



institution	広島工業大学 (Hiroshima Institute of Technology)
Title	基礎コンクリート破壊を考慮した鉄骨露出柱脚の復元力特性に関する実験的研究
Author(s)	高松, 隆夫; 玉井, 宏章; 山西, 央朗
Citation	広島工業大学紀要研究編, 39: 149-157
URL	http://harp.lib.hiroshima-u.ac.jp/handle/harp/3738
Rights	

基礎コンクリート破壊を考慮した鉄骨露出柱脚の 復元力特性に関する実験的研究

高松 隆夫*・玉井 宏章**・山西 央朗***

(平成16年9月10日受理)

EXPERIMENTAL STUDY ON RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF STEEL EXPOSED COLUMN BASE CONSIDERING CONCRETE FAILURE

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Teruaki YAMANISHI

(Received Sep. 10, 2004)

Abstract

Experimental study on steel exposed column bases with a steel foundation has been carried out, and restoring force characteristics of the column bases are shown to be slip-type models. The column bases are usually constructed on concrete foundation so that the failure of concrete must affect the restoring force characteristics of the column bases. Therefore, two types of concrete foundations are employed to examine the effect of the failure on the characteristics of the column bases under monotonic or cyclic horizontal loading. The experiments are carried out and the following conclusions are drawn.

- 1) The models of cyclic characteristics are in good agreement with the experimental results of column bases with the steel foundation and with 50mm mortar on the concrete foundation.
- 2) In case of 150mm unreinforced concrete on the concrete foundation, the experimental result shows to be lower than the model because of the failure of concrete.
- 3) The failure of concrete at RC column to steel roof beam connection caused by 2001 Geiyo Earthquake can be considered to be similar with the failure of concrete foundation destroyed by the base plate of column base.

Key Words: Exposed column base, Steel foundation, Concrete foundation, Restoring force characteristics

1. はじめに

著者らは、露出柱脚の復元力特性を明らかにするための実験を行ってきた。アンカーボルト降伏先行型柱脚を対象とした実験のために、コンクリート破壊は起こらないと仮定して鋼製基礎を使用してきた¹⁻³⁾。実際の露出柱脚ではコンクリート基礎が用いられているが、コンクリート破壊

が柱脚の復元力特性に及ぼす影響については明らかにしてこなかった。コンクリート破壊としては、1) アンカーボルト定着板を起点とするコンクリートパンチングシア破壊、および2) ベースプレートによるベースモルタルおよび基礎コンクリートの圧壊が考えられる⁴⁾。コンクリートパンチングシア破壊についてはアンカーボルト定着長さを十分に確保することにより防止することができる。本論文

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 広島工業大学工学部建設工学科

*** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

では、復元力特性に影響を与えるコンクリート破壊としてベースモルタルや基礎コンクリートの圧壊について検討する。

一方、芸予地震において屋内運動場の RC 柱と鉄骨屋根梁の定着部コンクリートが多数破壊したことが報告されている⁵⁾。破壊原因についてはいくつか報告されているが未だ不明確な点が残されている⁶⁾。破壊された定着部は露出柱脚とほぼ同様の構造となっている。破壊形式は柱上端部コンクリート破壊であり、露出柱脚におけるベースモルタルや基礎コンクリートの破壊に類似している。

そこで、本論文においては、解体された屋内運動場の露出柱脚を入手できたので、その露出柱脚を用いて載荷実験を行う。まず、コンクリート基礎を用いた露出柱脚の載荷実験を行うことにより、ベースモルタルや基礎コンクリート破壊が露出柱脚の復元力特性に及ぼす影響について検討する。その際に、いままで使用してきた鋼製基礎の場合との比較・検討を行うことにより鋼製基礎実験結果のコンクリート基礎露出柱脚への適用限界について考察する。更に、ベースモルタルや基礎コンクリートの破壊性状を検討することにより芸予地震における柱上端部コンクリート破壊発生の可能性についても併せて検討する。

なお、コンクリート基礎としては、主筋等で十分に補強された RC 梁に 50mm のベースモルタルを打設したもの (Type-CB50) と、150mm の立上げ部無筋コンクリート

を打設したもの (Type-CB150) の 2 種類とする。Type-CB50 試験体は通常使用されている露出柱脚であり、Type-CB150 試験体は立上げ部においてアンカーボルトの外側に補強鉄筋を配置していない露出柱脚である。

2. 実験

2.1 実験概要

本実験では既存屋内運動場露出柱脚を用いる。基礎としては、鋼製基礎、2 種類のコンクリート基礎の計 3 種類とする。載荷方法としては、単調および繰返し載荷を行い、合計 6 体の試験体について実験を行う。Fig. 1 に各試験体名称を示す。鋼製基礎 (Type-SB) は、モルタルおよびコンクリート破壊を無視できる、弾性体基礎である。2 種類のコンクリート基礎の違いは、コンクリート基礎梁に高さ 50mm の無収縮モルタルをベースモルタルとして打設したもの (Type-CB50) と、高さ 150mm の無筋コンクリートを打設したもの (Type-CB150) である。ただし、柱脚設置後にベースプレートとコンクリート基礎との間に隙間が生じる場合には、その隙間にモルタルペーストを注入することにより初期不整を最小限に止めている。

2.2 載荷方法

Fig. 2 に示す二軸載荷装置を使用して載荷実験を行う。本実験では、鉛直荷重は載荷しない。また、アンカーボルトには初期張力として降伏軸方向力の 30% である 22.56kN を与える。Fig. 3 に示す変位制御プログラムにより水平載荷を行う。

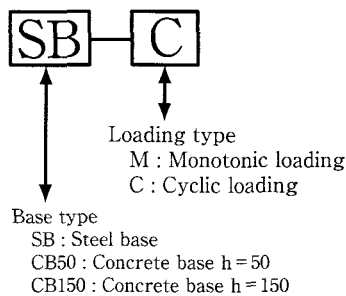


Fig. 1 Example of test code

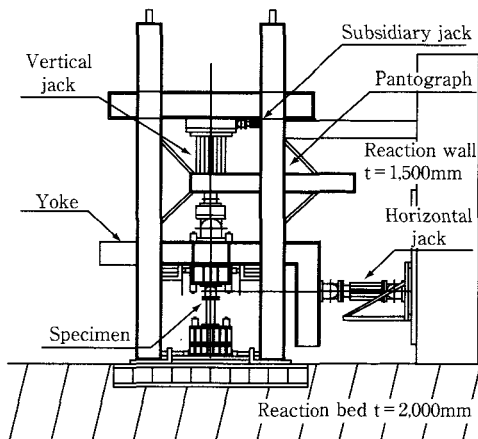


Fig. 2 Loading apparatus

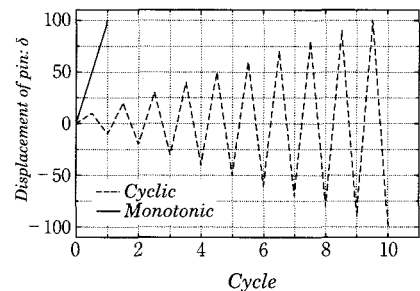


Fig. 3 Loading program

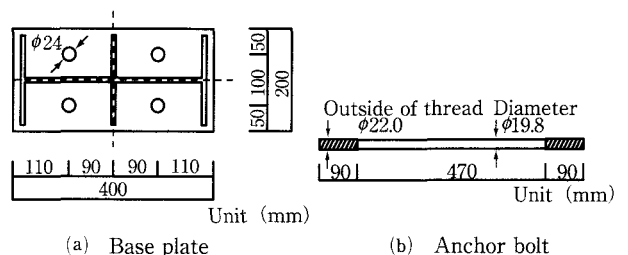


Fig. 4 Test specimen

Table 1 List of dimensions for test specimens

Base type	Column (mm)	Base plate (mm)	Anchor bolt		
			ϕ (mm)	abA (mm ²)	abl (mm)
Steel base	H-375×175×9×9	400×200×22	19.5	299	512
Concrete base					

ϕ : Diameter of anchor bolt abA : Area of anchor bolt abl : Effective length of anchor bolt

Table 2 Mechanical properties of specimen

Element	Material	E (kN/mm ²)	E_{st} (kN/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u (%)	ϵ_u (%)
Anchor bolt	ABR-400	205	2.94	316	490	65.0	23.0
Column	Flange	205	3.31	236	380	62.1	27.0
	Web	205	2.89	233	365	63.8	29.0

E : Young's modulus

E_{st} : Strain-hardening modulus

σ_y : Yield stress

σ_u : Maximum strength

σ_y/σ_u : Yield ratio

ϵ_u : Elongation

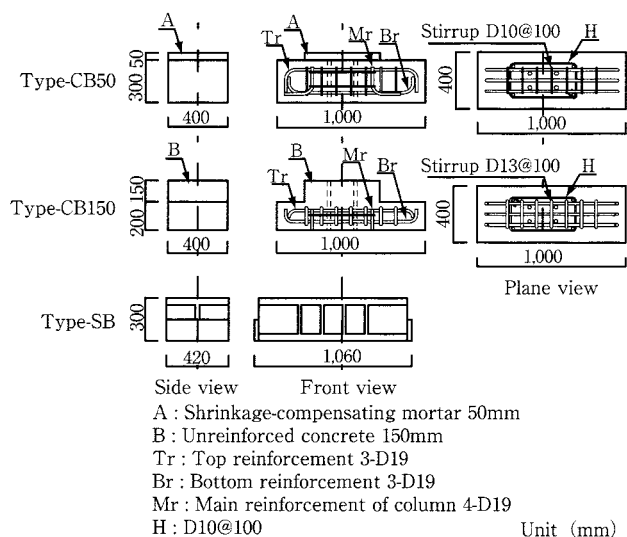


Fig. 5 Details of steel and concrete bases

Table 3 Mechanical properties of concrete

Test code	Concrete (N/mm ²)	Mortar (N/mm ²)
CB50-M	31.3	51.3
CB50-C	27.7	48.4
CB150-M	30.5	
CB150-C	31.5	

2.3 試験体

アンカーボルトは、十分な塑性伸びが期待できる転造ねじアンカーボルトを使用する。また、Fig. 4 に試験体形状、Fig. 5 に各基礎形状を示す。Table 1 に試験体の機械的性質、Table 2 に各部主要寸法を示す。試験体は、既存屋内運動場のテーパー付き柱（最下端部寸法：H-375×175×9×9）にベースプレート $t=22\text{mm}$ を隅肉溶接接合した柱脚である。また、Table 3 にコンクリートおよびモルタルの強度を示す。

2.4 計測方法

Fig. 6 に計測システムを示す。変位としては、ベース

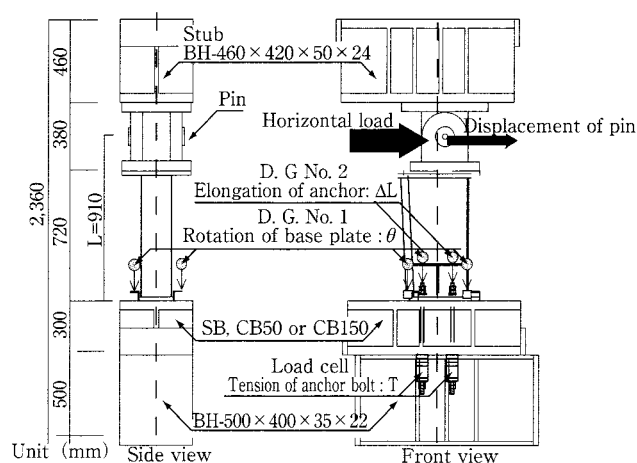


Fig. 6 Measurement system and setup of specimen

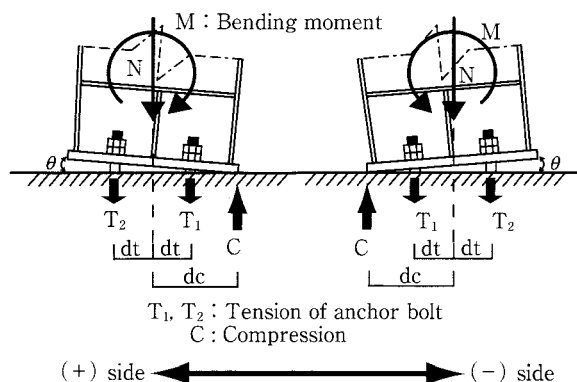


Fig. 7 Resistance mechanism of exposed column bases under seismic loading

プレート回転角 θ を求めるために D.G No. 1 による計測と、アンカーボルト伸び ΔL を求めるために D.G No.2 による計測を行う。また、試験体上端ピンの水平変位 δ も計測する。ベースプレート回転角については、試験体前後に設置された変位計で測定したものを平均して求める。

荷重としては、二軸荷装置に設置されている水平油圧ジャッキ先端に取り付けられたロードセルにより水平繰返

し荷重 P を計測する。鉛直荷重を載荷しない。アンカーボルト張力 T は、アンカーボルトに取り付けたロードセルにより計測する。

3. 復元力特性モデル

文献 3) で提案している復元力特性モデルを適用・拡張して、屋内運動場露出柱脚の復元力特性モデルを提案する。Fig. 7 に耐荷機構を示す。ただし、圧縮合力点位置をベースプレート最外縁とする。

3.1 降伏耐力

T_2 列アンカーボルトのみが降伏した時の降伏耐力 $T_2 M_y$ は次式により求められる。

$$T_2 M_y = n_{T_2} \cdot abA \cdot \sigma_y \cdot (d_t + d_c) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 n_{T_2} : T_2 列アンカーボルト本数、 abA : アンカーボルト軸部断面積、 σ_y : アンカーボルト降伏点、 d_t 、 d_c : Fig. 7 に示す距離である。

T_1 列アンカーボルトのみが降伏した時の降伏耐力 $T_1 M_y$ は、次式より求められる。

$$T_1 M_y = n_{T_1} \cdot abA \cdot \sigma_y \cdot (d_c - d_t) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 n_{T_1} : T_1 列アンカーボルト本数である。

3.2 曲げ剛性

弾性回転剛性 K_b は、アンカーボルトの弾性伸びから次式より求められる。

$$K_b = \frac{abE \cdot n \cdot abA \cdot d^2}{2 \cdot abl} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 abE : アンカーボルトのヤング係数、 n : 任意列アンカーボルトの本数、 abA : アンカーボルト軸部断面積、 d : ベースプレート最外縁から任意列アンカーボルト中心までの距離 (T_2 列 $d_c + d_t$ 、 T_1 列 $d_c - d_t$)、 abl : アンカーボルト有効長さである。

アンカーボルト降伏後の二次勾配 K_{bst} は次式で求められる。

$$K_{bst} = \frac{abE_{st} \cdot n \cdot abA \cdot d^2}{2 \cdot abl} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 abE_{st} : アンカーボルトの垂硬化係数である。

3.3 復元力特性

既存屋内運動場露出柱脚はアンカーボルト降伏先行型柱脚と考えられるため、繰返し載荷時の曲げ降伏耐力は、文献 7) により、処女載荷時以外は T_2 列アンカーボルトの

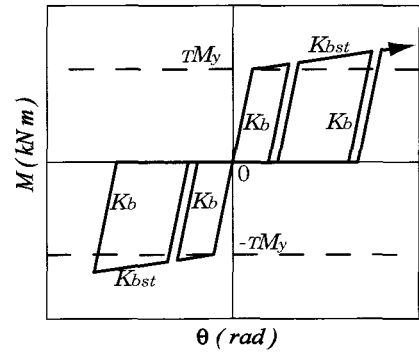


Fig. 8 Models of restoring force characteristics under cyclic loading

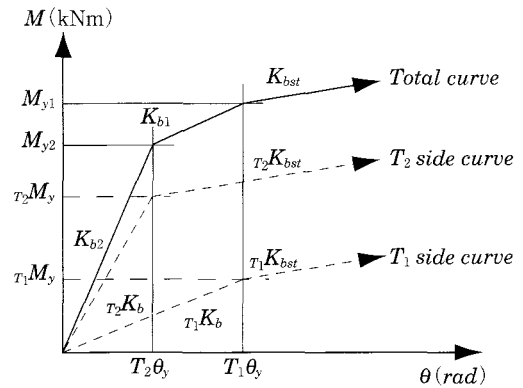


Fig. 9 Models of restoring force characteristics under monotonic loading

みが曲げ抵抗するため、Fig. 8 に示すスリップ型復元力特性となる。

単調載荷時においては、全てのアンカーボルトが常に曲げ抵抗するため、Fig. 9 に示すように復元力特性は、 T_1 列と T_2 列アンカーボルトの曲げ抵抗を累加して求められる。降伏耐力 M_{y1} と、降伏耐力 M_{y2} は次式により求められる。

$$M_{y1} = T_2 M_y + (T_1 \theta_y - T_2 \theta_y) \cdot T_2 K_{bst} + T_1 M_y \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$M_{y2} = T_2 M_y + \left(\frac{d_c - d_t}{d_c + d_t} \right) T_1 M_y \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $T_2 \theta_y (= T_2 M_y / T_2 K_b)$: T_2 列アンカーボルト降伏時の柱脚回転角 (T_2 列アンカーボルトの降伏耐力/ T_2 列アンカーボルトの弾性回転剛性)、 $T_1 \theta_y (= T_1 M_y / T_1 K_b)$: T_1 列アンカーボルト降伏時の柱脚回転角 (T_1 列アンカーボルトの降伏耐力/ T_1 列アンカーボルトの弾性回転剛性)、 $T_2 K_{bst}$: T_2 列アンカーボルトの二次勾配である。

累加された回転剛性は、次式により求められる。

$$\left. \begin{aligned} K_{b1} &= T_1 K_b + T_2 K_{bst} \\ K_{b2} &= T_1 K_b + T_2 K_{bst} \\ K_{bst} &= T_1 K_{bst} + T_2 K_{bst} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $T_1 K_{bst}$: T_1 列アンカーボルトの二次勾配である。

4. 実験結果および考察

4.1 荷重-変形関係

Fig. 10に各試験体の荷重-変形関係 (P - δ) を示す。縦軸は試験体上端ピンに作用する水平荷重 P であり、横軸は試験体上端ピンの水平変位 δ である。繰返し載荷時の履歴曲線は、いずれの試験体においてもスリップ型を示した。コンクリート基礎 Type-CB50 の場合には、負方向初期載荷時に荷重が上昇しなかった。原因としては、コンクリート基礎の表面処理が十分でなく、ベースプレートとコンクリート表面との間に隙間が生じたためと考えられる。

単調載荷時においては、鋼製基礎・コンクリート基礎 Type-CB50 および Type-CB150 のいずれの試験体でも、全てのアンカーボルトが常に曲げ抵抗するために、1列アンカーボルトのみが曲げ抵抗する繰返し載荷時よりも耐力が高目となる履歴曲線を示した。

4.2 復元力特性

Fig. 11 に各試験体の復元力特性 (M - θ 関係) を示す。縦軸は水平荷重 P に柱長さ L を掛けた柱脚モーメント M である。横軸はベースプレートに取り付けた変位計により求めた柱脚回転角 θ である。変位計をベースプレートに

直接取り付けることが困難であったために、ベースプレート端部に溶接されたアングル材に設置した。復元力特性モデルも二重線により併せて示す。Table 4 には、 eM_y : Fig. 12 に示す General yield point method により求められた実験による降伏耐力 (ただし、繰返し載荷時の場合は負方向載荷の値を用いる。), $A M_y$: 降伏耐力の理論値, eM_{max} : 実験により求められた最大耐力, $eM_y/A M_y$ を示す。

単調載荷時では、鋼製基礎を用いた試験体の復元力特性は、全てのアンカーボルトが常に曲げ抵抗するとして(5), (6)式より求めた復元力特性モデルで良好に推定できる。コンクリート基礎を用いた試験体 Type-CB50 および Type-CB150 のいずれにおいても、コンクリート破壊が生じると耐力低下するために、復元力特性モデルと比較して低目の値となる。特に、試験体 Type-CB150 は他の2体の試験体に比べて耐力低下が顕著である。

繰返し載荷時では、いずれの試験体においても処女載荷時に全てのアンカーボルトが曲げ抵抗するために、 T_2 列アンカーボルトのみが曲げ抵抗するとして(1)式より求めた復元力特性モデルに比べて耐力増加している。処女載荷時以降において復元力特性モデルは、鋼製基礎と試験体 Type-CB50 の実験結果に良好に対応している。試験体 Type-CB150 においては、単調載荷時と同様にコンクリート破壊による耐力低下が顕著であるために実験結果は、復

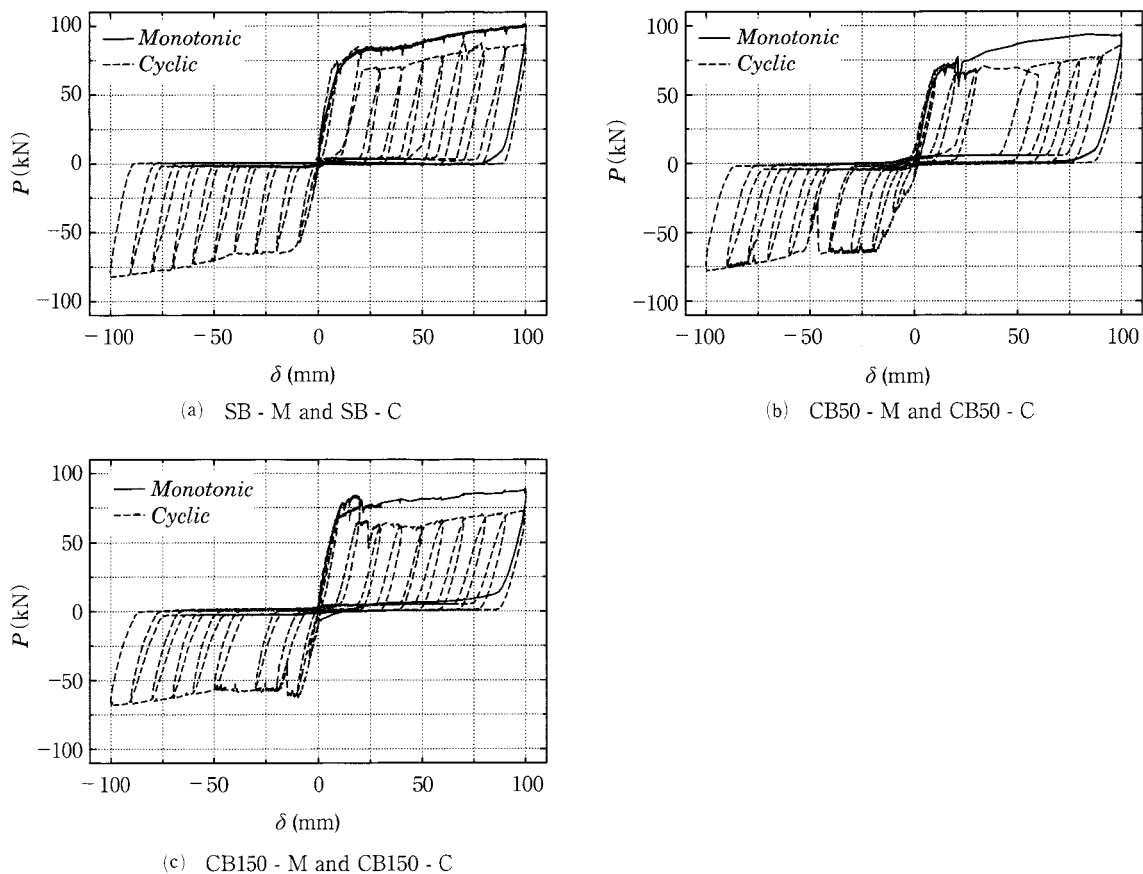


Fig. 10 Horizontal load versus horizontal displacement relationships

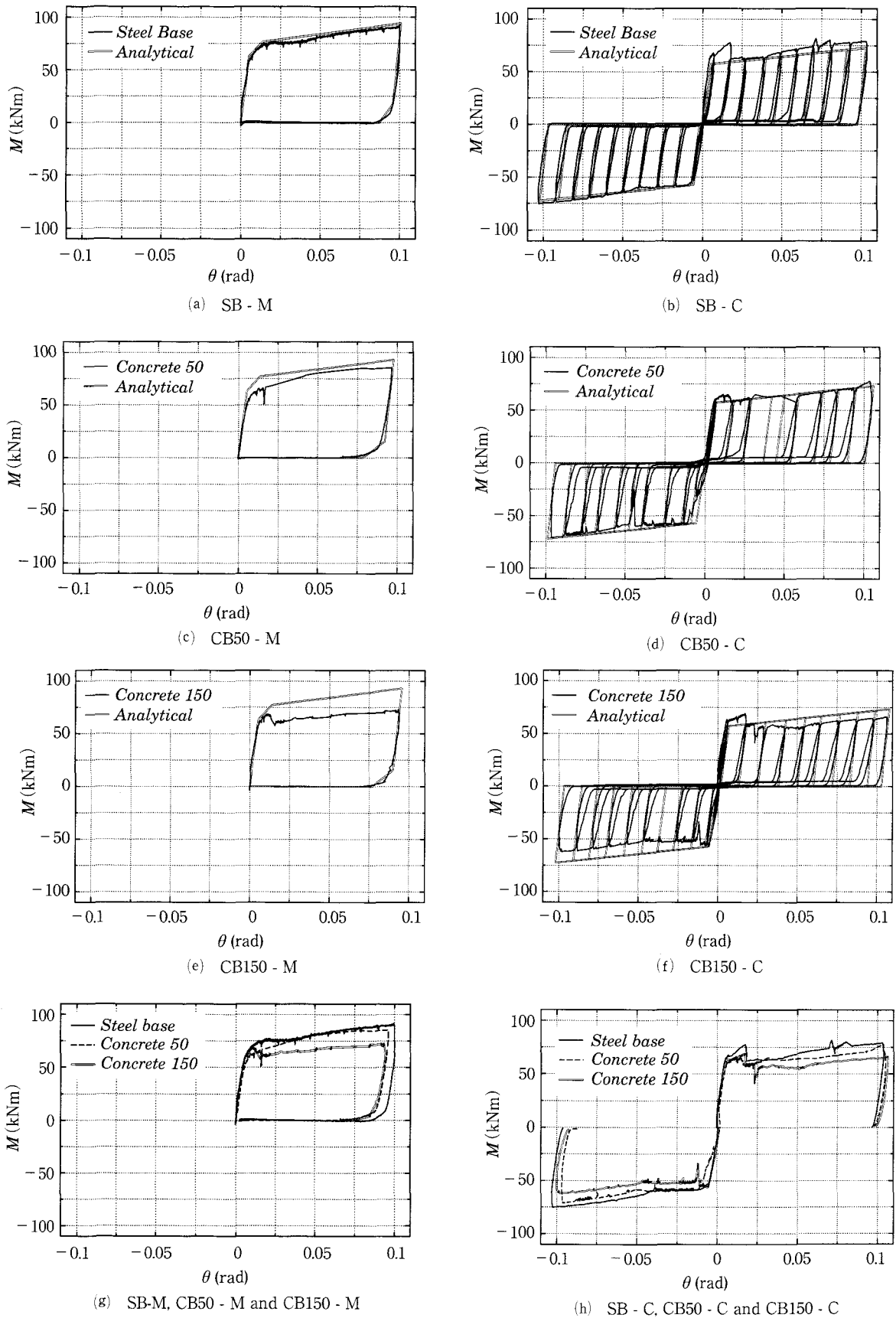


Fig. 11 Restoring force characteristics

Table 4 Calculated and Observed bending resistance

Test code	eM_y (kNm)	$A M_y$ (kNm)	$eM_y/A M_y$	eM_{max} (kNm)
SB-M	63.3	62.3	1.02	91.8
SB-C	58.3	57.2	1.02	79.1
CB50-M	55.9	62.3	0.90	85.1
CB50-C	59.1	57.2	1.03	77.7
CB150-M	62.4	62.3	1.00	71.8
CB150-C	54.8	57.2	0.96	63.5

eM_y : Experimental yield strength
 $A M_y$: Analytical yield strength
 eM_{max} : Experimental maximum strength

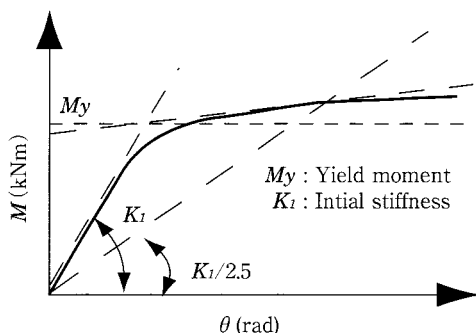


Fig. 12 General yield point method

元力特性モデルと比較して少し低目の値を示している。Table 4 において、 $eM_y/A M_y = 1.02 \sim 0.90$ であり、降伏耐力式は実験結果を比較的精度良く評価できる。

4.3 弾性回転剛性

Table 5 に、弾性回転剛性を示す。弾性回転剛性の理論値は、(3)式により求めた。実験値については、Fig. 11 に示す復元力特性より、Fig. 13 示す方法により求める。単調載荷時では、処女載荷時と除荷時の弾性勾配、また繰返し載荷時では、負方向処女載荷時と最終サイクルの除荷時弾性勾配により求めた。Table 5 および Fig. 11 に示すように、鋼製基礎の場合には理論値は実験結果を良好に推定している。しかしながら、コンクリート基礎の場合には、基礎にひび割れが入るまでは理論値にほぼ等しい値を示したが、ひび割れ後においては、 $eK_b/A K_b = 0.87 \sim 0.77$ となり弾性回転剛性は低下した。

4.4 圧縮合力点位置

復元力特性モデルの弾性回転剛性および降伏耐力を求める場合に、圧縮合力点位置をベースプレートの最外縁と仮定した。しかしながら、実際にはコンクリートがひび割れを起こすことにより圧縮合力点位置は移動する。文献(8)により、柱脚に作用するモーメントから、図心から圧縮合力点位置までの距離 d_c を次式により求める。

ただし、式(8)は単調載荷、式(9)は繰返し載荷である。

Table 5 Elastic rotational stiffness

Test code	$A k_b$ (kN m/rad)	eK_b (kN m/rad)	$eK_b/A k_b$	
SB-M	10400	10400	1.00	
SB-C	10400	11000	1.06	
B	CB50-M	10400		
	CB50-C	10400	10000	0.96
	CB150-M	10400	10100	0.97
	CB150-C	10400	10800	1.04
A	CB50-M	10400	9000	0.87
	CB50-C	10400	9200	0.88
	CB150-M	10400	8000	0.77
	CB150-C	10400	8700	0.84

B : Before crack
 A : After crack
 $A k_b$: Analytical Rotational stiffness
 eK_b : Experimental Rotational stiffness

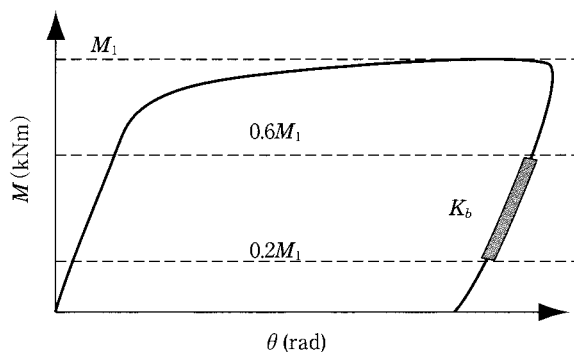


Fig. 13 Elastic rotational stiffness

$$d_c = \frac{M - T_2 \cdot d_t + T_1 \cdot d_t}{T_1 + T_2} \dots\dots\dots(8)$$

$$d_c = \frac{M - T_2 \cdot d_t}{T_2} \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 M : 柱脚モーメント、 T_1, T_2 : 各列アンカーボルト張力、 d_t : 図心から $T_1 \cdot T_2$ 列アンカーボルトまでの距離である。

Fig.14 に(8)(9)式より求めた図心から圧縮合力点位置までの距離 d_c を示す。縦軸は図心から圧縮合力点位置までの距離 d_c 、横軸は柱脚回転角 θ である。鋼製基礎の場合には、 d_c は図心からベースプレート最外縁までの距離でほぼ一定となる。圧縮合力点位置が最外縁から若干内側に移動しているのは、ベースプレートに塑性変形が生じたためと考えられる。コンクリート基礎の場合には、ひび割れ前では鋼製基礎と同様に圧縮合力点位置はベースプレート最外縁となる。ベースプレート最外縁近傍にコンクリートひび割れが発生すると、その位置でベースプレートからの圧縮力を支持できなくなるために、圧縮合力点位置はベースプレート中心方向に移動する。圧縮合力点位置がベースプレート最外縁から内側に移動することにより、柱脚の曲

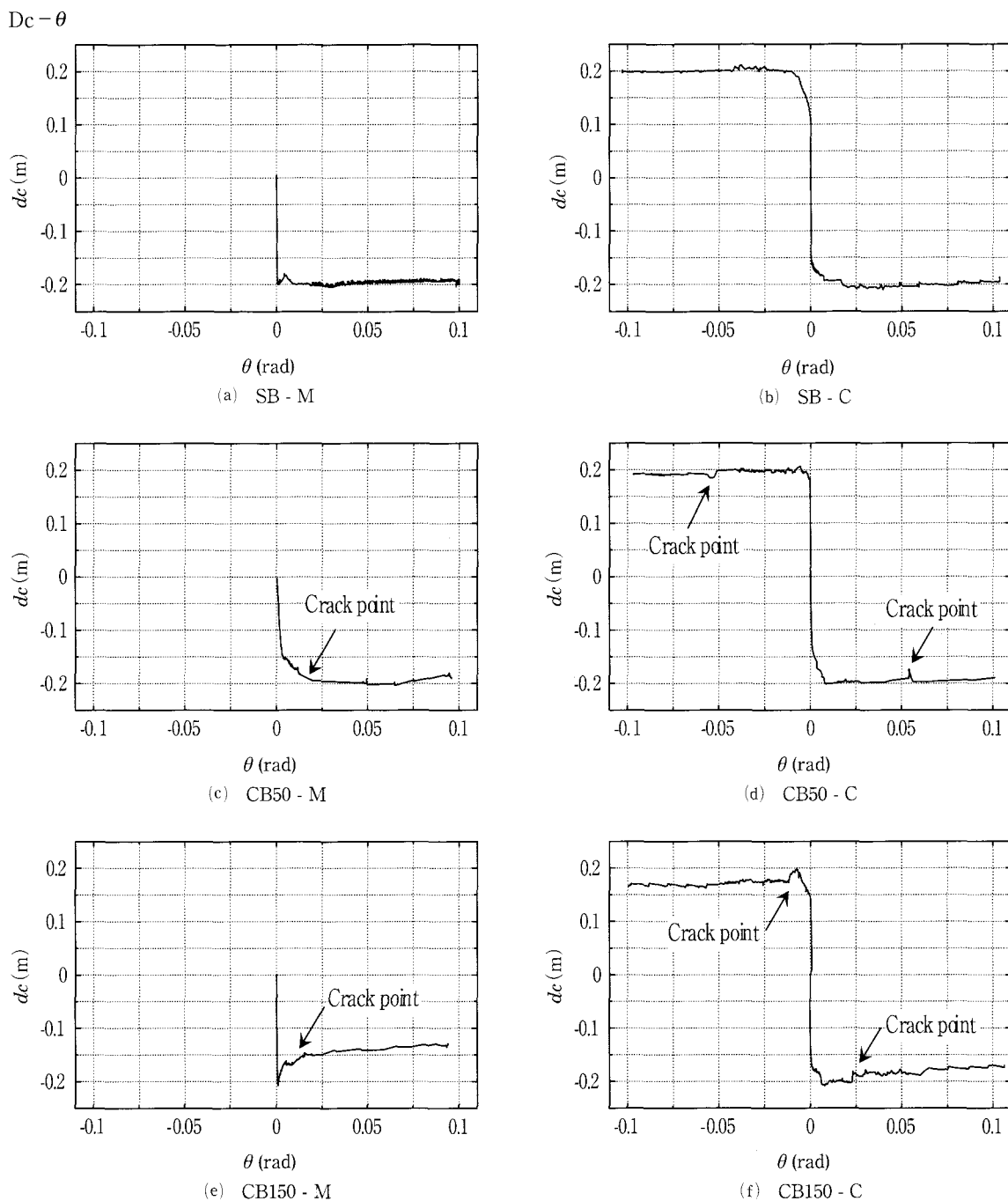


Fig. 14 dc versus rotation relationships

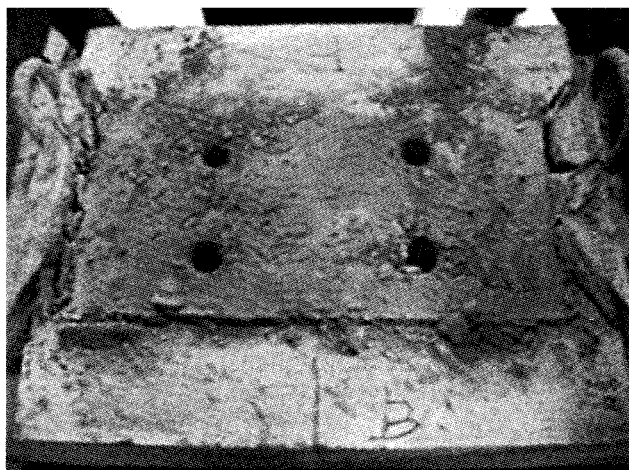
げ耐力が低下する。コンクリート基礎 Type-CB50 ではコンクリートひび割れが発生しても距離 d_c はほとんど減少しなかったが、コンクリート基礎 Type-CB150 ではコンクリート破壊が激しかったために、距離 d_c は著しく減少した。コンクリート破壊形状を Photo 1, 2 に示す。

5. 結 論

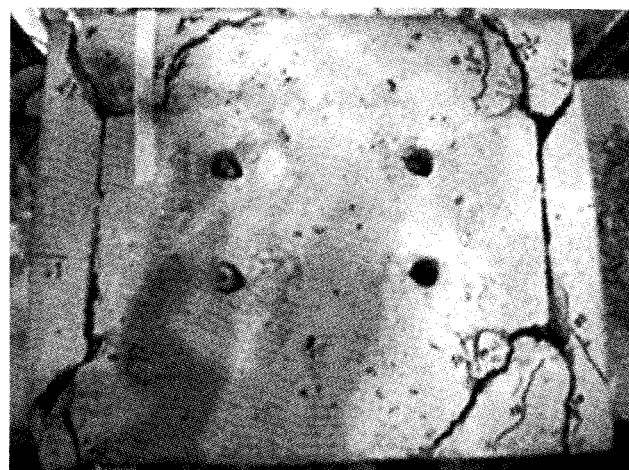
鋼製基礎およびコンクリート基礎を用いた既存屋内運動場露出柱脚の繰返し載荷実験を行い、基礎の違いによる露出柱脚の復元力特性への影響について検討した。得られた

知見は以下のようにまとめられる。

1. 鋼製基礎を用いた場合には、圧縮合力点位置はベースプレート最外縁となる。その位置をベースプレート回転中心として求めた復元力特性モデルは、実験により得られた復元力特性に良好に対応している。
2. Type-CB50 試験体では、ベースモルタルひび割れ後も耐力および弾性回転剛性はほとんど低下しないで、鋼製基礎試験体の復元力特性にほぼ良好に対応している。鋼製基礎を用いた露出柱脚試験体の実験結果により実際のコンクリート基礎露出柱脚の変形状をほぼ



(a) Type-CB50



(b) Type-CB150

Photo1, 2 Failure of concrete

推定できる。

3. Type-CB150 試験体では、基礎コンクリートひび割れ後耐力および弾性回転剛性は著しく減少する。コンクリート破壊により圧縮合力点位置はベースプレート最外縁から内側に移動するため、耐力および弾性回転剛性は減少する。
4. Type-CB50 と Type-CB150 とのコンクリート破壊性状を比較すれば、Type-CB50 ではベースモルタルにはひび割れが起こるのみであるが、Type-CB150 では、ひび割れ発生後にコンクリート破壊が起こった。立上げ部コンクリートにはアンカーボルト補強鉄筋の配置が必要である。
5. 芸予地震における RC 柱上端部コンクリート破壊の原因の1つとして、アンカーボルト補強鉄筋が配置されていなかったことが考えられる。

謝 辞

転造ねじアンカーボルトを提供いただいたフルサト工業株式会社、柱脚試験体を提供していただいた S 造仕口を調べる会（会長：尾熊政男）に対して深く感謝いたします。また、この実験を行うにあたり、高松・玉井両研究室卒業生に協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高松隆夫，銅木弘和，中村慎太郎：露出型柱脚の復元

力特性に関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集，第9巻，pp. 415-422，2001. 11.

- 2) 高松隆夫，銅木弘和，中村慎太郎：鉄骨露出型柱脚の復元力特性に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp. 499-506，2002. 11.
- 3) 高松隆夫，銅木弘和，中村慎太郎：改良型復元力特性を有する鉄骨露出柱脚に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第11巻，pp. 563-570，2003. 11.
- 4) 日本建築学会：兵庫県南部地震における鋼構造物の被害と教訓，pp. 36-45，1996. 7.
- 5) 社団法人 日本鋼構造協会，他；2000年鳥取県西部地震および2001年芸予地震鋼構造被害調査報告書 [建築編]，社団法人 日本鋼構造協会，2002. 3.
- 6) 松野一成，福原安洋，門前勝明，村上幸：鋼構造露出型柱脚の耐震性と補強法，鋼構造年次論文報告集，第11巻，pp. 459-464，2003. 11
- 7) 高松隆夫，玉井宏章，尾熊政男，石原節夫，山西央朗，松尾彰：露出柱脚の耐震補強に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 731-732，2004. 8.
- 8) 高松隆夫，玉井宏章，山西央朗，コンクリート基礎を用いたノンスリップ露出柱脚の実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 729-730，2004. 8.