

(23) コンクリート充てん角形鋼管柱の局部座屈後耐力劣化性状

STRENGTH DETERIORATION BEHAVIOR OF LOCALLY BUCKLING CFT BEAM-COLUMNS

川口 淳* 森野 捷輔** 町田 敏明***

By Jun KAWAGUCHI, Shosuke MORINO and Toshiaki MACHIDA

Cantilever beam-columns of steel square hollow section with or without filled-concrete were tested under constant axial load and alternately repeated horizontal load to investigate the strength deterioration phenomena due to local buckling, with varying values of the experimental parameters; axial load ratio, width-thickness ratio and displacement amplitude in the repeated loading. Discussed are the effects each experimental parameter together with the effect of filled-concrete on the deterioration of strength and energy dissipation capacity with the load repetition, in view of the results of analysis based on the degrading type stress-strain relation of the steel representing the effect of local buckling.

1. 序

コンクリート充てん鋼管柱(以下、CFT柱)は優れた耐震性能を有することが知られているが、いったん大きな地震力によって局部座屈を生じると、建物全体の崩壊につながりかねない。局部座屈の発生は材の幅厚比、軸力比および地震時の変形振幅に依存して生じるので、完全に設計時にこれを防ぐことは困難であり、また不経済でもある。本研究は、局部座屈後の耐力および変形性能がある程度確保できるような設計条件を導き出すことを最終的な目的として、一般にその伸び性能に問題

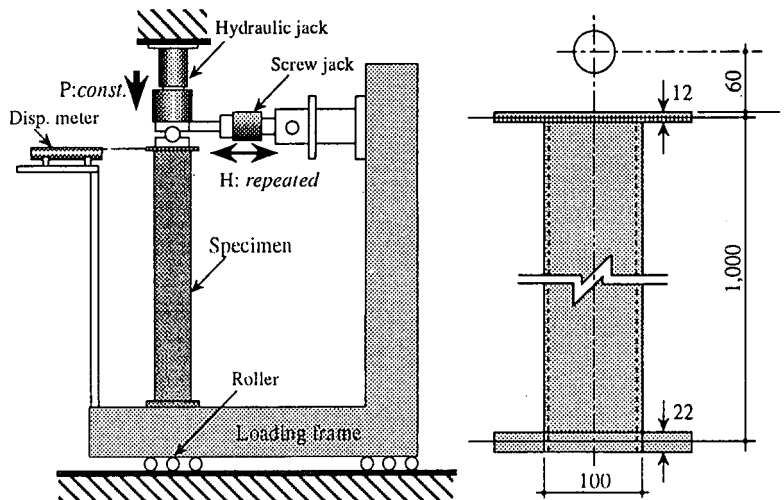


図1 実験装置と試験体

があるとされている冷間成形角形鋼管柱を対象に、変数を鋼管幅厚比、軸力比、繰返し変位振幅およびコンクリート充てんの有無とした実験を行って、局部座屈を生じた後の柱の耐力劣化性状を系統的に調べたものである。

* 工修 三重大学助手 工学部建築学科

** 工博 三重大学教授 工学部建築学科

*** 工修 佐藤工業(株)

表 1 実験変数と試験体一覧

Filled-concrete				Void								Filled											
Axial load ratio (%)				5		10		15		20		15		20		25				30			
Amplitude ratio (%)				1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.2	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2	1.0	1.2		
Width-thickness ratio				22	A	A	A	A	A	B	A	B	A	B	A	B	C	C	A	B	A	B	
				31	D		D		D		E		E	F	E	F	F	F	F	E	F	E	F
				43	G		G		G		G		H	I	H	I	I	I	H	I	H	I	

表 2 素材の機械的性質

Material	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Yield stress (N/mm ²)	332.2	443	384.2	398.9	324.4	346.9	384.2	380.2	385.2
Tensile strength (N/mm ²)	402.8	487.1	458.6	433.2	440.1	419.1	456.7	460.6	446.2
Elongation (%)	29.9	12.8	26.7	25.9	23.5	22.8	21.2	19.6	17.4
Concrete strength (N/mm ²)	23.6	21.7	24.8	-	22.6	17.6	-	26.6	17.6

2. 実験概要

試験体は、図 1 に示すような、冷間成形角形鋼管 (□-100x100, $l=1000$ mm) STKR400 を用いた、柱頭に一定軸力と定変位振幅正負交番繰返し水平力を受ける片持柱である。試験体と実験変数一覧を表 1 に、表中のアルファベットに対応する素材の機械的性質を表 2 にそれぞれ示す。実験変数の鋼管幅厚比は、鋼管の板厚を 4.5 mm, 3.2 mm, 2.3 mm とすることで、それぞれ 22, 31 および 43 の 3 種類とした。また、軸力比は降伏軸力に対する比として、中空のもので 5-20%, 充てん鋼管で 15-30% とし、繰返し変位振幅は、局部座屈発生変位 Δ_{cr} を基準とした比で、0.6-1.3 の範囲に設定した。载荷ルールは、所定の軸力を柱に与えた後、正負交番繰返し水平力载荷を原則として 10 回行った。試験体の名称は、幅厚比を示す数字、コンクリートの充てんの有無 (C: 充てん, S: 中空), 軸力比 (%) および変位振幅比 (x 10) で示している。

3. 実験結果

3.1 局部座屈

ほとんどすべての試験体で、局部座屈は柱脚ベースプレート上方 55 mm-70 mm の位置に生じ、中空の試験体 (以下 S シリーズ) では、膨らむ面とへこむ面がウェブとフランジに、充てん試験体 (以下 C シリーズ) では、すべての面で膨らむ形式で生じた。また、軸力比が小さく、変位振幅が大きい一部の試験体で鋼管に亀裂を生じた。図 2 に S シリーズと C シリーズの振幅比 1.0 の試験体の局部座屈発生変位 Δ_{cr} をプロットしたものを示す。軸力比および幅厚比の増加に伴い、 Δ_{cr} が小さくなる。また、同一変数の試験体で、S シリーズと C シリーズを比較すると、幅厚比 22 と 43 で C シリーズが S シリーズの約 1.4 倍、幅厚比 31 で約 1.9 倍となる。これは、幅厚比が 22 のものは、鋼管部分が

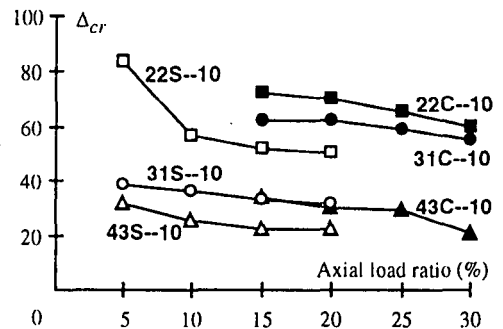


図 2 局部座屈発生変位

軸力のほとんどを負担し、 Δ_{cr} の絶対値は大きい。充てんコンクリートによる局部座屈発生の遅延効果はさほど期待できないこと、また幅厚比が 43 のものは逆に鋼管の負担分が小さく、同様に充てんコンクリートの効果があまり発揮できないことを示している。この結果、幅厚比 31 のものが、鋼管とコンクリートのバランスがよく、充てんコンクリートの局部座屈発生の遅延効果がもっとも大きいといえる。

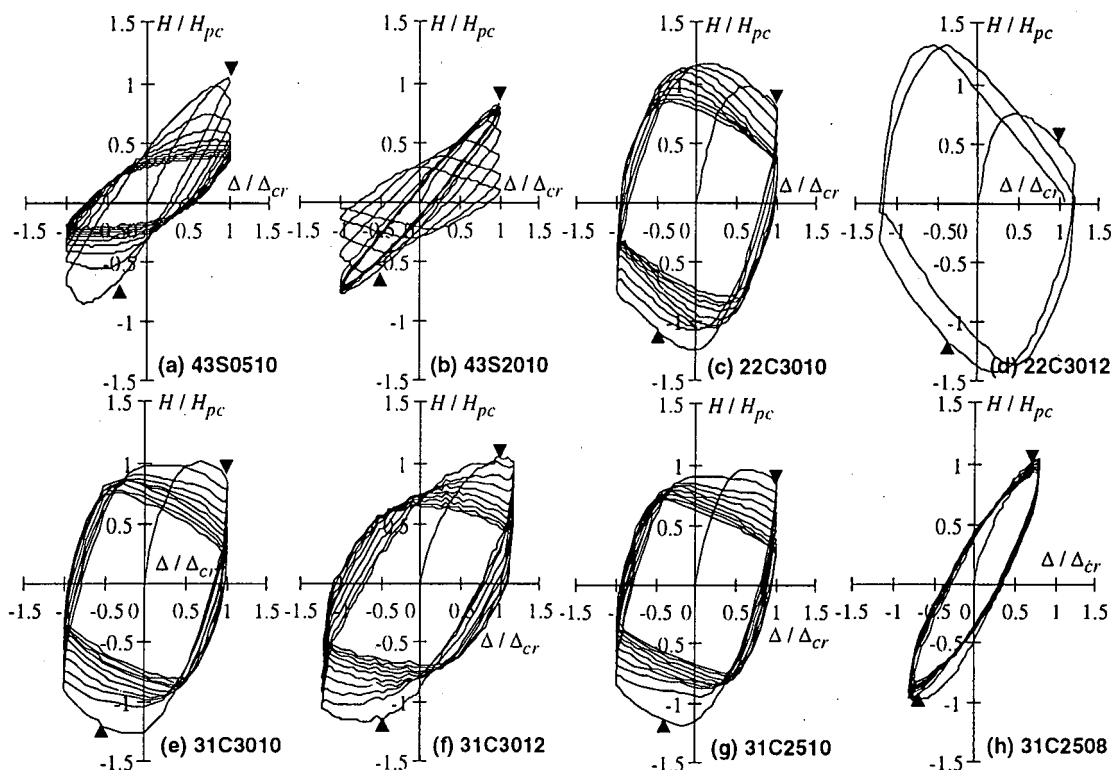


図3 履歴曲線

3.2 履歴性状

図3に代表的な試験体の水平力-水平変位履歴曲線を示す。水平力は試験体断面の終局モーメント M_{pc} を試験体の柱脚ベースプレート上方から柱頭ピンまでの長さで除した剛塑性崩壊荷重 H_{pc} で、水平変位は局部座屈発生時の水平変位 Δ_{cr} でそれぞれ無次元化している。また、図中の▼は局部座屈発生点を示す。(a), (b)は幅厚比43のSシリーズ試験体で、軸力比が5%と比較的小さければ最初の数サイクルでの耐力劣化は大きいものの、その後は耐力劣化が収れんしていくのに対し、軸力比20%では、繰返し載荷に伴う耐力劣化が著しい、ここには示していないが、幅厚比の小さいものほどこの傾向は顕著に見られ、幅厚比31および22の試験体では軸力比15%と20%で10サイクルの繰返し載荷を完了する前に復元力を失って実験を終了した。

(c), (d)は、幅厚比22のCシリーズの試験体で、軸力比が30%と非常に大きいにもかかわらず、コンクリート充てんの効果で安定した履歴を示す(c)に対し、(d)は同一軸力比で振幅比を1.2倍にとると履歴特性は一変し、PD効果による耐力劣化が激しく数サイクルで復元力を失った。これは、幅厚比22の試験体は局部座屈発生変位 Δ_{cr} が絶対値で非常に大きいため、PDモーメントの絶対値が大きいたがが一因である。

(e), (f)は、幅厚比31のCシリーズで、(c), (d)と同じ比較を行ったものである。こちらは、変位振幅比を1.2倍としても履歴特性に与える影響はほとんど見られない。これは、鋼管幅厚比22では試験体の耐力に対する鋼管部分の分担比率が非常に大きいため、鋼管の局部座屈発生が決定的な耐力低下に結びつくのに対し、幅厚比を増大させるとコンクリートの分担比率が増大し、耐力低下抑制効果が相対的に増大する事を示している。

(g), (h)は、幅厚比31のCシリーズで変位振幅を予想される局部座屈発生変位 Δ_{cr} より小さくとした場合の影響について示したものである。変位振幅を Δ_{cr} より小さく設定した場合でも、局部座屈は繰返し載荷中に発生し、その発生変位は単調載荷時の Δ_{cr} よりかなり小さくなること、また処女載荷時に局部座屈を発生させた場合と違って正側載荷時の局部座屈発生変位は必ずしも負側のそれより大きくならないことがわかる。いずれにしても、変位振幅比を1より小さく取った場合は、局部座屈は生じるが繰返し載荷に伴う決定的な耐力劣化はほとんど見られない。

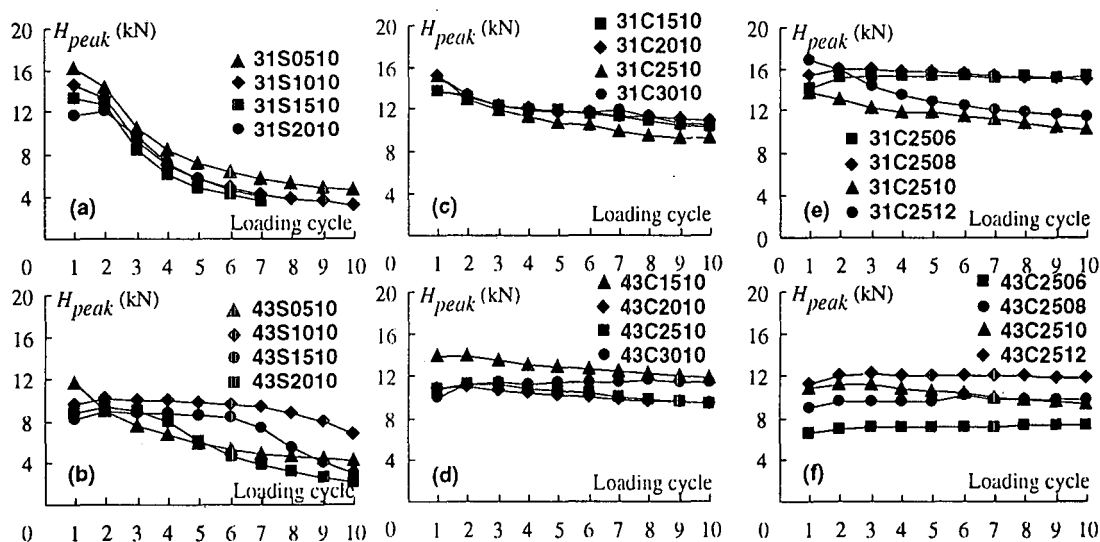


図4 耐力低下

3.3 耐力劣化性状

図4は繰返し載荷に伴う正側載荷時のピーク点耐力を幅厚比31と43についてプロットしたものである。(a),(b)は、Sシリーズの試験体の振幅比1.0のもの、(c),(d)はCシリーズの振幅比1.0のものをそれぞれ軸力比別にプロットしたもので、(e),(f)はCシリーズの軸力比25%の試験体を変位振幅比別にプロットしたものである。幅厚比31のSシリーズは双曲線的な劣化勾配を示し、ピーク点耐力がある一定値に収れんして行く傾向であるのに対し、幅厚比43では各曲線とも明確な特徴は見られない。Cシリーズにおいては、いずれも繰返しにともなう耐力劣化の度合いは小さく、Sシリーズと比べて緩やかで直線的な劣化勾配を示し、非常に安定している。これについては幅厚比22試験体でも同様の結果を得た。

(e),(f)は、振幅比の影響を見たものであるが、幅厚比31で振幅比が0.6と0.8のものは繰返しによる耐力低下がほとんど見られないのに対して、1.0および1.2のものは耐力が徐々に低下している。それに対して幅厚比43の試験体は、振幅比1.0では明確な耐力劣化が見られるもののそのほかではあまり明確な耐力劣化が確認されない。これは前述の通り、幅厚比43では、充てんコンクリートの応力負担分が大きく、鋼管の局部座屈が決定的な耐力低下の原因にはならないためである。

3.4 エネルギー吸収能力

図5は、各載荷サイクル毎の履歴ループの描内面積、すなわちエネルギー吸収能力を(a)幅厚比22、(b)同31および(c)同43の試験体についてプロットしたものである。黒塗りのマークはCシリーズを、白抜きのマークはSシリーズをそれぞれ示す。(a)Cシリーズは劣化の度合いが小さく安定した吸収能力を示すのに対し、Sシリーズでは劣化の度合いが大きく、軸力比が大きいほど急激に劣化する。(b)の幅厚比31ではCシリーズとSシリーズの吸収能力ははっきり分かれるが、軸力比の違いによる影響はほとんど見られず、劣化曲線は各シリーズではほぼ一定である。(c)の幅厚比43のものはCシリーズがSシリーズより大きなエネルギー吸収能力を示す傾向はあるものの、軸力比が30%と大きいCシリーズの試験体はむしろSシリーズに近い。また、曲線の形状がCシリーズではほぼ横ばいで安定しているのに対し、Sシリーズではばらつきが大きく一定の傾向はつかめない。このような挙動は図4のピーク点耐力のプロットでも見られる。これは、幅厚比が43の試験体は鋼管厚が2.3mmと非常に薄いため、初期不整や材料の不均一性などの影響を受けやすいためであると思われる。

3.5 耐力劣化相関局面

図6は、1サイクル目正側載荷時のピーク点耐力に対する10サイクル目正側載荷時のピーク点耐力の比（以下耐力低下率）を幅厚比と軸力比を座標軸にとった3次元空間にプロットしたものを示す。ただし10サイクルの載荷を行えなかった試験体については低下率0とし、1を超えるものについては1とした。また、変位振幅比はいずれも1.0のもので、各データの間は線形補間を行った。(a)はSシリーズの試験体を示すが、耐力低下率は幅厚比22で0~0.41, 31で0~0.28, 43で0.25~0.70となっており、幅厚比22と31では軸力比が大きいくほど低下率は大きい。また同一軸力比で幅厚比の影響を見ると、幅厚比31で22および43より耐力低下率が大きくその部分に谷が形成されている。(b)はCシリーズの試験体を示しており、低下率がすべての試験体で0.60以上となっており、Sシリーズと比較して全体的に高い位置で幕が形成され、耐力劣化が小さく安定している。軸力の影響もSシリーズほど明確ではないが、幅厚比の影響はSシリーズと同様31で谷が形成されている。

図7は、日本建築学会・鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（以下SRC規準）¹⁾に基づいて計算した終局軸力・終局曲げモーメント相関曲線に、軸力比20%、振幅比1.0の試験体の1サイクル目正側載荷時の実験耐力をそれぞれプロットしたものを示す。幅厚比22では、Sシリーズにおいても実験耐力は計算値を大きく上回りその後ひずみ硬化の影響で繰返しに伴う急激な耐力劣化はない。Cシリーズでは計算値の約1.4倍の耐力を示すが、Sシリーズにおいても計算値を上回るような大きな耐力を有していることから、コンクリート充填による局部座屈抑制効果は小さい。幅厚比43では、1サイクル目載荷時に全断面が降伏する前に局部座屈を発生するため、実験耐力は計算値を下回る。しかしコンクリートを充てん

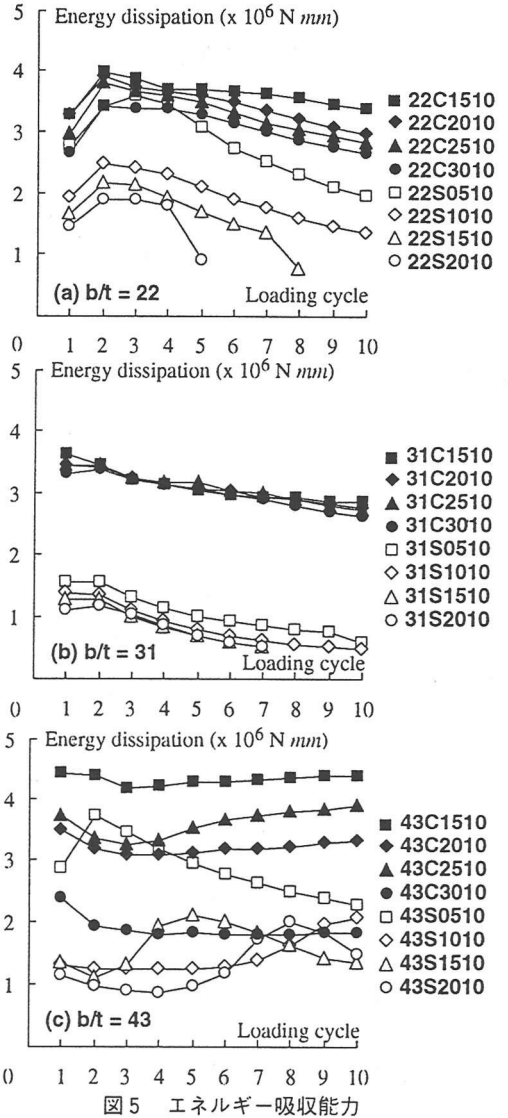


図5 エネルギー吸収能力

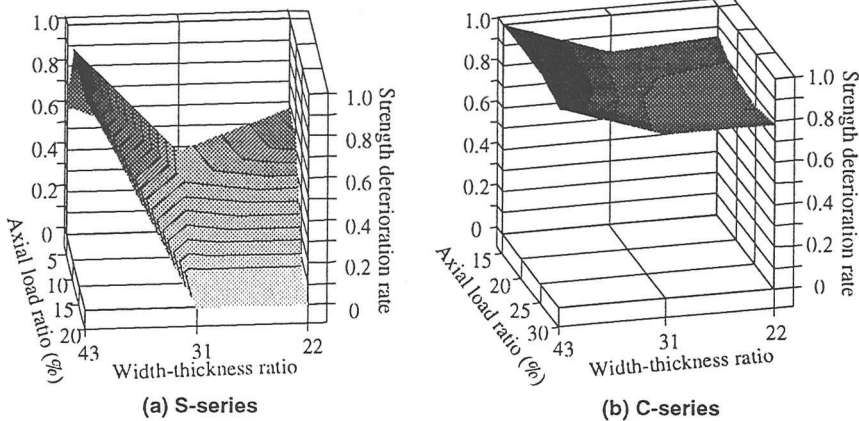


図6 ピーク点耐力低下率

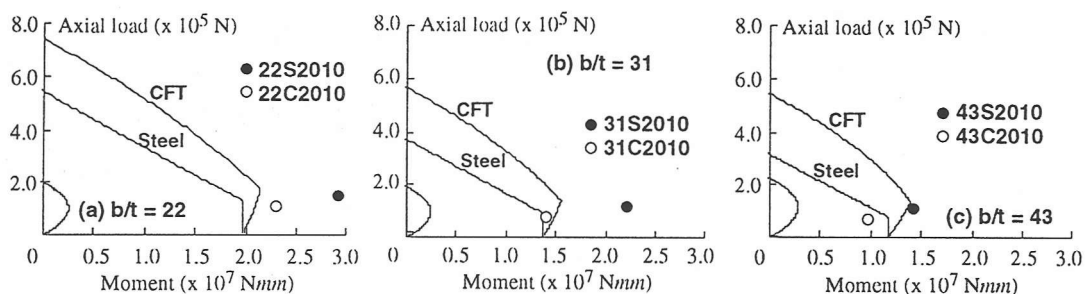


図7 M-N 相関曲線

すると局部座屈の発生が遅れ、計算値を若干上回る程度まで耐力の上昇が見られる。幅厚比31では、Sシリーズにおける局部座屈発生時にはほぼ全断面が降伏しており、実験耐力はほぼ計算値と一致し、コンクリートを充てんすることで幅厚比22, 43のものと比較して効果的に局部座屈が抑制され、実験耐力が計算値の1.5倍に上昇する。しかし、ひずみ硬化が幅厚比22のものほど期待できないため、SシリーズCシリーズともに幅厚比22, 43のものに比べ、繰返しに伴う耐力低下率が相対的に大きくなる。これが、図6の幅厚比31部分の谷の原因であると考えられる。

図8に著者らが提案した解析方法²⁾による数値解析を行った結果を図6と同じようにプロットしたものを示す。全体的な耐力低下率はSシリーズで0.3~0.5、Cシリーズで0.7以上となり、実験値との対応も非常によい。また、実験で見られた幅厚比31付近での谷間の形成が実験値より若干緩やかになっている。

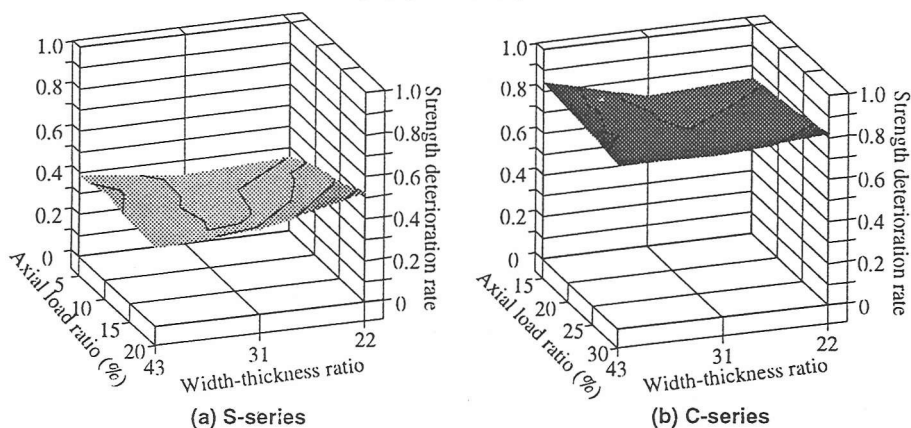


図8 ピーク点耐力低下率（解析値）

4. 結論

- 1) 鋼管にコンクリートを充てんすると、鋼管幅厚比22および43で約1.4倍、幅厚比31で約1.9倍局部座屈発生変位が大きくなる。
- 2) 中空鋼管において、幅厚比が大きいと軸力比が大きくなっても振幅比が履歴特性に与える影響はほとんどない。
- 3) 10サイクル載荷後の耐力低下率は、中空鋼管試験体で0.4以下、コンクリート充てん鋼管試験体で0.6以上となる。
- 4) 充てんコンクリートの局部座屈抑止効果は幅厚比31のものがもっとも効果的であるが、繰返しに伴う耐力劣化は大きい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1987.6.
- 2) Jun KAWAGUCHI, Shosuke MORINO, Hiroshi ATSUMI and Shinya YAMAMOTO: Strength Deterioration Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Beam-Columns under Repeated Horizontal Loading, Proc. of the 3rd International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, pp. 119 - 124, 1991. 9.