

合成柱による高架橋橋脚の研究 (その1)

——コンクリート充てん円形鋼管柱の曲げせん断実験——

野村 敏雄 高橋 泰彦
小畠 克朗 武田 寿一

Studies on Pier Using Composite Column (Part 1)

——Experiments on Concrete-Filled Circular Steel Tube Columns——

Toshio Nomura Yasuhiko Takahashi
Yoshiro Kobatake Toshikazu Takeda

Abstract

The aim of these studies was to make a pier using a concrete-filled steel tube (composite column) suitable for practical purposes. A composite column has the advantage of an aseismatic capacity compared with a tubular steel column. Accordingly, four 1/5-scale model specimens of actual composite columns were tested to obtain data to promote practical use. The parameters were diameter-thickness ratio (D/t) and variety of steel. The results of investigations on the influences of local buckling were as follows: (1) The influence of local buckling depends on the diameter-thickness ratio. High-tension steel is at a slight disadvantage with respect to local buckling. (2) With D/t of 90 to 110, bending strength exceeding full plastic moment was indicated and displacement properties and energy absorption were good. (3) Bending strength of a specimen with D/t of about 150 was inferior to strengths of other specimens.

概 要

鋼管の内部にコンクリートを充てんした合成柱を高架橋の橋脚として実用化することがこの研究の目的である。合成柱は大きな耐荷力と変形能を有しており、従来の鋼管柱などと比較して耐震的に有利と考えられる。そこで、合成柱の実用化を促進する資料を得るために、実際の橋脚を約1/5に縮小した4体の試験体に対して、単純はり形式の左右両振り繰返し載荷による曲げせん断実験を行なった。実験のパラメータとして鋼管の径厚比と鋼種を選び、鋼管の局部座屈が合成柱の曲げ耐荷力と復元力特性に与える影響を調べた結果、次のことが明らかになった。(1) 鋼管の径厚比によって局部座屈の影響が異なる。また、高張力鋼管は局部座屈に対して多少不利である。(2) 径厚比が90~110では全塑性モーメントを上回る耐荷力を示し、変位性状やエネルギー吸収性も良好である。従って、塑性域を考慮した設計法が有利となる。(3) 径厚比が150程度の合成柱は耐荷力が劣り、使用する場合注意が必要であろう。

1. はじめに

鋼管の中にコンクリートを充てんした柱(合成柱と呼ぶ)を高架橋の橋脚として実用化することがこの研究の目的である。

近年、市街地で高架橋を建設する際、立地条件が厳しいために断面の小さい橋脚が要求される傾向にある。しかし、既存の鋼構造や鉄筋コンクリート構造では耐荷力や経済性に限界があり、鋼管とコンクリートを有効に利

用した合成柱を使用することが有利と考えられるようになってきた。すなわち、合成柱はコンクリートが鋼管の局部座屈を防止し、鋼管がコンクリートの周囲を拘束するという相乗作用により、大きな耐荷力と変形能力を有し、従来の断面と比較して小断面でも耐震性能が優れているからである。

しかし、実用化するためにはまだ問題が残っており、現在、これらの解明を行なうための研究^{1),2)}が進められている。今回の実験はこのような背景のもとに計画され

たものである。

2. 試験体

図-1 に試験体の概略を、表-1 に試験体諸元と使用材料の特性を示す。

試験体は径厚比拡張の手掛かりを得ることを意図して L150 B-2, L110B-2, L90B-2, L90B-2 と名付けた 4 体で径厚比と鋼種がパラメータである。名称の中の『150』、『110』、『90』が公称の径厚比を、『L』、『H』が鋼種を意味している。いずれも直径 500 mm の鋼管内部にコンクリートを充てんした円形合成柱である。実験対象部分は長さ 2.0 m ($l/D=4.0$) であるが、単純はり形式の加力を行なうので左右対称となっている。試験体の加力部と反力支持部はスチフナリングで補強し、また、鋼管とコンクリートの一体性を図るために、内部に拘束リングを 5 箇所取付けた。鋼管はバンディングロール法で製作し、コンクリートは表-2 の配合のものを使用し、封缶養生したシリンダーにより強度 (4 週) を確認した。

3. 加力方法

橋脚に上部からの軸力と地震による水平力が作用する状態を想定し、図-2 のような単純はり形式の加力方法を採用した。なお、導入軸力としては実状を考慮して圧縮耐荷力 ($N_y = A_s \sigma_y + A_c \sigma_{ck}$, A_s : 鋼管断面積, σ_y : 鋼管降伏点, A_c : コンクリート断面積, σ_{ck} : コンクリート圧縮強度) の 20% とした。

加力形式は、正負両振り漸増繰返し法とし、軸力を導入した後、図-3 に示す荷重パターンに従い加力した。このパターンは試験体の予想降伏部材角をもとにして決め、部材角 $\gamma=1/200$ rad. でいったん除荷した後、 $\gamma=1/100$ rad. から $1/100$ rad. のピッチの変位増分で正負繰返しを行なう方法である。また、各部材角における繰返しは 2 回とした。

4. 耐荷力

表-3 に試験結果の一覧を、図-4 に P_{cr}/P_p , P_{max}/P_p (P_{cr} : 座屈荷重, P_{max} : 最大荷重, P_p : 全塑性モーメント³⁾に対応する耐荷力) と $D/t \cdot \sigma_y/E$ (ここでは等価径厚比と呼ぶ) の関係を示す。また、図-5, 6 に鋼管とコンクリートの終局耐力を加えた終局累加強度と、両者が一体として挙動すると考えた全塑性モーメントより求めた M-N 相関曲線を示す。図中の累加強度と全塑性モーメントの相違を示す斜線部分はコンクリートと鋼管の間に付着を考慮するかどうかにより生じる差である。

試験体	直径(D) (mm)	板厚(t) (mm)	径厚比 (D/t)	鋼管の材料特性				コンクリートの材料特性	
				鋼種	降伏点 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	伸び (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ kg/cm ²)
L150B-2	500	3.2	156	SS41	3440	4700	36	370	2.83
L110B-2	500	4.5	111	SS41	3120	4100	42	370	2.83
L90B-2	500	6.0	83	SS41	3250	4500	37	370	2.83
H90B-2	500	6.0	83	SM50	3970	5300	31	370	2.83

表-1 試験体諸元及び材料特性

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤
					W	C	S	G	
25	12	4.0	55.7	44.0	160	287	814	1060	0.667

表-2 コンクリートの配合

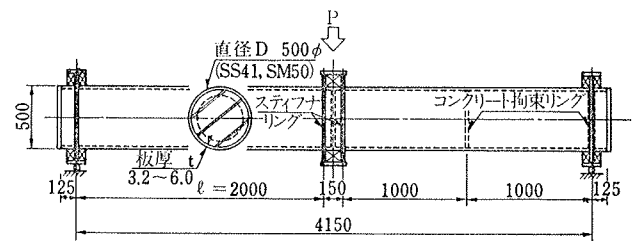


図-1 試験体

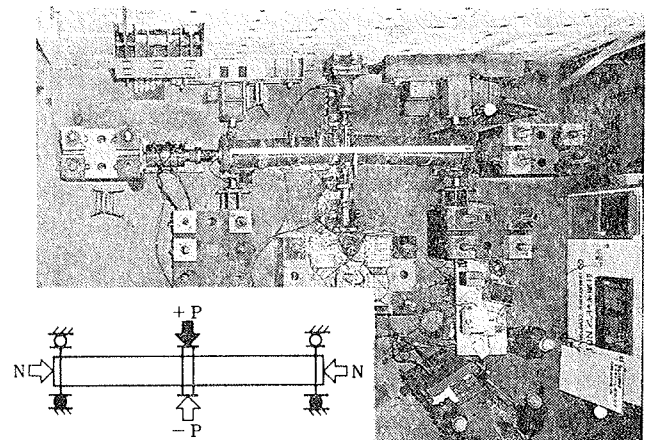


図-2 加力方法

写真-1 加力状況

図-4 をみると、等価径厚比が小さくなるに従い、 P_{cr}/P_p は大きくなる。L110B-2 と L90B-2 はほぼ座屈のレベルが一致しているが、H90B-2 はそれらと L150B-2 の中間に位置しており、高張力鋼は座屈に関して多少不利な状態にある。しかし、 P_{max}/P_p では L150B-2 のみ 0.98 であるが、他の 3 体はいずれも 1.12 となり、耐荷力の違いが明らかとなった。後者では鋼管のひずみ硬化と三軸効果によるコンクリート強度の増加が、局部座屈による圧縮側の鋼管の耐力低下を補っているのに対し、L150B-2 では早期の座屈が鋼管の耐力低下を起こさせており、鋼管の拘束効果が小さいと予想される。

図-5, 6をみると L90B-2 (L110B-2, H90B-2 も同様) では全塑性モーメントの外側に, L150B-2 では全塑性モーメントと累加強度の中間に位置している。しかし, 軸力と変位による 2 次曲げモーメントを加えた M_{max}' ではすべての試験体が全塑性モーメントを上回る。また, 表-1 の降伏点を限界とした短期許容耐力 (図中の M_s) と比較すると, 各試験体とも約 1.5 倍の耐力を持ち, 鋼管コンクリート規準⁴⁾ による許容応力度設計を行なった場合には十分な安全率がある。

5. 変位性状

図-7~10 に各試験体の $P \sim \delta$ 曲線を示す。 $P \sim \delta$ 曲線の正荷重時の包絡線を L90B-2 について CDC (Column Deflection Curves)⁵⁾ 法による解析結果とともに図-11に示し, 図-12には包絡線の荷重及び変位をそれぞれ P_p 及び δ_p (荷重を P_p として求めた弾性変位) で無次元化した $P/P_p \sim \delta/\delta_p$ 曲線を示す。なお, CDC 法は軸力と曲げが作用する部材の変形後の釣合い条件をいくつかの分割点で満足させることによって $P \sim \delta$ 曲線を求めるものである。

図-11をみると, 曲げひびわれの発生, 圧縮降伏 ($\gamma \approx 1/250$), 引張降伏, 局部座屈の発生の順序で塑性化が進行するとともに剛性が低下していき, $\gamma \approx 1/50$ で最大荷重に達し, $\gamma \approx 1/40$ まで保持する。この段階までは, L110B-2 と H90B-2 はほぼ同様の傾向を示したが, L150B-2 では座屈の発生と引張降伏が逆転し性状が多少劣る。各試験体とも最大荷重に達した後, $P \sim \delta$ 曲線は負勾配となる。その勾配は軸力と変位による 2 次曲げモーメントを含めた全塑性耐力 P_p' 線の負勾配に

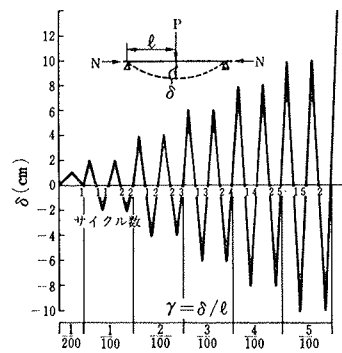


図-3 荷重パターン

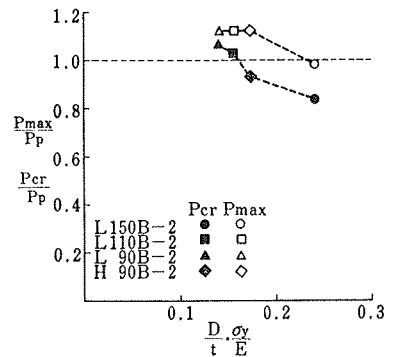


図-4 $P_{cr}/P_p, P_{max}/P_p \sim D/t \cdot \sigma_y/E$ 関係

試験体	諸荷重	ひびわれ	圧縮	引張	座屈	最大	最大
		荷重 (t)	降伏荷重 (t)	降伏荷重 (t)	荷重 (t)	荷重 (t)	荷重時変位 (mm)
L150B-2	実験	20.3	40.3	54.6	50.	58.1	20.5
	計算	18.0	45.2	46.7	-	59.2	-
L110B-2	実験	22.0	48.3	60.1	70.	75.7	32.9
	計算	20.0	48.4	53.3	-	67.8	-
L90B-2	実験	24.0	53.0	62.8	80.	84.9	38.3
	計算	21.0	53.7	59.6	-	75.5	-
H90B-2	実験	24.0	62.0	74.1	80.	96.2	36.3
	計算	22.0	64.6	68.4	-	85.9	-

④ひびわれ荷重の計算値は弾性理論により求めている。
 圧縮縁と引張縁の降伏荷重の計算値は CDC 解析により求めている。
 最大荷重の計算値は全塑性モーメントより求めている。(Pp)

表-3 試験結果一覧

近似しており, 最大荷重を保持したままで, 塑性ヒンジが回転し, 変位の増加による 2 次曲げのために荷重低下が起こったと考えられる。しかし, $\gamma = 1/16$ 程度まで変位させても, 性状の顕著な劣化はみられない。

実験値を CDC 解析値と比較すると, 曲げひびわれ発生から引張降伏まで, すなわち, 弾性から塑性へ移行する過程では荷重, 変位, ひずみとも良好な対応を示している。しかし, CDC 解析では鋼管のひずみ硬化及びコン

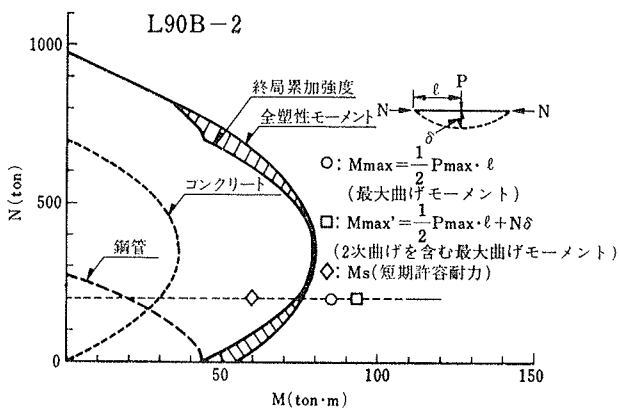


図-5 M-N 相関曲線

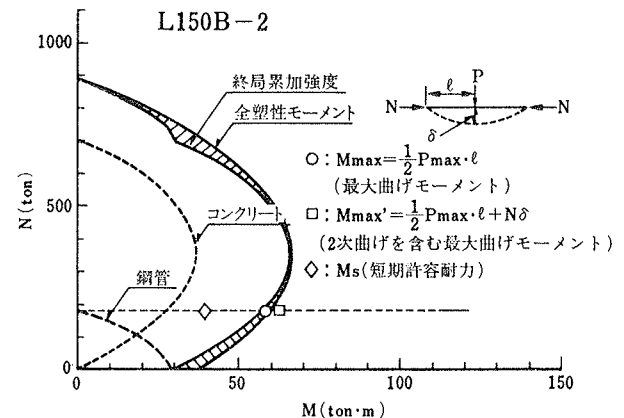


図-6 M-N 相関曲線

クリートの三軸効果は考慮していないので、両外縁が降伏した後は、徐々に塑性化領域を広げながら P_p' 線に下方から漸近していき実験値と対応しなくなると思われる。

図-12で各試験体の変位性状を比較すると、圧縮縁の降伏までは各試験体とも同一である。その後も L150B-2 以外の3体はほぼ同じ性状を示しているが、L150B-2 の挙動はそれらと明らかに異なる。これは、他の3体と比較して座屈荷重が低い所に位置しており、局部座屈によるためと考えられる。

写真-2 に破壊状況を示すが、座屈は加力点から 5~15 cm の領域にほぼ半周にわたって発生し、ふくらみ高さは約 25 mm である。

6. 履歴性状

まず、図-7~10をみると径厚比 $D/t=150, 110$ では部材角 $\gamma=1/100$, $D/t=90$ では $\gamma=2/100$ までは安定した紡錘形の履歴を示す。しかし、その後S字形の履歴性状を示し始め、変位が大きくなるとその傾向が明確になる。また、S字形ループで変位が大きく流れるスリップ荷重は D/t が小さいほど高くなる。

なお、同一変位振幅の繰返し加力によって $\gamma=2/100$ 以後では各試験体とも10%程度の荷重の低下を示す。ただし、L150B-2 では局部座屈が早いために $\gamma=1/100$ でも荷重の低下が起こる。

図-13のように塑性化による吸収エネルギーは変位に比例して大きくなるとともに、 D/t が小さいほど、 P_p が

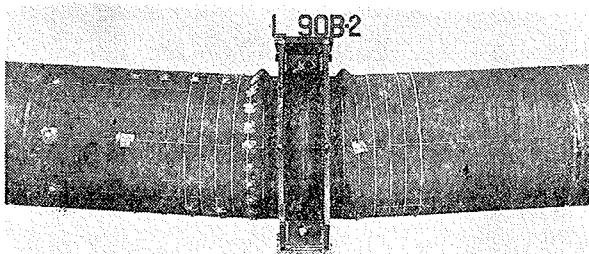


写真-2 破壊状況

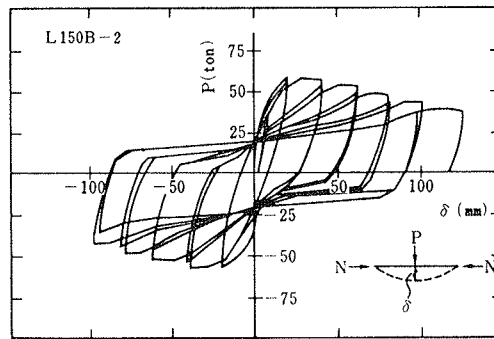


図-7 P~δ 曲線

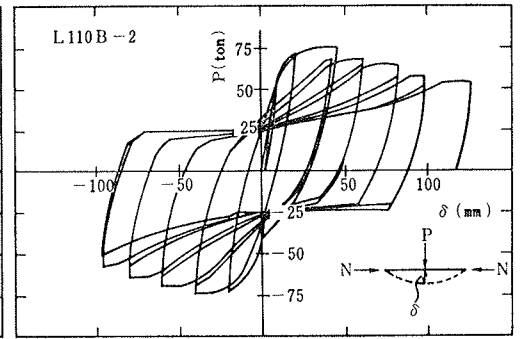


図-8 P~δ 曲線

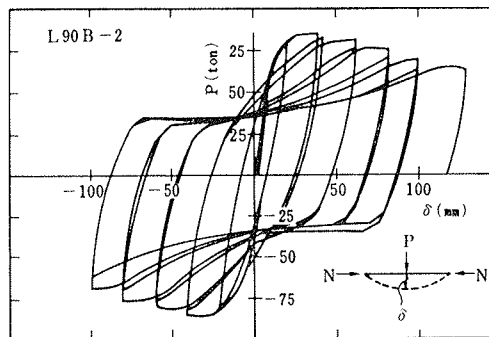


図-9 P~δ 曲線

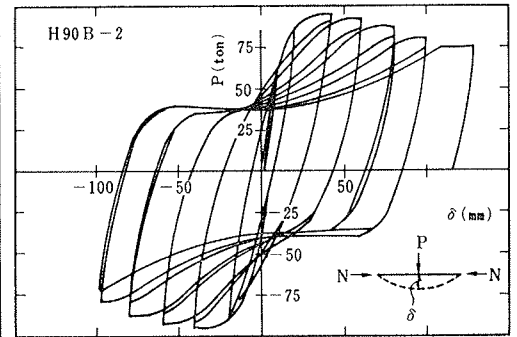


図-10 P~δ 曲線

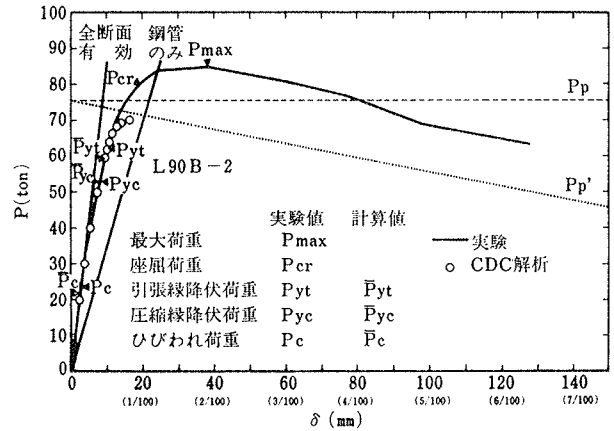


図-11 P~δ 曲線 (包絡線)

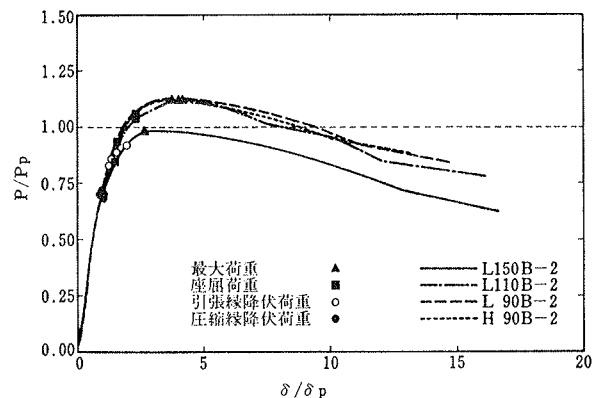


図-12 $P/P_p \sim \delta/\delta_p$ 曲線

大きいほど増加する。

そこで、図-14の減衰定数により定量的に検討する。ここで、弾性エネルギー(W)は P_p を耐荷力とした Bi-Linear 型の復元力特性を用いて、図中の $\Delta O C'D$ の面積と定義した。各試験体とも $r=2/100$ を超えるとほぼ一定値を示し、 D/t が小さいほど減衰定数は大きくなる傾向がみられる。また、鋼材の種類でみると SS 41 より SM 50 の方が座屈に対して相対的に多少不利となるために減衰定数もやや小さい。 $r=2/100 \sim 5/100$ の範囲で、L 150B-2 では 0.2, L110B-2 では 0.25, L90B-2, H90B-2 では 0.3 程度の減衰定数となっている。

7. まとめ

(1) 耐荷力について

L110B-2, L90B-2, H90B-2 は全塑性モーメント(M_p)の 1.12 倍の耐荷力を有するが、L150B-2 はほぼ M_p の 0.98 倍であった。

すなわち、径厚比 $D/t \leq 110$ と $D/t=150$ とでは耐荷力の差が明らかである。

また、短期許容耐力の約 1.5 倍であり、許容応力度設計を行なうと各試験体とも同程度の安全率が確保される。

(2) 変位性状について

L110B-2, L90B-2, H90B-2 の $D/t \leq 110$ の 3 体は良好な変位性状を示し、無次元化して比較するとほぼ一致するが、 $D/t=150$ の L150B-2 は座屈の影響により耐力的に多少低い。

また、CDC 解析は曲げひびわれ発生、圧縮側の降伏、引張側の降伏まで、すなわち、弾性から塑性に移行する過程では降伏荷重、変位、ひずみとも、実験結果とほぼ良好な対応を示している。

(3) 履歴性状について

径厚比 $D/t=150, 110$ では部材角 $r=1/100, D/t=90$ では $r=2/100$ までは安定した紡錘形の履歴性状を示すが、その後、S 字形の履歴性状を示し始める。しかし、S 字形となっても減衰定数は各試験体ともほぼ一定値を示し、 $r=2/100 \sim 5/100$ の範囲で 0.2~0.3 程度となっている。

(4) 設計へのつながり

以上の項目を設計へ反映させると次のようになる。

- ① 断面が全塑性モーメントに達し、塑性ヒンジが生じたことで耐荷力を求める M_p 法によって合成柱の耐荷力を予想することができる。また、CDC 法、終局累化強度式の計算値はいずれも M_p より下回るので安全側の耐荷力を与える。
- ② 現行設計法の径厚比制限を緩和することが可能と考えられる。

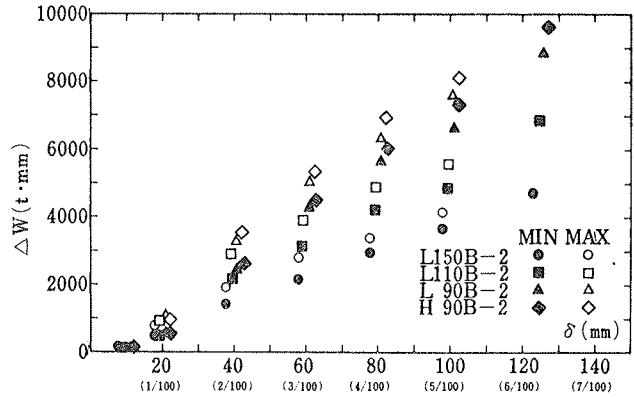


図-13 エネルギー吸収

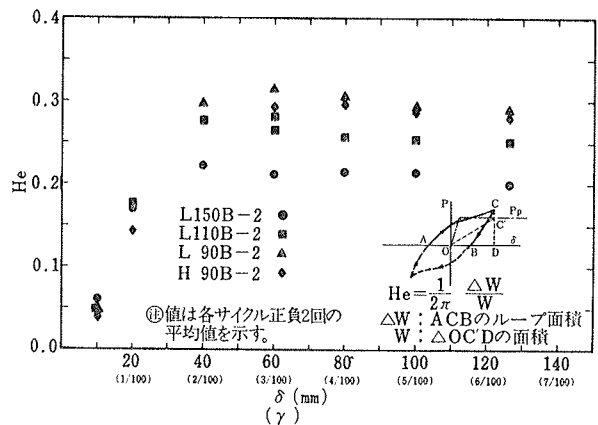


図-14 減衰定数

③ 合成柱は大きな変形能とエネルギー吸収能を有し耐震性能が非常に優れていることが分かる。よって、塑性域の性状を考慮した設計法を採用することが有利となる。

以上より合成柱は優れた構造性能を有していることが確認でき、高架橋橋脚として比較的早期に実用化できると考えられる。

謝 辞

この実験は首都高速道路公団の依頼により実施したものであり、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所: コンクリート充填鋼管の耐荷力 (その 2: 曲げ部材), (昭和58.5)
- 2) 建設省土木研究所: コンクリート充填鋼管の耐荷力 (その 3: はり一柱部材), (昭和59.5)
- 3) 仲 威雄, 他: コンクリート充填鋼管の偏心圧縮実験, 日本建築学会論文報告集号外, (昭和40.9)
- 4) 日本建築学会: 鋼管コンクリート構造計算規準・同解説, (1981)
- 5) Chen, W. F. and Atsuta, T.: Theory of Beam-Columns, Vol. 1, McGraw-Hill (1976)