

繰り返し荷重下におけるコンクリート充填鋼管柱の 終局挙動の簡易解析法とその適用性に関する検討

A SIMPLIFIED ANALYSIS OF ULTIMATE BEHAVIOR ON CONCRETE-FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS

渡辺 浩*, 崎元 達郎**

* 修(工) 熊本大学助手 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

** 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

A simplified numerical method for analyzing the ultimate behavior of concrete-filled steel box structures under horizontal cyclic loads is proposed. The method is based on ordinary 2nd-order frame analysis with beam-column elements, which are divided into number of fibers. Equivalent stress-strain relations of inner concrete are determined in consideration of the confined effects by using column tests. Those of outer steel tube are determined from the results of FEM analysis for stub columns. These equivalent stress-strain relations are introduced into a frame analysis program so that each fiber in the beam-column element follows defined stress-strain relation. Comparison of the numerical results with several experimental results shows that the proposed method is accurate and efficient for the practical use.

Key Words : Simplified analysis, Cyclic behavior, Concrete-filled steel tubular column, Bridge piers

1. まえがき

道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編¹⁾では平成8年12月の改訂より、コンクリートを充填した鋼製橋脚に対する地震時保有水平耐力法による耐震設計が導入された。この方法による結果は実験結果をよく評価できることが示されている²⁾が、下記の幾つかの点で検討の必要があると思われる。すなわち、

- 1) 座屈を考慮した圧縮側鋼材の応力度-ひずみ関係が幅厚比や補剛材剛比等の座屈パラメータに無関係に与えられている。
- 2) 充填コンクリートの挙動について、最大強度をコンクリートの基準強度の一律2倍とし、また最大強度以降の劣化が存在しないとしている点で鋼管による拘束効果が過大に評価されている可能性がある。
- 3) 微小変位解析であり、 $P-\delta$ 効果を無視している。
- 4) 繰り返しによる影響は小さいとして、単調載荷による解析で評価している。

一方で宇佐美らは、阪神・淡路大震災以前より充填鋼管柱脚に関する研究を精力的に行っており、それらに基づいて独自の設計法を提案している^{3) 4)}。その方法は実務設計における簡便性を重視した道路橋示方書とほぼ同様の方法であるが、特徴としては以下のような点が挙げられる。

- a) 鋼材の応力度-ひずみ関係は母材のものを用いるが、補剛材の細長比パラメータの関数として局部座屈を考慮した限界ひずみを定義し、中空部分の限界はこれによって定める。
 - b) コンクリートでは、拘束効果による強度増加を無視し、充填部断面の限界をコンクリートの限界ひずみによって与える。
 - c) 有限変位解析により $P-\delta$ 効果を考慮している。
 - d) 繰り返しによる影響は小さいとして、単調載荷による解析で評価している。
- この方法による解析結果は、実験結果と概ねよく一致するが、終局変位に関しては実験結果と解析結果との間のばらつきがあると報告されている^{3) 4)}。
- 本論文では、充填鋼管構造について、実設計を考慮しただけ簡便性を犠牲にせず、かつより精度よく解析する方法を提案する。本法の特徴は下記のようにまとめられる。
- i) 鋼材の応力度-ひずみ関係は局部座屈を考慮した鋼板の平均の応力度-ひずみ関係として、幅厚比の関数により定義する。
 - ii) 鋼管により拘束を受けるコンクリートの応力度-ひずみ関係は、外側鋼板の幅厚比の関数として定義する。
 - iii) 有限変位解析により $P-\delta$ 効果を考慮している。

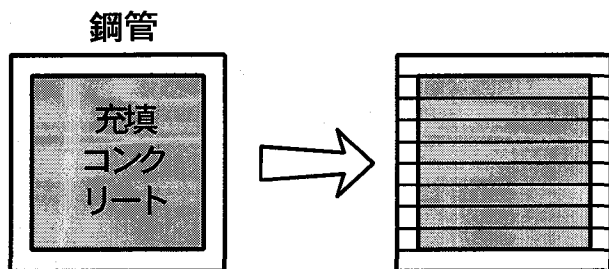


図-1 断面分割法

- iv) 繰り返し荷重に対する解析やそれに伴う強度劣化の追跡も可能である。
- v) 単一柱脚のみならず、ラーメン橋脚や構造システムとしての解析も容易に可能であり、実地震に対する時刻歴応答解析のモデルとしての発展性もある。
- 以下、本法による解析法を紹介し、その適用性について検討する。

2. 解析手法

(1) 概論

本論文で提案する解析法は、繰り返し荷重下での挙動の追跡を容易に行うため、骨組構造解析法を利用して簡易化している。充填鋼管構造は鋼管による充填コンクリートの拘束効果やコンクリートによる鋼管の局部座屈抑止効果により性能が改善されるといわれているが、骨組構造解析では一般的にこれらの局所的な挙動を考慮することはできない。そこで本解析法では、材料の応力度－ひずみ関係にこれらの挙動の影響を加味して改めて定義し、骨組構造解析に導入するものとする。すなわち、充填コンクリートの挙動は鋼管による拘束の大きさを考慮した上で 3 章で説明するように、また鋼管の挙動には充填コンクリートによる局部座屈抑止効果を考慮した上で 4 章で説明するように応力度－ひずみ関係の中に取り込み、これらを用いて解析を行うことにする。

本解析法は増分移動座標法を用いた増分ひずみエネルギー停留原理により定式化を行う⁵⁾。また、断面は図-1のように層状に分割し、塑性化の進展を追跡するものとする。

3. 充填コンクリートの挙動

道路橋示方書で示されている地震時保有水平耐力法における充填コンクリートの応力度－ひずみ関係の挙動は、鋼管による拘束効果を考慮して最大強度を基準強度の2倍とし、最大強度以降の劣化はないと定義している。しかし、特に本論文で扱うような繰り返し解析においては拘束効果を過大に評価する可能性がある。そこで充填コンクリートの応力度－ひずみ関係については、文献6)によるものとした。

ここでは、様々な板厚と幅厚比を持つ充填鋼管短柱に軸圧縮力を載荷する実験結果を基に、鋼管によって拘束を受ける充填コンクリートの等価な応力度－ひずみ関係が鋼管の幅厚

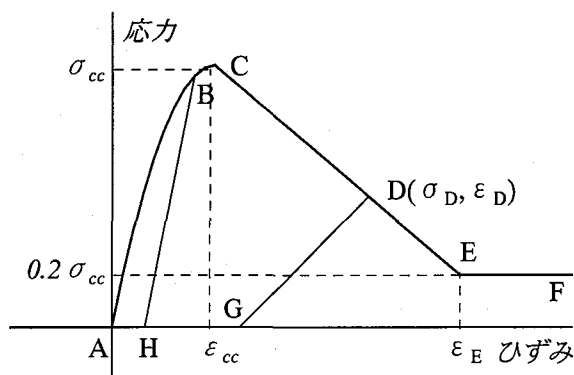


図-2 充填コンクリートの応力－ひずみ関係の定義

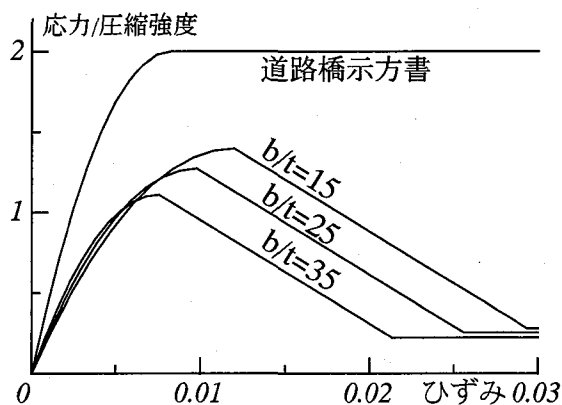


図-3 充填コンクリートの応力－ひずみ関係の例

比 b/t として導かれている。その一例が図-2 であり、下記のように定義されている。

圧縮領域では最大強度を示す点 C ($\sigma_{cc}, \epsilon_{cc}$) までは放物線で、その後直線的に劣化するものとした。ただし、鋼管に充填されているため劣化後もある程度の応力度は負担できると考えられる。この大きさについて調べた報告はあまり見あたらないが、ここでは RC のコアコンクリートの挙動について調べた Saatioglu らの研究⁷⁾を参考に圧縮応力の最小値は圧縮最大応力の 20%とした。

繰り返しに関しては中村らによる履歴則⁸⁾を用いた。すなわち、最大強度途上で除荷された場合は初期接線勾配で、またこれ以上で除荷された場合は $2\sigma_D / \epsilon_D$ の傾き (σ_D, ϵ_D は D 点での応力、ひずみ) により応力度は減少し、その後は横軸上を移動する。再載荷では除荷された経路を逆に辿るものとする。なお、引張り応力度は無視できるものとした。

以上により得られた充填コンクリートの等価な応力度－ひずみ関係の例が図-3 に示されている。道路橋示方書のそれと比較すると、最大強度は拘束の程度により小さく表現され、それ以降の劣化はかなり大きいものとなっ

表-1 鋼管の FEM 解析における解析パラメータ

鋼材の種類	SM400, SM490, SM490Y
幅厚比パラメータ	0.23~1.92
アスペクト比	1.0
初期たわみの最大値	板幅の 1/150
残留応力	板中央部で降伏応力の 30% 溶接部で降伏応力の 90%
硬化則	移動硬化則

ている。

4. 鋼管の挙動

(1) 概要

コンクリートを充填しない角形断面鋼管の局部座屈挙動については多くの研究がなされているが、充填鋼管では充填コンクリートにより鋼管の内部への座屈変形が抑止されるため、強度や劣化挙動において若干の性能の改善が見られるのではないかと考えられる。ここでは、充填鋼管における鋼管の挙動は、内部への変形を拘束した上での鋼管の局部座屈挙動解析により得られると考え、汎用構造解析プログラム MARC[®]を用いた FEM 解析によりその挙動を求め、その定義を試みた。

(2) 鋼管の局部座屈挙動解析

解析は対称条件を考慮して図-4のように1/8部分のみを対象とし、その端部の鋼管部分のみに変位制御により一様軸圧縮を与える解析を行った。鋼管には4節点 Shell 要素を用い、幅、長さ、厚さ方向にはそれぞれ8, 8, 5分割した。なお、本解析では充填コンクリートが存在する条件の下での鋼管の挙動を独立して得ることを目的としているため充填コンクリート部分には载荷しない。よって解析を容易にするため充填コンクリートを剛体として鋼管の内部への変形を抑止する効果を得るものとした。

解析パラメータは表-1のように設定した。幅厚比パラメータ R はその影響を考慮するため8種類に変化させた。ここで、 R は以下のように定義される。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (k=4.0) \quad (1)$$

鋼素材の応力-ひずみ関係については、ひずみ硬化が局部座屈挙動に与える影響を精度よく評価するために、後藤らにより実測されたひずみ硬化挙動¹⁰⁾を適用した。また繰返しに関しては移動硬化則を用いた。

等価な応力度-ひずみ関係は、端部に与えた変位を長さで除することで求められる平均ひずみ、および全節点の反力の和を鋼管の断面積で除することで求められる平均応力度の関係として得られる。図-5の点線は解析結果の一例として SM490 の FEM 解析結果を示している。なお縦軸、横軸ともに降伏応力度 σ_y および降伏ひずみ ε_y を用いて無次元化している。この図より、等価な応力度

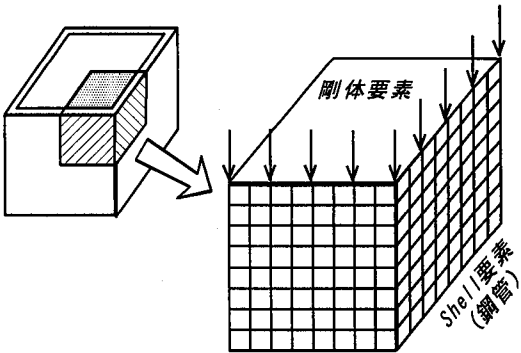


図-4 鋼管の FEM 解析モデル

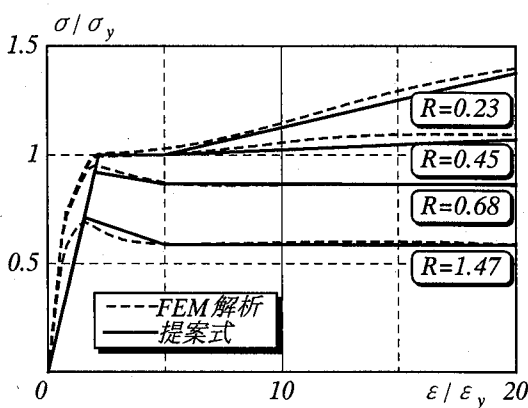


図-5 FEM 解析の結果と提案式との比較(SM490)

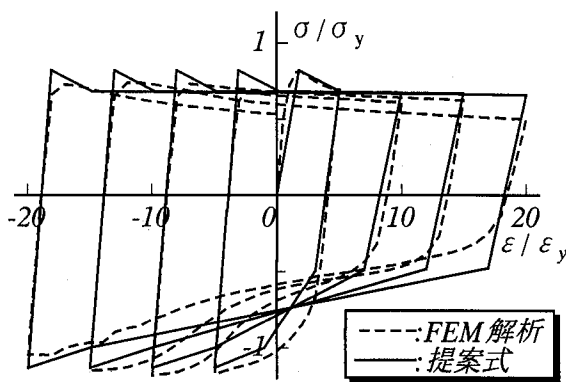


図-6 FEM 解析の結果と提案式との比較 (SM490, $R=1.02$)

—ひずみ曲線は原点から最大応力点まで、最大応力点から降伏ひずみの5倍の点まで、降伏ひずみの5倍の点から20倍の点まで、およびこれ以降の4本の直線で表現できると考えることにする。そこで、最大応力度 σ_u 、最大応力時のひずみ値 ε_u 、および ε_y の5倍および20倍における応力度 σ_5 、 σ_{20} を最小2乗法により、表-2のように定義した。

表-2 鋼管の等価な応力度－ひずみ関係の定義式

鋼 種		SM400	SM490	SM490Y
σ_u / σ_y	$R \leq 0.5$		1.00	
	$R > 0.5$		1.0	
			$0.783 + 0.440R - 0.011R^2$	
$\varepsilon_u / \varepsilon_y$	$R \leq 0.5$		2.20	
	$R > 0.5$		1.0	
			$0.302 + 0.348R - 0.085R^2$	
σ_s / σ_y	$R \leq 0.5$	1.00	1.00	1.00
	$R > 0.5$	1.0	1.0	1.0
		$0.467 + 1.168R - 0.207R^2$	$0.496 + 1.103R - 0.191R^2$	$0.439 + 1.228R - 0.211R^2$
σ_{20} / σ_y	$R \leq 0.5$	$-1.038R + 1.429$	$-1.387R + 1.695$	$-1.377R + 1.655$
	$R > 0.5$	1.0	1.0	1.0
		$0.583 + 1.126R - 0.198R^2$	$0.483 + 1.132R - 0.203R^2$	$0.483 + 1.211R - 0.214R^2$

なお σ_{20} 以降は応力の変化はないものとした。

以上をもとに得られる局部座屈を考慮した等価な鋼の応力度－ひずみ関係の一例が図-5に実線で示されている。簡略化のため始点と最大強度点を直線で結んだことから初期勾配が小さめに与えられているが、履歴挙動への影響は少ないと考えられる。この点を除けば、いずれの場合も提案式は解析結果をよく近似できていることがわかる。

(3) 繰り返し荷重下での挙動

図-6 の点線は FEM 解析により得られた繰り返し荷重下での応力度－ひずみ曲線の一つである。ただし、圧縮を正としている。この結果より繰り返し荷重の場合の応力度－ひずみ関係は下記に従って図-7 のように定義する。

a) 圧縮側の応力度－ひずみ関係には前述の単調増加の関係が適用できる。

b) 圧縮降伏後に除荷される場合は図-7 の A-B-C のように移動する。ただし

$$E_{ud} = \sigma_A / \varepsilon_y$$

$$\sigma_B / \sigma_y = (-0.1878R + 0.9158)\sigma_A \quad (2)$$

σ_A : 除荷時の応力度

$\varepsilon_C = \varepsilon_y$ (最初の引張荷重)
=過去における最大引張ひずみ度(2度目以降)

c) 引張降伏状態から除荷された場合 (D-E 間) は素材のヤング率 E_s の傾きで最大応力度まで移動する。

これらに従って与えられた鋼管の応力度－ひずみ関係を FEM 解析の結果と比較した一例が図-6 の実線である。両者は実用上十分な範囲で一致している。

(4) 曲げ挙動に対する適用性について

以上で得られた鋼管の応力度－ひずみ関係は純圧縮荷によるものであり、曲げを受ける供試体においてはフランジの挙動に相当するものと考えることができる。本来ならばウェブに関しても同様な検討を行うべきであるが、ここでは簡略化のため以下の考察を行う。

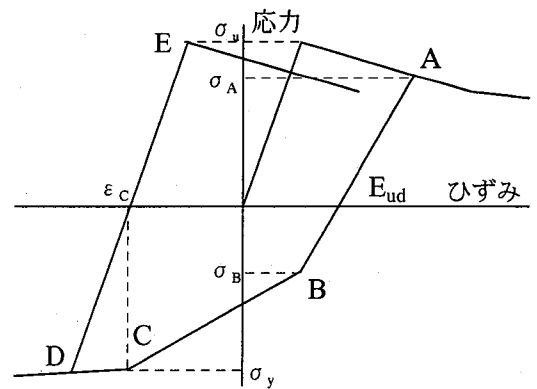


図-7 繰り返し載荷における等価な応力度－ひずみ関係の定義の方法

まずウェブの曲げ挙動は、上記で定義した純圧縮の応力度－ひずみ関係をひずみ勾配を考慮した上で適用した挙動と、局部座屈を考慮しない場合の挙動との中間を示すと考えられる。これに、

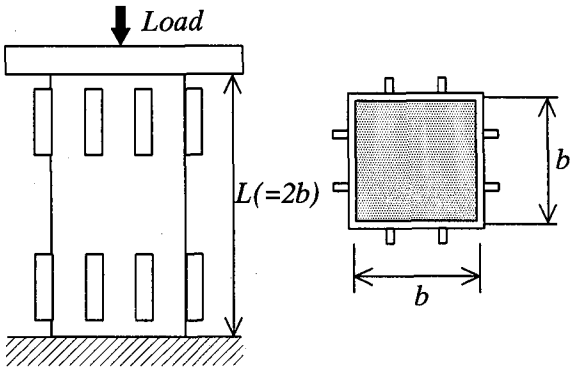
○フランジと比較してウェブの応力度－ひずみ関係が曲げ挙動に与える影響は小さいと考えられること

○ウェブに作用するのは面内曲げであり、同程度の荷重でも純圧縮と比較して座屈による耐力の低下は小さいと考えられること

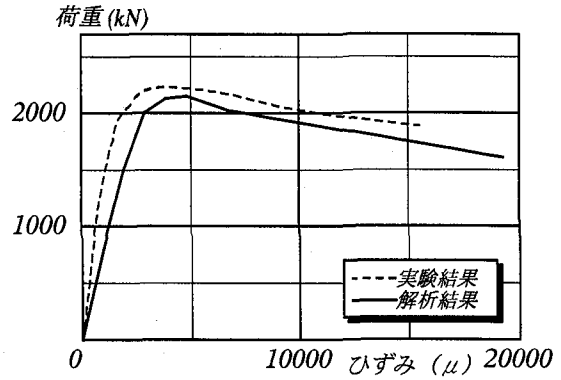
の2点を考え合わせると、ウェブに対しては局部座屈を考慮しない応力度－ひずみ関係を適用しても実現現象と大差ない解が得られるものと考えることができる。よって本研究では手法の簡略化のため、面内曲げ座屈に関する検討は特に行わず、ウェブについては局部座屈を考慮しない応力度－ひずみ関係で代用するものとする。なお、同様な解析において軸圧縮試験から得られた挙動をウェブに導入した解析例¹¹⁾も見られることから、以降の解析例ではこの場合についての解析も併せて行い、結果を比較・検討している。

表-3 諸元と材料的性質（解析例Ⅰ）

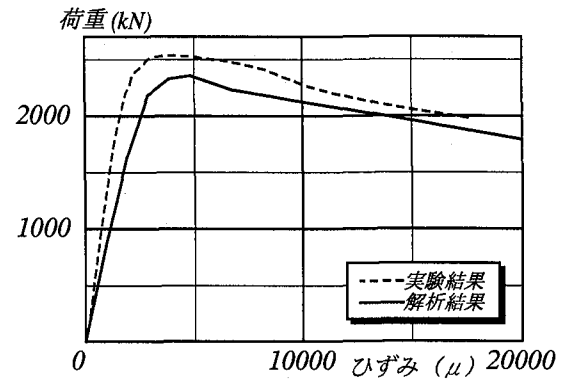
モデル		A3-45(1)	A3-45(2)
断面寸法 (mm)		202.5×202.5	
鋼 材	板厚 (mm)	4.5	
	幅厚比	45 (R=0.27)	
	ヤング係数 (GPa)	217.0	
	降伏応力 (MPa)	322.4	
	最大応力 (MPa)	345.0	
	降伏ひずみ (μ)	1490	
	ポアソン比	0.227	
コンク リート	圧縮応力 (MPa)	32.4	37.7
	ヤング係数 (GPa)	29.4	26.4
	圧縮ひずみ (μ)	2080	2510
	ポアソン比	0.22	0.36



(a) 実験の概要 (b) 供試体断面図
図-8 実験の概要と解析モデル（解析例Ⅰ）



(a) A3-45(1)



(b) A3-45(2)

図-9 実験結果と解析結果との比較（解析例Ⅰ）

5. 数値解析例

先に述べたように、以上によって提案された等価な応力度－ひずみ関係を骨組解析法に導入することにより簡易解析法が完成する。以下、本法における解析を既往の実験に適用して、本簡易解析法の妥当性を検討する。

(1) 解析例Ⅰ－軸圧縮実験¹²⁾

a) 実験の概要

図-8 に示すように、角型断面を有する充填鋼管短柱に漸増軸圧縮力を与える実験である。供試体に用いた鋼管は SM400 相当材を用い、4 隅を溶接して成形したもので、板厚は $t=4.5\text{mm}$ 、幅厚比は $b/t=45$ 、長さは断面幅の 2 倍である。供試体の両端外側には、板面中央部分に局部座屈を発生させるために、図-8 のような補剛材が溶接されている。供試体は寸法が同一の 2 体であるが、コンクリートの圧縮強度のみが異なっている。鋼材およびコンクリートの諸元と材料試験の結果は表-3 のとおりである。実験では載荷板で挟まれた供試体の全断面に軸圧縮力を与え、荷重および供試体全長における変位が計測されている。

b) 解析結果との比較

本論文の例題では、長さ方向の分割数は要素長と断面

幅と等しくなるように決めるものとする。これは、解析結果に大きな影響を与える鋼管の応力度－ひずみ関係が、アスペクト比 1 のモデルの FEM 解析により得られたことによっている。従って本例題では長さ方向に 2 分割して解析を行っている。

図-9 ではこの結果と実験結果を比較しているが、これらの図より本解析法により概ね実験結果に対して良好な解析結果を得ることができることがわかる。なお、解析結果は実験結果に対して全体的に小さく表されているが、これは本実験供試体では初期たわみが $b/1000$ 程度と極めて小さかったのに対し、解析で用いた鋼管の応力度－ひずみ関係は $b/150$ の初期たわみを有する解析モデルより得ていることに起因していると考えられる。

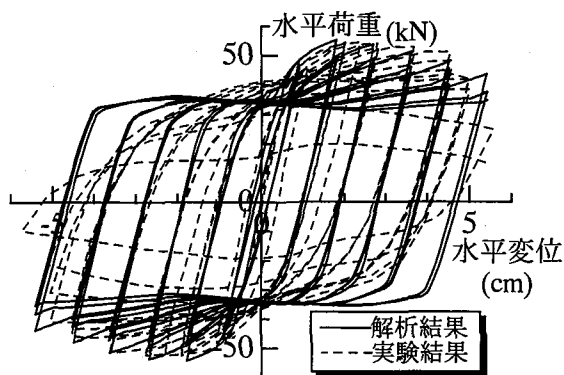
(2) 解析例Ⅱ－繰り返し水平力載荷実験¹³⁾

a) 実験の概要

名古屋大学において行われた一定軸力下で漸増繰り返し水平力を作用させる充填鋼管柱の終局挙動実験を対象に解析を行う。なお、本論文にて解析対象とする文献¹³⁾の UU-3 供試体では、図-10 に示すようにコンクリートは供試体の基部から 50%の高さのみにしか充填されていないが、鋼管の局部座屈は充填部分である基部で発生して

表-4 諸元と材料的性質（解析例Ⅱ）

モデル		UU-3
断面寸法 (mm)		170×111
鋼 材	板厚 (mm)	4.5
	幅厚比	38/25 (R=0.21/0.14)
	ヤング係数 (GPa)	197
	降伏応力 (MPa)	266
	降伏ひずみ (μ)	1340
	ひずみ硬化開始ひずみ	15300
	ポアソン比	0.269
コンクリート	圧縮応力 (MPa)	42.2
	ヤング係数 (GPa)	29.4
	ポアソン比	0.157



(a) 履歴曲線の比較

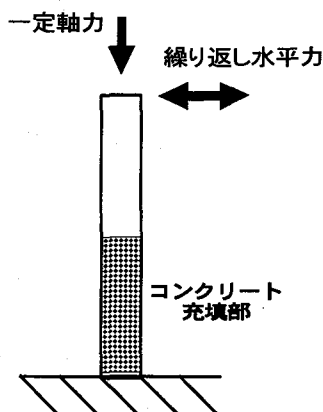
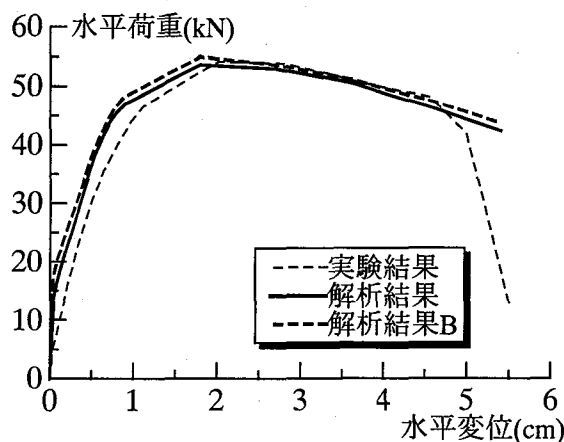


図-10 実験の概要（解析例Ⅱ）



(b) 包絡線の比較

図-12 実験結果と解析結果との比較（解析例Ⅱ）

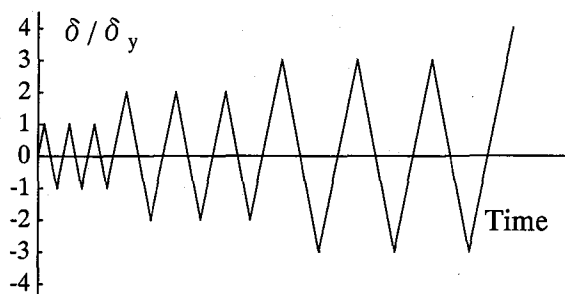


図-11 繰返し水平力の載荷方法（解析例Ⅱ）

いるため、本解析法の比較対象としては問題はないと考えられる。鋼管は SM400 材で板厚は $t=4.5\text{mm}$ 、断面形状は $170\times111\text{mm}$ 、幅厚比は 37.8 である。鋼管およびコンクリートの諸元と材料試験の結果を表-4 に示す。

実験では図-10 に示すように、まず鋼断面の降伏軸力の 20% に相当する軸圧縮力を載荷し、その軸力を保持しながら供試体頂部に漸増繰返し水平荷重を変位制御により与えている。水平荷重は図-11 に示すように、供試体基部の断面が降伏する変位 δ_y を基準に、その整数倍を正負に 3 回ずつ繰返ししながら載荷している。

b) 解析結果との比較

この解析結果を実験結果とあわせて図-12(a) に示す。またこれを包絡線でまとめたものが図-12(b) である。実験結果の水平荷重が水平変位 5.5cm 付近で大きく低下しているのは基部の溶接割れが原因であり、このことから本解析法では劣化に至る挙動がよく評価されていることがわかる。

また、本例題は曲げ載荷であるため、4(4)で述べられた問題に対する検討を行う。図-12(b)には比較のためウェブについてひずみ勾配を考慮した上で純圧縮の応力度-ひずみ関係を適用した解析例（解析結果 B）も併せて示しているが、その両者の結果の違いは小さく、この解析例についてはウェブの応力度-ひずみ関係が全体の挙動に与える影響が小さいことが示されている。このことから、ウェブに関しては局部座屈を考慮しなくても良好な解析結果を得ることができるという 4(4)の手法の妥当性が示される。

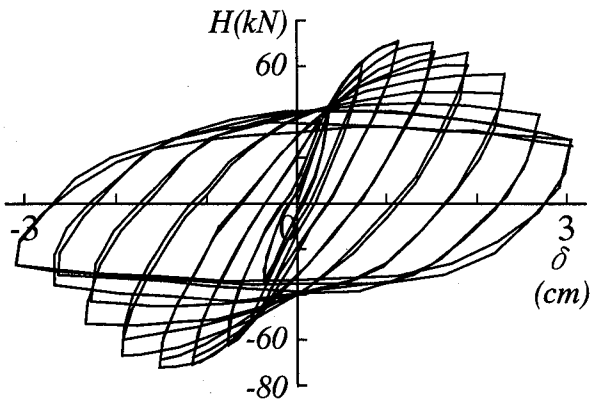
(3) 解析例Ⅲ－繰り返し水平力載荷実験¹⁴⁾

a) 実験の概要

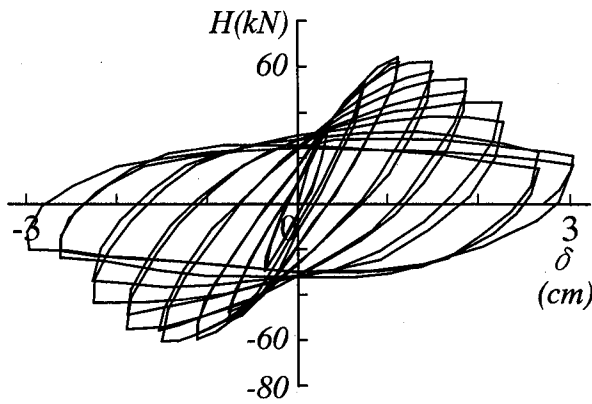
九州大学では一定軸力下で漸増繰り返し水平力を受ける充填鋼管柱の終局挙動実験が松井らによって行われている。ここでは、文献14)に示された実験結果のうち、普通鋼を用いた実験結果を対象に解析を行った。供試体は、断面が150×150mm、幅厚比が47および60と比較的小

断面・薄肉の鋼管を使用している。鋼管およびコンクリートの諸元と材料試験の結果は表-5のとおりである。

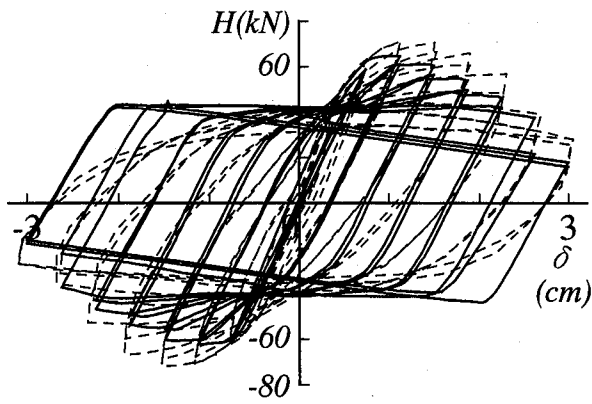
実験方法は解析例Ⅱと同様で図-10のとおりであるが、一定軸力は全断面降伏軸力の30%と大きめとなっており、水平荷重の繰り返し回数は2回で、鋼管の全部分にコンクリートが充填されている。



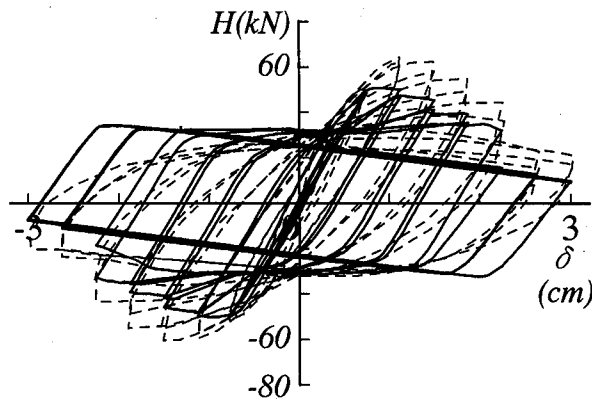
(a) 実験結果



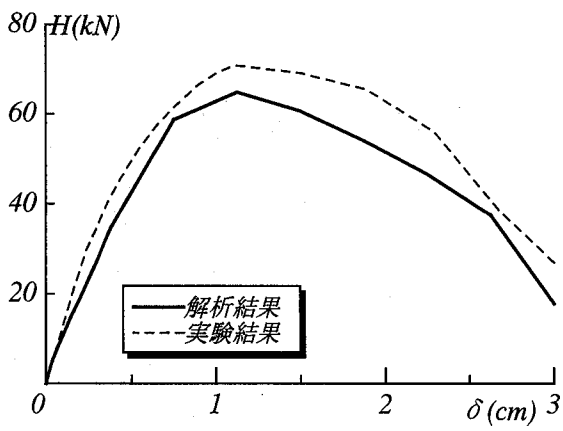
(a) 実験結果



(b) 実験結果と解析結果

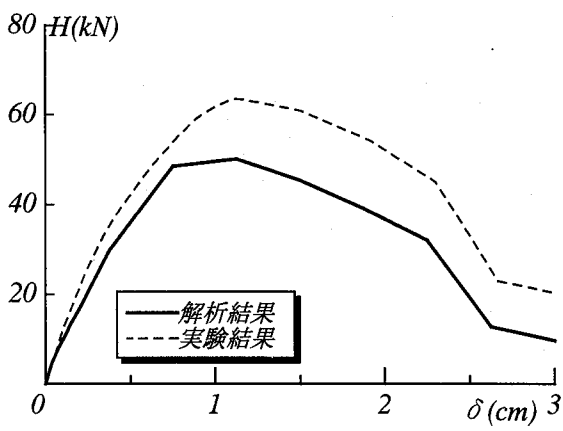


(b) 実験結果と解析結果



(c) 包絡線の比較

図-13 実験結果と解析結果の比較（解析例Ⅲ）CC473



(c) 包絡線の比較

図-14 実験結果と解析結果の比較（解析例Ⅲ）CC603

表-5 諸元と材料的性質 (解析例Ⅲ)

モデル		CC473	CC603
断面寸法 (mm)		150×150	
鋼 材	板厚 (mm)	3.2	2.5
	幅厚比	47	60
	降伏応力 (MPa)	380	386
	最大応力 (MPa)	478	450
	ひずみ硬化開始ひずみ	14000	19700
コンクリート	圧縮応力 (MPa)	39.4	40.8
	ヤング係数 (GPa)	29.2	29.7
	圧縮ひずみ (μ)	1840	2010

b) 解析結果との比較

図-13, 14 は両モデルの解析結果と実験結果との比較である。(a)と(b)を比較すると解析結果は全体的に角張っているが、劣化に至る状況をよく再現できていると考えられる。

(c)はこれらを包絡線で比較したものである。これらを比較すると、解析結果はいずれの場合も実験結果と類似しているが荷重は小さめとなっている。これは鋼管が冷間加工であること、本実験供試体は建築用部材を想定しており軸力が降伏軸力の 30%と一般的な橋脚と比較してかなり大きく与えられていること等に起因していると考えられる。

6. 結論

本研究によって得られた結論をまとめると下記のようなになる。

- ① 局部座屈を考慮した鋼管の応力度-ひずみ関係を幅厚比の関数として定義した。当然のことながら、本論文の4章で実施した FEM 解析は今後は必要ない。
- ② ①の結果と鋼管により拘束を受ける充填コンクリートの応力度-ひずみ関係を適用した簡易解析法により、充填鋼管構造の挙動が精度よく評価できることが示された。
- ③ 本解析法によると、例えば今回取り扱ったような例題に対してもパーソナルコンピューターにより約 10 分で繰り返し解析による結果を得ることが可能であり、簡易解析法としての提案法の優位性が認められる。
- ④ 今後の課題としては、補剛材を有する鋼管の応力-ひずみ関係を定義し、補剛断面にも適用範囲を広げることが挙げられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12
- 2) 西川 和廣，村越 潤，上仙 靖，高橋 実：道路橋示方書における鋼製橋脚の耐震設計について，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，pp.1-7，1997.5
- 3) 宇佐美 勉，鈴木 森晶，I. H. P. Mamaghani，葛 漢彬：コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.69-82，1995.10
- 4) 才塚 邦宏，宇佐美 勉：コンクリート部分充填柱鋼製橋脚の終局耐震設計法と耐震実験による検証，土木学会論文集，No.570/I-40，287-296，1997.7
- 5) Komatsu, S. and Sakimoto, T. : Nonlinear Analysis of Spatial Frames Consisting of Members with Closed Cross Sections, Proc. of JSCE, No.252, pp.143-157, 1976.8
- 6) 渡辺 浩，崎元 達郎，千場 幸輝，大西 俊一：コンクリート充填鋼管構造の終局挙動の簡易解析法，構造工学論文集，Vol.43A，pp.217-224，1997.3
- 7) M.Saatcioglu and R.Razvi : Strength and Ductility of Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607, 1992.6
- 8) 中村 光，二羽 淳一郎，田辺 忠顕：鉄筋コンクリート柱の終局変位に関する解析的研究，土木学会論文集 No.420/V-13，pp.115-124，1990.8
- 9) MARC Users Manual Vol.A-E，日本マーク
- 10) 王 慶雲，後藤 芳顯，高橋 宜男，小畑 誠：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析について，第 2 回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.369-376，1997.1
- 11) Kawaguchi, J., Morino, S., Atsumi, H. and Yamamoto, S.: Strength Deterioration Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Beam-Columns, Engineering Foundation Conference on Composite Construction II, Potosi, MO, USA, 1992.6
- 12) 渡辺 浩，崎元 達郎，山尾 敏孝，持田 拓児，寺田 昌弘：内部にコンクリートを充填した角形 4 鋼管柱の局部座屈に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.41A，1995.3
- 13) 宇佐美 勉，葛 漢彬，水谷 慎吾：コンクリートを部分的に充填した無補剛箱形鋼柱の繰り返し弾塑性挙動，構造工学論文集，Vol.39A，pp.249-262，1993.3
- 14) Matsui, C. and Tsuda, K. : Strength and Behavior of Concrete-Filled Steel Square Tubular Columns with Large Width-Thickness Ratio, Pacific Conference on Earthquake Engineering, 1987.8

(1998年9月18日受付)