

内部にコンクリートを充填した角形鋼管柱の 局部座屈に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE LOCAL BUCKLING STRENGTH OF CONCRETE-FILLED SQUARE STEEL TUBULAR COLUMNS

渡辺 浩*,崎元 達郎**,山尾 敏孝***,持田 拓児****,寺田 昌弘*****

Hiroshi WATANABE, Tatsuro SAKIMOTO, Toshitaka YAMAO Takuji MOCHIDA and Masahiro TERADA

*工修 熊本大学助手 工学部土木環境工学科 (〒860 熊本市黒髪2丁目39-1)

**工博 熊本大学教授 工学部土木環境工学科 (〒860 熊本市黒髪2丁目39-1)

***工博 熊本大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒860 熊本市黒髪2丁目39-1)

**** 熊本大学大学院工学研究科 (〒860 熊本市黒髪2丁目39-1)

*****工修 新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター (〒299-12 富津市新富20-1)

An experimental study on the local buckling behavior and strength of concrete-filled steel tubular columns is carried out. The outer steel tube is made of mild steel and has welded square box-profile section. The width-to-thickness ratio of the component plate of the tube is changed as 25,45,65 and 85 to see its effect. Half of the steel tubes were annealed after welding to remove the residual stress due to welding and to see its effect on the local buckling strength. The maximum strength of the steel tubes were found to be plotted between the theoretical strength curve for a hinged-hinged plate and that for a clamped-clamped plate. Necessity of the modification on the boundary condition of the component plate in the future theoretical analysis is pointed out.

Keywords : Concrete-filled columns, Local buckling, Welded box-profile

1. まえがき

内部にコンクリートを充填した鋼管部材は、その様々な利点により近年注目を集めているが、特に構造力学上有利な点として、鋼管と充填コンクリートの相互作用により耐荷力が向上する点、およびそのダクティリティの大きさゆえに耐震性能が向上する点の2点が挙げられている。

これらの利点は、充填コンクリートにより鋼板の内側への局部座屈が防止されること、および充填コンクリートが鋼管により拘束されることにより得られるものであるが、これらの特性を有する部材を精度よく解析するためには充填コンクリートにより拘束された鋼管の局部座屈挙動、および鋼管により拘束されたコンクリートの挙動を明らかにする必要がある。

コンクリートを充填した鋼管構造に関する研究には、北田らの研究^{1) 2)} などがある。ここではコンクリートを充填した鋼管部材の耐荷力、破壊特性の一端が明らかにされている。また鋼板の局部座屈強度に関しては、その実験値が周辺固定支持の解析値と単純支持の解析値の中

間の値となることが示されており、実構造の鋼板の側辺はコンクリートにより弾性拘束されるという考察を行っている。一方、宇佐美・葛らは、コンクリートを充填した角形鋼管柱について圧縮実験とFEM解析を行うことにより、コンクリートを充填した鋼管部材の耐力算定式の提案を行っている^{3) 4)}。

本研究では、以上のような充填角形鋼管柱について、鋼管の局部座屈挙動と充填されたコンクリートの挙動を個別に求め、その累加強度により充填鋼管の挙動を評価することを試みる。そこでまず、様々な幅厚比を持つコンクリートを充填した鋼管供試体を製作し、その鋼管部分のみに純圧縮荷重を載荷する実験により外側鋼管の局部座屈耐力を求め、有限変位弾塑性解析による結果と比較し、検討を行った。次に同様な供試体のコンクリート部分のみに載荷する実験、および鋼管とコンクリートの両方を同時に載荷する実験を行い、それらを比較することにより、鋼板の局部座屈後挙動を含めた累加強度評価の方法と可能性について検討するものである。

2. 実験の概要と予備実験

(1) 供試体

供試体に用いた鋼管は、正方形断面と断面幅の2倍の長さを持った角形鋼管である。使用した鋼板はいずれも板厚4.5mmのSM400材であり、四隅を溶接して集成している。これらをFig. 1に示すような載荷方法により実験を行うため、3タイプの供試体を製作した。これらはすなわち、鋼管のみを載荷する供試体（以下 Type-1 とする）、コンクリート部分のみを載荷する供試体（以下 Type-2 とする）、およびその両方を載荷する供試体（以下 Type-3 とする）である。

各供試体の諸元は Table 1 に示している。ここで、幅厚比パラメータ R は以下のように定義されるものとする。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}}$$

ここに b: 幅厚比 t: 板厚 μ: ポアソン比
σ_y: 鋼の降伏応力 E: 鋼の弾性係数
k: 板の座屈係数 (=4.0: 周辺単純支持)

供試体名の頭文字の A と B は焼鈍処理の有無を示しており、その次の数字は載荷のタイプを示している。また、- の後の数字は幅厚比を示している。以下、それぞれのタイプの供試体について説明を補足する。

(a) 鋼管のみに載荷する供試体 (Type-1)

同一の板厚で異なる 4 種類の幅厚比製作した。このうち 2 体 (幅厚比 25, 45 のものは 1 体) は残留応力の影響を除去するため、溶接集成後に焼鈍処理を施し、残りの 1 体 (幅厚比 25 のものは 2 体) はそのまま実験を行った。また、端部等での局部座屈の発生を防止するために、Fig.2 に示すようなスティフナーを 4 面の上下端にとりつけ、中央の正方形パネル内で局部座屈を発生させるようにした。さらに供試体の上端部は、Fig.1 に示されているように、内部に充填するコンクリートを鋼管の上端よりも約 1cm 下方までとすることにより、鋼管のみに載荷される

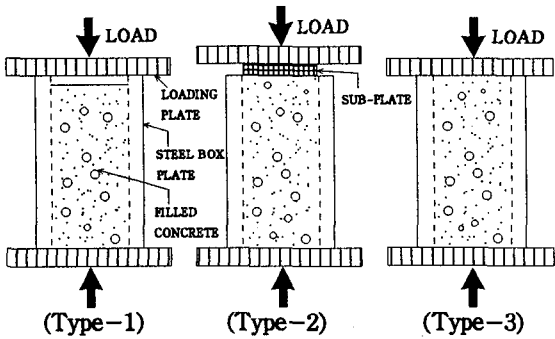


Fig. 1. 3 types of specimen and load

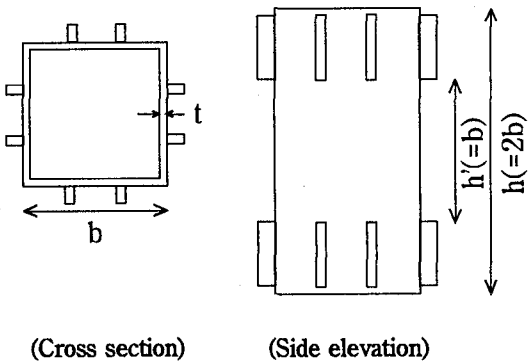


Fig. 2. Steel box specimens (Model-1,3)

ようにした。

(b) コンクリートのみに載荷する供試体 (Type-2)

45 の幅厚比を持つ供試体を 2 体製作した。なお、鋼板には圧縮力を与えないため、焼鈍処理、スティフナーは省略した。また、コンクリート部分のみを載荷するために、Fig. 1 に示されているようにコンクリート部分のみに接触する載荷板を介して載荷を行った。

(c) 両方に載荷する供試体 (Type-3)

幅厚比 45 を持つ供試体を 3 体製作した。鋼管にスティフナーをとりつけ、また 3 体のうち 2 体に焼鈍処理を施

Table 1. Parameters and measured dimension of test specimens

Type		b (mm)	t (mm)	b/t	R	h (mm)	Heating	Number
1	A1-25	117	4.5	25	0.51	225	annealed	1
	B1-25						as welded	2
	A1-45	207	4.5	45	0.92	405	annealed	1
	B1-45						as welded	1
	A1-65	297	4.5	65	1.33	585	annealed	2
	B1-65						as welded	1
	A1-85	387	4.5	85	1.74	765	annealed	2
	B1-85						as welded	1
2	B2-45	207	4.5	45	0.92	405	as welded	2
3	A3-45	207	4.5	45	0.92	405	annealed	2
	B3-45						as welded	1

した点などは、Type-1 と全く同様である。唯一異なるのは、供試体上端部の載荷面において、鋼管とコンクリートとの平面に保つためにモルタルによるキャッピングを施したという点である。

(2) 鋼材およびコンクリートの予備実験

使用鋼材より JIS 5 号引張試験片を、焼鈍処理をしたもの、しないものについて各 3 本を製作し、引張試験を行った。その結果の平均値を示したのが Table 2 である。

一方、コンクリートは全て同一の配合とし、Table 3 に示すとおりとした。また材料試験は Type-2、および Type-3 のそれぞれについて行っており、Table 4 に示すとおりであった。なお、Type-1 におけるコンクリートの材料試験の結果は、その違いが局部座屈実験の結果に与える影響は小さいと考え、記述および検討は省略した。

(3) 初期たわみ

Type-1、および Type-3 の供試体については、実験に先立ち初期たわみを計測した。この初期たわみが大きく影響を及ぼす可能性があるのは、局部座屈が発生する付近であることから、供試体上下のスティフナーの間の正方形部分のみを測定するものとした。その方法としては、長さおよび幅方向をそれぞれ 5 等分する基盤目状の線を引き、その交点を精度 1/100mm の変位計を用いて測定を行った。その結果、初期たわみは最大値でも 0.2mm であり、その大きさは、板幅の 1/1000 以下と非常に小さいということがわかった。

なお Type-2 については、初期たわみが結果に与える影響は小さいと考え、測定は省略した。

(4) 残留応力試験

Type-1、および Type-3 の供試体については、一枚の構成板の辺上に供試体と同じ溶接条件のビードを盛った残留応力測定用供試体を作成し、電気抵抗線ひずみゲージによる応力解放法によって、残留応力の測定を行った。このうち $b/t=65$ のものの結果を示したのが Fig. 3 である。なお、焼鈍処理を行った供試体では残留応力は 0 に近いと考えられるが、ここではその検証のため同様に測定を行っている。

Fig. 3 によると、焼鈍処理を行っていない供試体では、通常測定される残留応力の大きさ、かつ分布であり、部材端の溶接部では引張の降伏応力が、また中央部では降伏応力に対して約 20% の圧縮応力が測定された。一方で、焼鈍処理を行った供試体については、部材端の溶接部では降伏応力の約 10% の引張応力が、また中央部では降伏応力の約 5% の圧縮応力が測定されたが、これらは通常想定される残留応力に比べて十分に小さく、焼鈍処理の効果が表れていると考えられる。

さらに、幅厚比が 25, 45, 85 の焼鈍していないモデルに関しても測定を行ったところ、中央部で測定された圧

Table 2. Material Properties of Steel

	Annealed Models	As welded Models
Young's Modulus: $E(10^6 \text{kgf/cm}^2)$	2.21	2.13
Yield Stress: $\sigma_y(\text{kgf/cm}^2)$	3290	3260
Yield Strain: $\epsilon_y(\mu)$	1490	1529
Tensile Strength: $\sigma_t(\text{kgf/cm}^2)$	3520	3872
Poisson's Ratio: ν	0.28	0.32

Table 3. Mixtures of Concrete

Maximum Size of Aggrerate(mm)	20
Slump(cm)	8
Water Cement Ratio(%)	60
Sand Percentage	45
Water(kg/m ³)	185
Cement(kg/m ³)	308
Fine Aggregate(kg/m ³)	816
Coarse Aggregate(kg/m ³)	1150
Air Content(%)	2

Table 4. Material Properties of Concrete

Model	2	3
Young's Modulus: $E(10^6 \text{kgf/cm}^2)$	2.8	2.8
Compressive Stress: $\sigma_c(\text{kgf/cm}^2)$	370.5	3845
Compressive Strain: $\epsilon_c(\mu)$	2197	2381
Poisson's Ratio: ν	0.19	0.20

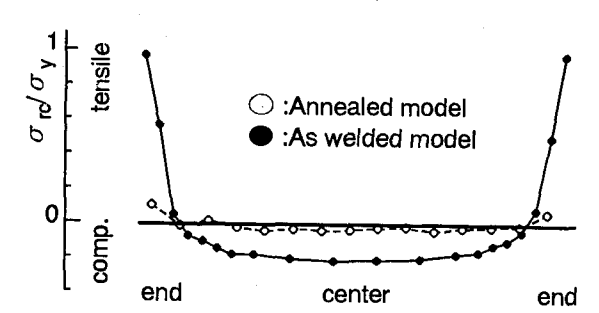


Fig. 3. Residual stress ($b/t=65$)

縮残留応力の大きさは、幅厚比 25 のモデルでは約 30%、幅厚比 45 のモデルでは約 20%、また幅厚比 85 のモデルでは約 15%であったが、同様の傾向を示すため図示は省略した。

なお、Type-2 については前述のように鋼管に荷重を行わないため、残留応力の影響は小さいと考えられることから、残留応力は考慮しないものとする。

(5) 荷重方法と計測方法

Fig. 4 は Type-1、および Type-3 における実験状況を示した図である。圧縮試験機により軸圧縮力を与えながら鋼板の中央に貼付したひずみゲージによりひずみを測定した。また、同時に上下の載荷板の相対変位、および鋼板中央部の正方形部分の相対変位を測定した。Fig. 5 はこの実験状況を示す写真である。

また Type-1 と Type-2 の供試体では、鋼管とコンクリートの挙動を独立して取り出すことを目的としているため、本実験前に鋼管とコンクリートの相互を結びつける付着の影響を取り除くことにした。その方法は、Type-1 の供試体ではコンクリート部分のみに、また Type-2 では鋼管部分のみに接触する薄い板を敷いた後、軽く載荷し、鋼管とコンクリートを相対的に滑らせることにより行った。

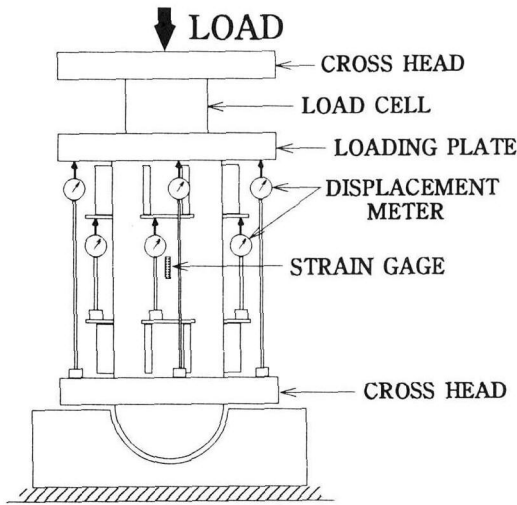


Fig. 4. test setup (Type-1,3)

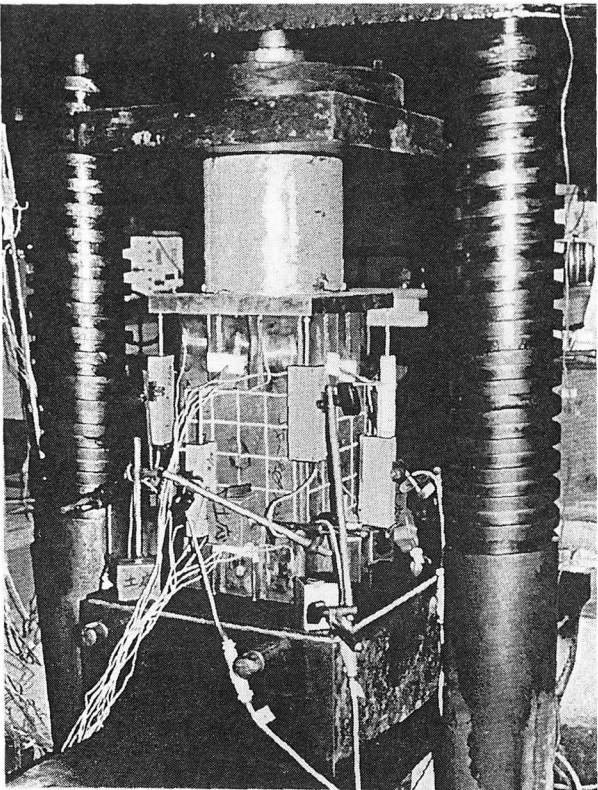
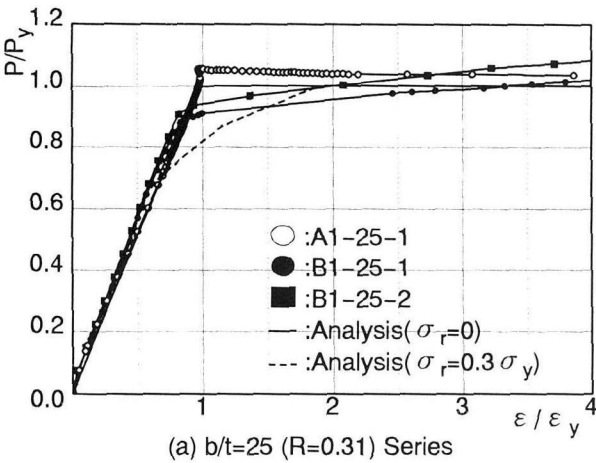
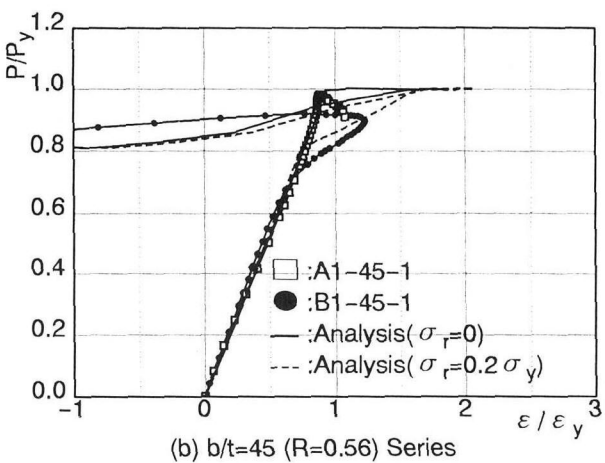


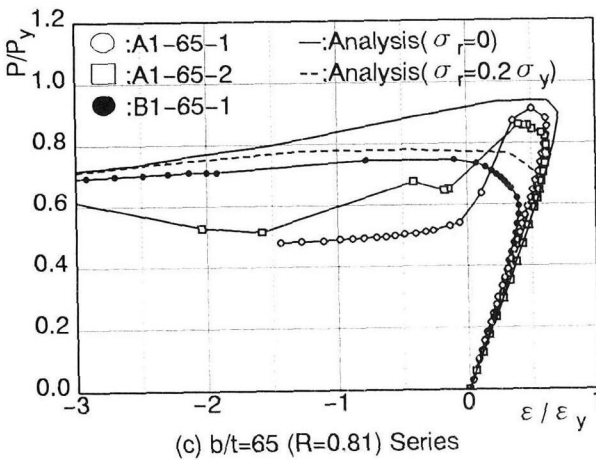
Fig.5. Test Setup (A1-45)



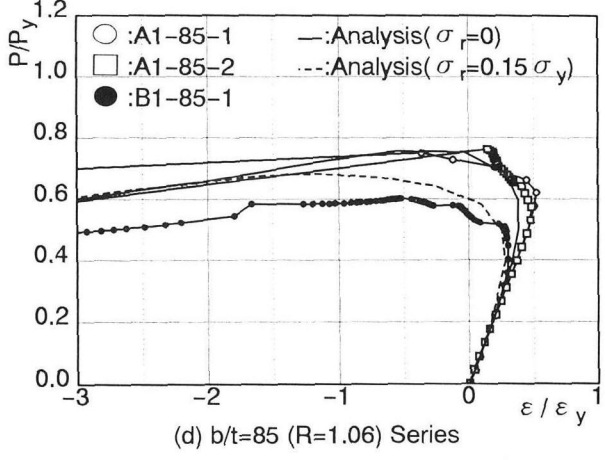
(a) b/t=25 (R=0.31) Series



(b) b/t=45 (R=0.56) Series



(c) b/t=65 (R=0.81) Series



(d) b/t=85 (R=1.06) Series

Fig.6. Load-Strain Relation

3. 実験の結果と考察

(1) 鋼管の局部座屈挙動について

Fig. 6 は、Type-1 の供試体において、鋼管を構成する 4 枚の板要素の中央に貼付したひずみゲージによるひずみの平均値と荷重との関係を示したものである。なお、縦軸は降伏荷重で、また横軸は降伏ひずみで無次元化している。

図中には同時に、板要素の有限変位弾塑性解析による結果⁵⁾も示している。この解析とは Fig. 7 に示されるような純圧縮を受ける鋼板要素の、対称性を考慮して 1/4 の部分のみを解析したものである。断面は長さ方向に 12 分割、幅方向に 6 分割、また層方向には 6 分割し、境界条件としては周辺固定と単純支持の両方を示している。また、残留応力は前節(4)で示した実測値をふまえてモデル化して与えた。なお、初期たわみは最大でも $b/1000$ と非常に小さかったことから、板の中央部分 (Fig. 7 の

dw) が $b/1000$ となるような半振幅の sin カーブにより与えた。この解析結果のうち Fig. 6 で示した解析値のひずみは、Fig. 7 の黒色で示した分割要素の最上層のひずみで整理している。

これらによると、全般的に実験値は解析値とよく一致していることがわかる。また、実験では局部座屈が発生したモデルにおいては、圧縮ひずみが鋼管の局部座屈によって引張に転じる様子もよく表現されている。局部座屈は必ずしもその中央部で発生しているわけではないが、4 面の平均をとることでかなり精度よい挙動をつかむことができているようである。Fig. 8 は A1-45 の供試体の実験後の様子を一例として示した写真である。

実験ではひずみゲージによるひずみの測定と同時に全長、および鋼板中央部の正方形部分の軸方向変位も測定している。この変位より供試体の平均ひずみが求められる。これらを用いて整理した例として Fig. 9、および Fig. 10 を示す。ここに Fig. 9 は A1-45 において全長から求めた平均ひずみと荷重との関係を示したものであり、また Fig. 10 は A1-65 において鋼板中央部の正方形部分の変位から求めた平均ひずみと荷重との関係を示したものである。

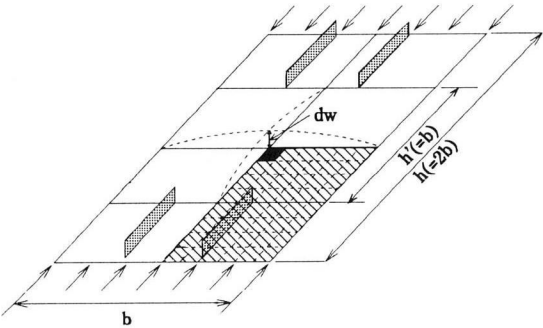


Fig.7. Numerical Models of Analysis

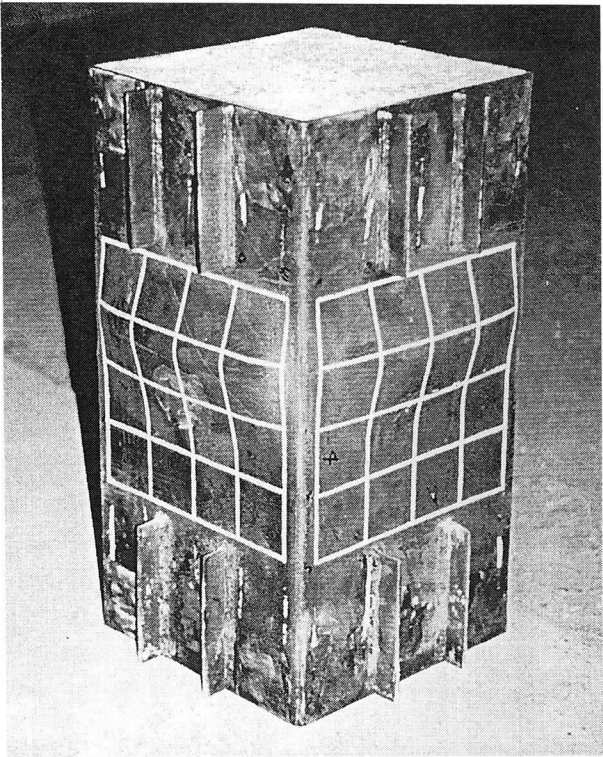


Fig.8. Specimen A1-45 after Test

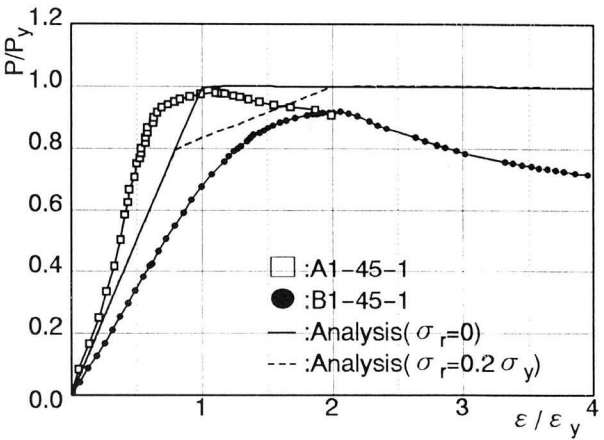


Fig.9. Stress-Strain Relation
($b/t=45$, Average Strain of Total Length)

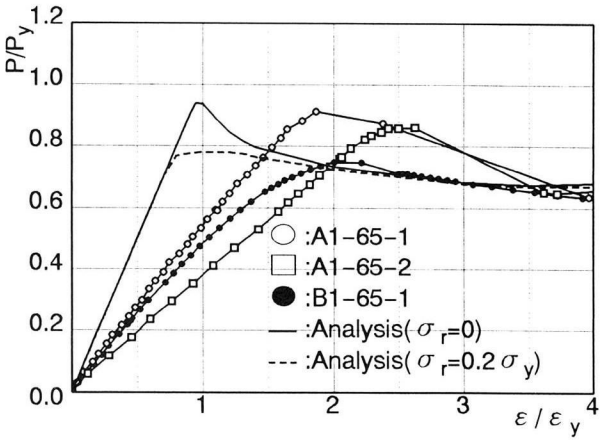


Fig.10. Stress-Strain Relation
($b/t=65$, Average Strain of Total Length)

Fig. 9 よると、A1-45-1 は初期剛性が大きく表れている。この原因は不明であるが、鋼管とコンクリートの付着が残っていた可能性も考えられる。その他においては初期勾配がいずれも小さく表されるという結果を示しているが、この原因も不明であり、今後検討の予定である。

(2) 鋼管の局部座屈強度について

Type-1 の供試体の最大荷重を幅厚比パラメータ R についてまとめると Fig. 11 のようになる。(a)が焼鈍したもの、(b)が焼鈍していないものであり、(1)と同様の解析結果もあわせて示している。なお、縦軸は降伏荷重で無次元化している。

この図より、実験結果は周辺固定と周辺単純支持の解析結果の中間を示すことが示された。これは北田らの研究にも示されている。中空鋼管では、四隅の溶接部は直角を保持しようとするために、Fig. 12(a) に示されるように互いに隣り合う鋼板要素が外側、内側と交互に変形する両辺単純支持に近い座屈波形が見られる。ところが、コンクリートを充填した鋼管部材では充填コンクリートにより内側への変形を拘束されるために、Fig. 12(b) に示されるように全ての鋼板要素が外側に変形する座屈波形となり、周辺単純支持の局部座屈強度に比較すると耐力の向上をもたらす。

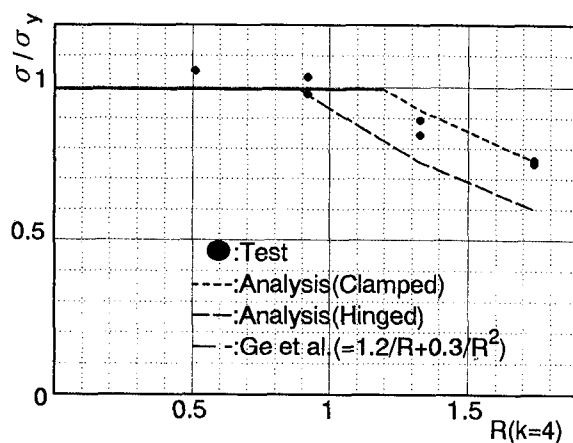
Fig.11(b)では、Ge らの局部座屈算定式⁴⁾ もあわせて示している。これは箱要素による有限変位解析に基づいたものであり、残留応力として部材端では引張の降伏応力が、また中央部では降伏応力に対して 30%の圧縮応力が存在するものと仮定されている。すると、実験結果は、ほぼGeの式を満足する結果となることが示されている。

このような周辺固定と単純支持の中間の特徴を示す鋼板要素の解析を行うにあたっては、Ge らの解析法に加え、コンクリートによる内部への拘束条件を考慮しつつ、四隅の弾性拘束条件を満足する解析モデルを利用することができれば、高精度な解析を、しかも容易に行うことができるものと期待できる。

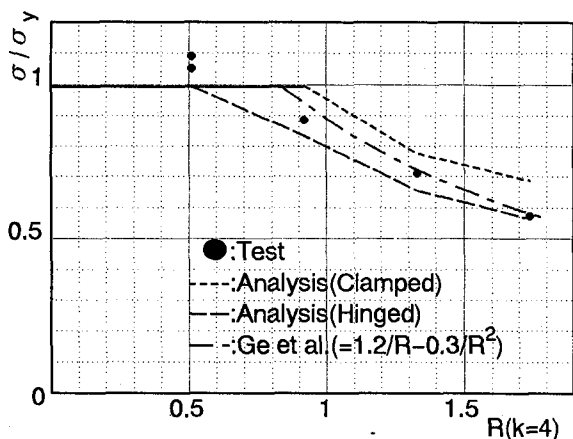
(3) 充填コンクリートの挙動について

Type-2 の供試体の荷重-ひずみ関係は Fig. 13 のとおりである。ここで、縦軸は $\phi 10 \times 20$ のコンクリート円柱供試体の圧縮強度で、また横軸はそのときのひずみで無次元化している。なお、実験値のひずみは上下載荷板の変位を供試体の長さで割って求めた平均ひずみである。

さらに図中には、周方向の拘束を受けない場合の挙動として円柱供試体のものも点線で示している。ただしこのひずみはひずみゲージによるものである。これらを比較すると、鋼管に充填されたコンクリートは強度、およびひずみの両面で周方向の拘束を受けないコンクリートを上回っており、耐荷力の向上やダクティリティの大きさが表れている。このコンクリートの性能向上は、鋼管による周方向の拘束力によって生じるものであり、構成



(a) Annealed Models



(b) As Welded Models

Fig.11. Relations of maximum stress and R

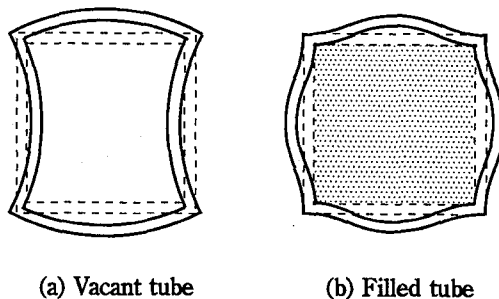


Fig. 12. Buckling modes of vacant and filled tubes

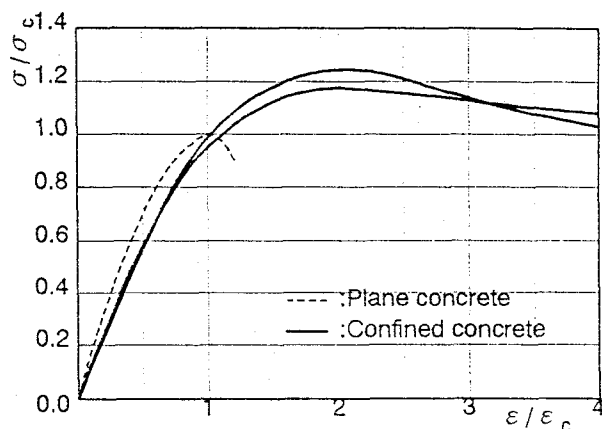


Fig.13. Stress-Strain Relation of Concrete

する板部材の幅厚比に関係するものと考えることができる。すなわち、幅厚比が小さいならば、かなりの強度の向上が期待できるが、逆に大きいとほとんど影響がないとも考えられる。幅厚比と強度との関係の詳細については今後の課題とする。

(4) 鋼管とコンクリートを

同時に載荷する場合の挙動について

ここでは、鋼管とコンクリートを同時に載荷する場合の挙動を、鋼管のみ、およびコンクリートのみを載荷する場合の挙動の和と比較することによって、コンクリートを充填した鋼管部材の挙動を、その累加で求めることができるかどうかを検討し、その耐力を求めるための方法を考察する。

比較対象とする供試体はいずれも焼鈍処理を施していない供試体で、鋼管のみに載荷した Type-1(B1-45)、コンクリートのみに載荷した Type-2(B2-45)、およびその両方に載荷した Type-3(B3-45)とする。これらは幅厚比 45 で互いに同じ寸法を持つ供試体であるが、Type-2 と Type-3 ではコンクリートの強度が異なるため、縦軸（荷重）に関して以下のような補正を行った。

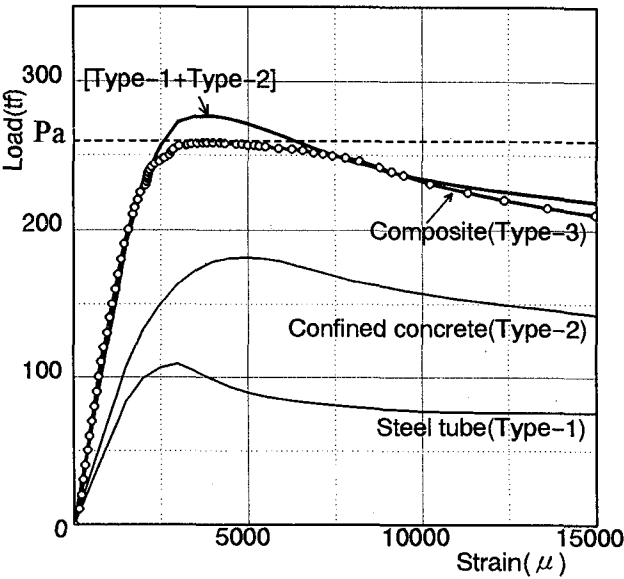
$$P_2' = \frac{\sigma_2}{\sigma_3} P_2$$

- ここに P_2' :Type-2 の荷重値（補正值）
- P_2 :Type-2 の荷重値（測定値）
- σ_1 :Type-3 のコンクリート強度
- σ_2 :Type-2 のコンクリート強度

Fig. 14 に各供試体の荷重－ひずみ曲線、および [Type-1 + Type-2] 曲線が示されている。この図によると、Type-3 曲線は単純累加である [Type-1+Type-2] 曲線と全般的にはよく一致しているが、ピーク付近はやや小さめに表されており、その最大値は約 7% 小さかった。この近傍では鋼管の局部座屈、およびコンクリートの圧壊の両方が発生していると考えられることから、理由としては以下の 2 点が考えられる。

まず、充填コンクリートの膨張により局部座屈の発生が助長された可能性があるという点である。コンクリートのポアソン比は鋼に比べて高応力域において急激に増加するため、最大耐力を発生する付近では鋼管を外側へ押し出す力がかかなり大きくなっていることが考えられる。また、もう 1 点は局部座屈の発生により充填コンクリートの拘束が失われたという点である。拘束が失われたコンクリートは当然のことながら拘束により得た強度の増加分を負担することはできない。この 2 点はともに鋼管とコンクリートの相互作用に起因するものであり、Type-1、Type-2 では考慮されていない現象である。

また Fig. 14 において、 P_a は Type-1 の荷重の最大値と



(P_a : Load of local buckling steel box and unconfined concrete)
Fig. 14. Load-strain relations

拘束力を受けない場合のコンクリート耐力（標準供試体圧縮応力）の和である。すると Type-3 の耐力はこの P_a にほぼ一致することがわかる。このことはコンクリートの拘束による強度増加を無視することに他ならないが、先にも示したようにコンクリートの圧壊よりも鋼管の局部座屈の発生が先行する供試体の場合には、それを余剰耐力として期待できないと考えることができる。

よって、コンクリートを充填した角形鋼管柱の耐力を求めるにあたっては、曲部座屈を生じる鋼管の最大荷重に標準供試体の圧縮強度、すなわち拘束を受けないコンクリートの耐力を加えたものを目安とすることができると考えられる。ただし、幅厚比が非常に大きく局部座屈を起こしやすい供試体においては、コンクリートの膨張により局部座屈の発生が助長され、 P_a に達しないとも考えられることから、さらに多くのデータをもとに検討を行う必要があると思われる。

4. 結論

本論文における成果・結論をまとめると以下のとおりである。

- I. コンクリートを充填した鋼管柱の局部座屈に関する実験と解析を行った。その結果、荷重と鋼板中央に貼付したひずみゲージの値との関係において良好な対応が得られることが示された。
- II. コンクリートを充填した鋼管柱の局部座屈強度の実験値は、板要素の有限変位弾塑性解析法のうち周辺を固定したものと単純支持したものとの中間となることが示された。そして、このような挙動を示す鋼管の解析においては、境界条件の取り扱いにおいて何らか

の工夫が必要であることを示した。

Ⅲ. 鋼管の内部に充填されたコンクリートの耐力、およびダクティリティにおける優位性が示された。また、この優位性は幅厚比に依存すると考えられるので、幅厚比との関係を検討する必要がある。

Ⅳ. コンクリートを充填した鋼管部材の挙動と、鋼管およびコンクリートのそれぞれの挙動を累加したものを比較した結果、その最大強度付近において一致しなかったが、最大強度に関しては、鋼管とコンクリート標準供試体のそれぞれの最大耐力の和で近似的に求められることを示した。

参考文献

- 1) T.Kitada, O.Yoshikawa and H.Nakai
A Design Method for Steel Plate Elements in Concrete
Enclosed Square Steel Tubular Columns
The First East Asian Conference on Structural
Engineering and Construction, Bangkok, 1986.1

- 2) H.Nakai, O.Yoshikawa and T.Kitada
An Experimental Study on Ultimate Strength of
Composite Columns for Compression or Bending
Proc.of JSCE, No.374 / I-6, pp.67-77, 1986.10
- 3) 葛漢彬・宇佐美勉・寺田昌弘
コンクリートを充填した鋼製箱形短柱の圧縮耐力に
関する実験的および理論的研究
構造工学論文集 Vol.38A, pp.119-132 1992年3月
- 4) H.B.Ge and T.Usami
Strength Analysis of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Box
Columns
Journal of Constructional Steel Research, Vol.30, No.3
pp.259-281, 1994
- 5) T.Yamao and T.Sakimoto
Nonlinear Analysis of Thin-Walled Structures by a Coupled
Finite Element Method
Proc.of JSCE, No.374 / I-6, pp.57-66, 1986.10

(1994年9月14日受付)