

座屈拘束ストラットを断面内側に配置する箱形断面部材の座屈抑制効果に関する研究

松村政秀¹・北田俊行²・高田佳彦³・林 秀侃⁴・谷 一成⁵

¹大阪市立大学大学院工学研究科講師 都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail: m_matsu@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

²大阪市立大学大学院工学研究科教授 都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail: kitada@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

³阪神高速道路株式会社 技術管理室 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

E-mail: yoshihiko-takada@hanshin-exp.co.jp

⁴(株)栗本鐵工所顧問 (〒550-8580 大阪市西区北堀江1-12-19)

E-mail: hi_hayashi@kurimoto.co.jp

⁵高田機工(株)設計部設計課 (〒556-0011 大阪市浪速区難波中2-10-70)

E-mail: k_tani@takadakiko.co.jp

地震時における地震エネルギーの吸収と構造物の減衰付加とを目的として、ブレース材は建築分野で幅広く用いられ、近年では土木構造物への適用も見られる。ここで、鋼製橋脚に代表される薄肉箱形断面部材は、過大な地震力を受け構成補剛板パネル全体の座屈変形が発生すると、急激に耐荷力を失い変形性能がなくなることが指摘されている。本研究では、薄肉補剛箱形断面部材の補剛板パネル全体の座屈変形を防止する簡易な方法として、縦補剛材を利用して箱形断面の内側に座屈拘束ストラットを設置し、対面の補剛板パネルを繋ぐ方法を提案している。この補剛箱形断面部材を対象とした座屈拘束ストラットの設置効果を弾塑性有限変位解析および載荷実験を実施し明らかにしている。

Key Words : *buckling restrained struts, stiffened plate, buckling, elasto-plastic finite displacement analysis, loading test*

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、補剛板構造からなる箱形断面鋼製橋脚の強地震に対する耐震性に関する研究が進められ、十分な変形性能を確保するためには、以下の2つの方法が薦められている。すなわち、ダイヤフラムを設置して確実に密閉できる状態でコンクリートを充填する方法、およびコンクリートの充填が強度上昇等の関係で不適切な場合には、従来に比べ板厚の厚い鋼板と剛性の大きい補剛材とを使用し補剛板の弾性座屈強度を高める方法である¹⁾⁵⁾。後者の場合で、既設鋼製橋脚の柱部材に対する耐震補強には、補剛板パネル全体が座屈する耐震上不利な座屈モードを、縦補剛材位置が節となるモードへと改善するため、縦補剛材を補剛、あるいは横補剛材やダイヤフラムを追加・設置する方法が採用されてきた。

一方、建築分野では、強地震による構造物の大きな損傷を防止し変形性能を向上させるべく、ブレース材がラーメン構造の高層ビルなどに幅広く用いられている^{6),7)}。

このようなブレース材の土木構造物への適用も始まっている⁹⁾。

このような状況のもと、本研究では、補剛箱形断面部材の内側に、縦補剛材を追加・設置したり、ダイヤフラムを密に配置するよりも容易に補剛板パネル全体の座屈変形の発生を防止できる方法として、縦補剛材を利用して座屈拘束ストラットを箱断面内側に設置し、対面の補剛板パネルを繋ぐ方法を考案している。この方法のメリットは、補剛板パネル全体の座屈変形の発生を防止できること、鋼断面を鋼部材のみで補強できること、コンクリートを充填する場合よりも補強に伴う柱基部への作用力の上昇を抑制できること、が挙げられる。また、鋼製柱部材の内側にストラットを設置する方法は、無補剛の箱形断面柱部材を対象とした研究^{9),10)}は見られるが、補剛板構造を対象とした研究はほとんど実施されていない。

文献 11) では、フランジ・プレートに1本の縦補剛材を有する補剛箱形断面部材を対象として、座屈拘束ストラットを設置する有用性を数値解析により検討してい

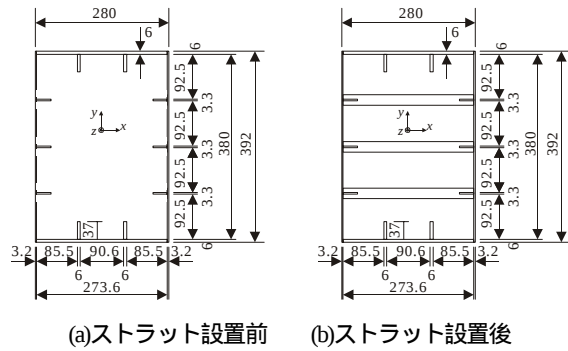


図-1 座屈拘束ストラットの設置 (寸法単位: mm)

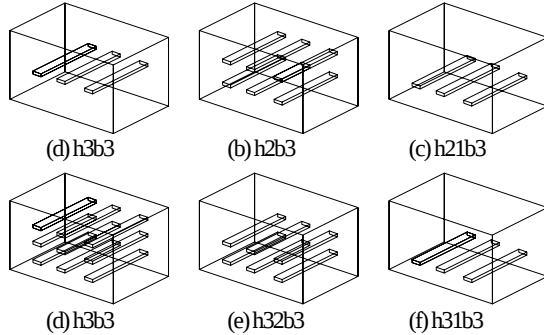


図-2 基部ダイアフラム間のストラットの配置パターン

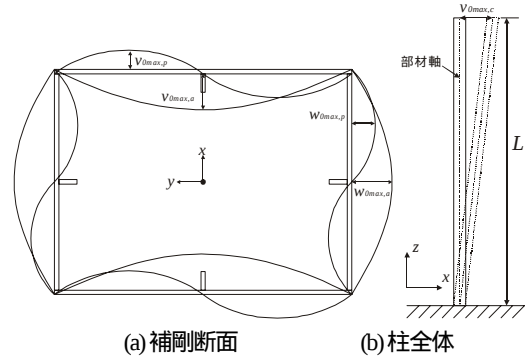


図-3 解析に用いた初期たわみの形状

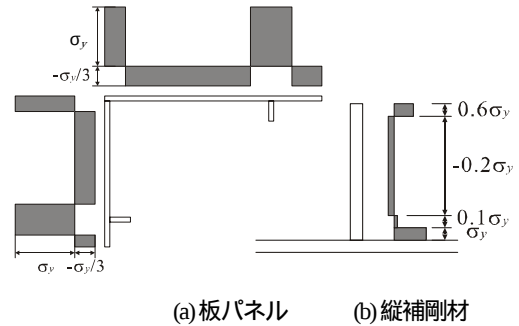


図-4 解析に用いた残留応力の分布形状

る。

その結果、座屈拘束ストラットの設置が、繰返し荷重が作用する場合にも柱部材の変形性能の向上に有効であり、初期曲げ剛性に及ぼす影響は小さく、ダイアフラムを設置する場合と同様な設置効果が得られることを明らかにしている。

そこで、本研究では、まず、複数の縦補剛材を有する補剛箱形断面に対する座屈拘束ストラットの設置効果に関する基礎的な資料を得るため数値解析を実施する。また、数値解析の結果を参考にして、座屈拘束ストラット自体が変形しないような座屈拘束ストラットの断面を決定し載荷実験に用いる。つぎに、解析モデルでは再現できない挙動を曲げ載荷実験および繰返し載荷実験により検討し、座屈拘束ストラットの有用性を明らかにしている。

2. 解析による座屈拘束ストラットの設置効果に関する検討

(1) 解析モデルおよび解析条件

解析モデルは、過去に実施した載荷実験¹²⁾を参考に、幅 392 mm のフランジ・プレートに 3 本、幅 280 mm のウェブ・プレートに 2 本の縦補剛材を有する補剛断面を有し、柱高さ L が 1,600 mm で、ダイアフラムが基部から 320 mm ($L/5$ の高さ) に設置されている柱部材を対象とする。ただし、実験供試体基部に充填された中埋めコ

ンクリートは、モデル化していない。

解析モデルの断面を図-1 に示す。要素分割は、基部付近では、座屈変形を精度よくシミュレートできるように縦補剛材間を 8 分割 (高さ $0 \sim 2L/5$ の間)、上部では縦補剛材間を 4 分割している。また、縦補剛材には、梁・柱要素を用い、それ以外はすべて 3 節点 3 角形板要素を用いている。

初期不整には、文献 13) を参考にして、初期たわみおよび残留応力を考慮した。初期たわみには、図-3 に示すように、縦補剛材間の板パネルの初期たわみ (式(1)参照)、補剛板パネル全体の初期たわみ (式(2)参照)、および柱全体としての初期たわみ (式(3)参照) とを考慮し、それらを足し合わせた初期たわみ波形を考慮した。また、残留応力の分布形状は、図-4 に示すとおりとした。

a. 補剛板パネル全体の初期たわみ波形

$$w_l = \frac{a}{1,000} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{B}\right) \quad (1)$$

b. 縦補剛材間の板パネルの初期たわみ波形

$$w_g = \frac{B/n}{150} \cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi z}{B}\right) \quad (2)$$

c. 柱全体の初期たわみ

$$v_o = \frac{L}{1,000} \sin\left(\frac{\pi z}{2L}\right) \quad (3)$$

ここに、 a : ダイアフラム間隔、 B : 補剛板の幅、 n : 縦補剛材に囲まれる板パネルの数、 L : 橋脚高さ

表-1 解析モデルの内訳

	座屈拘束ストラットによるダイアフラム間の分割数				
	2分割		3分割		4分割
	全体	基部のみ	全体	基部から2箇所	基部のみ
解析モデル名	h1b3	h2b3	h21b3	h3b3	h31b3
ストラットの本数	3	6	3	9	6

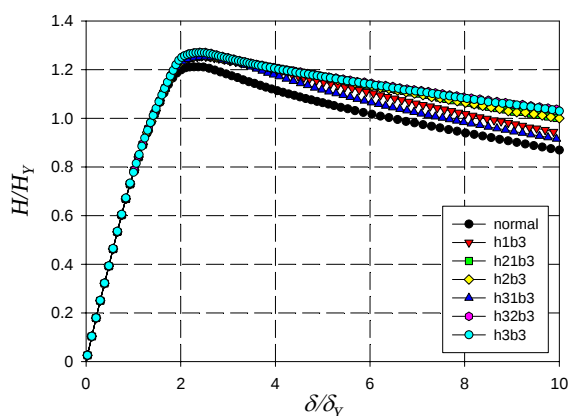


図-5 水平荷重-水平変位関係（一方向載荷）

座屈拘束ストラットは、図-1(b)に示すように、両フランジ・プレートの縦補剛材間を繋ぐように設置し、図-2に示すように、基部ダイアフラム間を2～4分割して配置する6つの解析モデルを設定した。解析モデルの内訳を表-1に示す。なお、座屈拘束ストラットの断面は、文献11)で得た知見に基づいて、座屈拘束ストラット自体が座屈しないように、板幅20mm×板厚 t はフランジ・プレートの板厚の3倍の平鋼とした。また、座屈拘束ストラットは、縦補剛材の座屈変形を拘束できるように、縦補剛材と十字をなす方向に設置する。

なお、解析は、鉛直方向に上部構造の死荷重を想定して、鋼断面の全塑性軸方向力の11%を導入した状態で、基部を完全固定とした柱の頂部に一方向水平変位を漸増させる。解析には、解析プログラムUSSP¹⁴⁾を用いた。

(2) 解析結果

a) 水平荷重-水平変位関係

図-5には、柱頂部における水平荷重-水平変位関係を示す。縦軸は水平荷重 H を降伏水平荷重 H_Y で、横軸は水平変位 δ を降伏水平変位 δ_Y で除して無次元化している。図-5より、箱断面内側へのストラットを設置すると、柱部材の耐力、および曲げ剛性の向上にはほとんど影響を及ぼさず、終局荷重以降の強度低下が緩和されていることが確認出来る。

解析モデルh32b3とh3b3、およびh21b3とh2b3を比較すると、水平荷重-水平変位関係にあまり差異が認められない。すなわち、文献11)で得られた結果と同様に、曲げモーメント勾配の影響により、基部に近い板パネルに

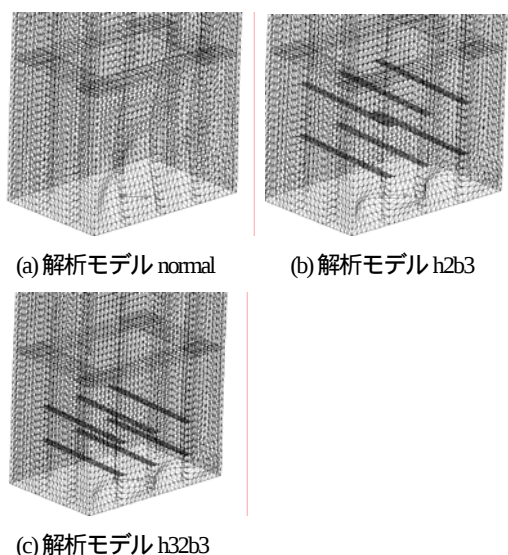


図-6 変形状況（ δ_{95} の時、変形倍率3倍）

座屈変形が発生するため、高さ方向にストラットを複数層設置する効果は少ないと考えられる。

b) 変形状況

図-6には、終局水平荷重以降で荷重が終局時から95%まで低下したときの水平変位 δ_{95} のときにおける断面の変形状況を示す。変位倍率は3倍である。同図より、ストラットの設置パターンにより発生する座屈変形モードが異なることが確認できる。座屈拘束ストラットを設置していない解析モデルnormalでは、補剛板全体が座屈変形している。一方、座屈拘束ストラットを設置した解析モデルh2b3では基部近傍、h32b3では基部近傍で2層目まで、板パネルの局部座屈のみが発生し、補剛板全体の座屈変形は発生していない。

以上から、座屈拘束ストラットを、今回設定した6つの解析モデルの中では、例えば解析モデルh2b3のように適切に設置すると、終局状態においても補剛板パネル全体の座屈変形は発生せず、縦補剛材間の板パネルの座屈変形のみ限定できる。また、ストラットの設置が、柱部材の耐力力、および曲げ剛性に及ぼす影響はほとんど認められない。

そこで、以下では、前述の解析モデルでは再現できない挙動を検討するため、縦補剛材を有する梁、および柱部材を対象として、曲げ載荷実験、および繰返し載荷実験により、座屈拘束ストラットの設置効果を検討する。

3. 実験供試体の製作材料

(1) 鋼材の機械的性質

実験供試体の製作には、実構造物に用いる厚板鋼板と同様に、明確な降伏棚を有する鋼材を用いて、実験供試体を製作するため、公称板厚 6 mm の降伏棚を有する厚板鋼板（SM400 材），および 6 mm 鋼板から切削加工を施した板厚 3.2 mm の鋼板を用いた．各実験供試体の製作に用いた鋼材の機械的性質を調べるために，各使用鋼板から引張試験片（JIS 規格の 5 号試験片）をロール方向に 3 本ずつ切り出し，引張試験を実施した．

表-2 には，引張試験から得られた鋼材の機械的性質（平均値）を示す．図-7 には，引張試験結果より得られた応力-ひずみ関係の一例を示す．なお，図中の No.1 は漸増繰返し水平変位載荷実験¹²⁾，No.2 は後述する曲げ載荷実験，No.3 は後述する漸増繰返し水平変位載荷実験，そして，No.4 は漸増繰返し水平変位載荷実験に用いた実験供試体の箱断面内側に設けたストラット（ $\phi=22\text{mm}$ の丸鋼）の製作に使用した鋼材であることを示す．

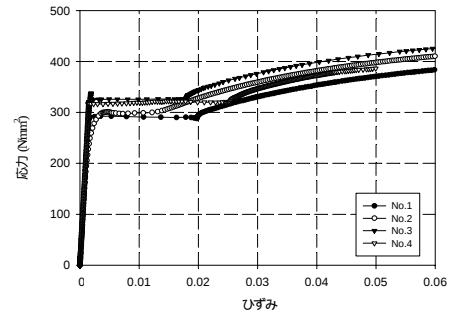


図-7 応力-ひずみ関係の一例

表-2 使用鋼板の機械的性質

試験片 No.	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比 μ_s	伸び率 (%)
No.1	288.5	436.2	1.90×10^5	0.283	40.7
No.2	304.9	459.6	2.00×10^5	0.278	42.3
No.3	336.5	477.8	1.98×10^5	0.278	38.9
No.4	320.7	465.2	2.10×10^5	0.297	22.7

表-3 コンクリートの材料試験結果

(a) 実験供試体 CEO-L/5

材令 日	圧縮強度 σ_{ck} N/mm ²	ヤング係数 E_c N/mm ²	ポアソン比	引張強度 σ_{ct} N/mm ²
7	15.6	1.99×10^4	0.175	1.52
28	23.5	2.23×10^4	0.186	1.88
34*	22.1	2.23×10^4	0.206	1.94

表中*は実験供試体 CEO-L/5 の実験実施日

(b) 実験供試体 CEO-L/5-B

材令 (日)	圧縮強度 σ_{ck} (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	ポアソン比 μ_c	引張強度 σ_{ct} (N/mm ²)
7**	21.0	2.22×10^4	0.182	-
14	24.60	2.53×10^4	0.180	2.06
28	25.4	2.52×10^4	0.196	2.32

表中**は実験供試体 CEO-L/5-B の実験実施日

表-4 各種座屈パラメータ

供試体名	R_R	R_F	R_S	γ/γ_s^*	$\bar{\lambda}$
t3.2-01 t3.2-02	0.595	0.583	0.434	1.100	-
CEO-L/5	0.619	0.484	0.605	1.849	0.395
CEO-L/5-B	0.631	0.494	0.598	1.731	0.402

(2) コンクリートの材料試験

繰返し載荷実験に用いた実験供試体にはコンクリートを充填した．コンクリートには，早強コンクリートを用い，圧縮強度 σ_{ck} およびスランプは，それぞれ 18N/mm^2 および 15 cm を目標とした．コンクリート強度の時間的な推移を調べるために，標準である打設後 7 日目，28 日目，および各実験供試体の載荷日に，圧縮強度試験および引張強度試験を行った．

表-3 には，コンクリートの材料試験結果を示す．材料試験結果は，各材令における 3 体の試験結果から得られた諸数値を平均したものである．各載荷実験の実施日には，実験供試体に用いたコンクリートの圧縮強度は，目標とした圧縮強度を上回っていることを確認した．

4. 実験供試体の概要

曲げ載荷実験および繰返し載荷実験に用いる実験供試体は，箱形断面部材の耐荷力に著しい影響を与えると考えられる以下の座屈パラメータ，縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ R_R ，補剛板パネル全体の幅厚比パラメータ R_F ，縦補剛材の板としての幅厚比パラメータ R_S ，および縦補剛材剛比 γ/γ_s^* を考慮して設計した．

表-4 には，各実験供試体の座屈パラメータの値をまとめて示す．同表に示すように，無補剛断面モデルでは幅厚比パラメータ R_R が 0.65，補剛断面モデルでは板パ

ネルの幅厚比パラメータ R_R ，および補剛板パネル全体の幅厚比パラメータ R_F が約 0.6，縦補剛材剛比パラメータ γ/γ_s^* が 1.1 であり，文献 15) にしたがうと変形性能が不足している断面である．

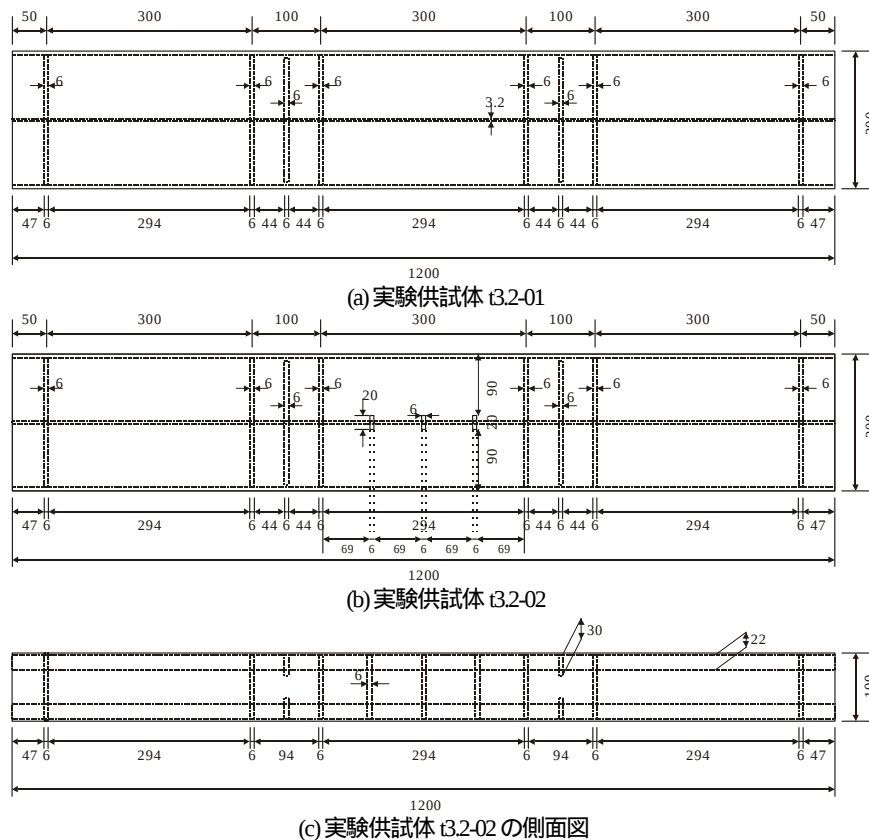


図-8 実験供試体の概要（曲げ載荷実験，寸法単位：mm）

(1) 曲げ載荷実験に用いる実験供試体

箱形断面梁部材に対する座屈拘束ストラットの設置効果を検討するために，図-8 および図-9 に示すフランジ・プレートに 1 本の縦補剛材を有する薄肉補剛断面梁を対象とする．2 体の実験供試体を製作し，4 点曲げ載荷試験を行う．載荷点間 460 mm であり，断面の外寸は 200×100 mm で，フランジ・プレートの板厚は 3.2 mm，ウェブ・プレートの板厚は 6 mm である．なお，実験供試体 t3.2-02 の内部には，20×88×6 mm の平鋼板からなる座屈拘束ストラットを断面中央に計 3 箇所配置している．ストラットの形状寸法は，ストラットには軸方向力のみ発生すると仮定し，FEM 解析で算出したパネ定数¹¹⁾を参考に，ストラットが座屈しないよう十分な剛性を有するストラット断面を設計した．

(2) 漸増繰返し水平変位載荷実験に用いる実験供試体
一定な軸方向荷重を載荷した状態で，繰返し水平変位を漸増させる漸増繰返し水平変位載荷実験には，高さ約 8 m，断面寸法約 2×1.4 m の箱形断面の T 型鋼製橋脚柱を対象とし，その約 1/5 の縮小模型である図-10 に示す 2 体の実験供試体を用いた（柱の断面図は図-1 参照）．

また，実験供試体には，橋脚高さ L (L : 橋脚下端から水平荷重の作用位置までの距離) の 1/5 までコンクリートを充填した．

実験供試体 CEO-L/5-B には，充填コンクリートの直上

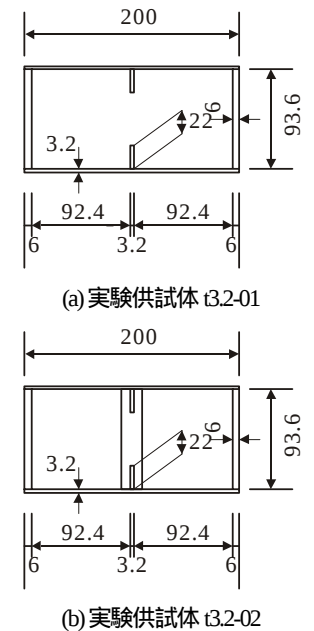


図-9 実験供試体の断面図
（曲げ載荷実験，寸法単位：mm）

の鋼断面に，高さ方向にはダイアフラム間を 3 等分する位置で縦補剛材間を連結するように，2 章および文献 11) の結果を参考にして座屈拘束ストラット自体が座屈しないような断面を有する座屈拘束ストラット（φ 22 mm の丸鋼）を設置している．座屈拘束ストラットの設

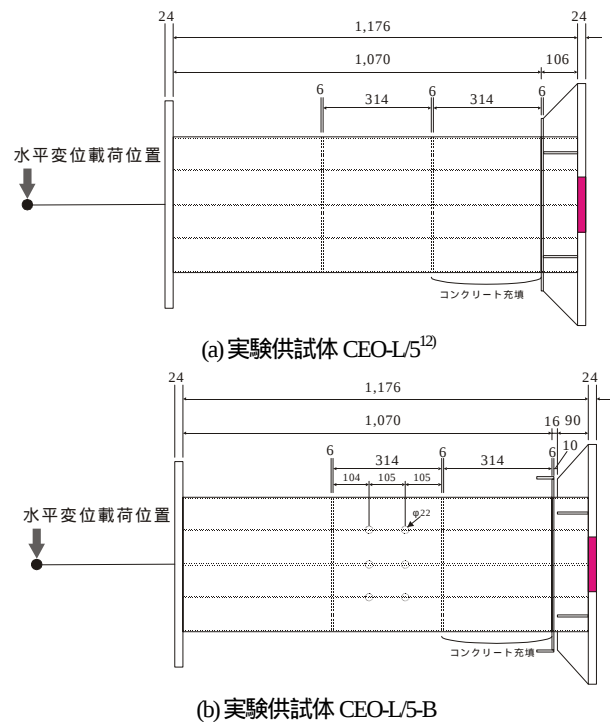


図-10 実験供試体の概要
（漸増繰返し水平変位載荷実験，寸法単位：mm）



(a) 実験供試体 t3.2-01



(b) 実験供試体 t3.2-02

図-11 曲げ載荷実験終了後の崩壊状況

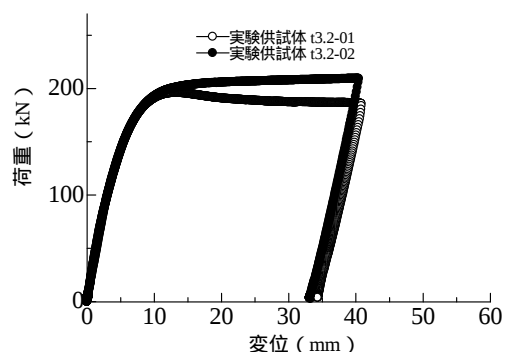


図-12 荷重-変位関係 (t3.2-01 および t3.2-02)

表-5 最大荷重および初期曲げ剛度の比較

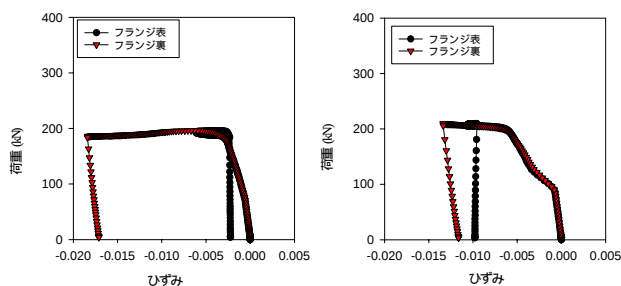
実験供試体 No.	最大荷重 P_u		最大荷重時の変位 δ_u		曲げ剛度 (kN/mm)
	(kN)	P_u/P_Y	(mm)	δ_u/δ_Y	
t3.2-01	195.97	1.20	13.19	2.62	33.71
t3.2-02	209.35	1.28	40.23	7.99	33.56

置効果は、コンクリートを $L/5$ まで充填した鋼断面供試体 CEO-L/5¹²⁾を基準にして考察する。

5. 曲げ載荷実験

(1) 実験終了後の崩壊状況

図-11 には、実験終了後の崩壊状況を示す。座屈拘束ストラットを設置しない実験供試体 t3.2-01 には、補剛板パネル全体の座屈変形が生じている。一方、座屈拘束ストラットを配置した t3.2-02 には、補剛板パネル全体の座屈変形の発生は観察されず、ストラットの設置位置、および縦補剛材を節とした縦補剛材間の板パネルの座屈が



(a) 実験供試体 t3.2-01

(b) 実験供試体 t3.2-02

図-13 荷重-ひずみ関係 (スパン中央断面圧縮フランジ)

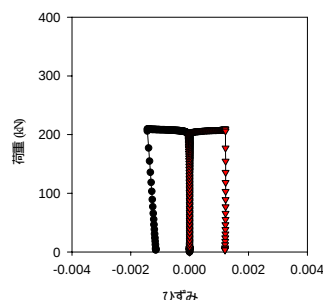


図-14 荷重-ひずみ関係

(実験供試体 t3.2-02, ストラット中央)

発生している。

(2) 水平荷重-水平変位関係

図-12 には、各実験供試体の荷重-変位関係を示す。縦軸は載荷荷重 P を降伏荷重 P_Y で、横軸は鉛直変位 δ を降伏変位 δ_Y で除している。表-5 には、最大荷重、および初期剛度を示す。初期剛度は、低荷重領域における荷重-変位関係に対し最小二乗法を適用して算出した。

図-12 によると、座屈拘束ストラットを配置した実験供試体 t3.2-02 は、実験供試体 t3.2-01 と比較して曲げ耐力が 6%向上し、実験終了時までほとんど耐力の低下が認められないことがわかる。これは、実験供試体 t3.2-01 では、降伏荷重以降で、圧縮フランジに座屈変形が発生したのに対して、座屈拘束ストラットを配置した実験供試体 t3.2-02 では、補剛板パネル全体の座屈変形は発生しなかったためである。また、座屈拘束ストラットを設置しても、断面が降伏するまで曲げ剛度にほとんど影響を及ぼさないことが確認できる。

(3) 板パネルおよび座屈拘束ストラットの変形

図-13 には、スパン中央断面の圧縮を受けるフランジ・プレートの縦補剛材間の板パネル中央の表裏に貼付したひずみゲージにより計測したひずみと載荷荷重との関係を示す。同図より、ストラットを設置しない実験供試体 t3.2-01 は、最大荷重時に座屈が生じている。一方、ストラットを配置した実験供試体 t3.2-02 では載荷終了時までほとんど座屈が発生していないことが確認できる。

図-14 には、荷重と実験供試体 t3.2-02 のスパン中央に配置したストラットのひずみとの関係を示す。同図によると、最大荷重付近までストラットにはほとんど変形が発生せず、梁全体の変形が大きくなると、降伏ひずみを若干上回るひずみを計測していることがわかる。

以上より、座屈拘束ストラットは、補剛板パネル全体の座屈変形発生抑制に効果的であり、ストラットの設置が曲げ剛度に及ぼす影響も小さいことがわかる。

6. 漸増繰返し水平変位載荷実験

(1) 載荷方法

図-15 に示すように、最大荷重 1,000 kN の定荷重油圧ジャッキを水平方向に、最大荷重 500 kN でストローク ±15 cm のアクチュエーターを鉛直方向に設置し、それぞれ独立に、または同時に載荷できるように設計されている実験装置を用いた。実験供試体は、横向きの状態で設置されているため、それぞれ水平荷重を実験供試体に対する軸方向圧縮力、また鉛直変位を漸増繰返し水平変位として載荷する。なお、実験供試体は、基部が固定支持され（実際には、載荷フレームが弾性変形するため、弾性支持となる）、頂部を円筒ベアリングによるピン結合としている。

載荷方法としては、まず、上部構造の死荷重を想定して作用軸方向圧縮力 N として鋼断面の全塑性軸方向圧縮力の 11 % を導入した。つぎに実験供試体頂部には、地震変位を想定し、 $\pm n\delta_Y$ ($n=1, 2, \dots$) となるように降伏水平変位 δ_Y を基準に、水平変位マイナス側から繰返し漸増させて、耐荷力の低下が確認できるまで載荷した。 δ_Y は、基部に充填したコンクリートを無視し、鋼断面のみと仮定して以下の式(4)を用いて算出した。ここで、実験供試体 CEO-L/5-B では、実験供試体基部に図-16 に示す測定用枠を供試体基部に取り付け、実験供試体基部の剛体変形を取り除いた δ_Y を計測している。実験供試体 CEO-L/5 では、実験の実施に先立って、弾性範囲（±30 kN）における繰返し水平荷重を 3 回載荷する弾性実験を行い、そのデータを参照して、実験供試体基部の剛体水平変位を含む δ_Y を実験的に算出している。そのため、両実験供試体で載荷方法が若干異なる。

$$\delta_Y = \frac{H_Y L^3}{3EI} \quad (4)$$

$$H_Y = \left(\sigma_Y - \frac{N}{A} \right) \frac{W}{L} \quad (5)$$

ここに、 δ_Y ：制御に用いた降伏水平変位、 EI ：曲げ剛性、 L ：供試体高さ（1,600 mm）、 H_Y ：降伏水平荷重、 σ_Y ：降伏応力、 N ：導入した軸方向圧縮力（ $N=0.11 \sigma$

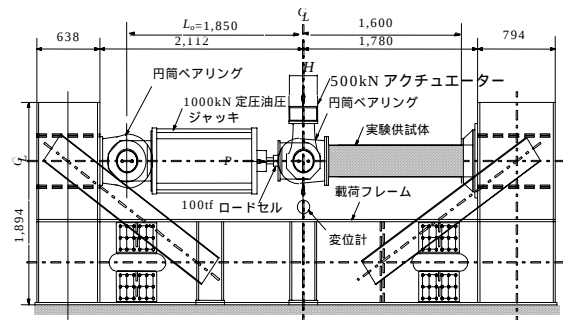


図-15 載荷装置の概要 (寸法単位: mm)

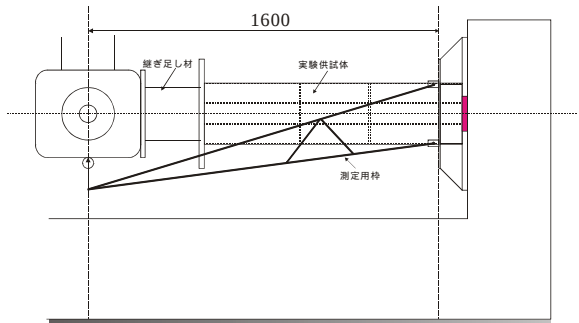


図-16 水平変位の計測方法 (寸法単位: mm)

σ_A)、 A ：鋼断面のみの断面積、 W ：鋼断面の断面定数

また、この載荷装置では、水平荷重 H による水平変位 δ が大きくなると、軸方向圧縮力 N の鉛直方向成分 $N \cdot \sin(\delta / L_0)$ (L_0 : 1,000 kN 定圧ジャッキの固定間距離) が、水平荷重 H に加算され、この影響が無視できなくなる。以下では、この影響を補正した値で評価している。

(2) 実験終了後の実験供試体の崩壊状況

図-17 には、載荷終了後、作用水平荷重をゼロまで戻した状況における崩壊状況を示す。

実験供試体 CEO-L/5 では、図-17(a)に示すように、供試体高さの $L/5$ までの充填コンクリート直上に位置する鋼断面に補剛板パネル全体の座屈が発生した。コンクリートを充填した柱基部には座屈は発生しなかった。

実験供試体 CEO-L/5-B では、充填コンクリート上部のダイアフラムと1段目のストラットとの間の縦補剛材間の板パネルに局部座屈が発生し、この箇所が主たる塑性化区間となり板パネルの座屈変形が進行していった。+4 δ_Y に向かう途中 3 δ_Y 付近で、ストラットを配置した鋼断面において、縦補剛材間の板パネルに目視できる程度の局部座屈変形が発生した。+6 δ_Y になると、座屈波形がさらに大きくなり、ウェブ・プレートのコナ部に近い縦補剛材間の板パネルにも局部座屈変形が発生した。しかしながら、実験供試体 CEO-L/5 で見られた補剛板パネル全体の座屈は認められなかった（図-17(a)参照）。

以上より、座屈拘束ストラットを箱断面内側に設けることによって、不利な変形モードである補剛板パネル全体の座屈変形モードから、ストラット設置位置付近の縦



(a) 実験供試体 CEO-L/5



(b) 実験供試体 CEO-L/5-B

図-17 漸増繰返し水平変位載荷実験終了後の崩壊状況

補剛材間の板パネルの局部座屈変形モードへ移行できることがわかった。また、今回の実験では、座屈拘束ストラットに座屈等の変形は認められなかった。

(3) 水平荷重-水平変位関係

図-18 には、水平荷重-水平変位曲線を示す。縦軸は降伏水平荷重 H_Y で、横軸は降伏水平変位 δ_Y で、それぞれ、無次元化している。表-6 には、図-18 から得られた塑性率 μ_u 、 μ_{95} 、ならびに終局強度を比較して示す。塑性率 μ_u および μ_{95} は、終局水平荷重時の水平変位 δ_u 、および終局水平荷重以降で荷重が終局時から 95 %まで低下したときの水平変位を、それぞれ、降伏水平変位 δ_Y で除して算出している。

コンクリートを柱高さ L の 1/5 まで充填した実験供試体 CEO-L/5 は、補剛板パネル全体の座屈変形が発生したため、繰返し変位を初めに与えた変位マイナス側では、塑性率 μ_u は 3.52、 μ_{95} は 4.73 ($=1.34\mu_u$) であった。

実験供試体 CEO-L/5 に座屈拘束ストラットを追加した実験供試体 CEO-L/5-B では、塑性率 μ_u は 2.95 とやや低下したが、 μ_{95} は 4.24 ($=1.44\mu_u$) となった。また、終局強度は、ストラットを設置する場合が設置しない場合よりも、変位マイナス側で約 16 %低下している。これは、発生する座屈変形モードの違いによって、ストラットを設置した CEO-L/5-B では充填コンクリート直上の鋼断面

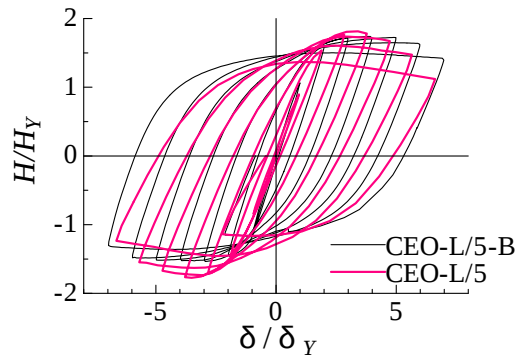


図-18 作用水平荷重-水平変位関係

表-6 塑性率および終局強度

供試体名	μ_u	μ_{95}	μ_u	μ_{95}	H_u/H_Y		M_Y (kN・m)	δ_Y (mm)
	$\delta < 0$		$\delta > 0$		$\delta < 0$	$\delta > 0$		
CEO-L/5	-3.52	-4.73	3.41	4.39	-1.83	1.86	156.7	10.26
CEO-L/5-B	-2.95	-4.24	3.92	4.98	-1.53	1.73	169.8	9.22

が、ストラットを設置しない CEO-L/5 ではコンクリート充填断面の上方の断面が強度を決定する断面となるためである。また、今回設定した座屈拘束ストラットの配置パターンでは、座屈損傷がストラットを配置した断面区間に集中したものの、最大荷重後の耐荷力の低下は、ストラットを設置する方が緩やかであることが確認できる。

今後、より適切なストラットの配置位置やストラットを変形させる方法など、改善の余地は残しているものの、座屈拘束ストラットの設置は、耐荷力の上昇を伴わずに補剛板の座屈変形モードが改善できるとともに、耐荷力の急激な低下の防止に有効であることがわかった。

7. まとめ

本研究では、薄肉補剛板構造からなる箱形断面部材の耐荷力と変形性能に著しい影響を及ぼすと考えられる補剛板パネル全体の座屈変形モードの発生を防止することを目的として、座屈拘束ストラットを縦補剛材位置で両フランジ・プレートを繋いで設置する方法を提案した。このストラットの有効性を、数値解析、曲げ載荷実験、および繰返し載荷実験により検討した。得られた結果は以下の通りまとめられる。

- 1) 一方向に水平変位を漸増させる単調載荷解析の結果、座屈拘束ストラットを設置すると、補剛板パネル全体の座屈変形が防止でき、縦補剛材間の板パネルの座屈変形のみ限定できることがわかった。また、ストラットの設置が、柱部材の耐荷力および曲げ剛性に及ぼす影響はほとんど認められなかった。
- 2) 薄肉補剛箱形断面梁を用いた曲げ載荷実験からも、

座屈拘束ストラットは、補剛板パネル全体の座屈変形発生の抑制に効果的であり、ストラットの設置が曲げ剛性に及ぼす影響は小さいことがわかった。

- 3) 複数の縦補剛材を有する薄肉補剛箱形断面柱に、繰返し水平変位を漸増させる繰返し載荷実験の結果、座屈拘束ストラットを設置すると、耐力力の上昇を伴わずに補剛板の座屈変形モードが改善できるとともに、耐力力の急激な低下の防止に効果が認められることがわかった。これは、不利な変形モードである補剛板パネル全体の座屈変形からストラット設置位置付近の縦補剛材間の板パネルの局部座屈変形へ移行できるためであることが確認できた。なお、今回の実験では、座屈拘束ストラットに変形は認められなかった。
- 4) 座屈拘束ストラットの設置は、耐力力の上昇を伴わずに補剛板の座屈変形モードが改善できるとともに、耐力力の急激な低下の防止に有効であることがわかった。

本研究では、数値解析において、縦補剛材は梁 - 柱要素によりモデル化した。より正確な座屈拘束ストラットの設置効果の評価に必要な、板要素を用いて縦補剛材のモデル化し、さらに繰返し荷重が作用する場合を対象とした数値解析の実施が必要であり、今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，1996年7月。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，鋼橋編，2002年3月。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，耐震設計編，2002年3月。
- 4) 北田俊行，中井 博，中西克佳：鋼製箱形断面を有する橋脚柱の耐震性向上法に関する実験的研究，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.219-232，1998年4月。
- 5) 中井 博，北田俊行，中西克佳，渡邊浩延：薄肉補剛箱形断面を有する鋼製・合成橋脚柱の耐力力と変形性能に関する研究，構造工学論文集，Vol.43A，土木学会，

pp.1355-1366，1997年3月。

- 6) たとえば，武田寿一，竹本 清，高橋泰彦：新しい鉄骨ブレース，建築技術，1972年6月。
- 7) 藤本盛久，和田 章，佐伯英一郎，渡辺 厚，人見泰義：鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究，構造工学論文集，Vol.34B，日本建築学会，pp.249-258，1988年3月。
- 8) 松本信之，岡野素之，在田浩之，曾我部正道，涌井 一，大内 一，高橋泰彦：鋼製ダンパー・ブレースを有するRC鉄道高架橋の耐震性能，構造工学論文集，Vol.45A，土木学会，pp.1411-1422，1999年3月。
- 9) H.L. Hsu, J.L. Juang: Performance of thin-walled box columns strengthened with internal braces, Thin-Walled Structure, Vol.37, pp.241-258, 2000.
- 10) 松村新也，原岡雅史，岩坪 要，山尾敏孝：十字型補剛壁を有する鋼製橋脚の耐震性能に関する研究，構造工学論文集，Vol.47A，土木学会，pp.809-818，2001年3月。
- 11) 松村政秀，北田俊行，谷 一成，林 秀侃：ストラットを断面内側に配置する矩形断面柱部材の座屈抑制効果に関する基礎的研究，土木学会地震工学論文集，Vol.27，CD-ROM(8ページ)，土木学会，2003.12。
- 12) 松村政秀，北田俊行，澤登善誠，中原嘉郎：無充填区間を有するコンクリート充填工法による既設鋼製橋脚の耐震補強法に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.35-44，土木学会，2001.3。
- 13) 小松定夫，牛尾正之，北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第265号，pp.25-35，1977年5月。
- 14) USSP研究会：USSPユーザーズ・マニュアル，理論編，Ver.3.0，日本構研情報（株），1996年10月。
- 15) 阪神高速道路公団：既設鋼製橋脚の耐震補強設計要領（案）・同施工マニュアル（案），1998年3月。

(2007.4.6 受付)

STUDY ON EFFECT OF INTERNAL STRUTS PREVENTING OVERALL BUCKLING OF STIFFENED PLATED PANELS ON DUCTILITY OF THIN-WALLED BOX COLUMNS

Masahide MATSUMURA, Toshiyuki KITADA,
Yoshihiko TAKADA and Hidenao HAYASHI

Bracing members are widely used in rigid framed structures in steel buildings to increase the ductility performance and to avoid the serious damage of them. The overall buckling of stiffened plates arises a severe damage to the thin-walled steel columns. Proposed in this paper is a strengthening technique to prevent the overall buckling of the stiffened plates of steel columns with box cross section by adding internal struts into the box cross section.

The strengthening effect of the internal struts for the stiffened plated column member is verified through analytical and experimental approaches.