

合成柱による高架橋橋脚の研究（その3）

——合成柱とフーチングの接合部の実験的研究——

川那部 嘉彦 小 畠 克 朗 入 沢 賢 一
(本社 土木技術本部 設計第1部)
増 井 直 樹 岡 島 豊 行 高 橋 泰 彦
(本社 土木技術本部 設計第1部) (本社 土木技術本部 設計第2部)

Studies on Pier Using Composite Column (Part 3)

——Experimental Study on Composite Column-to-Footing Connection——

Yoshihiko Kawanabe Yoshiro Kobatake Ken-ichi Irisawa
Naoki Masui Toyoyuki Okajima Yasuhiko Takahashi

Abstract

This research aims to evaluate the possibility of the practical application of a concrete-filled steel tube (composite column) to a bridge pier. Part 1 suggested relaxing the current limitations to the diameter-thickness ratio. Part 2 concluded that vertical stiffeners and reinforcing bars improve the structural behavior of the composite column. This paper describes experimental investigations of a composite column-to-footing connection of monolithic construction under lateral loads. The results demonstrate that an appropriate reinforcement around the embedded column makes it possible to maintain the flexural strength and ductility of the composite column even when the embedded depth is approximately equal to the diameter of the column. In addition, a design method using a macro model for connection with the above embedded depth is proposed in the paper.

概 要

本研究の目的は、コンクリート充填鋼管柱(合成柱)を高架橋の橋脚として実用化することである。(その1)では鋼管径厚比の変化に伴う局部座屈の発生と座屈後の挙動を調べ、現行の径厚比制限を緩和できることを報告した。(その2)では鋼管内部の縦補剛材により力学性状が大幅に改善されることを確認するとともに、充填コンクリート内に配筋することにより耐力調節が可能であることを示唆した。本報告では、次のステップとして柱・フーチング接合部に着目し、合成柱に適合した埋込み形式の接合部を模型実験によって検討した。その結果、柱埋込み部周辺の補強を適切に施せば、柱径程度の埋込み深さを確保することにより、合成柱の耐力やじん性を十分に発揮させる接合部となることが判明した。また、接合部の設計手法として、埋込みの浅い接合部の力学モデルを提案した。

1. はじめに

コンクリート充填鋼管柱(以下、合成柱と称す)の設計上の問題点を解明し、高架橋の橋脚として実用化を図るための研究を続けてきた。(その1)¹⁾では合成柱の弾塑性域の基本的な挙動を把握するとともに、鋼管径厚比をパラメータとして局部座屈の発生と座屈後の挙動の変化について検討した。また、(その2)²⁾では地震時に塑性化する合成柱脚部近傍の挙動の改善に着目し、鋼管内側の縦補剛材による局部座屈防止効果と充填コンクリートへの配筋による補強効果の2項目について検討した。

一方、既往の研究についての文献調査結果は次の通りであった。

① 合成柱に関する研究は、主として柱本体を対象と

した部分的なものが多い。

② 梁・柱接合部や柱・フーチング接合部(以下、柱脚部と称す)の研究の多くは建築物を対象に実施されており、土木分野での大型構造物に適用できる研究例はほとんどない。

したがって、現状では合成柱本体を設計するためのデータはかなり蓄積されていると判断し、今回は次のステップとして合成柱の特性を生かした合理的な柱脚の構造形式を提案し、模型実験によってその力学挙動を検討することにした。

2. 構造形式の選定

建築分野の指針³⁾では、柱脚の構造形態を露出、根巻き、埋込みの3形式に大別しているため、この分類方法

と用語を引用することにする。

従来から鋼製柱の柱脚にはアンカーボルト形式の露出柱脚が使用されている。しかし、鋼管をフーチング内に直接埋込み、柱とフーチングとの一体化を図った埋込み柱脚が合成柱に適した柱脚と考えられるので、この柱脚形式を採用することにした。なお、埋込み柱脚の長所として次のようなことが考えられる。

① 構造体としての連続性の確保 混合構造システムを構成する柱とフーチングの間に露出柱脚のような構造的に不連続な接合面を有することなく、円滑に構造体に変化する。

② 優れた荷重伝達機構 アンカーボルト等の機械的なジョイントは不要であり、柱の断面力を支圧により単純にフーチングに伝達することができる。

③ 構造の簡略化 埋込み部鋼管と周辺コンクリートとの一体化を図ることにより充填コンクリートの抜出しが防止されるので、鋼管下端の拘束用底蓋は不要となる。また、底蓋の省略により、鋼管部分とコンクリート部分で分担された断面力を直接フーチングに伝達することができる。

④ 施工の簡略化 露出柱脚のような大規模なアンカーフレームを必要とせず、鋼管の建込みも容易である。

ところで既往の研究によれば、柱脚の耐力が柱本体の耐力を上回ることを設計のクライテリアにすることが推奨されている。すなわち、構造物全体の急激な崩壊につながるフーチングコンクリートの支圧破壊またはせん断破壊等のぜい性破壊を防止するためである。鋼製柱の場合、埋込み深さを柱径または柱幅の2倍以上とすれば柱の耐力を上回る耐力が得られることが明らかになっており、合成柱を用いた場合の必要埋込み深さも、同程度もしくはそれ以上になることが予想される。しかし、この条件を実際の橋脚に適用するとフーチング厚さが過大になり実用的でないので、鋼管埋込み部周辺のコンクリートを補強することにより、埋込み深さを柱径程度とした柱脚を検討することにした。

3. 実験概要

3.1 試験体

試験体は計6体で、図-1に示すようにφ500 (t=6、径厚比83)の鋼管にコンクリートを充填した高さ2.0mの柱本体部と柱を埋込んだ長さ3.0m×幅2.0m×高さ1.5mのフーチング部から構成されている。なお、いずれの試験体も埋込み部には抜出し防止リング、ベースプレートを設けた。

実験パラメータは、①埋込み部補強鉄筋量、②鋼管貫通鉄筋の有無、③埋込み深さ、④軸方向圧縮力で、表-1にその詳細を示す。

埋込み部補強鉄筋は軸方向鉄筋24-D16、帯鉄筋8-D13を基準(略記号:S)にこれより少ないもの(L)と多いもの(M)の3種類、鋼管貫通鉄筋は図-2に示すように15-D16を2方向に配筋したもの(P)と無いもの(B)

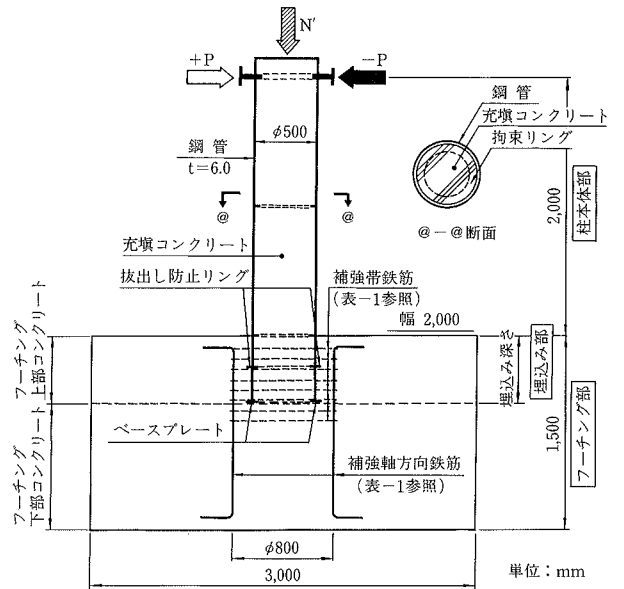


図-1 試験体の形状・寸法

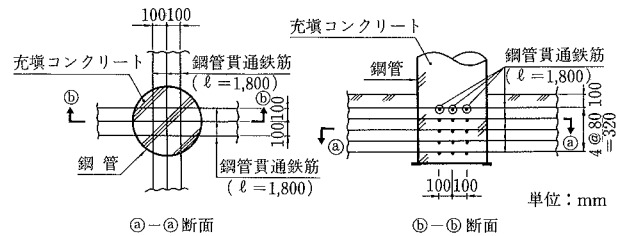


図-2 鋼管貫通鉄筋：SP10-2

表-1 実験パラメータ

試験体	埋込み部補強鉄筋 上段：軸方向鉄筋 下段：帯鉄筋	鋼管貫通鉄筋	埋込み深さ	軸方向圧縮力
SB 10-2	24-D16, 15° 間隔 8-D13, 80mm間隔	無	50cm	0.2N _y
LB 10-2	24-D10, 15° 間隔 8-D10, 80mm間隔	無	50cm	0.2N _y
MB10-2	24-D22, 15° 間隔 8-D16, 80mm間隔	無	50cm	0.2N _y
SP 10-2	24-D16, 15° 間隔 8-D13, 80mm間隔	15-D16, 2方向 100mm×80mm間隔	50cm	0.2N _y
SB 15-2	24-D16, 15° 間隔 11-D13, 80mm間隔	無	75cm	0.2N _y
MB10-0	24-D22, 15° 間隔 8-D16, 80mm間隔	無	50cm	0.0

N_y：柱の軸方向圧縮耐力

の2種類、埋込み深さは柱径Dの1.0倍(10)と1.5倍(15)の2種類、軸方向圧縮力N'は軸方向圧縮耐力N_yの20%(2)と0%(0)の2種類とした。試験体名称は①, ②, ③, ④それぞれの略記号を順番に並べて表示した。使用材料の特性を表-2に示す。

表-2 材料特性

(a) 鋼材				
材料	呼び名	鋼種	降伏強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)
鋼管	EP 6	SM 490	3,970	2.10
	D10	SD 295	3,380	1.83
鉄筋	D13	SD 345	3,530	1.87
	D16	SD 345	3,690	1.78
	D22	SD 345	3,740	1.82

(b) コンクリート			
位置	設計基準強度 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
鋼管内	270	367	2.75
フーチング上部	210	242	2.23
フーチング下部	210	283	2.48

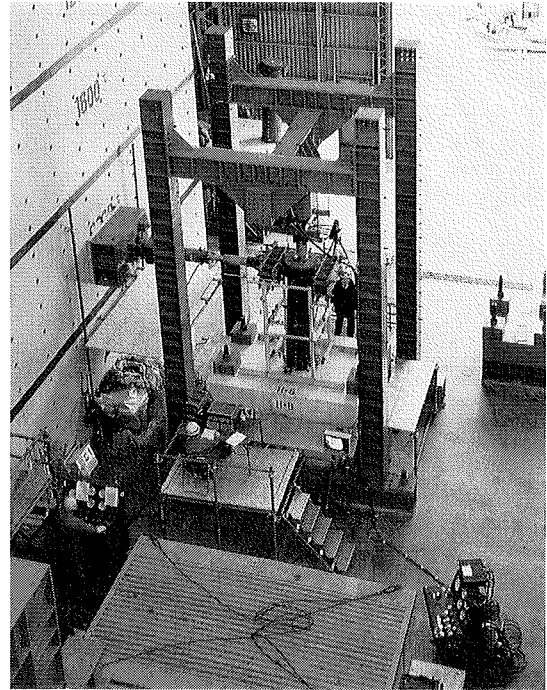


写真-1 載荷状況

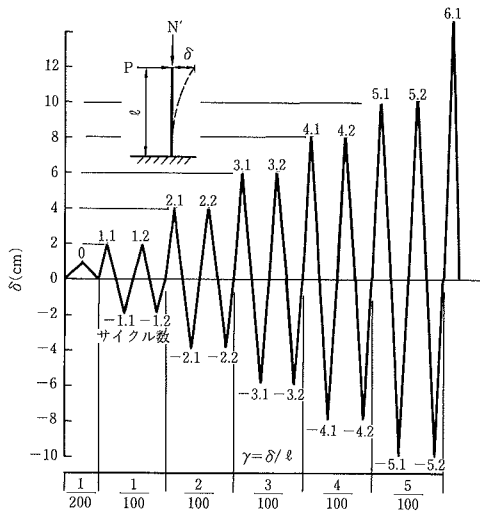


図-3 載荷パターン

3.2 実験方法

図-1, 写真-1 に示すように, 軸方向圧縮力(N')を載荷した状態 (MB10-0を除く) で柱頭部に水平力(P)を載荷した。なお, 載荷方法は水平地震動を模擬して, 図-3 に示す両振り漸増繰返しパターンにしたがった。

4. 実験結果と考察

4.1 破壊性状

全試験体ともフーチングコンクリートには支圧破壊やせん断破壊等は起こらず, 柱本体には降伏や局部座屈がみられ, 塑性ヒンジの発生が確認された。すなわち, 柱脚の耐力が柱本体の耐力を上回っていたため, 柱本体の破壊が先行したと考えられる。

ただし, フーチングコンクリートのひびわれ状況は試験体間で差異を生じた。図-4 にひびわれ状況の代表例を示すが, 基準試験体 SB10-2に比べ埋込み部補強鉄筋量が多い MB10-2や鋼管埋込み部に貫通鉄筋を挿入した SP10-2には微細なひびわれが多数分散して発生し, 一方, 埋込み深さの大きい SB15-2にはほとんどひびわれ

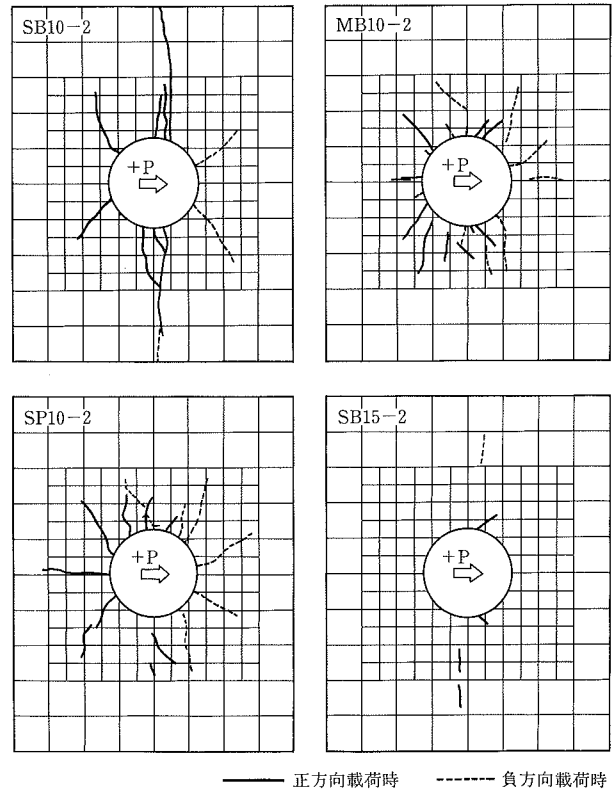


図-4 ひびわれ状況

が発生しなかった。前者は補強鉄筋や鋼管貫通鉄筋により応力が円滑に分配されたためであり, 後者は埋込み部周辺コンクリートの支圧面積の増加により支圧応力度が低減したためであると考えられる。

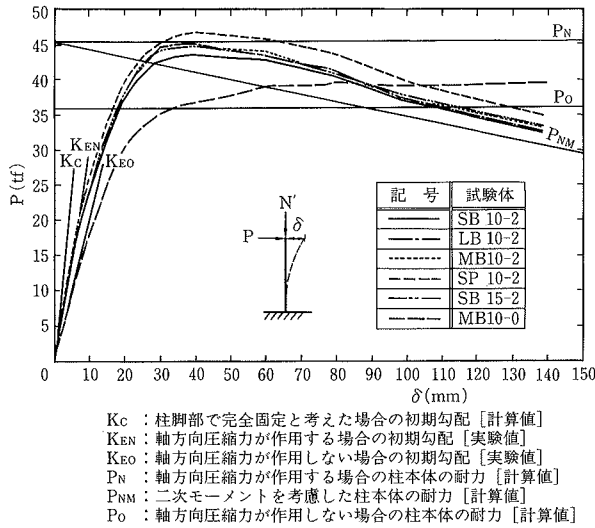


図-5 P~δ 曲線 (包絡線)

4.2 変位性状

図-5にP~δ曲線の正方向載荷時の包絡線を、図-6に代表的な履歴曲線を示す。図-5には、鋼管とコンクリートが完全に付着し、ともに全塑性状態にあると仮定した鉄筋コンクリート方式により算定した柱本体の耐力(P_N, P_O)、および、軸方向力と水平変位による二次モーメントを考慮した耐力線(P_{NM})も併せて表示してある。

初期勾配に多少の相違はあるが、軸方向圧縮力が作用する試験体では最大荷重に達した後P~δ曲線は二次モーメントを考慮した柱本体の耐力線とほぼ平行に低下した。一方、圧縮力が作用しない試験体では変位が増加しても最大荷重を保持し続けた。いずれの試験体も塑性ヒンジが形成されたことにより変位が増大し、軸方向圧縮力が作用する試験体では、圧縮力と水平変位による二次モーメントのために見掛け上の荷重低下が起こったと考えられる。なお、全試験体とも部材角γ=2/100まではほぼ紡錘形の履歴性状を示し、γ=4/100以降では完全な逆S字形となった。

これらは、4.1節で述べたようにフーチングコンクリートが破壊しなかったため、柱本体のじん性に富んだ変位性状と履歴性状⁹⁾が反映された結果である。

4.3 柱脚の固定度

図-5の初期勾配は、軸方向圧縮力が作用する試験体では埋込み深さに関係なく約2.9 tf/mm、圧縮力が作用しない試験体では約2.0 tf/mmであった。一方、鋼管とコンクリートの全断面が有効かつ柱脚部で完全固定と仮定して求めた初期勾配の計算値は4.9 tf/mmであり、軸方向圧縮力が作用する試験体では約40%、圧縮力が作用しない試験体では約60%、実験値は計算値に比べて小さい。これは埋込み部周辺コンクリートの局所的な圧縮変形およびフーチングからの鋼管の拔出しに起因すると考えられる。

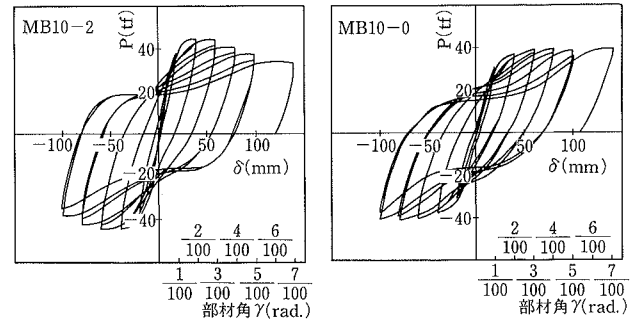


図-6 P~δ 曲線

既往の実験的研究⁵⁾でも指摘されているように、今回の実験でも埋込み柱脚の固定度は若干低下しフーチング表面で完全固定にはならないことがわかったので、建設省土木研究所で行なわれた杭頭結合実験⁶⁾を参考にして、柱脚の固定度を次式により評価した。

$$C_F = (\delta - \delta_c) / \delta_c \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

δ : 変位の実測値

δ_c : 片持梁と考えて計算した変位の理論値

すなわち、柱脚部で完全固定かつ柱断面が全断面有効で弾性挙動をする場合はδ=δ_cとなりC_F=0となる。また、固定度が低下するにしたがってC_F値は大きくなる。

表-3に各試験体の初期勾配から求めたC_F値を示すが、これよりおおむね以下のことが言える。

- ① 埋込み部補強鉄筋量が多いと内部コンクリートを拘束する効果が増加するため固定度がやや大きくなる。
- ② 鋼管貫通鉄筋は固定度を大きくする。
- ③ 埋込み深さを1.0Dから1.5Dに変えても固定度はほとんど変化しない。なお、杭頭結合実験⁶⁾では埋込み深さが1.0D以下になると固定度が急激に低下することが示されている。
- ④ 軸方向圧縮力が作用しない場合はフーチングから鋼管が拔出しやすくなるため固定度が著しく低下する。なお、実際の橋脚では軸方向圧縮力は0.1~0.2 N_γの範囲にある。

これより、埋込み柱脚において固定度を大きくするには、柱のフーチングへの埋込み深さを少なくとも柱径程度は確保するとともに、埋込み部補強鉄筋により埋込み部周辺コンクリートに拘束を与えることが有効であると考えられる。

4.4 柱脚の耐力

表-4に、二次モーメントを考慮した各試験体の最大曲げモーメントの実験値(M_{max})、および、現行指針³⁾から引用した図-8(a)に示す耐荷機構(モデル-1と称す)により計算した柱脚曲げ耐力(M_u)を示す。全試験体とも柱本体で破壊していることから、表-4に示す最大曲げモーメントは柱本体の曲げ耐力であると考えられる。なお、M_uの算定は以下の手順で行なう。

- ①鉛直方向の力のつり合い

鉛直力の有無にかかわらずM_uの算定には考慮せず

表-3 柱脚の固定度

試験体	C _F
SB 10-2	0.96
LB 10-2	0.96
MB10-2	0.85
SP 10-2	0.80
SB 15-2	0.96
MB10-0	1.78

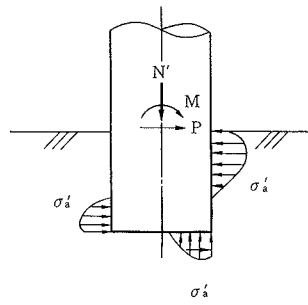


図-7 耐荷機構概念図

②水平方向の力のつり合い

$$P = f_a D (2x - d) \rightarrow x \text{ の算定} \dots\dots\dots (2a)$$

③柱脚曲げ耐力

$$M_u = f_a D (d^2 - 2x^2) / 2 \dots\dots\dots (2b)$$

ここに、

D : 柱径

d : 埋込み深さ

f_a' : コンクリートの支圧強度 = f_c√(A/A_a)⁷⁾

A : コンクリート面の支圧分布面積

A_a : 支圧を受ける面積

f_c : コンクリートの圧縮強度

ただし、ここでは f_a = f_c とする

x : フーチング表面から埋込み部の中立軸位置までの距離

表-4 より SB15-2以外の試験体では柱脚部の破壊が先行することが予想されるが、実験では柱脚の耐力が柱本体の耐力を上回った。この原因として、軸方向圧縮力の支持機構、局部支圧作用ならびに埋込み部補強鉄筋の拘束効果による支圧強度の増加、支圧面に生じる摩擦力およびベースプレートや抜き防止リングの耐力増加への寄与等が考えられる。

5. 設計への適用性の検討

5.1 柱脚耐力算定用力学モデル

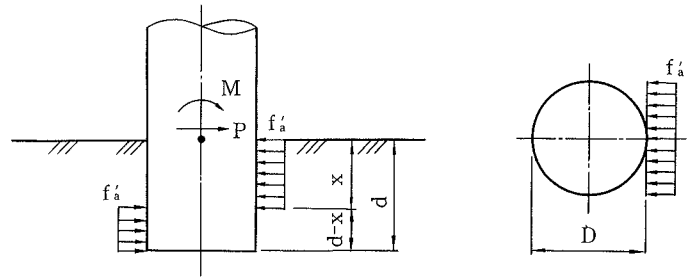
図-7に示すように、埋込みの浅い柱脚の耐荷機構は、実験的研究より鋼管側面とコンクリートの付着力、摩擦力は無視し、埋込み部において柱は支圧反力と柱下部支圧面での摩擦力により支持されているものと仮定している。ここでは、この耐荷機構概念を基に柱脚耐力を評価するための力学モデルを設定し、それぞれの耐力評価式を誘導して柱脚耐力を試算することとする。

(1) モデル-1 4.4節で既述。

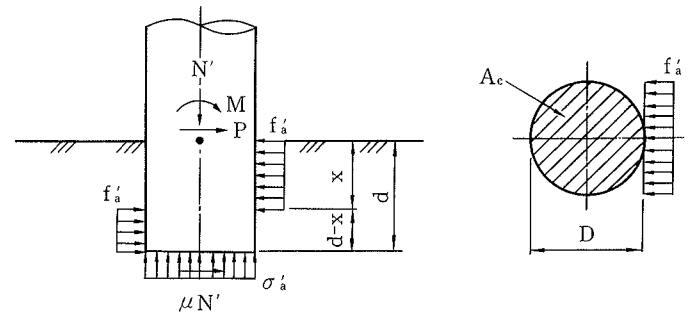
(2) モデル-2 モデル-1に加えて柱下面の支圧反力とせん断摩擦力を考慮する。なお、前者は鉛直力に対してのみ、後者は水平力と曲げモーメントに対して抵抗するものとする。耐荷機構を図-8(b)に、耐力算定手順を以下に示す。

①鉛直方向の力のつり合い

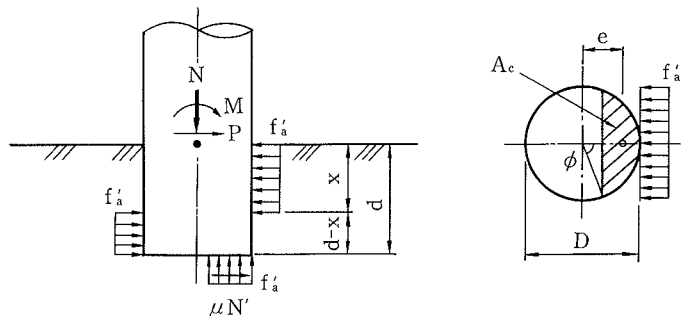
$$N' = \sigma'_a A_c \rightarrow \sigma'_a \text{ の算定} \dots\dots\dots (3a)$$



(a) モデル-1 (現行指針³⁾に準拠)



(b) モデル-2 (設定)



(c) モデル-3 (設定)

図-8 柱脚耐力算定用力学モデル

②水平方向の力のつり合い

$$P = f_a D (2x - d) - \mu N' \rightarrow x \text{ の算定} \dots\dots\dots (3b)$$

③柱脚曲げ耐力

$$M_u = f_a D (d^2 - 2x^2) / 2 + \mu N' d \dots\dots\dots (3c)$$

ここに、

A_c : 柱下部の支圧面積 = πD²/4

μ : 柱下部支圧面の摩擦係数

$$= 1.1 \sqrt{f'_c / \sigma'_a} \leq 0.12 \sqrt{f'_c} \text{⁷⁾}$$

f_c : コンクリートの圧縮強度

σ_a' : コンクリートの支圧応力度

D, d, f_a, x : 既述

(3) モデル-3 モデル-2と同様、モデル-1に加えて柱下面の支圧反力とせん断摩擦力を考慮する。ただしモデル-2と異なり、前者は鉛直力と曲げモーメントに対して、後者は水平力と曲げモーメントに対して抵抗するものとする。耐荷機構を図-8(c)に、耐力算定手順を以下に示す。

①鉛直方向の力のつり合い

$$N' = f_a A_c \rightarrow A_c \text{ の算定} \dots\dots\dots (4a)$$

②水平方向の力のつり合い

$$P = f_a D (2x - d) - \mu N' \rightarrow x \text{ の算定} \dots\dots\dots (4b)$$

表-4 柱本体および柱脚の曲げ耐力

試験体	M _{max} (tf・m)	モデル-1		モデル-2		モデル-3	
		M _u (tf・m)	M _u /M _{max}	M _u (tf・m)	M _u /M _{max}	M _u (tf・m)	M _u /M _{max}
SB 10-2	95.4	64.4	0.68	96.3	1.01	109.3	1.15
LB 10-2	98.6	64.0	0.65	95.8	0.97	109.1	1.11
MB10-2	98.2	64.0	0.65	96.0	0.98	109.3	1.11
SP 10-2	102.0	63.5	0.62	95.3	0.93	108.7	1.07
SB 15-2	96.9	153.0	1.58	—	—	—	—
MB10-0	73.8	66.1	0.90	66.1	0.90	66.1	0.90

M_{max} : 最大曲げモーメント [実験値], M_u : 柱脚の曲げ耐力 [計算値]

③柱脚曲げ耐力

$$M_u = f_a D (d^2 - 2x^2) / 2 + \mu N' d + N' e \dots\dots\dots (4c)$$

ここに,

A_c : 柱下部の支圧面積 = D²(2φ - sin2φ) / 8

φ : 図-8(c)参照

e : 柱下部支圧反力の合力作用位置

$$= \left[\frac{\cos \phi}{2} + \frac{\sin \phi (2 + \cos^2 \phi) - 3 \phi \cos \phi}{3(2\phi - \sin 2\phi)} \right] D$$

μ : 柱下部支圧面の摩擦係数

$$= 1.1 \sqrt{f_c} / f_a^{2/3} \leq 0.12 \sqrt{f_c} \text{ ⑦}$$

D, d, f_a, x : 既述

5.2 耐荷機構と耐力評価式の提案

各力学モデルを用いて求めた柱脚耐力を表-4にまとめて示す。

表より、モデル-2は実験で得られた柱本体曲げ耐力とほぼ等しい柱脚曲げ耐力を与えることがわかる。また、モデル-3による柱脚曲げ耐力の計算値は柱本体曲げ耐力の実験値を10~15%上回っており、柱本体の破壊が先行した実験結果とも一致している。

いずれのモデルにも一長一短があるが、ここでは特に安全性を考慮して『モデル-2』を提案することとした。その理由を以下に示す。

① 今回の実験だけでは、柱脚の耐力が柱本体の耐力をどの程度上回っているかは不明である。したがって、現時点では柱本体の耐力を柱脚の耐力の最小値と考えておくべきである。一方、表-4より軸方向圧縮力の有無にかかわらずモデル-2は柱脚の耐力として柱本体の耐力とほぼ等しいかやや小さめの値を与える。

② 図-9に最大曲げモーメント時に測定したひずみから求めた埋込み部の曲げモーメント分布の割合を示す。この図は、柱下端ではおおむね75~90%の曲げモーメントが側部コンクリートに伝達されていることを示している。したがって、柱下面の支圧反力により残りの曲げモーメントを全て負担したとしてもその割合は10~25%と小さく、無視しても差支えないと考えられる。

6. まとめ

合成柱を有する橋脚に埋込み柱脚を採用した模型実験を行ない、以下のことがわかった。

① 今回の実験で検討した径厚比83程度の合成柱の埋

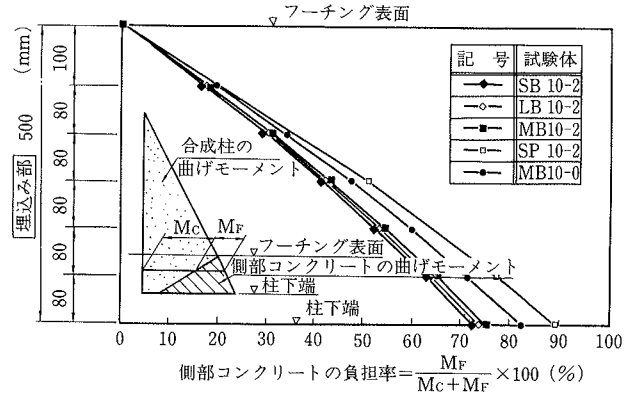


図-9 曲げモーメント分布の割合

込み柱脚においては、埋込み部周辺の補強を適切に施すことにより、埋込み深さを柱径程度にしても柱脚耐力は柱本体耐力を上回り、合成柱としての所要の耐力およびじん性を十分に発揮させることが可能である。

② 埋込み柱脚では、埋込み部補強鉄筋量および埋込み深さのいかににかかわらず固定度は低下し、フーチング表面で完全固定にはならない。

③ 現行指針^③による埋込み柱脚の曲げ耐力評価式は、柱に軸方向圧縮力が作用する場合、設計上かなり安全側の評価を与えると考えられる。

また設計への適用性について検討し、現行指針^③の埋込みの浅い柱脚の力学モデルを改良することにより、実験結果をより適切に評価し得る力学モデル(図8 モデル-2)を提案した。

今後さらに柱脚部で破壊した実験データを蓄積するとともに、解析的アプローチにより耐荷機構の解明、補強効果の定量的把握等を行ない、より合理的な設計手法を確立する必要があると考える。

謝 辞

本実験は首都高速道路公団の委託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) 野村, 他: 合成柱による高架橋橋脚の研究 (その1), 大林組技術研究所報, No. 36, p. 62~66, (1988)
- 2) 野村, 他: 合成柱による高架橋橋脚の研究 (その2), 大林組技術研究所報, No. 39, p. 92~96, (1989)
- 3) 日本建築学会: 鋼管構造設計施工指針・同解説, (1990)
- 4) 秋山: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂, (1985)
- 5) 武田, 他: S造およびSRC造の建物の柱脚の実験的研究 (その1), 日本建築学会関東支部研究報告集, p. 265~268, (1980)
- 6) 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室, 杭頭結合条件を考慮した橋梁杭基礎の設計法に関する研究, 土木研究所資料, No. 1874, p. 4~53, (1982)
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], (1986)