鉄骨構造露出形式柱脚部における基礎コンクリートの 支圧強度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON BEARING STRENGTH OF CONCRETE FOOTINGS AT EXPOSED TYPE OF STEEL COLUMN BASES

九谷和秀*, 増田貫志**
Kazuhide KUTANI and Kanshi MASUDA

In this paper, from the results carried out the centrally applied compressive load tests, the eccentrically applied compressive load tests and the lateral load tests under constant axial compressive forces to investigate the bearing strength of footings, conclusions are obtained as follows, as basic data for the ultimate strength design of the exposed type of steel column bases. The ultimate bending strength of footings is able to predict by using an empirical formula of the bearing strength in consideration of the flexural strength and flexural rigidity of base plates and the height of footings. And the ultimate bending strength of footings is able to predict by assuming the distribution of the bearing stress as a second degree parabola or a rectangle.

Keywords : column base, base plate, footing, bearing strength, ultimate strength

柱脚, ベースプレート, 基礎, 支圧強度, 終局耐力

1. 序

コンクリートの支圧強度に関しては, これまで多数の研究成果¹⁾が発表されており, 支圧強度には支圧面および支承面の幾何学的形状・寸法, コンクリート圧縮強度, 載荷板の厚さおよび支圧面の状況, 支承面の状況, 鉛直および水平荷重の組合せ状況, 補強筋の位置・量, 並びにコンクリートブロックの寸法効果などが関与することが指摘されている。一般に露出形式柱脚部には, 軸力, 曲げモーメントおよびせん断力が作用し, 基礎コンクリートにはそれらの複合された応力が作用していると考えられ, 上記の研究成果を用いて露出形式柱脚の終局曲げ耐力を予測する場合には, 十分な確認実験を行う必要がある。

ところで, 露出形式柱脚の基礎コンクリートの支圧強度に関しては, 秋山・黒沢・和国・西村²⁾並びに加藤・佐藤・鈴木・遠山・中村・坂本³⁾の研究がある。両者の共通点は, ベースプレート最外縁と基礎立上がり部最外縁の距離(へりあき)に着目している点である。前者は基礎立上がり部とベースプレートの面積比並びにベースプレートの強度・剛性により2種類の破壊モード, すなわち基礎立上がり部周辺のコンクリートの剝落並びに

ベースプレート下面の支圧破壊(ベースプレートの底面積の1/18を支圧面積と想定)を仮定し, かつこれらの破壊モードは互いに関連するとし, 終局時の基礎コンクリートの破壊を防ぐための条件式を提案している。後者は加圧幅(ベースプレートの圧縮側最外縁から中立軸までの距離に相当)およびへりあきを実験変数とする部分圧縮試験を行い, 支圧強度の実験式を提案している。また, 若林・南・西村⁴⁾は, 鉄骨鉄筋コンクリート柱脚部に関する研究において, 支圧強度の実験式を提案し, 支圧強度はベースプレート(剛と仮定)の中立軸比により変化するとしている。

しかしながら, これらの柱脚に関する支圧強度の実験式には, 支圧強度に影響を及ぼすベースプレートの強度・剛性および基礎立上がり部の高さの評価方法並びにせん断力との組合せの問題などが未解決であり, 支圧強度に関する統一された見解を示すには至っていない。

本研究では, 露出形式柱脚部を実物の1/2~1/3程度の大きさにモデル化し, ベースプレートの強度・剛性並びに基礎コンクリートおよび無筋コンクリートブロックの形状・寸法の主な実験変数として中心圧縮試験を行い, 支圧強度の実験式を求めている。さらに, アンカー

本論文の一部は, 文献9)~13)に発表している。

* 九州産業大学工学部建築学科 助手・工修

** 九州産業大学工学部建築学科 教授・工博

Research Assist., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering Univ. of Kyushu Sangyo, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering Univ. of Kyushu Sangyo, Dr. Eng.

ボルトに引張力を生じない領域における柱脚の終局曲げ耐力の確認のため、並びに累加強さ式を適用して柱脚の終局曲げ耐力を予測する場合の基礎資料として、無筋コンクリートブロックの偏心圧縮試験および一定軸力下における水平加力試験を行い、中心圧縮力を受ける場合の支圧強度の実験式を用いて、終局時の基礎コンクリートの曲げモーメントと軸力の相関関係を十分予測可能であることを実験的に検証するものである。なお本研究では、せん断力との組合せの問題については言及しない。

2. 基礎コンクリートの支圧強度

2.1 試験体

本研究では、鋼板 (E-45, S45 C) の下面に、断面形状を□・H・○の3種類に、高さを5 mm 程度に機械加工により彫り出した金型状のものを鋼柱の代わりに使用する。鋼柱断面の寸法は、□-150×150×20, □-175×175×20, □-200×200×20, H-150×150×7×9, H-200×200×8×12 および ○-165×20 の6種類であり、鋼柱寸法の一覧を Table 1 に示す。

試験体 CC 24 のベースプレートは、400 tf 万能試験機用の球座圧盤 (直径 300 mm) であり、その他の試験体のベースプレートは、単一の鋼板 (E-28: SM 50 A, その他の板厚の鋼板: SS 41) である。幅 300 mm, せい 300 mm の場合には、板厚は 75 mm, 50 mm, 40 mm, 25 mm, 19 mm, 16 mm, 12 mm, 9 mm の8種類であり、幅 330 mm, せい 330 mm の場合には、板厚は 28 mm の1種類であり、直径 300 mm の場合には、板厚は 40 mm, 25 mm, 19 mm, 16 mm, 12 mm の5種類であり、ベースプレートの寸法の一覧を Table 1 に示す。

コンクリートには、レデーミクストコンクリート (普通ポルトランドセメント, 海砂, 粗骨材最大寸法 20 mm) を使用しており、基礎コンクリートの形状・寸法を以下に示す。試験体 CC 1~CC 6, CC 11~CC 13 および CC 15 は、幅 400 mm, せい 400 mm, 高さ 600 mm の鉄筋コンクリート造基礎柱形 (主筋: SD 30, 帯筋: SR 24) を有し、基礎柱形の両側に、幅 250 mm, 高さ 600 mm の鉄筋コンクリート造基礎ばり (主筋: SD 30, あばら筋: SR 24) を有している。さらにその基礎柱形の上に、CC 1~CC 3 には、幅 300 mm, せい 300 mm, 高さ 200 mm, CC 4~CC 6 には、幅 350 mm, せい 350 mm, 高さ 200 mm の無筋コンクリート造基礎立上がり部が後打ちされており、また CC 15 には、幅 400 mm, せい 400 mm, 高さ 200 mm の鉄筋コンクリート造基礎立上がり部が一体打ちされている。なお、CC 1~CC 6 の基礎ばりおよび基礎柱形には、CC 11~CC 13 と同一のコンクリートおよび配筋が用いられている。CC 38~CC 40 は、幅 400 mm, せい 400 mm, 高さ 600 mm の無筋コンクリート造の基礎柱形を有し、基礎柱形の片側

Table 1 Geometric properties of specimens and test results

Specimens No.	Column*1 WF-section Size (mm)	Base plate B×B×D×Bt (mm)	Footing F×F×D×Fh (mm)	EN (tf)
CC 1	□-150×150×20	300×300×40	300×300×200*3	255.3
CC 2	□-150×150×20	300×300×19	300×300×200*3	176.1
CC 3	□-150×150×20	300×300×12	300×300×200*3	158.4
CC 4	□-150×150×20	300×300×40	350×350×200*3	280.2
CC 5	□-150×150×20	300×300×19	350×350×200*3	196.9
CC 6	□-150×150×20	300×300×12	350×350×200*3	180.2
CC 7	□-150×150×20	300×300×40	400×400×200*4	375.3
CC 8	□-150×150×20	300×300×19	400×400×200*4	220.1
CC 9	□-150×150×20	300×300×12	400×400×200*4	190.4
CC11	□-150×150×20	300×300×19	400×400×0*3	280.0
CC12	□-150×150×20	300×300×16	400×400×0*3	278.2
CC13	□-150×150×20	300×300×12	400×400×0*3	239.3
CC14	□-150×150×20	300×300×75	400×400×200*4	365.2
CC15	□-150×150×20	300×300×25	400×400×200*3	240.3
CC16	□-150×150×20	300×300×19	400×400×200*4	216.8
CC17	□-150×150×20	300×300×12	400×400×200*4	159.9
CC18	□-200×200×20	300×300×40	400×400×200*4	379.4
CC19	□-200×200×20	300×300×25	400×400×200*4	354.6
CC20	□-200×200×20	300×300×19	400×400×200*4	347.8
CC21	□-200×200×20	300×300×16	400×400×200*4	327.7
CC22	□-200×200×20	300×300×12	400×400×200*4	229.4
CC23	□-200×200×20	300×300×9	400×400×200*4	247.3
CC24		300* ^{*2}	400×400×200*4	317.0
CC25	○-165×20	300×300×40	400×400×200*4	328.2
CC26	○-165×20	300×300×25	400×400×200*4	238.5
CC27	○-165×20	300×300×19	400×400×200*4	179.2
CC28	○-165×20	300×300×16	400×400×200*4	139.8
CC29	○-165×20	300×300×12	400×400×200*4	129.9
CC30	○-165×20	300* ^{*4} 40	400×400×200*4	273.6
CC31	○-165×20	300* ^{*4} 25	400×400×200*4	224.3
CC32	○-165×20	300* ^{*4} 19	400×400×200*4	200.4
CC33	○-165×20	300* ^{*4} 16	400×400×200*4	171.2
CC34	○-165×20	300* ^{*4} 12	400×400×200*4	126.6
CC35	□-175×175×20	300×300×40	400×400×800*5	201.6
CC36	□-175×175×20	300×300×19	400×400×800*5	170.1
CC37	□-175×175×20	300×300×12	400×400×800*5	169.9
CC38	□-175×175×20	300×300×40	400×400×600*5	206.7
CC39	□-175×175×20	300×300×19	400×400×600*5	175.9
CC40	□-175×175×20	300×300×12	400×400×600*5	164.7
CC41	□-175×175×20	300×300×40	400×400×800*4	199.3
CC42	□-175×175×20	300×300×19	400×400×800*4	169.4
CC43	□-175×175×20	300×300×12	400×400×800*4	160.2
CC44	□-175×175×20	300×300×40	400×400×600*4	230.0
CC45	□-175×175×20	300×300×19	400×400×600*4	167.6
CC46	□-175×175×20	300×300×12	400×400×600*4	162.1
CC47	□-175×175×20	300×300×40	400×400×400*4	238.4
CC48	□-175×175×20	300×300×19	400×400×400*4	208.0
CC49	□-175×175×20	300×300×12	400×400×400*4	173.2
CC50	□-175×175×20	300×300×40	400×400×200*4	340.4
CC51	□-175×175×20	300×300×19	400×400×200*4	269.0
CC52	□-175×175×20	300×300×12	400×400×200*4	215.0
CC53	H-200×200×8×12	300×300×40	400×400×400*4	249.2
CC54	H-200×200×8×12	300×300×19	400×400×400*4	196.0
CC55	H-200×200×8×12	300×300×9	400×400×400*4	157.5
CC56	H-200×200×8×12	300×300×40	400×400×200*4	281.4
CC57	H-200×200×8×12	300×300×19	400×400×200*4	219.2
CC58	H-200×200×8×12	300×300×9	400×400×200*4	172.1
CC59	H-150×150×7×9	300×300×40	400×400×200*4	323.4
CC60	H-150×150×7×9	300×300×25	400×400×200*4	260.8
CC61	H-150×150×7×9	300×300×19	400×400×200*4	203.3
CC62	H-150×150×7×9	300×300×16	400×400×200*4	188.3
CC63	H-150×150×7×9	300×300×12	400×400×200*4	158.6
CC64	□-200×200×20	300×300×50	400×400×400*4	287.6
CC65	□-200×200×20	300×300×19	400×400×400*4	253.3
CC66	□-200×200×20	300×300×50	400×400×200*4	378.0
CC67	□-200×200×20	300×300×19	400×400×200*4	343.3
CC68	□-200×200×20	300×300×19	400×400×100*4	380.7
CC69	□-150×150×20	300×300×9	400×400×100*4	184.6
CC70	□-200×200×20	330×330×28	400×400×400*4	302.4
CC71	□-200×200×20	330×330×28	400×400×300*4	330.5
CC72	□-200×200×20	330×330×28	400×400×200*4	380.1
CC73	□-150×150×20	330×330×28	400×400×100*4	299.4

*1: machined column, *2: spherical seat of testing machine, *3: with reinforced concrete beam in both sides, *4: plain concrete block, *5: with plain concrete beam in one side

に幅 250 mm, せい 600 mm の無筋コンクリート造基礎ばりを有している。さらに, CC 35~CC 37 には, CC 38~CC 40 と同形状の基礎柱形の上に, 幅 400 mm, せい 400 mm, 高さ 200 mm の無筋コンクリート造基礎立上がり部が一体打ちされている。上記以外の試験体の基礎コンクリートは, 幅 400 mm, せい 400 mm であり, 高さが Table 1 に示すように, 800 mm, 600 mm, 400 mm, 300 mm, 200 mm, 100 mm と変化する無筋コンクリートブロックである。なお, 基礎コンクリートの形状・寸法の詳細を Table 1, Fig.1(a)~(l) に, 試験体 CC 1~CC 6 並びに CC 11~CC 13 の配筋図を Fig.2(a) に, CC 15 の配筋図を Fig.2(b) に示す。

鋼材およびコンクリートの機械的性質を Table 2 および Table 3 に示す。

2.2 載荷方法

基礎コンクリートの載荷試験には, 400 tf 万能試験機および Fig.3 に示すような中心圧縮試験装置を用いている。なお, 試験体のベースプレート下面には, 厚さ

10 mm 程度の高強度無収縮モルタルが充填されており, モルタルの圧縮強度が 450 kgf/cm^2 程度に達していることを確認した後, 試験機の球座圧盤とベースプレート上面の間に金型状の鋼柱を置き, 載荷試験を開始している。

2.3 実験結果

2.3.1 破壊状況

一例として, ベースプレート厚が 40 mm, 19 mm で, 基礎コンクリートの高さが 800 mm, 600 mm, 400 mm, 200 mm の試験体の破壊状況を Fig.4(a)~(h) に示す。支圧ひび割れは, ベースプレート周辺に沿うように, かつそこから基礎コンクリートの側面に向かって放射状に発生している。ベースプレート厚が小さくなるにつれてそれらのひび割れは, ベースプレート外縁から柱フランジ直下に移行する傾向を示す。また, 基礎の高さが 800 mm, 600 mm と大きい場合には, 基礎コンクリート上面の各辺中央付近のひび割れ以外は, ほとんど支承面まで到達していない。

Fig.1 Details of footings

Fig.2 Reinforcement details of footings

Fig.3 Test setup

Table 2 Mechanical properties of the steel

Materials		σ_Y	σ_B	ϵ_B
Part	Shape			
Base plate	P-50	2.84	4.73	27
	P-40	2.84	5.33	28
	P-28	3.31	5.58	25
	P-25	2.59	4.27	39
	P-19	2.47	4.29	35
	P-16	2.48	4.32	37
	P-12	2.93	4.63	26
	P-9	3.06	4.82	28
Main bar	D-22	3.42	5.13	26
Hoop and Stirrup	9φ	3.28	4.78	30

σ_Y :Yield point (tf/cm²)

σ_B :Tensile strength (tf/cm²)

ϵ_B :Elongation (%)

P-50, P-40, P-25~P-9:SS41

P-28:SM50A

Table 3 Mechanical properties of the concrete

Specimens	Compressive strength (kgf/cm ²)
CC 1~CC 9	207
CC11~CC13	246
CC14~CC17	243
CC18~CC24	234
CC25~CC34	212
CC35~CC52	219
CC53~CC58	246
CC59~CC63	257
CC64~CC69	248
CC70~CC73	250

Fig. 4 Crack patterns of footings

2.3.2 実験結果の考察および支圧強度の実験式

コンクリートの支圧強度に関する実験は多く、実験から支圧強度 F_b は、(1) 式の形^{1), 5), 6)}で表され、著者らの実験も実験定数 α , k を求めるものである。

$$F_b = \alpha \cdot F_c \cdot (\text{支承面積} / \text{支圧面積})^k \dots \dots \dots (1)$$

ここで

α , k : 実験定数

F_c : コンクリートの圧縮強度

ベースプレートを剛と仮定すると、基礎コンクリートの支圧面積 ${}_B A_e$ はベースプレートの底面積 ${}_B B \cdot {}_B D$ として表される。また、支承面積 ${}_F A_e$ は、基礎立上がり部の断面積 ${}_F B \cdot {}_F D$ (基礎立上がり部が存在しない場合には、基礎柱形の断面積) として表されると仮定する。

基礎コンクリートの中心圧縮試験から得られた最大荷重 ${}_E N$ は、Table 1 に示すとおりであり、基礎コンクリートの支圧強度 $F_b (= {}_E N / {}_B A_e)$ とコンクリートのシリンダー圧縮強度 F_c との比を縦軸に、支承面積と支圧面積の比を横軸に採ると、実験結果は、Fig. 5 に示すように表される。なお実験値は、鋼柱断面・ベースプレート底面の形状が、それぞれ、 $\square \cdot \square$ の場合には $\diamond$ 記号、以下同様に、 $H \cdot \square$ の場合には $\triangleright$ 記号、 $\bigcirc \cdot \bigcirc$ の場合には $\bigcirc$ 記号、 $\bigcirc \cdot \square$ の場合には $\bigcirc$ 記号で示されている。また、相関曲線は、実線で示されており、ベースプレートを剛と仮定した場合の基礎コンクリートの支圧強度の実験式は、(2) 式のように得られる。

$$F_b = 0.995 F_c ({}_F A_e / {}_B A_e)^{0.226} \dots \dots \dots (2)$$

図から明らかなように、ベースプレートを剛と仮定した場合には、相関係数は 0.173 であり、かなり低い相関を示し、支圧強度を的確に予測することは困難である。

また、Fig. 5 の点線は、文献 2), 4) に用いられている支圧強度を表しており、著者らの実験値との相関はかなり低い。

ベースプレートの強度・剛性および基礎コンクリートの高さが、支圧強度に及ぼす影響を把握するため、以下のような条件を設ける。

Fig. 5 $F_b/F_c - {}_F A_e / {}_B A_e$ relationships for footings (assuming the base plate to be rigid body) Fig. 6 $F_b/F_c - {}_F A_e / {}_B A_e$ relationships for footings (graph showing the variation of bearing strength with ${}_B d / {}_B t$ and ${}_F h / {}_B D$)

- i) 圧縮側における柱フランジ外面からベースプレート外縁までの距離 ${}_B d$ とベースプレート厚 ${}_B t$ の比を、ベースプレートの幅厚比 ${}_B d / {}_B t$ とする。
- ii) 基礎の高さ ${}_F h$ とベースプレートのせい ${}_B D$ との比を、基礎コンクリートの高さ径比 ${}_F h / {}_B D$ とする。ここで、 ${}_F h$ は、中柱形式のように基礎柱形の両側に基礎ばりを有する場合には、基礎立上がり部の高さ、側柱のように基礎柱形の片側にのみ基礎ばりを有する場合には、基礎柱形の高さと基礎立上がり部の高さの和とする。

ベースプレートの幅厚比および基礎コンクリートの高さ径比が、つぎの (3) ~ (5) 式を満足する試験体のみを抽出し、Fig. 6 に示す。

$${}_B d / {}_B t \leq 2 \text{ かつ } {}_F h / {}_B D \leq 0.8 \dots \dots \dots (3)$$

$$2 < {}_B d / {}_B t \leq 4 \text{ かつ } 0.8 < {}_F h / {}_B D \leq 1.6 \dots \dots \dots (4)$$

$${}_B d / {}_B t > 4 \text{ かつ } {}_F h / {}_B D > 1.6 \dots \dots \dots (5)$$

ここで

本研究に用いた試験体は、(3) 式を満足する範囲では、相対的に強度・剛性の大きなベースプレートかつ相対的に扁平な形状の基礎コンクリートを有しており、(5) 式を満足する範囲では、それとは逆の状態であり、

(4) 式を満足する範囲では、それらの中間の状態であるとのおおむね考えられる。

図から明らかなように、支圧強度はベースプレートの幅厚比が大きくなり、かつ基礎コンクリートの高さ径比が大きくなるにつれて、小さくなる傾向を示している。ベースプレートの強度・剛性が小さくなると、曲げ降伏および曲げ変形のために支圧面積がベースプレートの全面積より小さくなること、並びに基礎コンクリートと圧縮試験用のシリンダーでは高さ径比が異なることなどが、このような傾向を示す主因と推察される。

ところで、Fig. 5 の一点鎖線は、露出柱脚の終局曲げ耐力算定用のコンクリートの支圧強度⁷⁾であり、(6) 式を提示している。

$$F_b = 0.85 F_c \cdots \cdots (6)$$

ここで

立上がり基礎（本研究では、基礎柱形と基礎立上がり部に区別している）の寸法は、ベースプレートサイズの 1.15 倍以上を目安とすればよい（CC1～CC3 を除く試験体は、この条件を満足する）。

上記の式から予測される支圧強度は、支圧面積をベースプレートの底面積と仮定して得られる場合の本研究の実験結果の下限値におおむね相当している。したがって、ベースプレートの幅厚比が小さくなり、かつ基礎コンクリートの高さ径比が小さくなるにつれて不経済な設計になることが予想される。

支圧強度に及ぼすベースプレートの強度・剛性の影響を実験的に評価するため、文献 1), 8) に準じて、鋼柱底面から θ の角度で引かれた範囲内のベースプレートのみが、一様に基礎コンクリートを支圧していると仮定する。すなわち、鋼柱に角形鋼管・円形鋼管・H 形鋼を用いる場合の支圧面積 ${}_B A_e$ は、それぞれの順に、Fig. 7(a)～(c) に斜線で示す面積（黒塗りの鋼柱断面面積も含む）として近似されとする。例えば、鋼柱断面が箱形、ベースプレートが長方形の単一鋼板の場合には、支圧面積は (7) 式のように表される。

$${}_B A_e = {}_B B_o \cdot {}_B D_o - {}_B B_i \cdot {}_B D_i \cdots \cdots (7)$$

Fig. 7 Bearing areas of footings

ここで

$${}_B B_o = {}_c B + 2 {}_B t \cdot \cot \theta$$

$${}_B D_o = {}_c D + 2 {}_B t \cdot \cot \theta$$

$${}_B B_i = {}_c B - 2 {}_B t \cdot \cot \theta - 2 {}_c t$$

$${}_B D_i = {}_c D - 2 {}_B t \cdot \cot \theta - 2 {}_c t$$

$$0 \leq {}_B B_i < {}_B B_o \leq {}_B B$$

$$0 \leq {}_B D_i < {}_B D_o \leq {}_B D$$

${}_c B, {}_c D, {}_c t$: 鋼柱断面の幅、せい、板厚

${}_B B, {}_B D, {}_B t$: ベースプレートの幅、せい、板厚

ここでは、文献 1), 8) に準じて、 $\theta = 45^\circ$ と仮定し、基礎コンクリートの支圧強度 $F_b (= {}_e N / {}_B A_e)$ とコンクリートのシリンダー圧縮強度 F_c の比を縦軸に、支承面積と支圧面積の比を横軸に採ると、実験結果は、Fig. 8 に示すように表される。なお、実験値は、鋼柱断面の形状およびベースプレートの形状に応じて Fig. 5 と同一の記号で示されている。また、相関曲線は、実線で示されており、ベースプレートの強度・剛性を考慮した基礎コンクリートの支圧強度の実験式は、(8) 式のように得られる。

$$F_b = 1.39 F_c ({}_F A_e / {}_B A_e)^{0.478} \cdots \cdots (8)$$

図から明らかなように、鋼柱断面から 45° で引かれた範囲内のベースプレートを支圧面積とする場合には、相関係数は 0.731 であり、ベースプレートの底面積を支圧面積とする場合に比べてかなり高い相関を示している。

さらに、支圧強度に及ぼす基礎コンクリートの高さ径比の影響を実験的に評価するため、基礎コンクリートの高さを前述の ${}_F h$ とし、径を Fig. 7 に示した支圧面積のせい ${}_B D_o$ とし、基礎コンクリートの圧縮強度 F'_c を文献 6) に準じて、(9) 式のように仮定する。ただし、基礎コンクリートの高さ径比 ${}_F h / {}_B D_o$ が 0.5 以下の場合には、高さ径比を 0.5 とし、 F'_c の上限値を $1.6 F_c$ とする。

$$F'_c = (0.8 + 0.4 {}_B D_o / {}_F h) F_c \cdots \cdots (9)$$

ここで

$$0.8 F_c \leq F'_c \leq 1.6 F_c$$

鋼柱底面から $\theta = 32.6^\circ$ (試行錯誤により求めている)

Fig. 8 F_b/F_c - F_Ae/B_Ae relationships for footings (regarding the flexural strength and flexural rigidity of base plates)

で引かれた範囲内のベースプレートのみが、一様に基礎コンクリートを支圧していると仮定し、支圧強度と圧縮強度 F'_c の比を縦軸に、支承面積と支圧面積の比を横軸に採ると、実験結果は、Fig. 9 のように表される。実験値は、鋼柱断面の形状およびベースプレートの形状に応じて Fig. 5 と同一の記号で示されている。また、相関曲線は、図中に実線で示され、ベースプレートの強度・剛性および基礎コンクリートの高さ径比を考慮した支圧強度の実験式は、(10) 式のように得られる。

$$F_b = 0.963 F'_c (A_e / B A_e)^{0.493} \dots \dots \dots (10)$$

図から明らかなように、鋼柱断面から 32.6° で引かれた範囲内のベースプレートを支圧面積とし、かつ基礎コ

Fig. 9 F_b/F'_c - $F A_e/B A_e$ relationships for footings

Table 4 Geometric properties of specimens and test results

Specimens No.	Column*1 $cB \times cD \times ct$ (mm)	Base plate $B B \times B D \times B t$ (mm)	Footing*2 $F B \times F D \times F h$ (mm)	Loading system (mm)	eN (tf)	eM (tf·m)
CE 1	150×150×25	330×330×50	400×400×400	E.C.L.	e= 100	140.4
CE 2	150×150×25	330×330×50	400×400×300	E.C.L.	e= 100	151.7
CE 3	150×150×25	330×330×50	400×400×200	E.C.L.	e= 100	169.7
CE 4	150×150×25	330×330×50	400×400×100	E.C.L.	e= 100	190.4
CE 5	150×150×25	300×300×50	400×400×400	E.C.L.	e= 25	230.1
CE 6	150×150×25	300×300×50	400×400×400	E.C.L.	e= 50	214.8
CE 7	150×150×25	300×300×50	400×400×400	E.C.L.	e= 75	191.3
CE 8	150×150×25	300×300×50	400×400×400	E.C.L.	e= 100	132.1
CE 9	150×150×25	300×300×50	400×400×400	O.M.L.	h=1000	55.0
CE10	150×150×25	300×300×50	400×400×200	E.C.L.	e= 25	278.1
CE11	150×150×25	300×300×50	400×400×200	E.C.L.	e= 50	275.9
CE12	150×150×25	300×300×50	400×400×200	E.C.L.	e= 75	222.0
CE13	150×150×25	300×300×50	400×400×200	E.C.L.	e= 100	174.1
CE14	150×150×25	300×300×50	400×400×200	O.M.L.	h=1000	70.0
CE15	150×150×25	300×300×36	400×400×400	E.C.L.	e= 25	229.0
CE16	150×150×25	300×300×36	400×400×400	E.C.L.	e= 50	182.6
CE17	150×150×25	300×300×36	400×400×400	E.C.L.	e= 75	142.2
CE18	150×150×25	300×300×36	400×400×400	E.C.L.	e= 100	109.1
CE19	150×150×25	300×300×36	400×400×400	O.M.L.	h=1000	50.0
CE20	150×150×25	300×300×36	400×400×200	E.C.L.	e= 25	273.8
CE21	150×150×25	300×300×36	400×400×200	E.C.L.	e= 50	206.5
CE22	150×150×25	300×300×36	400×400×200	E.C.L.	e= 75	184.0
CE23	150×150×25	300×300×36	400×400×200	E.C.L.	e= 100	131.5
CE24	150×150×25	300×300×36	400×400×200	O.M.L.	h=1000	50.0
CE25	150×150×25	300×300×25	400×400×400	E.C.L.	e= 25	190.0
CE26	150×150×25	300×300×25	400×400×400	E.C.L.	e= 50	163.2
CE27	150×150×25	300×300×25	400×400×400	E.C.L.	e= 75	120.2
CE28	150×150×25	300×300×25	400×400×400	E.C.L.	e= 100	84.8
CE29	150×150×25	300×300×25	400×400×400	O.M.L.	h=1000	40.0
CE30	150×150×25	300×300×25	400×400×200	E.C.L.	e= 25	241.5
CE31	150×150×25	300×300×25	400×400×200	E.C.L.	e= 50	193.1
CE32	150×150×25	300×300×25	400×400×200	E.C.L.	e= 75	136.7
CE33	150×150×25	300×300×25	400×400×200	E.C.L.	e= 100	104.2
CE34	150×150×25	300×300×25	400×400×200	O.M.L.	h=1000	50.0

*1: built-up, *2: concrete block, E.C.L.: Eccentrically applied compressive load, O.M.L.: one way monotonous lateral load, e: eccentricity, h: distance between position of lateral load and bottom of base plate

ンクリートの高さ径比に応じた圧縮強度 F'_c を用いた場合には、相関係数は 0.850 であり、(2) 式および (8) 式に比べてより高い相関を示すことが分かる。

以上に示した実験結果から、(2), (8), (10) 式のよう
に 3 種類の支圧強度の実験式が得られたが、ベース
プレートの強度・剛性を考慮し、かつ基礎コンクリートの
高さ径比に応じた圧縮強度を用いて得られた (10) 式は、
露出形式柱脚の中心圧縮耐力を予測する場合に用いる基
礎コンクリートの支圧強度の実験式として最適であると
考えられる。

3. 基礎コンクリートの終局曲げ耐力

3.1 試験体

鋼柱は、溶接による組立圧縮材であり、断面の寸法は
□-150×150×25 の 1 種類である。

ベースプレート (幅 mm×せい mm×板厚 mm) は、
試験体 CE 1~CE 4, CE 5~CE 14, CE 15~CE 24,
CE 25~CE 34 の順に、330×330×50, 300×300×50,
300×300×36, 300×300×25 の 4 種類であり、鋼柱と
突合せ溶接されている。なお、ベースプレートの寸法の
一覧を Table 4 に示す。

基礎コンクリートは、無筋コンクリートブロックであ
り、断面 (幅 mm×せい mm) は、400×400 であり、高

さは 4 種類あり、CE 1, CE 5~CE 9,
CE 15~CE 19 および CE 25~CE 29 は
400 mm, CE 2 は 300 mm, CE 3, CE 10
~CE 14, CE 20~CE 24 および CE 30~
CE 34 は 200 mm, CE 4 は 100 mm であ
る。なお、基礎コンクリートの形状・寸法
の詳細を Table 4 および Fig. 10(a)~(d)
に示す。

鋼材およびコンクリートの機械的性質
を、それぞれ、Table 5 および Table 6 に
示す。また、鋼材は、すべて SS 41 であり、
セメントおよび骨材の種類は、中心圧縮試
験で用いたものと同一である。

Fig. 10 Details of footings

Fig. 11 Test setup

Fig. 12 Crack patterns of footings

Table 5 Mechanical properties of the steel

Materials		σ_Y	σ_B	ϵ_B
Part	Shape			
Column	P-25	2.64		
Base plate	P-50	2.84	4.73	27
	P-36	2.66	4.61	29
	P-25	2.64	4.50	32

 σ_Y :Yield point (tf/cm²) σ_B :Tensile strength (tf/cm²) ϵ_B :Elongation (%)

Table 6 Mechanical properties of the concrete

Specimens	Compressive strength (kgf/cm ²)
CE 1~CE 4	250
CE 5 CE 9~CE 10 CE 14~CE 27 CE 34	262
CE 6~CE 8 CE 11~CE 13 CE 18, CE 23 CE 28, CE 33	291

3.2 載荷方法

400 tf 万能試験機を用いて偏心軸方向圧縮力を与える装置を Fig. 11(a), (b) に示す。装置 (a) は、偏心距離 25 mm, 50 mm, 装置 (b) は、偏心距離 75 mm, 100 mm の載荷試験に用いている。また、100 mm を超える偏心距離の載荷試験の場合には、Fig. 11(c) に示すように、一定軸方向圧縮力の下で、ベースプレート下面から 1 000 mm の高さの位置に水平力を与える装置を用いている。

CE 1~CE 4 は偏心圧縮力を受ける試験体であり、偏心距離 e はいずれも 100 mm に設定されている。|CE 5~CE 8|, |CE 10~CE 13|, |CE 15~CE 18|, |CE 20~CE 23|, |CE 25~CE 28|, |CE 30~CE 33| は、偏心圧縮力を受ける試験体であり、偏心距離を中括弧内に示された試験体の順に、それぞれ、25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm に設定している。また、CE 9, CE 14, CE 19, CE 24, CE 29, CE 34 は、ベースプレート下面から高さ $h=1000$ mm の位置に、水平力を受ける試験体であり、軸方向圧縮力 eN を、それぞれの順に、55 tf, 70 tf, 50 tf, 50 tf, 40 tf, 50 tf に設定している。なお、試験体のベースプレート下面には、厚さ 10 mm 程度の高強度無収縮モルタルが充填されており、モルタルの圧縮強度が 450 kgf/cm² 程度に達していることを確認した後、載荷試験を開始している。

3.3 実験結果

3.3.1 破壊状況

一例として、偏心距離 75 mm の偏心圧縮力を受け、ベースプレート厚が 50 mm, 36 mm, 25 mm で、基礎コンクリートの高さが 400 mm, 200 mm の試験体の破壊状況を Fig. 12(a)~(f) に示す。支圧ひび割れは、ベースプレート厚が小さくなるにつれて圧縮側ベースプレート最外縁から圧縮側柱フランジのほうに移行する傾向を示す。なお、基礎の高さ変化による破壊性状の差異は特に見られない。

3.3.2 曲げモーメントと軸力の相関式

本実験のように鋼柱が箱形断面、ベースプレートの底面および基礎コンクリートの断面が長方形の場合には、ベースプレートが薄くなると、その有効面積は、Fig. 7(a) に示すような中空の箱形になると考えられ、基礎コンクリートの曲げモーメント M と軸力 N の相関式 ($M-N$ 相関式) は複雑化し、実用的ではない。したがって本研究では、計算の単純化を図るために、箱形の面積を等価な長方形の面積に置換し、新たに支圧面積として (11) 式で表されるようなベースプレートの有効面積 ${}_B A_e$ を想定する。

$${}_B A_e = {}_B B_e \cdot {}_B D_e \quad \cdots \cdots (11)$$

ここで

$${}_B B_e = {}_B B_0 - {}_B D_1 \cdot {}_B B_1 / {}_B D_0$$

$${}_B D_e = {}_B D_0$$

$${}_B B_0 = cB + 2{}_B t \cdot \cot \theta + 2S$$

$${}_B D_0 = cD + 2{}_B t \cdot \cot \theta + 2S$$

$${}_B B_1 = cB - 2{}_B t \cdot \cot \theta - 2{}_B c t$$

$${}_B D_1 = cD - 2{}_B t \cdot \cot \theta - 2{}_B c t$$

$$0 \leq {}_B B_1 < {}_B B_0 \leq {}_B B$$

$$0 \leq {}_B D_1 < {}_B D_0 \leq {}_B D$$

$cB, cD, {}_B c t$: 鋼柱断面の幅, せい, 板厚

${}_B B, {}_B D, {}_B t$: ベースプレートの幅, せい, 板厚

${}_B B_e, {}_B D_e$: ベースプレートの有効幅, 有効せい

S : 鋼柱表面からベースプレート上の溶

接止端部までの距離

曲げモーメントと軸力を受ける基礎コンクリートのベースプレート位置における力の釣合いの代表例を Fig. 13 に示す。基礎コンクリートを、上記の有効面積 $B_e A_e$ を断面とする無筋コンクリートの柱と見なし、長方形、2次のパラボラ、三角形の3種類のコンクリートの支圧反力分布を想定すると、基礎コンクリートの $M-N$ 相関式は、それぞれ、(12)~(16) 式のように表される。なお、この有効面積を用いて得られる $M-N$ 相関式は、箱形の面積を用いる場合に比べて、明らかに安全側に基礎コンクリートの終局曲げ耐力を予測可能である。

1) 支圧反力分布を長方形とする場合

$$M = 1/2 \cdot N \cdot B_e \cdot D_e \{1 - N / (B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b)\} \dots\dots (12)$$

2) 支圧反力分布を2次のパラボラとする場合

a) $N \leq 2/3 \cdot B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b$ のとき

$$M = 1/16 \cdot N \cdot B_e \cdot D_e \{8 - 9 \cdot N / (B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b)\} \dots\dots (13)$$

b) $N > 2/3 \cdot B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b$ のとき

$$M = 1/4 \cdot B_e \cdot B_e \cdot D_e^2 \cdot F_b \{1 - N / (B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b)\} \dots\dots (14)$$

3) 支圧反力分布を三角形とする場合

a) $N \leq 1/2 \cdot B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b$ のとき

$$M = 1/6 \cdot N \cdot B_e \cdot D_e \{3 - 4 \cdot N / (B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b)\} \dots\dots (15)$$

b) $N > 1/2 \cdot B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b$ のとき

$$M = 1/6 \cdot B_e \cdot B_e \cdot D_e^2 \cdot F_b \{1 - N / (B_e \cdot B_e \cdot D_e \cdot F_b)\} \dots\dots (16)$$

Fig. 13 Typical load carrying mechanism

3.3.3 実験結果の考察

基礎コンクリートの偏心圧縮試験および一定軸力下における水平加力試験から得られた最大耐力を Table 4 に示す。

実験値と(6)式の支圧強度⁷⁾を用いて得られる基礎コンクリートの $M-N$ 相関曲線との比較結果を、ベースプレートのサイズにより、試験体 CE 1~CE 4, CE 5~CE 14, CE 15~CE 24, CE 25~CE 34 の4グループに分けて Fig. 14(a)~(d) に示す。また、実験値と(8)式および(10)式を用いて得られる $M-N$ 相関曲線の比較結果を Fig. 15(a)~(d) および Fig. 16(a)~(d) に示す。なお、基礎コンクリートの高さ F_h は、400 mm, 300 mm, 200 mm, 100 mm の4種類であり、実験値を、それぞれの順に、○, ◇, △, ▽記号で示す。一方、ベースプレートのサイズおよび基礎コンクリートの高さによ

Fig. 14 $m-n$ interaction curves for footings (using Eq. (6), and grouping by geometric properties of base plates) Fig. 15 $m-n$ interaction curves for footings (using Eq. (8), and grouping by geometric properties of base plates)

り実験値を区別せず、実験値と(6), (8), (10) 式の支圧強度を用いて得られる $M-N$ 相関曲線とのマクロ的な比較結果を、それぞれの順に、Fig. 17(a)~(c) に示す。なお、この場合には、すべての実験値を○記号で示す。

支圧反力分布を長方形、2次のパラボラ、三角形の3種類に想定して得られる $M-N$ 相関曲線(以下の考察では、長方形 $M-N$, 2次のパラボラ $M-N$, 三角形 $M-N$ と略記する)を、それぞれの順に、実線、破線、点線で Fig. 14~Fig. 17 に示す。なお、支圧強度の予測に(6), (8), (10)式を用いる場合には、(11)式のベースプレートの有効面積の計算において、それぞれの順に、 $\theta=0^\circ$, $\theta=45^\circ$, $\theta=32.6^\circ$ とし、溶接の補強盛りの大きさ S を実測に基づき 12 mm としている。

また、Fig. 14～Fig. 17の縦軸および横軸は、(17)および(18)式のように無次元化軸力 n および無次元化モーメント m を表している。

$$n = N / (b B_e \cdot b D_e \cdot F_b) \cdots \cdots (17)$$

$$m = M / (b B_e \cdot b D_e^2 \cdot F_b) \cdots \cdots (18)$$

支圧強度の予測に(6)式を用いた場合の M - N 相関曲線と実験値の比較 (Fig. 14(a)～(d)) から、ベースプレートの強度・剛性および基礎コンクリートの高さの変化に対して、(6)式ではほとんど対応できないことが分かる。計算による最大圧縮耐力の1/2以下の軸力では、長方形 M - N は実験値を良く追跡している。それより大きな軸力では、長方形 M - N はベースプレートの強度・剛性が最も小さな試験体 CE 25～CE 34 の実験値をおおむね追跡しているが、ベースプレートの強度・剛性が大きくなるにつれて、また基礎の高さが小さくなるにつれてかなり安全側に実験値を評価している。なお、本実験におけるすべての試験体の耐力は、長方形 M - N より大きな値を示しており、2次のパラボラ M - N および三角形 M - N との比較結果については特に言及しない。

支圧強度の予測に(8)式を用いた場合の M - N 相関曲線と実験値の比較 (Fig. 15(a)～(d)) から、ベース

プレートの強度・剛性による差異はほとんど見られないが、基礎コンクリートの高さの変化による差異はかなり大きいことが分かる。計算による最大圧縮耐力の1/2以下の軸力では、三角形 M - N はかなり安全側に、2次のパラボラ M - N は若干安全側に実験値を評価しており、長方形 M - N は良く実験値を追跡している。それより大きな軸力では、実験値は特定の相関曲線では追跡できず、三角形 M - N に近いもの、長方形 M - N に近いもの、2次のパラボラ M - N に近いものに分かれている。

支圧強度の予測に(10)式を用いた場合の M - N 相関曲線と実験値の比較 (Fig. 16(a)～(d)) から、ベースプレートの強度・剛性並びに基礎コンクリートの高さの変化による差異はほとんど見られないことが分かる。計算による最大圧縮耐力の1/2以下の軸力では、三角形 M - N はかなり安全側に、2次のパラボラ M - N は若干安全側に実験値を評価しており、長方形 M - N は極めて良く実験値を追跡している。それより大きな軸力では、三角形 M - N は若干安全側に、長方形 M - N は若干危険側に実験値を評価しており、2次のパラボラ M - N は良く実験値を追跡している。

また、Fig. 17(a)～(c)には、縦軸・横軸のスケールを統一して実験値を示しており、明らかに、(6)式よりは(8)式を、(8)式よりは(10)式を露出形式柱脚基礎コンクリートの支圧強度の予測式として用いた場合が実験値を良く追跡できることが分かる。本実験から、支圧強度の実験式としてベースプレートの強度・剛性並びに基礎コンクリートの高さ径比を考慮した(10)式を用いることが最も妥当であることが検証された。なお、文献7)に提示されている支圧強度(6)式を用いた場合の M - N 相関曲線は、中心圧縮試験結果と同様に、偏心圧縮試験および一定軸力下での水平加力試験結果においても本実験の下限值に近い値を示すことがうかがえる。

以上に示した実験値と M - N 相関曲線の比較検討結果から、支圧強度の予測に(10)式を用い、支圧反力分布に2次のパラボラを用いて得られる M - N 相関曲線は、計算による軸力の全範囲において、実験値を最も良く追跡していることが分かる。また、支圧強度の予測に(10)

Fig. 16 m - n interaction curves for footings (using Eq. (10), and grouping by geometric properties of base plates)

Fig. 17 m - n interaction curves for footings (plotting all data)

式を用い、支圧反力分布に長方形を用いて得られる $M-N$ 相関式は、計算による最大圧縮耐力の $1/2$ の軸力以下では、実験値を極めて良く追跡しており、適用限界軸力を設定することにより露出形式柱脚の基礎コンクリートの終局曲げ耐力を最も簡明に予測可能である。

4. 結 び

露出形式柱脚の基礎コンクリートの中心圧縮試験、偏心圧縮試験および一定軸軸力下での水平加力試験を行った結果からつぎのような結論が得られた。

(1) ベースプレートの強度・剛性および基礎コンクリートの高さ径比を考慮した露出形式柱脚の基礎コンクリートの支圧強度の実験式として (10) 式を得た。なお、中柱のように曲げを受ける構面内に基礎ばりを有する場合には、基礎ばり天端からの立上がり部の高さを基礎の高さと見なすことができる。

(2) 基礎コンクリートの終局曲げ耐力は、(10) 式の支圧強度を用い、支圧反力分布を 2 次のパラボラとし、ベースプレートの有効面積を断面とする無筋コンクリートの柱と見なして求めることができる。また、支圧反力分布を長方形とする場合には、最大圧縮耐力の $1/2$ を超える軸力では、実験耐力を若干危険側に評価する傾向がある。

(3) 文献 7) の支圧強度を用いると、基礎コンクリートの終局曲げ耐力は、ベースプレートの強度・剛性が大きくなり、基礎コンクリートの形状が相対的に偏平になるにつれて実験耐力をかなり安全側に評価する傾向がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料 23, 24, pp. 90~100, 1987
- 2) 秋山 宏, 黒沢 稔, 和国信之, 西村 功：鋼構造露出

柱脚の強度と変形, 日本建築学会論文報告集, 第 342 号, pp. 46~54, 1984. 8

- 3) 加藤 勉, 佐藤邦昭, 鈴木周衛, 遠山幸三, 中村嘉宏, 坂本光雄：鋳鋼製柱脚金物 HIBASE を用いた露出型柱脚の研究 (その 4: 立上がり基礎部の支圧強度), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1221~1222, 1984
- 4) 若林 実, 南 宏一, 西村泰志：鉄骨鉄筋コンクリート構造柱脚部のベースプレートの応力伝達機構, 構造工學論文集, Vol. 32 B, pp. 147~158, 1986. 3
- 5) 岡田 清, 六車 照：コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, 1981
- 6) 佐治泰次：建築材料, コロナ社, 1984
- 7) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説, 1990
- 8) A. Williams: The bearing capacity of concrete loaded over a limited Area, Cement and Concrete Association, Technical Report 526, 1979
- 9) 増田貫志, 九谷和秀, 河添隆司：鉄骨柱脚部の力学性状に関する実験的研究, 露出形式柱脚の降伏耐力について (その 1), 日本建築学会九州支部研究報告集, 第 29 号, pp. 329~332, 1986
- 10) 増田貫志, 九谷和秀, 河添隆司：鉄骨柱脚部の力学性状に関する実験的研究, 露出形式柱脚の降伏耐力について (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II, pp. 883~884, 1986
- 11) 増田貫志, 九谷和秀, 河添隆司：鉄骨柱脚部の力学性状に関する実験的研究, 露出形式柱脚の降伏耐力について (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II, pp. 885~886, 1986
- 12) 増田貫志, 九谷和秀：鉄骨柱脚部の力学性状に関する実験的研究, 露出形式柱脚の降伏耐力について (その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II, pp. 1073~1074, 1987
- 13) 増田貫志, 九谷和秀, 吉田祐輔：鉄骨柱脚部の力学性状に関する実験的研究, 露出形式柱脚の降伏耐力について (その 7), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II, pp. 1365~1366, 1990

(1991 年 3 月 10 日原稿受理, 1991 年 7 月 5 日採用決定)