

I-81

部分的にコンクリートを充填した鋼管橋脚模型の繰返し載荷実験

(株)日本製鋼所 正員 小枝 日出夫
 開発土木研究所 正員 谷本 俊充
 室蘭工業大学 正員 小室 雅人
 (株)日本製鋼所 正員 別所 俊彦
 室蘭工業大学 正員 松岡 健一

1. はじめに

兵庫県南部地震では、比較的靱性が高いと信じられてきた鋼製橋脚にも被害が発生した。その中で、橋脚基部に充填されている車両衝突防護用コンクリートが耐震性向上のために効果があることが明らかになった。従来から、橋脚基部に適切にコンクリートを充填することにより、鋼製橋脚の耐荷力および変形性能が飛躍的に向上することが確認されている¹⁾。この効果を定量的に解明するために、コンクリートを充填した鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する研究^{2)~4)}が盛んに行なわれており、終局耐震設計指針案にも盛り込まれている⁵⁾。

しかしながら、既存の研究では鋼製橋脚の中でも主に矩形断面のものを対象としており、コンクリートを充填した円形断面橋脚の弾塑性挙動に関する研究は極めて少ない。円形断面橋脚は、矩形断面橋脚に比べ単位重量当たりの強度が大きい実用上有利であるが、その耐震設計法を確立するためには多くの実験データの集積が必要である。

このような観点から、本研究ではコンクリートを部分的に充填した円形断面橋脚の耐震設計に必要な基礎データを得ることを目的として、鋼管橋脚模型を用いた単調および繰返し水平載荷実験を行ない、コンクリート充填が円形断面橋脚の耐荷力と変形性能に与える影響等について実験的に検討を行なった。

2. 実験の概要

2.1 試験体

本研究では、コンクリート充填率と円形断面橋脚の耐荷力や変形性能の関係を検討するために、鋼管の寸法を固定しコンクリートの充填高さを変化させ実験を行なった。試験体の形状を図-1に、また、寸法および試験パラメータを表-1に示す。表-1における細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ ⁶⁾および径厚比パラメータ R_t ⁷⁾は次式により定義される。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L'}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E}} \quad \dots (1) \quad R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad \dots (2)$$

ここで、 σ_{ys} は降伏応力、 R は平均半径、 L' は部材長(鋼管高さ)、 t は板厚、 r は断面2次半径、 E は弾性係数、 ν はポアソン比である。

試験体の鋼管部は、厚さ5.7mmの圧力配管用炭素鋼鋼管(JIS G 3454 STPG370 90A 熱間仕上継目無鋼管)を所定の長さで切断し、旋盤により内外面を切削して製作した。試験体の上下端部には、試験台および載荷板に固定するための鋼板を周溶接により取付けた。また、コンクリートは、

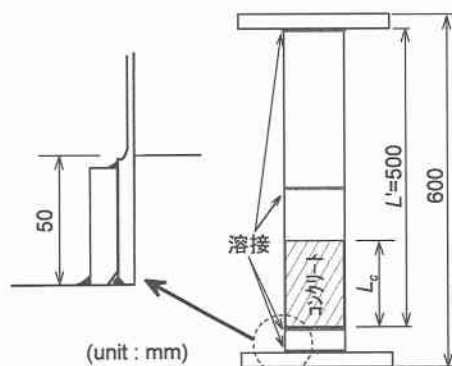


図-1 試験体の形状および寸法

Lateral Cyclic Loading Tests of Partially Concrete-Filled Steel-Pipe Pier Models.

by Hideo KOEDA, Toshimitsu TANIMOTO, Masato KOMURO, Toshihiko BESSHO and Ken-ichi MATSUOKA

表－1 試験体寸法および試験パラメータ

試験体 No.	荷重点高さ $L(mm)$	鋼管高さ $L'(mm)$	コンクリート高さ		半径 $R(mm)$	板厚 $t(mm)$	細長比		径厚比	
			$L_c(mm)$	L_c/L'			L/R	$\bar{\lambda}$	R/t	R_t
t15-N8-f0-m t15-N8-f0-c	631.5	500	0	0.00	48.0	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086
t15-N8-f1-m t15-N8-f1-c	631.5	500	125	0.25	48.0	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086
t15-N8-f2-m t15-N8-f2-c	631.5	500	285	0.57	48.0	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086
t15-N8-f4-m	631.5	500	500	1.00	48.0	1.5	10.4	0.379	32.0	0.086

試験体の上板の中央に開けられた穴から所定の長さまで中詰めした。コンクリートの充填高さ L_c は、鋼管高さに対する比 L_c/L' で0.0、0.25、0.57、1.0の4種類とした。ただし、 $L_c/L'=0.0$ はコンクリートを充填しない場合を示すものとする。

2.2 材料試験

使用鋼管の機械的性質を得るために、鋼管からJIS 6号試験片を製作し引張試験を行なった。引張試験の結果を表－2に示す。

一方、充填コンクリートには普通コンクリートを用い、設計基準強度 f_{ck} を17.7MPaとした。表－3に実験時のコンクリートの材料試験結果を示す。

表－2 鋼管材の引張試験結果

鋼 種	降伏応力 σ_{ys} (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
STPG 370	336	206	0.30

表－3 充填コンクリートの圧縮試験結果

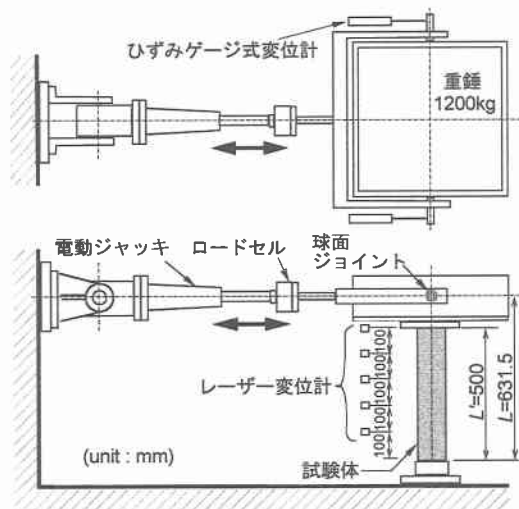
材 令 (days)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
93～94	19.2	16.7	0.21

2.3 実験装置および荷重方法

実験装置の概要を図－2に示す。水平荷重はストローク200mmの電動式ジャッキを用いて、上載荷重(1200kgの鉛重錘)の重心高さ線上の2箇所で載荷している。水平荷重の載荷点にはボールジョイントを使用し、試験体上端部に生じる水平および鉛直方向の変位と回転が拘束されるのを防いでいる。

実験における測定は、荷重載荷点での水平変位と荷重、試験体各位置での変位とひずみについて行なった。水平変位の測定にはひずみゲージ式変位計を用い、水平荷重載荷位置と試験体基部との相対変位を測定した。また、水平荷重の測定には容量50kNのロードセルを用いた。試験体各位置での変位とひずみは、図－2に示す位置においてレーザー変位計とひずみゲージを用いて計測した。これらの測定値はデジタルデータレコーダに連続記録している。

実験は、変位速度0.39mm/sとする水平変位制御により行なった。載荷方法は、一方向の単調載荷と変動変位の繰り返し載荷の2種類とした。また、軸力は質量1200kgの重錘で与えているが、これは降伏軸荷重 P_y の約8%に相当する。表－4に実験条件を



図－2 実験装置の概要

まとめて示す。

繰り返し载荷の方法は、図-3に示すように、水平変位 δ を降伏水平変位 δ_y を基準にして各サイクルで漸増しながら繰り返し与えることとした。ただし、降伏水平変位 δ_y は弾性はり理論より次式で定義した。

$$H_y = \frac{(\sigma_{ys} - P/A)I}{RL} \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta_y = \frac{H_y L^3}{3EI} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 H_y は鋼管基部が降伏応力に達するときの水平力、 P は軸力、 A は鋼断面のみの面積、 I は鋼断面のみの断面2次モーメントである。

表-4 実験条件

試験体 No.	載荷方法	軸 力		降伏荷重	降伏変位
		P (kN)	P/P_y	H_y (kN)	δ_y (mm)
t15-N8-f0-m	-m 単調載荷	11.8	0.077	5.26	4.109
t15-N8-f0-c					
t15-N8-f1-m					
t15-N8-f1-c					
t15-N8-f2-m	-c 繰返し載荷				
t15-N8-f2-c					
t15-N8-f4-m					

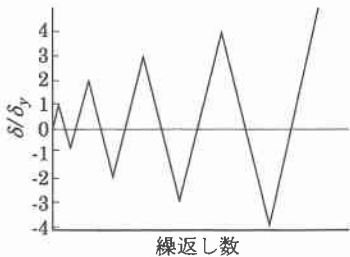


図-3 繰り返し载荷方法

3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況

主な試験体の実験終了後の様子を図-4に示す。また、各試験体の座屈位置および座屈形態をまとめて表-5に示す。

(1) 単調载荷実験

コンクリートを充填していない試験体(以下、中空試験体と呼ぶ)では、水平変位の増加とともに基部から約15mm高さの位置に局部座屈が発生し、载荷が進むにつれ局部座屈が大きくなり耐荷力を失っていった。

一方、コンクリートを充填した試験体(以下、充填試験体と呼ぶ)では、基部近傍を含めた複数の箇所でも局部座屈が発生した。この状況をコンクリート充填高さ $L_c=285\text{mm}$ の試験体(t15-N8-f2-m)を例に説明する。まず、水平変位の増加につれ微かな座屈変形が基部から約15mm高さの位置に発生し、その後、载荷が進むにつれ充填コンクリート上端の直下位置(基部から約260mm高さ)に局部座屈が発生した。さらに载荷が進むにつれ、コンクリート上端の局部座屈が進展し耐荷力を失っていったが、基部の局部座屈はほとんど進展しなかった。この過程を図-5に示す軸方向ひずみの変化から見ると、基部の局部座屈は変位がほぼ $\delta/\delta_y=5$ で発生し徐々に進展するものの、変位が $\delta/\delta_y=18$ となりコンクリート上端で局部座屈が発生すると、基部の

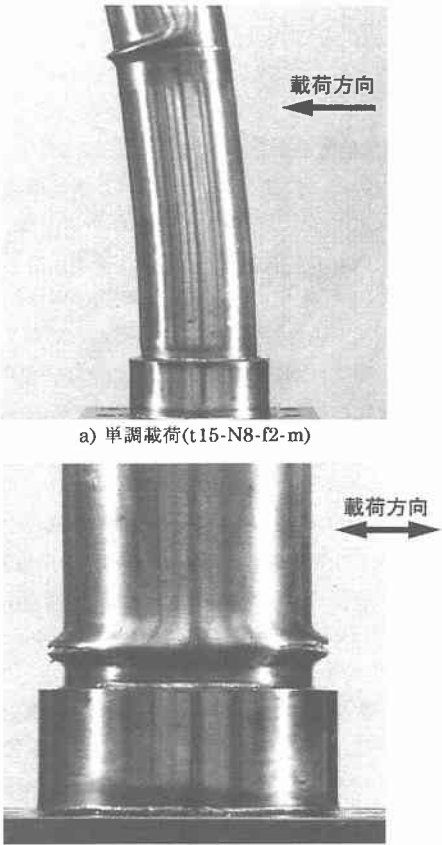


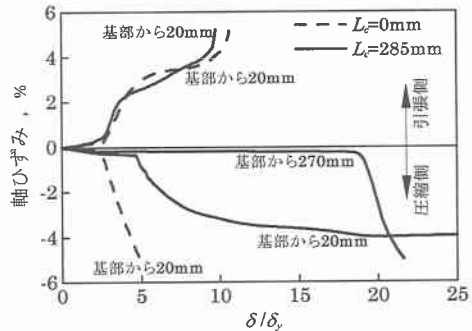
図-4 実験終了後の試験体

表－5 座屈位置および塑性率

試験体 No.	座屈形態	座屈位置 (mm)	最大荷重		最大荷重時変位		塑性率	
			H_m (kN)	H_m/H_y	δ_m (mm)	δ_m/δ_y	δ_u (mm)	δ_u/δ_y
t15-N8-f0-m	EFB	14	7.2	1.38	10.1	2.46	31.7	7.71
t15-N8-f0-c	EFB	15	7.2	1.37	10.3	2.50	19.9	4.85
t15-N8-f1-m	EFB	15,100,125	8.9	1.69	14.8	3.61	88.5	21.53
t15-N8-f1-c	EFB	15	9.2	1.75	15.7	3.82	49.1	11.96
t15-N8-f2-m	EFB	15,260	10.9	2.08	70.8	17.23	116.3	28.31
t15-N8-f2-c	EFB	15	10.4	1.98	20.4	4.96	53.5	13.03
t15-N8-f4-m	EFB	15,40,90	11.3	2.15	107.3	26.12	$110 \geq$	$27 \geq$

局部座屈の進展は停止していることが理解できる。

また、図－5には中空試験体(t15-N8-f0-m)のひずみの変化状況も示しているが、コンクリート充填の有無による基部近傍のひずみを比較すると、コンクリート充填の効果は圧縮側(載荷側)だけに現われており、引張側では両者にほとんど差が見られない。これは、コンクリートの引張強度が圧縮強度の1/10程度と小さいことにより、引張側では鋼管の拘束効果が期待できないためと推察される。



図－5 試験体の軸方向ひずみ

(2) 繰り返し載荷実験

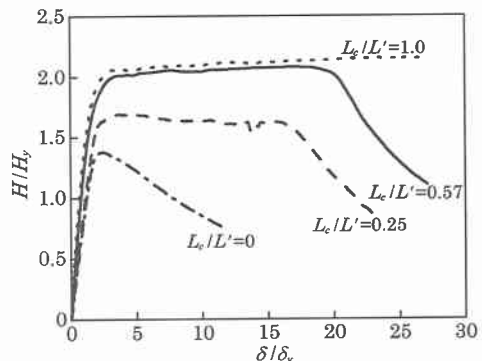
繰り返し載荷実験では、コンクリート充填の有無によらず全ての試験体において基部から約15mm高さの位置に、全周にわたる凸状の局部座屈が発生した。その後、載荷が繰り返されるにつれ、中空試験体では局部座屈が徐々に大きくなり耐荷力を失っていった。一方、充填試験体では、単調載荷で見られたような基部以外での局部座屈の発生はなく、基部に発生した局部座屈の凸部にき裂が発生しその進展とともに耐荷力を失っていった。このき裂の発生は、低サイクル疲労によるものと考えられる。

上記のように、充填試験体では、載荷方法により座屈発生位置と破壊形態が異なっている。この要因として次のことが考えられる。繰り返し載荷の場合、圧縮と引張が交番するため、試験体基部コンクリートが劣化し強度が低下する。その結果、圧縮側においても拘束効果が低減し基部に局部座屈が発生する。さらに、局部座屈発生領域以外ではコンクリートの劣化が小さく拘束効果を期待できることより、鋼管の剛性低下も座屈発生領域に比較してはるかに小さいものと考えられる。その結果、鋼管の変形が基部の座屈発生領域に集中し、やがて低サイクル疲労によりき裂が発生したものと推察される。

3.2 水平荷重－水平変位履歴特性

単調載荷における各試験体の水平荷重－水平変位曲線を図－6に示す。同図において水平荷重と水平変位は、それぞれ降伏荷重 H_y と降伏変位 δ_y で無次元化してある。中空試験体と充填試験体を比較すると、コンクリート充填高さ比 $L_c/L' = 0.25$ で20%、 $L_c/L' = 0.57$ と1.0で50%程度最大荷重が増加している。また、最大荷重に対応する変位も増加しており、特に $L_c/L' = 1.0$ では $\delta/\delta_y = 27$ まで載荷しても耐荷力の低下は見られない。

繰り返し載荷における各試験体の水平荷重－水平変位



図－6 水平荷重－水平変位曲線(単調載荷)

履歴曲線を図-7に示す。同図において水平荷重と水平変位は、それぞれ降伏荷重 H_y と降伏変位 δ_y で無次元化してある。コンクリート充填の有無による履歴曲線の形状を比較すると、中空試験体では紡錘形であるのに対し、充填試験体ではS字形を呈している。これは、繰り返し载荷とともに試験体基部コンクリートの劣化が著しく、剛性が低下したためと考えられる。

水平荷重-水平変位履歴曲線の最大変位点を結んだ包絡線を図-8に示す。単調载荷の場合と同様に、充填試験体では最大荷重および最大荷重に対応する変位が増加している。

また、単調载荷と繰り返し载荷実験結果を比較すると、最大荷重は両者ほぼ同じであるが、耐力力の低下は繰り返し载荷の方が著しい。これは、単調载荷では局部座屈の拡大により耐力力が低下するのに対し、繰り返し载荷では座屈部に発生したき裂の拡大により耐力力が低下するためと考えられる。

以上のことから、鋼管橋脚においてもコンクリートを充填することにより、耐力力および変形性能が著しく向上することが理解される。特に、コンクリート充填比が高いほどこの傾向は顕著である。

3.3 塑性率とエネルギー吸収能力

塑性率の定義方法は種々提案されているが、本文では以下の2つの塑性率を用いて変形性能を評価する。

$$\mu_m = \delta_m / \delta_y \dots\dots\dots (5) \quad \mu = \delta_u / \delta_y \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 δ_m は最大荷重 H_m に対応する変位、 δ_u は最大荷重到達後に水平荷重が H_y まで低下した時点での変位である。表-5にこれらの値をまとめて示している。また、これら塑性率とコンクリート充填比の関係を図-9に示す。同図より充填高さが大きくなるにしたがい、塑性率 μ_m 、 μ とも増加していることがわかる。

次に、水平変位と各サイクルの履歴曲線の面積から求めたエネルギー吸収量の関係を図-10に示す。同図において水平変位は δ_y で、エネルギー吸収量は弾性エネルギー $\delta_y H_y / 2$ で無次元化してある。図-8に示した包絡線と比較すると、各試験体とも最大荷重を越えても1サイクル当たりのエネルギー吸収量は増加し続け、塑性率 μ の付近でピークを呈することがわかる。また、コンクリートを充填することにより、エネルギー吸収量とそのピークに対応する変位が大きくなっていることがわかる。

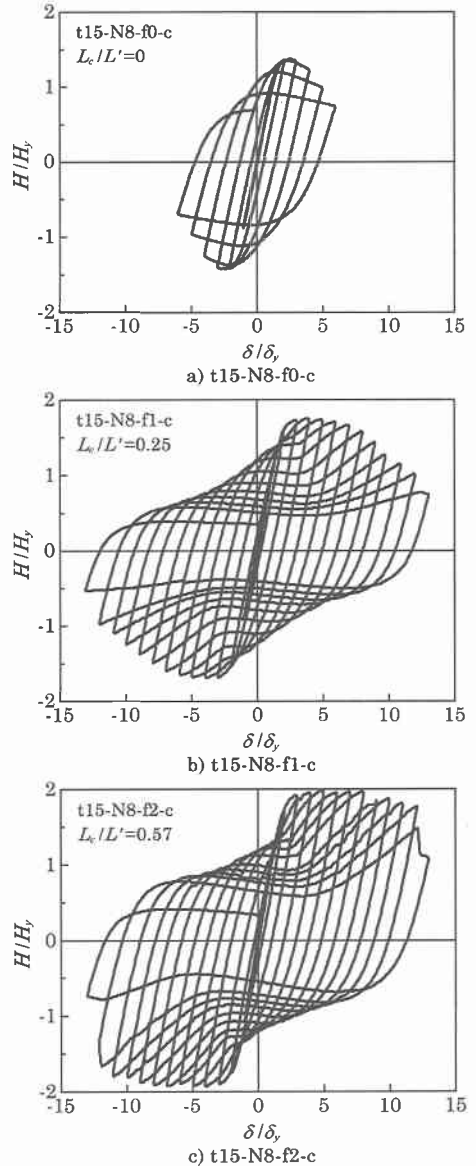


図-7 水平荷重-水平変位履歴曲線

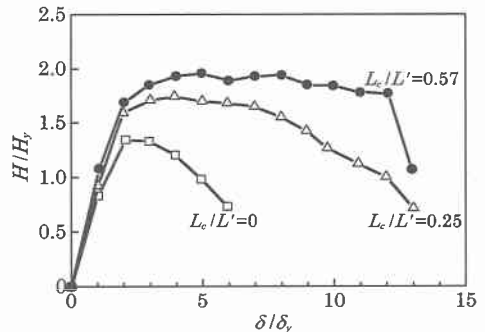


図-8 水平荷重-水平変位曲線の包絡線

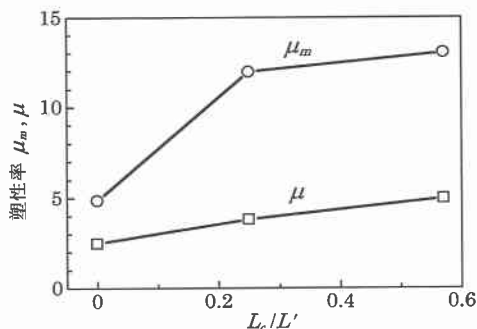


図9 塑性率とコンクリート充填比の関係

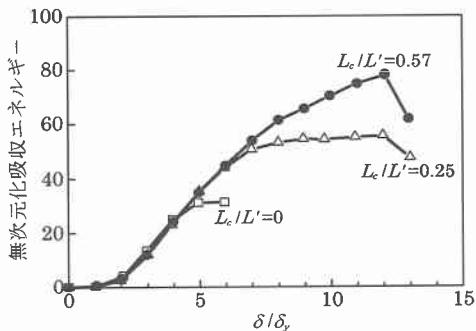


図10 吸収エネルギー量の比較

以上のことから、鋼管橋脚においてもコンクリートを充填することにより、塑性率とエネルギー吸収能力が向上すること理解される。特に、コンクリート充填比が高いほどこの傾向は顕著である。

4. まとめ

本研究では、コンクリートを充填した円形断面橋脚の耐震設計に必要な基礎データを得ることを目的として、鋼管試験体を用いた水平載荷実験を行ない、コンクリートの充填が円形断面橋脚の耐荷力と変形性能にどのような影響を与えるのかを調査した。本実験の範囲内で得られた結果を以下に要約する。

- 1) コンクリートを充填した試験体では、載荷方法により座屈発生位置と破壊形態が異なる。単調載荷では、最初基部近傍に局部座屈が発生するが、載荷が進むにつれコンクリート上端近傍にも局部座屈が発生し、この局部座屈が拡大し耐荷力を失う。繰返し載荷では、基部近傍に発生した局部座屈の凸部にき裂が発生し、その進展とともに耐荷力を失う。
- 2) 繰返し載荷における水平荷重－水平変位履歴曲線の形状は、中空試験体では紡錘形であるのに対し、コンクリート充填試験体ではS字形を呈する。
- 3) コンクリートを充填することにより、鋼管橋脚の耐荷力および変形性能が向上する。これはコンクリート充填比が大きいほど顕著である。
- 4) コンクリートを充填することにより、鋼管橋脚の塑性率とエネルギー吸収能力が向上する。これはコンクリート充填比が大きいほど顕著である。

参考文献

- 1) 宇佐美, 葛, 水谷: コンクリートを部分的に充填した無補剛箱形鋼柱の繰返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol.39A (1993), pp249-262.
- 2) 中井, 北田, 吉川, 中西, 尾山: コンクリートを充填した長方形箱形断面柱の耐荷力と変形性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.39A (1993), pp1347-1360.
- 3) 中井, 北田, 中西, 杉山, 河野: 地震荷重を受けた後の合成柱(充填方式)の耐荷力, 構造工学論文集, Vol.40A (1994), pp1401-1412.
- 4) 鈴木, 宇佐美, 伊藤, 豊島: 細長比パラメータの大きなコンクリート部分充填鋼柱の強震時挙動, 土木学会論文集, No.537/I-35 (1996), pp775-78.
- 5) 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(1996.7).
- 6) (社)土木学会: 鋼構造物の設計指針, PART A 一般構造物, 鋼構造シリーズ3A, (1987).
- 7) (社)土木学会鋼構造委員会: 座屈設計ガイドライン, (1987).