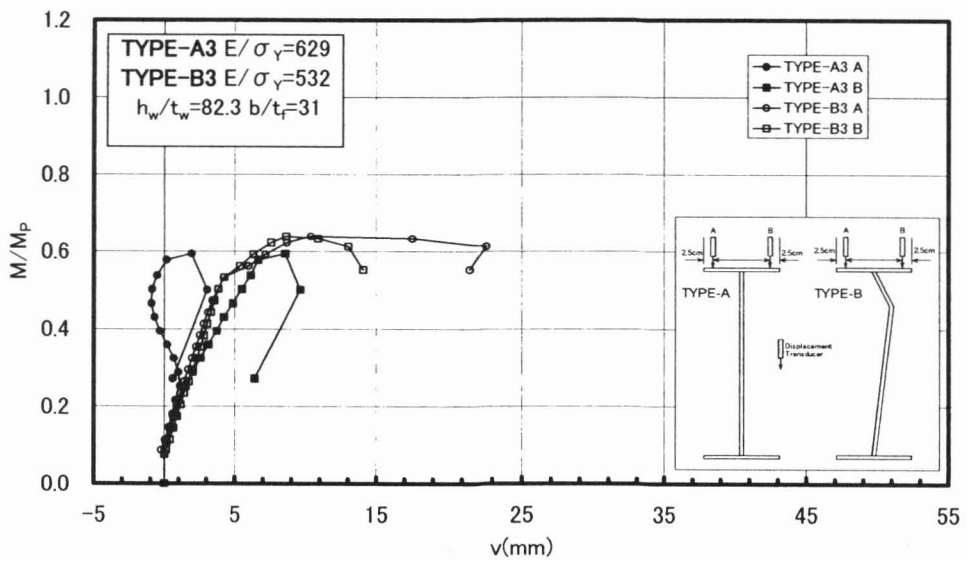


図3-18 曲げモーメントと変位の関係

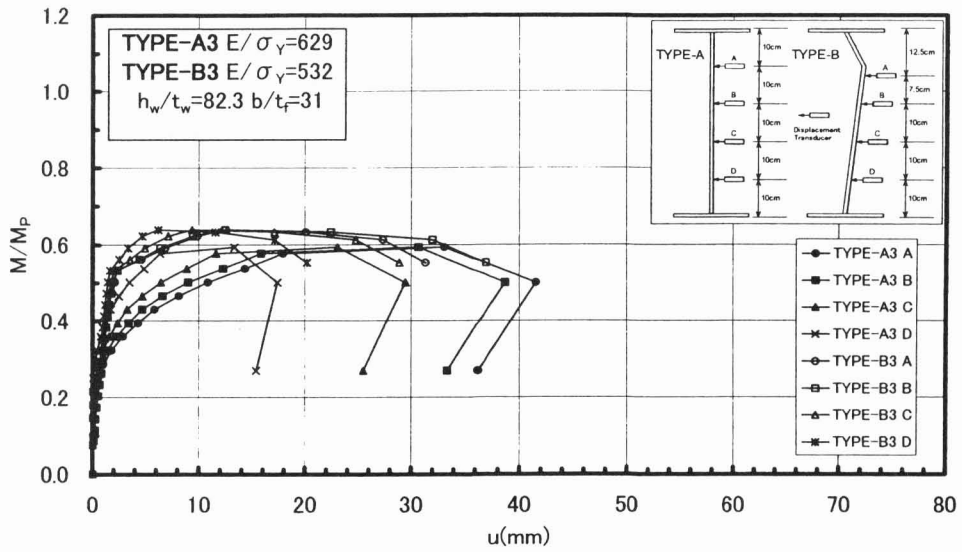


図3-19 曲げモーメントと変位の関係

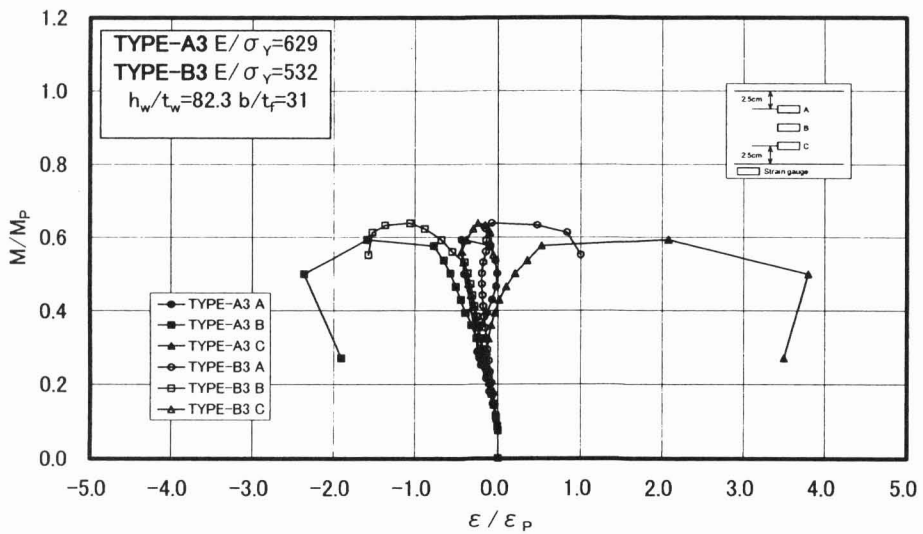


図3-20 曲げモーメントとひずみの関係

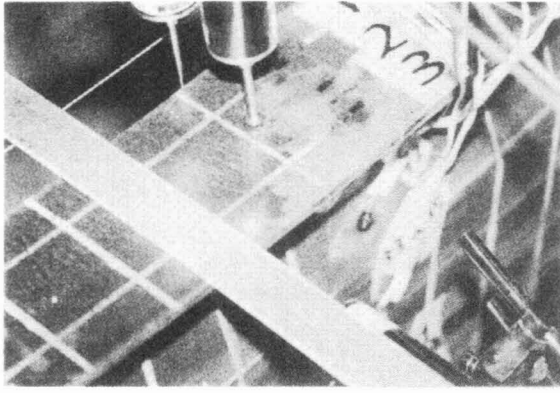


写真 3-11 TYPE-B1 の崩壊モード

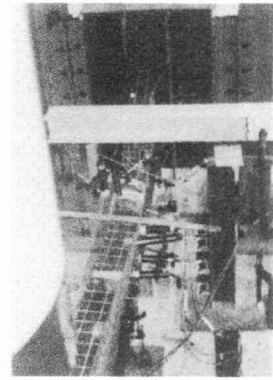


写真 3-12 TYPE-B1 の崩壊モード

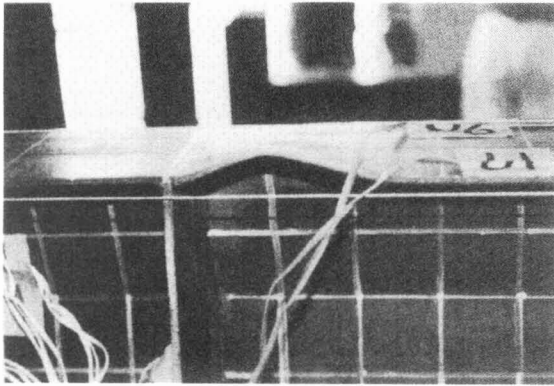


写真 3-13 TYPE-B2 の崩壊モード

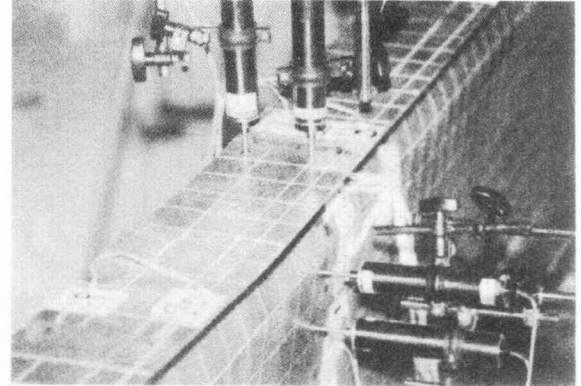


写真 3-14 TYPE-B2 の崩壊モード

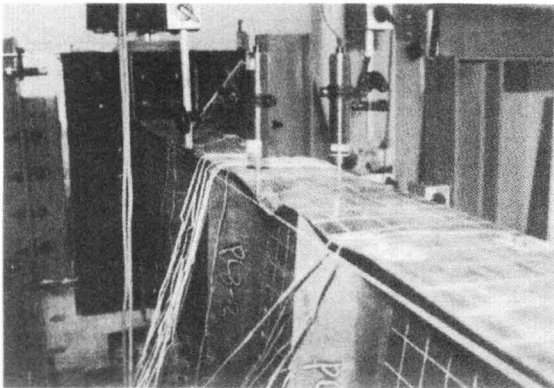


写真 3-15 TYPE-B3 の崩壊モード

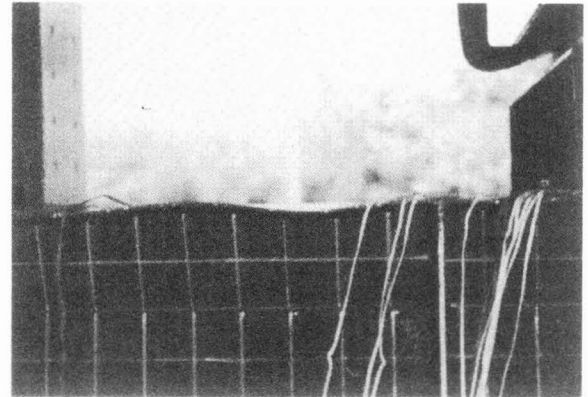


写真 3-16 TYPE-B3 の崩壊モード

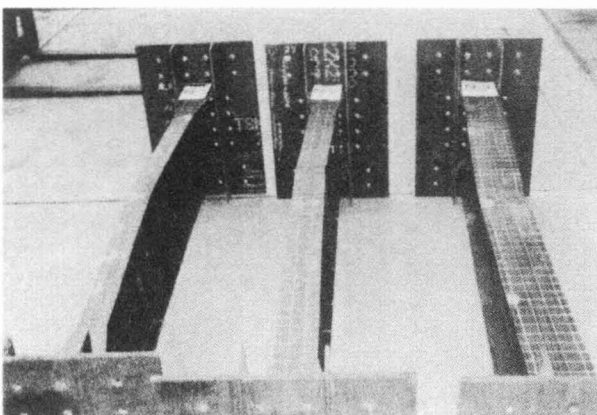


写真 3-17 TYPE-B の崩壊モード

(2) 折れ板断面による補剛効果

表 3-3 に、実験によって得られた試験桁の M_{max}/M_p 、桁の横倒れ開始時の M/M_p 、圧縮フランジの局部座屈開始時の M/M_p 、折れ板断面による強度増加率、及び崩壊モードを示す。

表 3-3 載荷試験結果

TYPE	A1	A2	A3	B1	B2	B3
M_{max}/M_p	0.741	0.673	0.592	0.845	0.781	0.639
横倒れ開始時の M/M_p	0.6	0.5	/	0.62	0.6	/
圧縮フランジの局部座屈開始時の M/M_p	/	0.48	0.22	/	/	0.53
崩壊モード	横倒れ座屈	連成座屈	局部座屈	横倒れ座屈	連成座屈	局部座屈
強度増加率(%)	/	/	/	14	16	8

強度増加率は次式で算定した。

$$\text{強度増加率} = \left(\frac{M_{max}}{M_p} \right)_{TYPE-B} \bigg/ \left(\frac{M_{max}}{M_p} \right)_{TYPE-A}$$

表 3-3 より、TYPE-B1 桁で 14%、TYPE-B2 桁で 16%の強度増加が得られたが、TYPE-B3 桁では 8%の強度増加しか得られなかった。これは、TYPE-B3 桁では、ウェブの補剛効果が十分機能する前に圧縮フランジの座屈が先行し、局部座屈崩壊を呈したためだと思われる。

(3) 載荷試験結果と解析結果の比較

ここでは、本試験結果の妥当性を検証するために、折れ角 $\theta=5^\circ$ を有する折れ板断面桁の載荷試験結果と解析結果の比較を行った。実験及び解析で得られた曲げモーメントと変位の関係を図 3-21、22、25、26、29、30 に、曲げモーメントとひずみの関係を図 3-23、27、31 に、解析で得られた変形モード図を図 3-24、28、32 に、それぞれ示す。なお、図中、載荷試験結果を黒塗りの凡例で、解析結果を白抜きの凡例で、それぞれ示した。

(a) TYPE-B1

TYPE-B1 桁の曲げモーメントと変位の関係を図 3-21、22 に、曲げモーメントとひずみの関係を図 3-23 に、変形モード図を図 3-24 に、それぞれ示す。図から明らかのように、解析結果では、実験結果とほぼ同様に $M/M_p=0.62$ 付近で不安定挙動が生じて側方変位が増大し、 $M/M_p=0.82$ で最大曲げモーメントに達した後、急激に強度が低下している。図 3-19 及び写真 3-11、12 から明らかのように、解析結果は実験結果と同じ横倒れ座屈崩壊を呈している。これらの結果より、試験桁 TYPE-B1 の解析結

果は、終局強度及び変形モード図共に、試験桁の曲げ終局挙動を的確に捉えていると言えよう。

(b) TYPE-B2

TYPE-B2 桁の曲げモーメントと変位の関係を図 3-25、26 に、曲げモーメントとひずみの関係を図 3-27 に、変形モード図を図 3-28 に、それぞれ示す。図から明らかなように、解析結果では、 $M/M_p=0.63$ 付近で不安定挙動が生じ、 $M/M_p=0.80$ で最大曲げモーメントに達した後、崩壊に至っている。これらの図から明らかなように、解析結果より得られた不安定挙動開始モーメント及び最大曲げモーメントは、実験結果と比較的良く一致しており、TYPE-B2 桁の耐荷力特性をよく評価していると言えよう。また、図 3-28 の変形モード図から明らかなように、解析結果は連成座屈崩壊モードを的確に評価している。

(c) TYPE-B3

TYPE-3 桁の曲げモーメントと変位の関係を図 3-29、30 に、曲げモーメントとひずみの関係を図 3-31 に、変形モード図を図 3-32 に、それぞれ示す。図から明らかなように、解析結果は、実験結果と同様に、 $M/M_p=0.51$ 付近で不安定挙動が生じ、 $M/M_p=0.65$ で最大曲げモーメントに達し、崩壊に至っている。また、図 3-32 の変形モード図より明らかなように、解析結果より得られた変形モード図は、実験結果と同じ局部座屈崩壊を呈しており、圧縮フランジの複雑な局部座屈波形を良く評価している。

以上の結果より、本解析結果は、折れ鋼板材を用いた折れ板断面鋼桁の変形モード図及び耐荷力特性を的確に評価していると結論付けられよう。

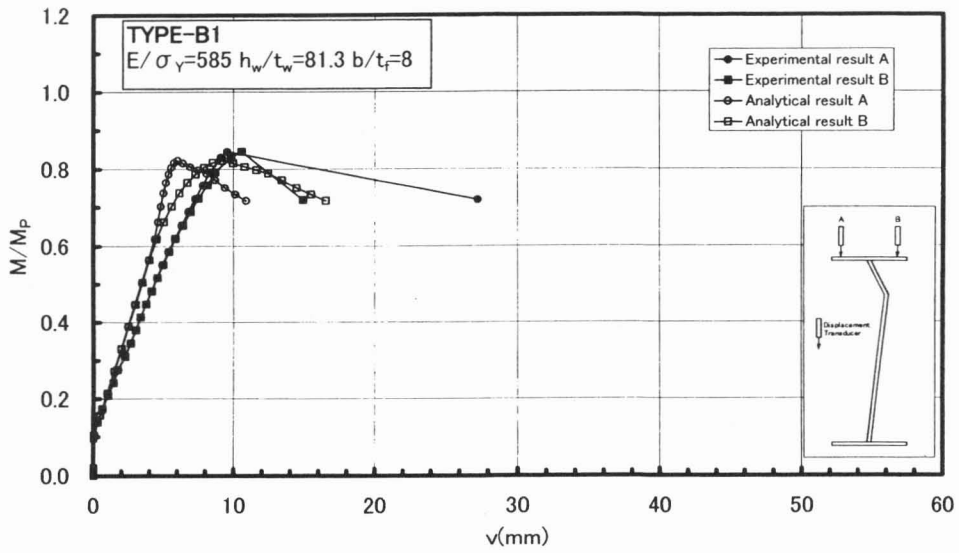


図3-21 曲げモーメントと変位の関係

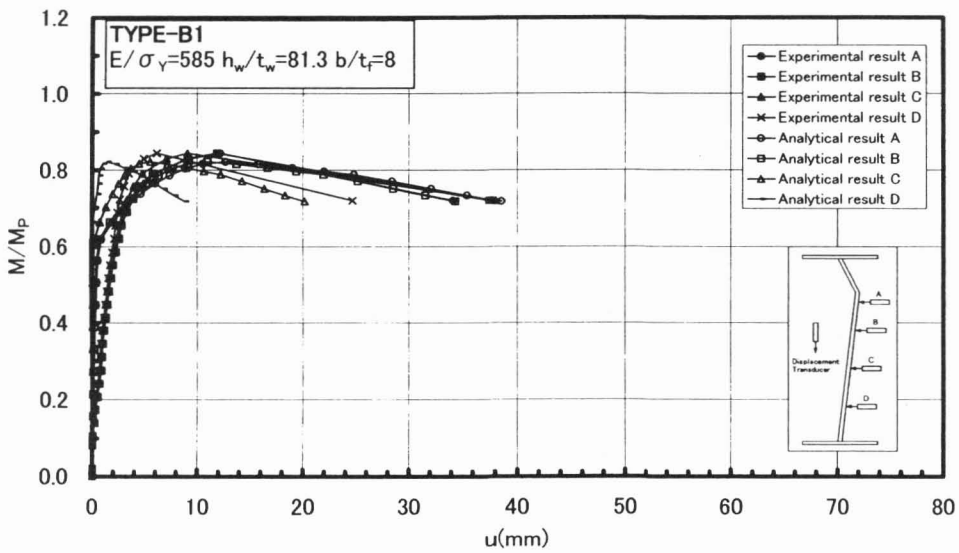


図3-22 曲げモーメントと変位の関係

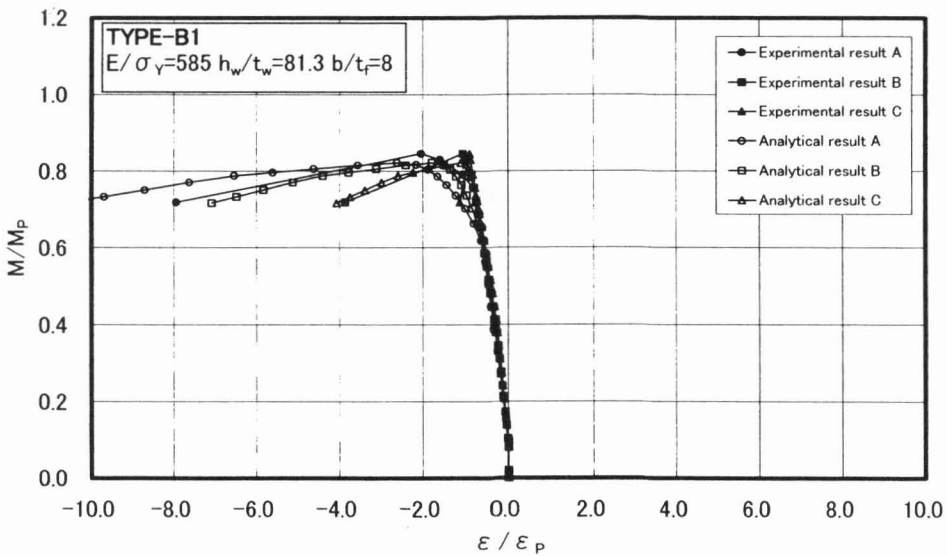


図3-23 曲げモーメントとひずみの関係

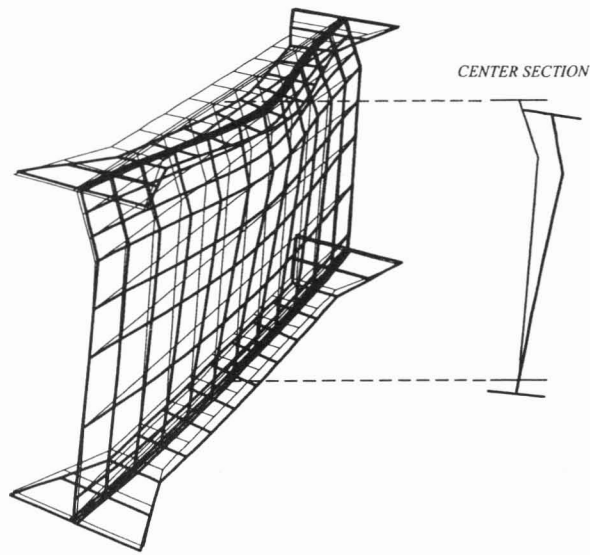


図 3-24 変形モード TYPE-B1

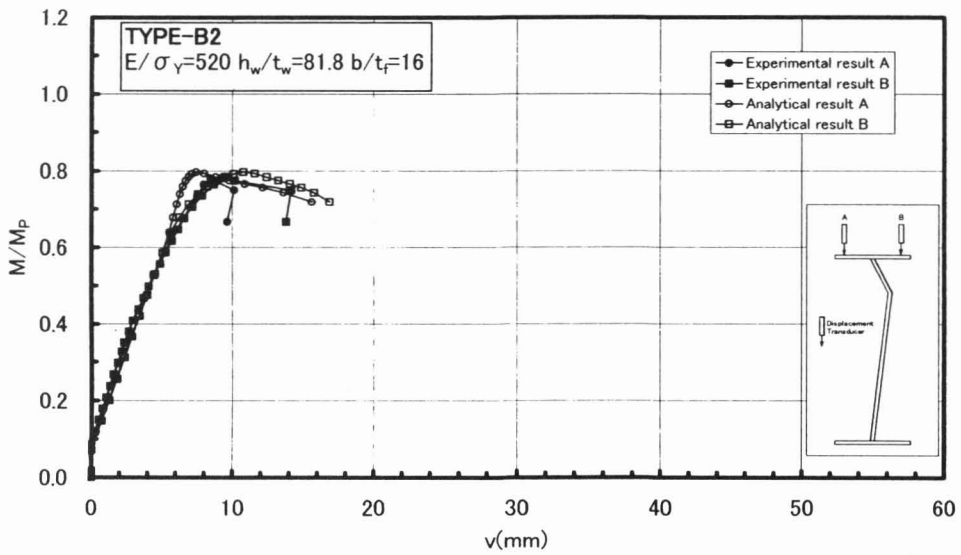


図3-25 曲げモーメントと変位の関係

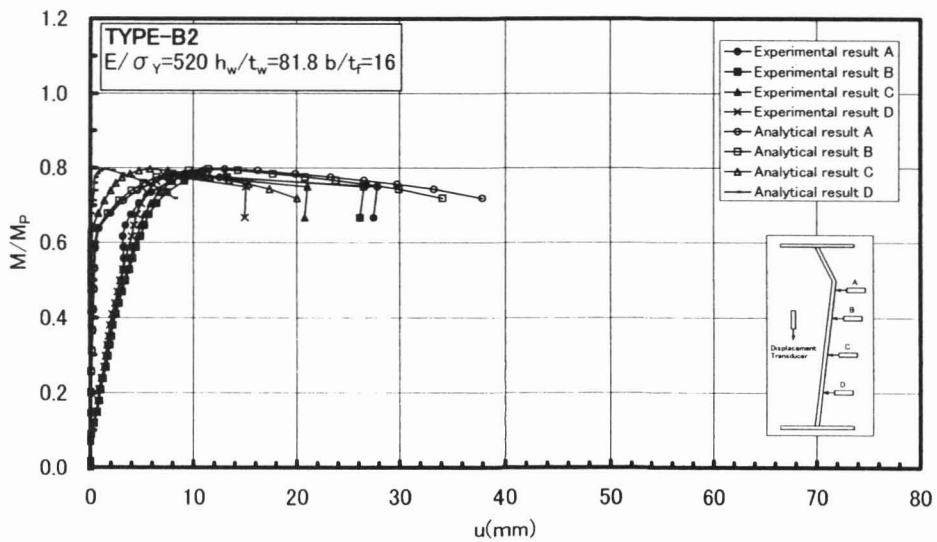


図3-26 曲げモーメントと変位の関係

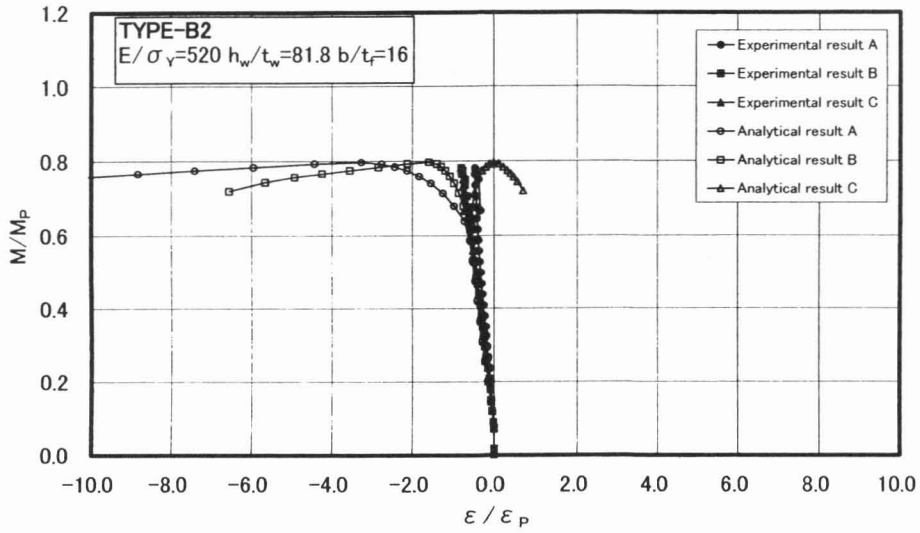


図3-27 曲げモーメントとひずみの関係

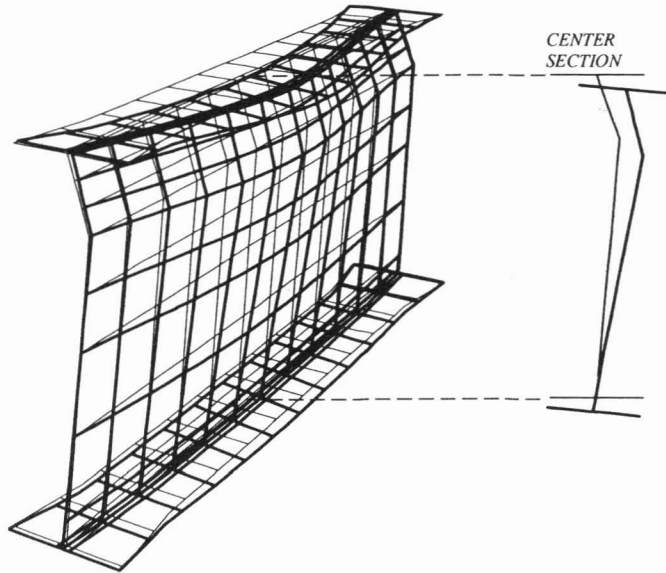


図3-28 変形モード TYPE-B2

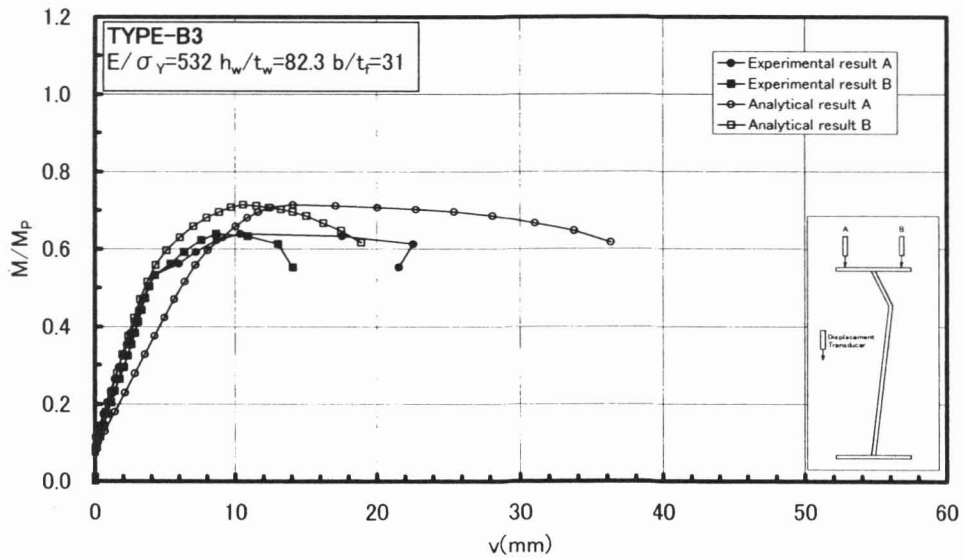


図3-29 曲げモーメントと変位の関係

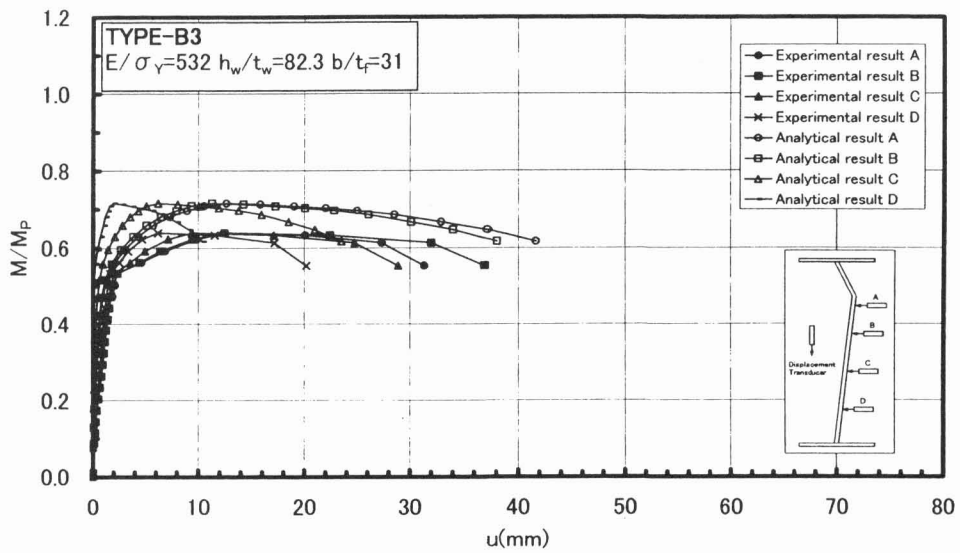


図3-30 曲げモーメントと変位の関係

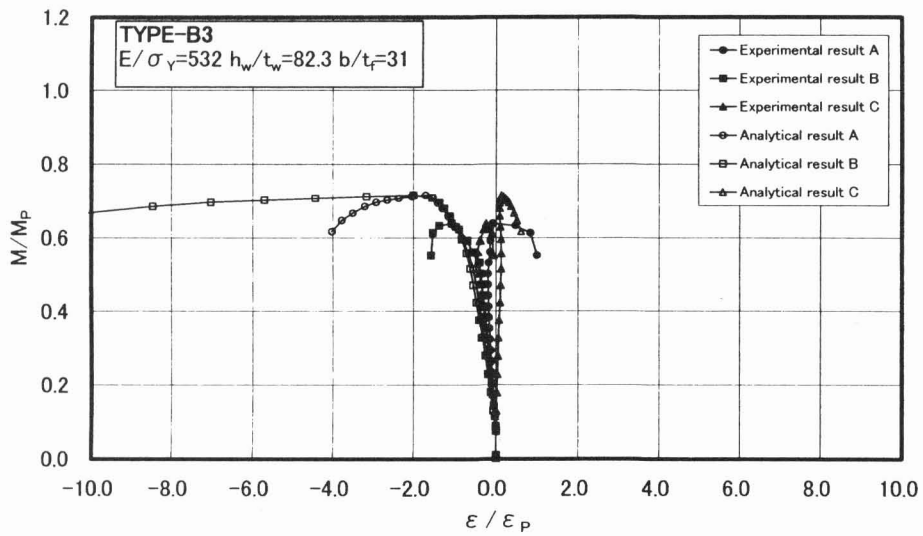


図3-31 曲げモーメントとひずみの関係

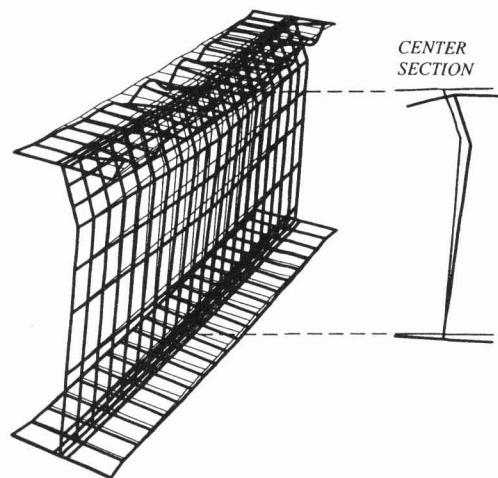


図 3-32 変形モード TYPE-B3