

鋼構造建築物に関する実験実習テーマについて

山西 央朗*

(令和6年11月7日受付)

EXPERIMENT TRAINING THEME OF STEEL CONSTRUCTION BUILDING

Teruaki YAMANISHI

(Received November 7, 2024)

Abstract

Steel structures offer advantages when applying seismic design methods that handle the elastoplastic range, due to their ease of deformation control and their capacity for plastic deformation. However, to fully leverage this performance, it is essential to manage various types of buckling issues, primarily including flexural buckling, local buckling, and lateral-torsional buckling.

This paper presents experimental approaches for learning about steel structures, focusing on experiments related to flexural buckling, local buckling, and lateral-torsional buckling, as well as themes that track the behavior of elastoplastic steel materials. Additionally, it provides an overview of the implementation methods and the key learning points derived from these experiments.

Key Words: steel construction building, experiment, buckling, cyclic loading

1 序論

構造実験による学びは、力学系科目（構造力学、材料力学をはじめとする、変形計算、不静定構造物の応力計算、振動解析、塑性解析（極限解析））、構造設計系科目（木質構造、RC構造、鋼構造の構造設計）の下地となる実現象を理解し、物理現象と学問を結びつけるための重要な機会である。

また、題目に含まれる「鋼構造建築物に関する実験」においては、建築構造分野で用いられる軟鋼が表1、図1、図2に示すように、構造計算を行うにあたって、利点と明瞭な性質（ヤング係数 $E = 205,000 \text{ N/mm}^2$ で一定）を保有している。具体的には、高い降伏応力度、線弾性係数（ヤング係数）を保有しており、明確な弾性域と降伏後に降伏棚を有し、更に破断ひずみは20~40%と延性に富んでいる。また、規格によらず線弾性係数が一定値、かつ弾

表1 鋼材（軟鋼）の性質¹⁾

ヤング係数	N/mm ²	205×10^3
σ_y 降伏応力度	N/mm ²	235 ~ 365
σ_u 引張応力度	N/mm ²	400 ~ 520
ϵ_f 破断伸び	%	20 ~ 40
単位体積重量	t/m ³	7.86
融点	°C	1,536
沸点	°C	2,754

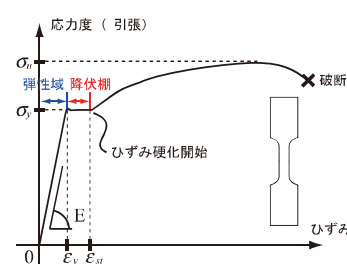


図1 鋼材の応力度-ひずみ曲線

性限界を迎えるまではほぼ完全な線形性を有するため変形計算が容易であり、建築鋼増で用いられるコンクリート、木質材料と比較して構造要素として利用し易い。

鋼材の特徴と利用方法を箇条書きにすると、

1. 高強度：小さい断面を採用できる。
2. 高剛性&線弾性係数が一定：小さい断面を採用でき、計算が容易である。

* 広島工業大学建築工学科

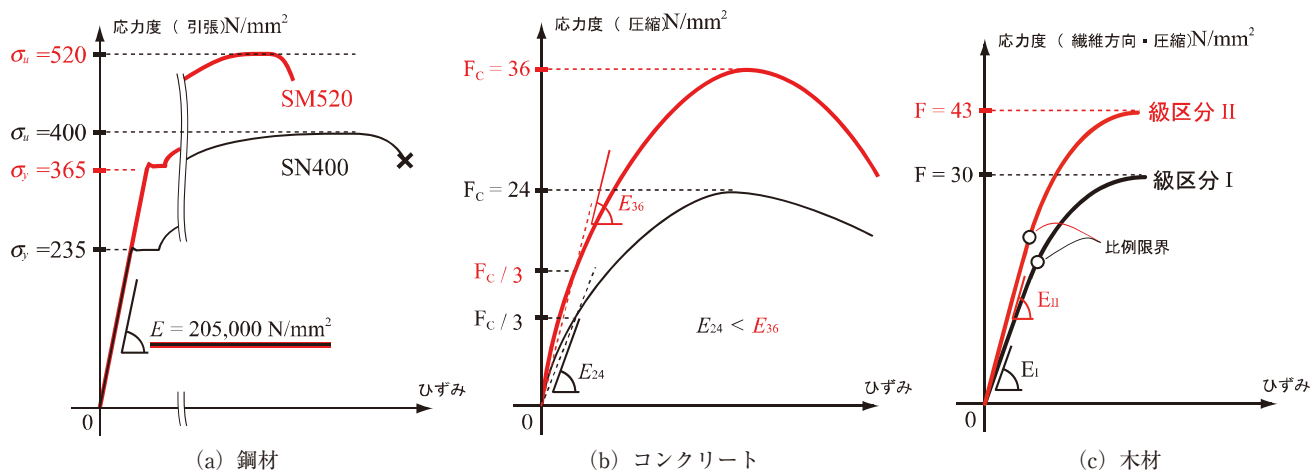


図2 各素材の応力度-ひずみ曲線の比較

3. 延性：耐震設計に適合する（塑性変形を許容）。
 4. 完全な線形性と降伏棚：耐震設計に適合する（塑性解析，塑性率，累積塑性変形）。
- となる。

このような特徴を利用する形で，鋼構造建築物では強度比の高い構造物を実現できる。これにより，構造物自重の低減を実現して地震時に有利であること，細長く軽快な部材を得られて構造デザインに利用されることも多い。

しかし一方で，軽快な部材（細長い，薄い）を実現することで，偏心圧縮荷重に基因した座屈現象が発現する。細長い圧縮材における状況を図3に示すが，このように座屈現象が弾性領域で発現すると，

- i. 降伏耐力を迎える前に強度のピークを迎える。
 - ii. 座屈発生後，強度が著しく低下する。
- という構造的な著しい低下を招き，前述した1～4の鋼材の特徴を全て阻害する。

この座屈時の強度は弾性座屈荷重として以下の式により求められる。

$$N_E = \frac{\pi \cdot E \cdot I}{l_b^2} \quad (1)$$

これを基本とし，塑性座屈を考慮した座屈波形が図4の様に整備されている。

現在，座屈は以下の3種類に大別され，それぞれの発生を抑制する方針で設計がなされている。

- I. 曲げ座屈（全体座屈）：細長い部材に軸圧縮力が作用することで，図3に示すように部材全長に渡って座屈波形が発生する現象。
- II. 局部座屈：薄板要素に圧縮応力が作用することで，図5に示すような座屈波形が発生する現象。

曲げ，圧縮力を受ける形鋼で発生する。このため，柱，梁，ブレース等の鋼材全般が対象となり，幅厚比により制御できる。

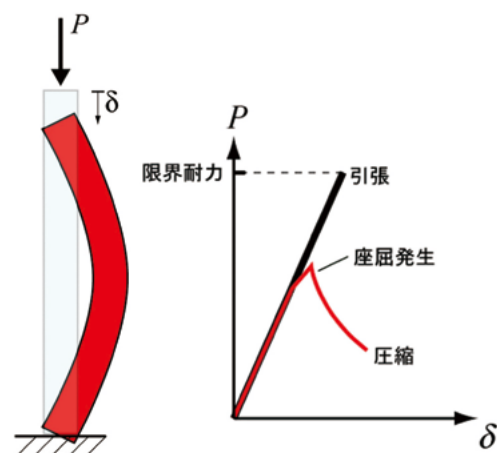


図3 弾性曲げ座屈の荷重-変形関係

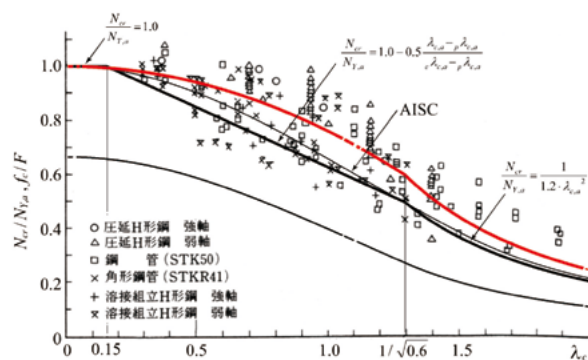


図4 座屈曲線実験値²⁾

- III. 横座屈：強軸回りに曲げを受けることで，図6に示すように圧縮側フランジが曲げ座屈し，これに伴い捩れ（材軸回りの曲げ変形）と反り（弱軸回りの曲げ変形）が発生する現象。

強軸・弱軸が存在し曲げが卓越する部材で発生するため，主に梁が対象となり，曲げ材の細長比により制御できる。尚，小梁を設置して横座屈補剛間距離を極短くすることで，横座屈が発生しない梁を実現することが原則である。

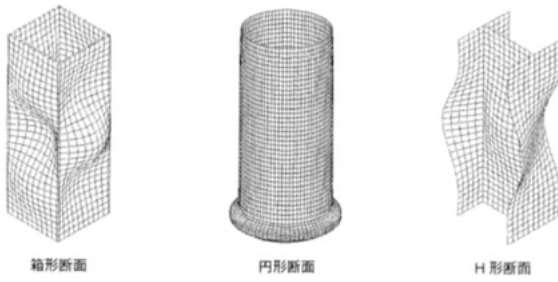


図5 局部座屈³⁾

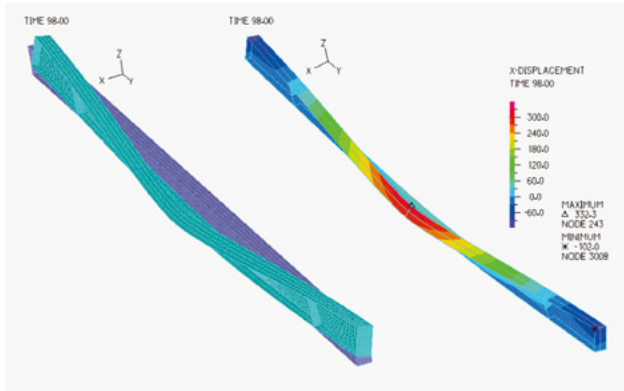


図6 横座屈

また、耐震設計では、部材の損傷および塑性崩壊を許容するが倒壊を抑制しなければならない。これを保証するため、弾性時最大ポテンシャルエネルギーと弾塑性ポテンシャルエネルギーが等しくなる必要保有水平耐力以上の保有水平耐力を構造物に保持させる⁴⁾。

これは、一般に図7を用いて説明されるが、弾塑性繰返し振動下の応答結果である図8にて弾性時の最大層間変形角と弾塑性時の最大層間変形角はほぼ等しくなり、耐震工学的に合理的な考え方として評価されている。

すなわち、構造特性係数の考え方により、構造物の最大層間変形角が簡易的に推定可能であると考えられ、構造設計支援ツールでは増分解析が主として扱われている。

このように、最大層間変形角を有る程度制御できるとした前提下で、実務設計では最大層間変形角が $1/100 = 0.01(\text{rad})$ を超過しないよう設計することが慣例として行われている。

この根拠として、一つは層間変形角 $0.025(\text{rad})$ を超過して図9に示す $P-\Delta$ 効果が顕在化することによる倒壊を

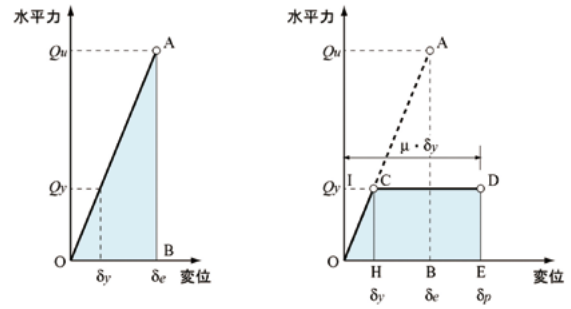


図7 構造特性係数

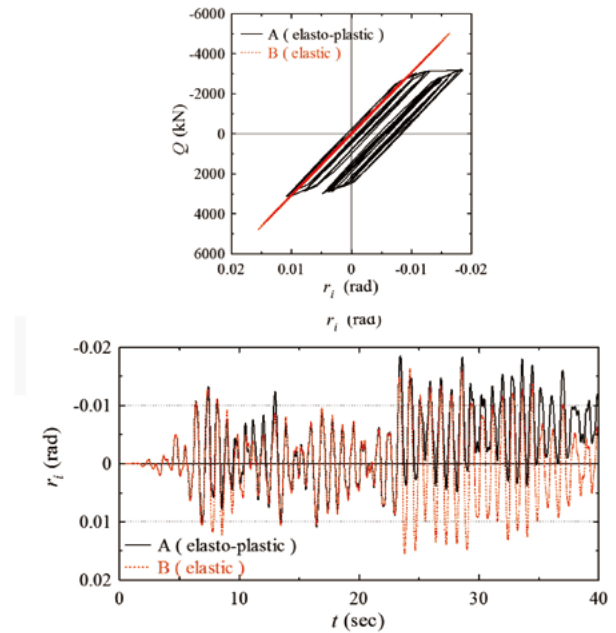


図8 多層多スパン架構における弾性時・弾塑性時の時刻歴地震応答解析結果の例

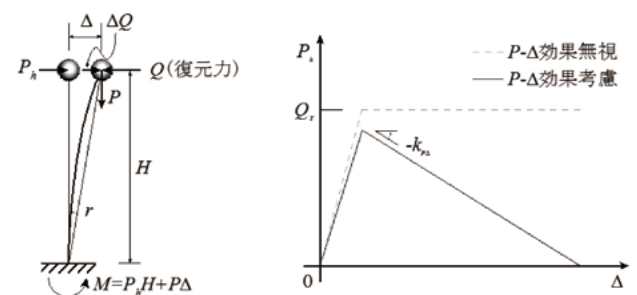


図9 $P-\Delta$ 効果

抑制するために、震度7等を意識した安全側の閾値として設けられている。

以上、鋼構造を理解するにあたっては、座屈問題と弾塑性の履歴形状を強く意識しなければならない。また、冒頭に説明した様に、鋼材はヤング係数が一定値(表1、図2参照)となるため、変形計算、ひずみゲージによる応力の推定等が簡単に実施できる。このような特徴を4回の実験にて網羅することを目的に、2章以降に、実験テーマと代表的な結果を提示する。大学教育における鋼構造の実験教

育に関する情報共有を計ることが本論の力点である。

2 H形鋼短柱の圧縮実験（局部座屈実験）

一様に圧縮力を受ける鋼構造部材は、座屈を生じなければ、引張力を受ける場合と同様な応力度 - ひずみ関係を示す。しかしながら、板要素の局部座屈が発生すると耐力の上昇はほとんど期待できない。本実験においては、塑性設計指針の幅厚比制限値を満足する断面を持つ H 形鋼を試験体として選定している。すなわち、弾性域においては座屈を生じないとともに塑性域においてもひずみ硬化開始点までは座屈を生じないような試験体寸法である。これは、図10に示す $b/t = 15$ に相当する部材で、日本工業規格（JIS）に準じた製品であれば、幅厚比制限値を満足した試験体であるため、降伏後も安定した挙動（降伏耐力以上の耐力を有し、かつ急激な耐力低下が現れない）を示す。

本実験の目的は圧縮実験ではあるが、弾性域においてはほぼ引張実験と同様な挙動を示すので、弾性域における鋼材の素材特性を把握すると共に、局部座屈開始点や座屈後挙動の確認を行うことである。

2.1 実験方法

試験体は、図11に示す H 形鋼（H-100x50x5x7, SN400）で、材長200mmとする。実験には、アムスラー万能載荷試験機を用いる。アムスラー万能載荷試験機に、圧縮試験用治具を設置して、治具中央に試験体を軸方向圧縮単調載荷するように設置する。

計測は、試験体のフランジ中央部に貼付したひずみゲージにより載荷方向直ひずみ ε 、変位計により試験体の縮み量 δ 、アムスラー万能載荷試験機により荷重 P を計測する。

2.2 データの整理方法

- i) 荷重 P と縮み δ の関係をグラフにまとめる。
- ii) 応力度 σ とひずみ ε の関係をグラフにまとめる。
(ひずみは、ゲージからの値と変位計からの値を用いる。)
- iii) 応力度 - ひずみ関係のグラフより、降伏耐力、最大耐力、降伏ひずみ度、ひずみ硬化開始ひずみ、最大耐力時ひずみ、ヤング率、ひずみ硬化係数を求める。

2.3 結果と考察について

実験結果として、図12に荷重 - 変形関係、応力度 - ひずみ曲線を、図13に実験時の様子を示す。

図12(b) より、圧縮ではあるものの局部座屈が顕在化するまでは引張試験と同等の履歴を描くことから、同実験により降伏応力度を得られると共に、鋼材の特徴的である降伏棚、ヤング係数を得ることができる。

図12(a)、図13より、ひずみ硬化が開始し始める B までは局部座屈は顕在化しておらず、幅厚比規定を満足することで局部座屈による急激な耐力低下を抑制できることが読み取れる。

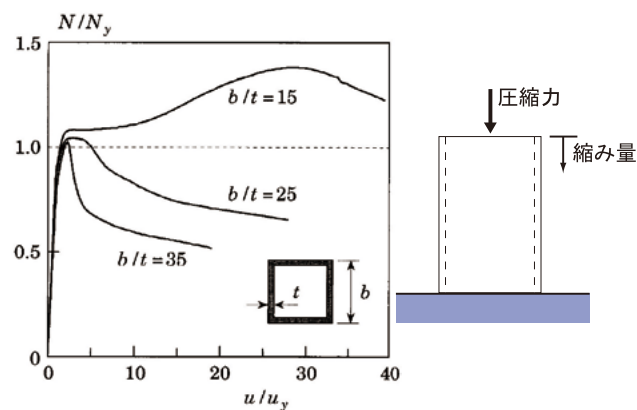


図10 幅厚比 b/t を変数とした時の圧縮力 - 縮み量関係

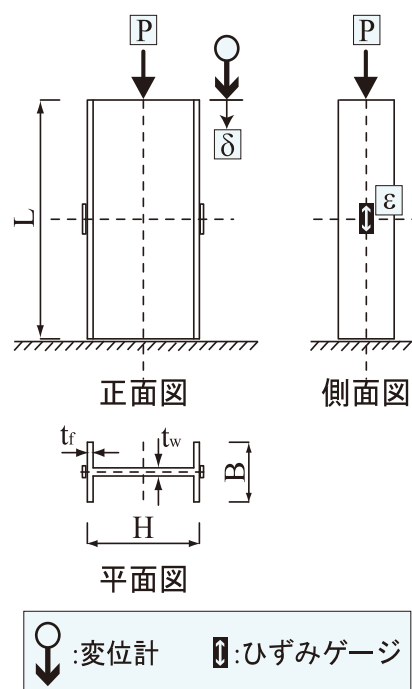


図11 試験体セットアップと計測位置

また、局部座屈の顕在化と共に耐力の低下が明瞭となり、ひずみにして80,000 (μ) 程度の変形で降伏応力度まで耐力が低下する。

以上から、代表的な機械的性質（降伏応力度、ヤング係数）、鋼材の履歴形状、そして局部座屈の発現とそれに伴う耐力低下の様子を学ぶことができる。

3 H形鋼長柱の圧縮実験（曲げ座屈実験）

細長く真っ直ぐな部材は、引張力を受けた場合には降伏耐力に達して抵抗するが、圧縮力を受けると図3に示すような曲げ座屈を起こす。

曲げ座屈が発生する時の荷重は、オイラー座屈荷重によりほぼ評価でき、細長比が大きくなると共に座屈荷重は小さくなる（図4より、オイラー座屈荷重は、実験結果の座

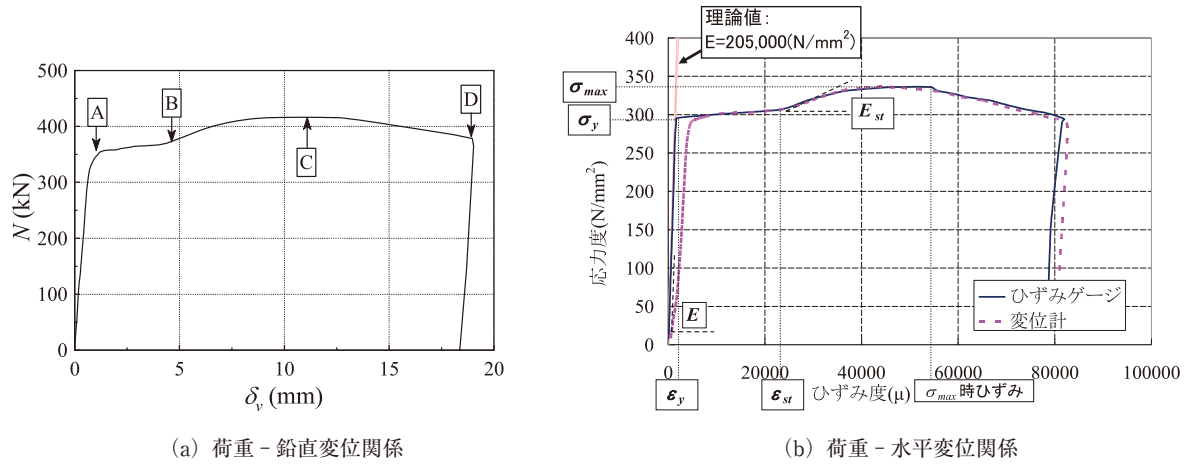


図12 局部座屈実験の実験結果

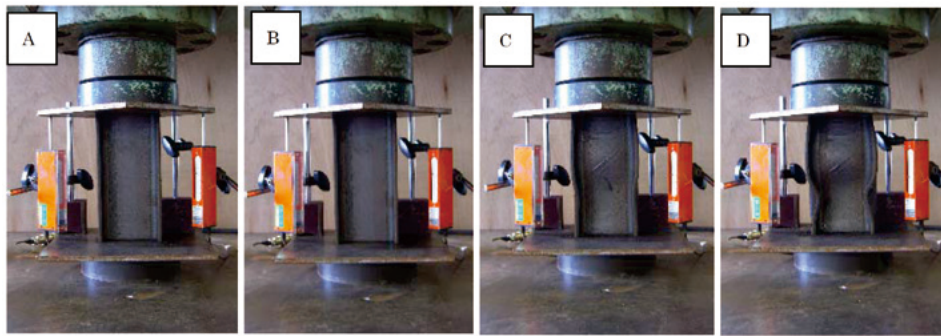


図13 局部座屈実験の実験時状況

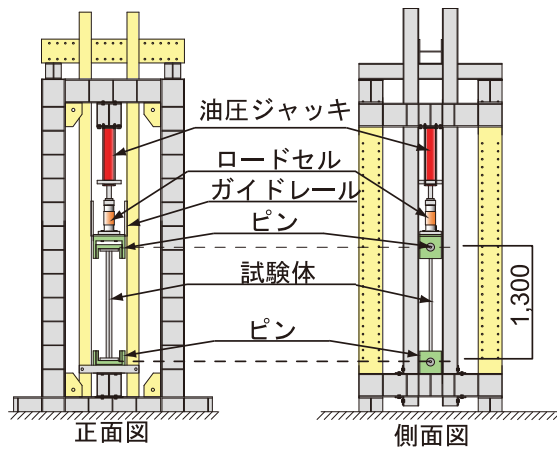


図14 曲げ座屈実験セットアップ

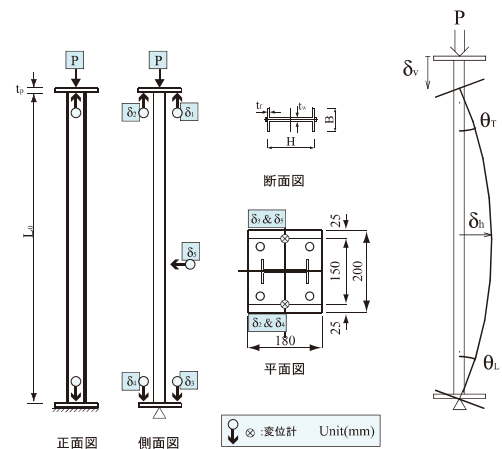


図15 曲げ座屈実験試験体と計測位置

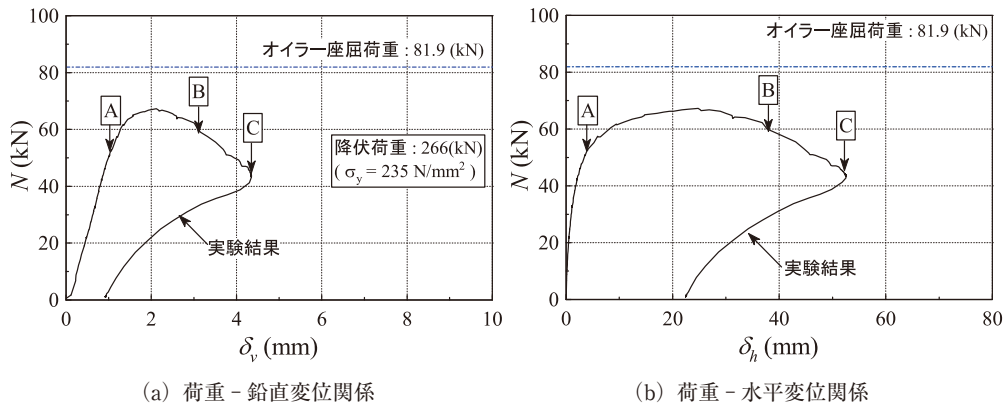


図16 曲げ座屈実験の実験結果

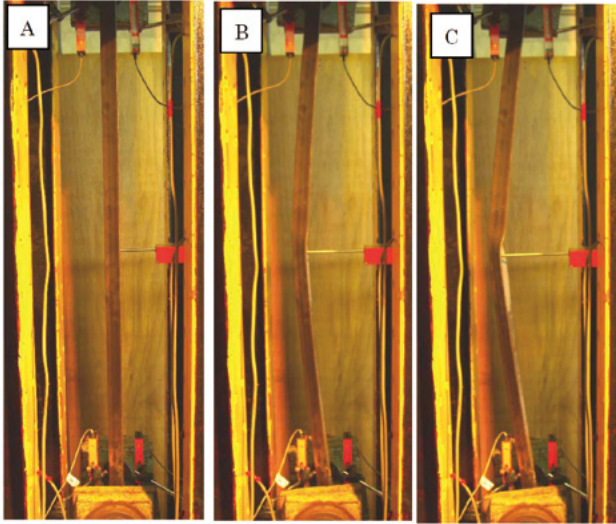


図17 曲げ座屈の実験時状況

屈荷重を精度よく評価できることが分かる)。更に、曲げ座屈が発生する場合は、図3に示すように座屈後に急激に耐力が低下するため、鋼構造の設計においては曲げ座屈が発生しないように設計することが重要となる。

本実験では、プレース材に用いられるH形鋼長柱の圧縮実験を行う。座屈の波形は弱軸回りに生じるので、弱軸回りのみ回転可能なピンを両端とする長柱に圧縮力を加える座屈実験を行う。本実験から座屈荷重および座屈後の耐力低下性状を確認する。但し、試験体や装置に不可避な初期不整がある場合には座屈荷重は理論値と比べて低めの値となる。

3.1 実験方法

試験には、図14に示す装置を用いる。試験体の下端をピン支点、上端をピンローラー支点（鉛直方向に移動自由）となるように装置を組み、上端のピンローラー支点到油圧ジャッキを設置する。荷重は、試験体を軸方向圧縮単調載荷とする。

荷重 P はロードセル先端に設置したロードセルにより計測する。また、図15に示すように、各変位計を設置して、縮み量 δ_v 、試験体中央たわみ δ_h を算出する。

3.2 データの整理方法

- i) 荷重 P と縮み δ_v の関係、荷重 P と水平たわみ δ_h の関係をグラフにまとめる。
- ii) オイラー座屈荷重を算出し、グラフ中に併記する。

3.3 結果と考察について

実験結果として、図16に荷重－縮み関係、荷重－水平たわみ関係を、図17に実験時の様子を示す。

図16(a)より、弾性範囲（図12(a)参照）であるが60kN前後から非線形化が始まりピークを迎えて荷重が急激に低下している。図17を併せて検討すれば、座屈により非線形化とピークを迎えたことが読み取れる。

図16(b)より、非線形化（曲げ座屈）が生じるまでは水平たわみは発生していないものの、非線形化が顕在化すると急激に増大した。また、鉛直縮みが4mm超過程度に対して、水平たわみは50mmを超過しており10倍以上の値を示している。このように、極端に水平たわみが大きくなる様子は図17からも読み取れる。

以上、弾性範囲での座屈現象は降伏耐力を下回り、かつ座屈発生後は急激な耐力の低下を伴うこと、そして座屈の波形は作用変位（ここでは δ_v ）に比較して大きく増幅されることを学ぶことができる。

4 H形鋼梁の曲げ載荷実験（横座屈実験）

強軸回りに等曲げモーメントを受けるH形鋼梁は、図6の横座屈を起こす可能性がある。

曲げモーメントにより圧縮側となるフランジが中心圧縮柱の曲げ座屈を起こす（弱軸方向曲げ変形＝反り）。これを基因とする捩れ変形が生じることで、横座屈細長比 λ_b によっては著しい耐力低下を招く。

横座屈は、境界条件および曲げ応力分布から支配的な影響を受ける。本実験では、支持点の反り拘束度を低く保ち、4点曲げ載荷実験により中央部に等曲げモーメントをうける梁の横座屈曲げモーメントを求める。

4.1 実験方法

実験には、図18に示す装置を用いる。試験体を支点到設置して、支点から張出した先端にジャッキシステム（ピン、ロードセル、油圧ジャッキ）を接合する。左右の支点、それぞれから外側に等距離にジャッキを接合し、鉛直方向に載荷を行う4点曲げ載荷実験とする。載荷は、ジャッキで引張力を加える（鉛直下方向に載荷する）単調載荷実験とする。尚、ジャッキシステムによる水平方向（図6中のX軸方向並進）を拘束しないよう、下部ピンの軸受け間に隙間を設けている。

荷重 P は、ジャッキシステムに内蔵したロードセルにより計測する。また、図19に示すように変位計を設置し載荷点の鉛直変位 δ_v を、試験体中央断面に材軸方向直ひずみを計測するひずみゲージを貼付してひずみ $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_7$ を計測する。

4.2 データ整理法

- i) 荷重 P と鉛直変位 δ_v の関係、ひずみ ε と鉛直変位 δ_v の関係、そして弾性加力時（曲げ応力が3, 6, 9kNm時）の断面高さ方向のひずみ ε 分布をグラフにまとめる。
- ii) 以下の式より得られる横座屈荷重を算出し、グラフ中に併記する。

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{\left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y \cdot G \cdot J}{l_b^2} \right) + \left(\frac{\pi^4 \cdot E^2 \cdot I_y \cdot I_w}{l_b^4} \right)} \quad (2)$$

ここに、 C_b ：モーメント係数、 E ：ヤング係数、 I_y ：弱

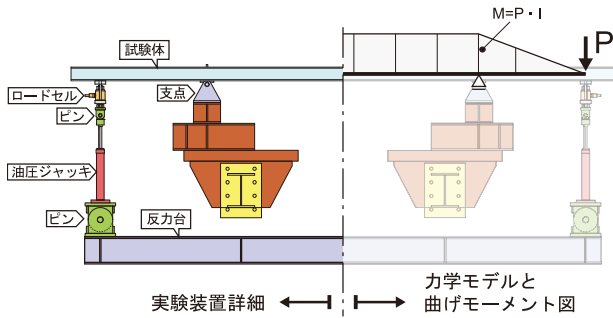


図18 横座屈実験セットアップ

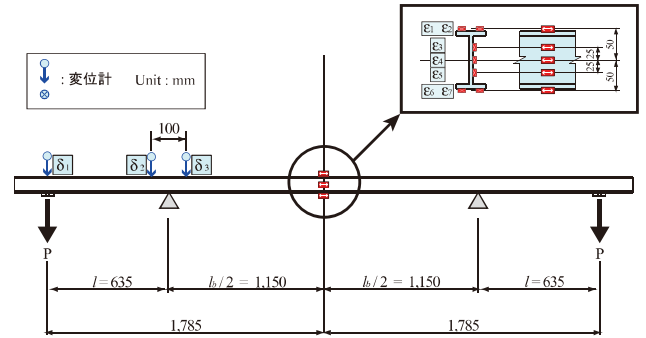


図19 横座屈実験試験体と計測位置

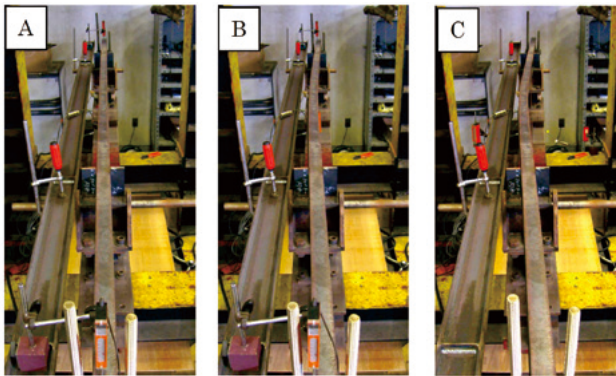


図21 横座屈実験の実験時状況

軸回りの断面 2 次モーメント, G : せん断弾性係数, J : 捩り係数, I_w : 反り係数, l_b : 支点間距離である。

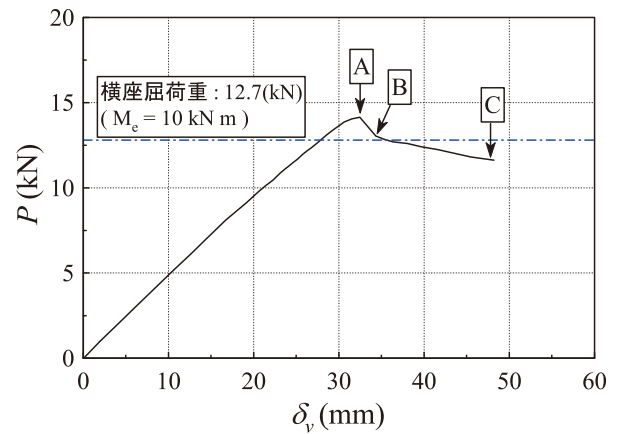
4.3 結果と考察について

実験結果として, 図20(a)に荷重 - 鉛直変位関係, 曲げ - ひずみ関係, 断面高さ方向の垂直ひずみ分布を, 図21に実験時の様子を示す。

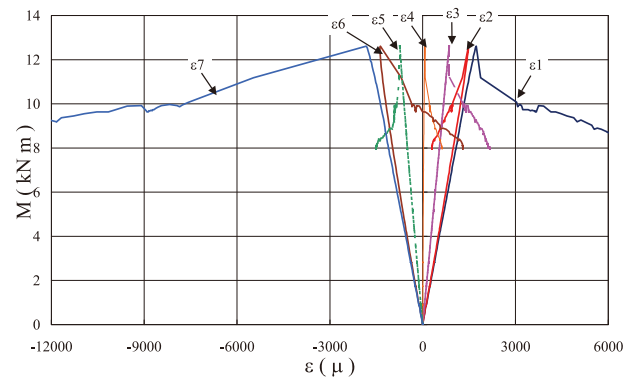
図20(a), 図21より, 横座屈が発生するまでは線形的に抵抗しているが, 横座屈の発生と同時に抵抗力が低下し, その後は劣化勾配を示している。また, 横座屈の発生は圧縮側フランジ (本実験では下フランジ) が大きくたわみ, これに基因した捩れ, 反り変形が生じている。

図20(b) より, 横座屈が発生するまでは線形的かつ断面の高さに比例した値を示しており, 強軸回りにのみ断面の回転が生じていることが読み取れる。しかしながら, 耐力の低下, すなわち横座屈の発生と共に前述の線形性は失われる。これは, 横座屈に伴い反り (弱軸回りの断面の回転) が発生したことに基因しており, 高さが同一の ε_1 と ε_2 の組合せ, ε_6 と ε_7 の組合せが横座屈と共に逆方向に値が進展したことから読み取れる。

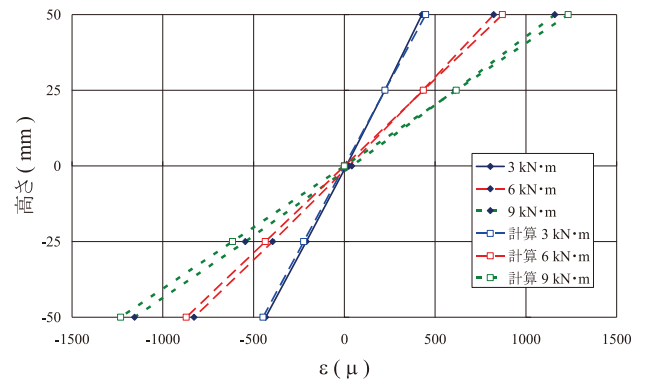
図20(c) より, 弾性範囲のひずみの分布を示しているが, ここからは平面保持の仮定が成立していることが確認できる。鋼材は連続体であり, クラック等も生じないためひずみ分布が読み取りやすく, 固体力学で重要な平面保持の仮定を明確に確認できる。



(a) 荷重 - 鉛直変位関係



(b) 荷重 - ひずみ関係



(c) 断面高さ方向の垂直ひずみ分布

図20 横座屈実験の実験結果

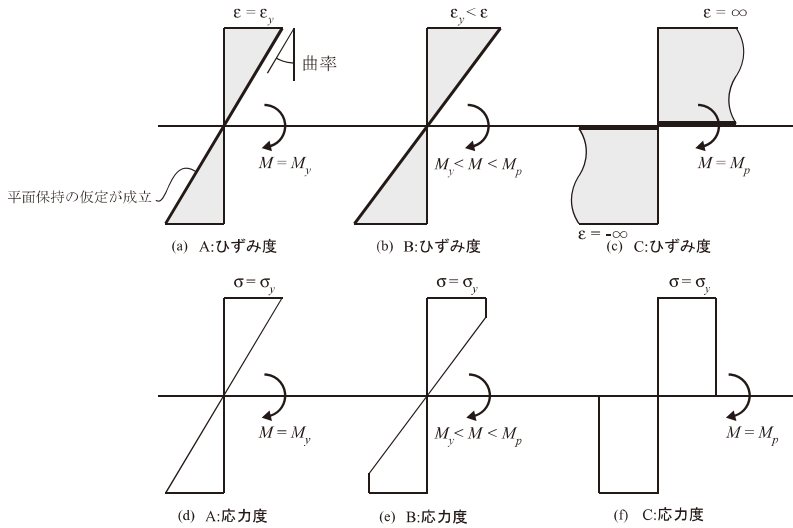


図22 全塑性耐力の仮定

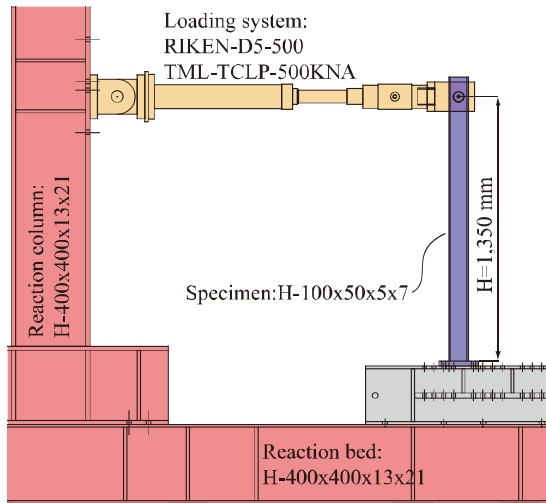


図24 弾塑性繰返し曲げ実験セットアップ

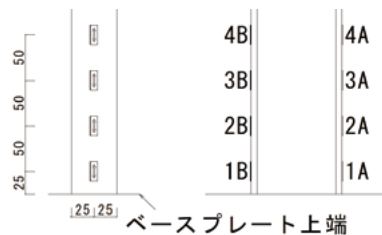


図25 ひずみゲージ設置位置

以上、実際の現象として経験することの少ない横座屈を分析し、かつ横座屈荷重の計算値精度を確認できる。また、平面保持の仮定が成立することを学ぶことができる。

5 H形鋼片持ち柱の弾塑性繰返し载荷実験

部材が曲げ応力を受ける場合、断面内の垂直応力度分布は三角形分布（ひずみ分布と相似）となる。但し弾塑性領域に入ると、鋼材の応力度－ひずみ関係に従い、縁から降伏応力度 σ_Y の領域が広がる（図22、図23参照）。この極限状態を図23中の（c）、（f）と定めて全塑性状態（Full plastic）と呼び、部材が有する曲げ応力の極限值を評価する一手法

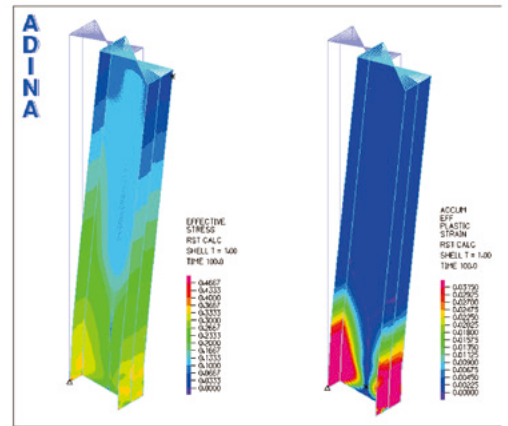
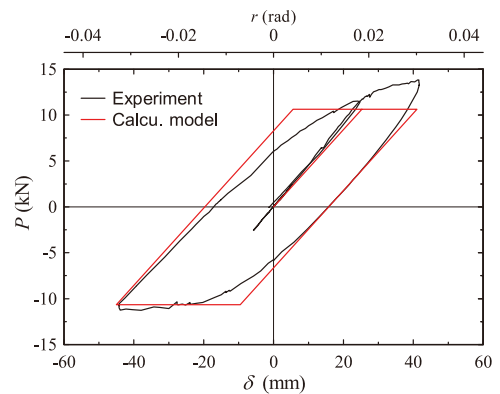
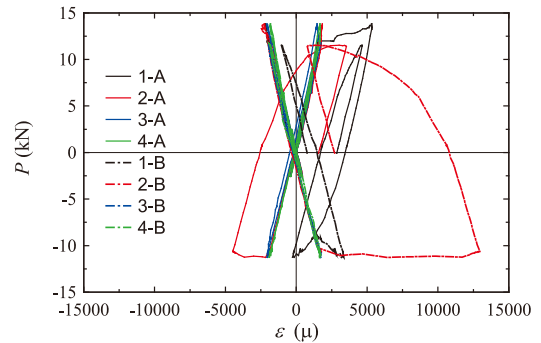


図23 片曲げを受ける場合の応力、塑性ひずみ



(a) 荷重－変形関係



(b) 荷重－ひずみ関係

図26 弾塑性繰返し曲げ実験の実験結果

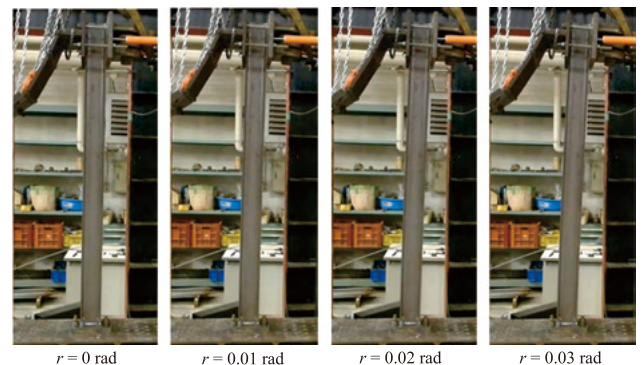


図27 部材角

として広く用いられている。これを全塑性耐力と呼ぶ（但し、中立軸上まで塑性ひずみに到達している必要があるため、物理的挙動としては実現せず、簡易的に極限状態を評価するための略算解である）。

本実験では、H形断面を有する片持ち柱の柱頭部に地震外力を想定した水平外力を与え、繰返し載荷実験を行い、鋼構造部材の弾塑性域の繰返し載荷下の挙動を確認すると共に、上述した全塑性耐力の精度等を追跡する。

5.1 実験方法

試験には図24に示す実験装置を用いる。試験体には、H-100x50x5x7(SN400)を用いて部材長（柱下端から載荷点までの距離）を $H = 1,350\text{mm}$ とする。尚、載荷はH形断面強軸回りに曲げ応力を受ける方向とし、層間変形角 $R = 1/30\text{rad}$ を正負で繰返すものとする。

計測は、水平力 P を水平加力システム内に設置したロードセルを用いて計測、また試験体ベースに設置した計測柱に設置した変位計により水平変位 δ を計測する。また、塑性領域の広がりを確認するため図25に示す位置にひずみゲージを貼付している。

5.2 データ整理法

- i) 荷重 P と鉛直変位 δ_v 、ひずみ ε の関係をグラフにまとめる。
- ii) 以下の式より得られる弾性剛性、全塑性耐力を算出し、グラフ中に計算モデルとして併記する。

$$K = \frac{3EI}{H^3} \quad (3)$$

$$M_p = \left(B \cdot t_f \cdot (H - t_f) + \left(\frac{H}{2} - t_f \right)^2 \cdot t_w \right) \cdot \sigma_y \quad (4)$$

5.3 結果と考察について

実験結果として、図26に荷重－鉛直変位関係、荷重－ひずみ関係を、図27に実験時の様子を示す。

図26(a)より、荷重変形関係は紡錘型を描いており、弾塑性応答時の履歴減衰によるエネルギー吸収を効率良く行えることが分かる。また、計算剛性と実験結果が対応していること、最大値等に乖離はあるものの式(3)、(4)より表現した計算モデルは鋼材の弾塑性挙動を概ね評価できることが分かる。

図26(b)より、下端部（固定端近傍）から降伏領域が広がっていることが読み取れる。図25の(c)、(f)、および

式(4)はこの様な挙動を極単純化して捉えているが、図26(a)の実験結果と計算モデルは対応しており、工学的に実用的な手法であることが読み取れる。

図27より、部材角 $r = 0.01, 0.02, 0.03$ (rad) 時の状況を示している。それぞれの初学者が持つ感覚は統一的ではないが、設計で考える最大層間変形角に据えられることの多い $r = 0.01$ の変形はごく小さく、図9に記した $P-\Delta$ 効果による倒壊を懸念しなければならない $r = 0.03$ の変形は視認できるものの、倒壊を示唆するようなレベルであるとは想像していないというケースが多い。

以上、鋼材の弾塑性領域の変形状態、また極限解析で用いられる全塑性耐力の精度、そして、実際の変形レベルを経験できる。

6 結論

鋼構造の特徴を捉える上で、座屈および鋼材の弾塑性挙動を学ぶための実験実習テーマを提示した。

本論で扱った試験体は全て H-100x50x5x7を用いており、鋼構造建築の主要部材（柱、梁、ブレース等）に用いられるものではないが、いずれも説明すべき現象は明確に現われており、初学者が学ぶ内容としては適当であると考えている。

また、専門の機器を必要とする取組であるため、このようなテーマは構造設計などに従事し既に専門科として活躍されている方であっても経験されていない事例も少なくない。教育機関に従事されており、環境が整備されている方々におかれては、機会があれば大学の枠組みを超えて社会に向けて、実験実習の見学会等を開催いただければ幸いである。

参考文献

- 1) 井上一朗, 吹田啓一郎, 建築鋼構造－その理論と設計－, 鹿島出版会, 2007.12
- 2) 日本建築学会, 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 2010
- 3) 日本建築学会, 構造用教材, 第3版, 2019.8
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人 建築研究所, 2020年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 第3版, 2020.3