

# 等曲げを受けるRC梁の曲げ塑性変形挙動の寸法効果

小池 狭千朗

## Size Effect on Plastic Deformation Behavior of Reinforced Concrete Beams under Uniform Flexural Moment

Sachio KOIKE

In this study, the variations of moment-curvature relationships of reinforced concrete beams of various sizes under uniform flexural moment were examined. The size effect on the compressive strength and the complete stress-strain behavior of confined concrete were also examined by using a stiff compressive testing machine.

The following results were obtained : 1) Strain at the maximum stress of confined concrete increases with decreasing size of specimen for the large percentage of transverse reinforcement. 2) Moment-curvature relationships of reinforced concrete beams are affected by the size of beam, i.e., the moment-curvature relationships of large size beam specimens are rather brittle compared with those of small specimens.

### 1. まえがき

RC部材や構造物の実験では、モデル供試体による実験が多く、しかもこれらの供試体は空中養生で実験に供されることが多い。コンクリートの水和反応は、養生条件によって大きく異なるため、空中養生を行った場合のRC部材の塑性変形挙動は、供試体寸法によってかなり相違するものと考えられる。筆者は、別シリーズの実験[1]で、空中養生されたコンクリートの強度と塑性変形挙動について調べた結果、明確な寸法効果がみられた。したがって、空中養生された曲げを受けるRC梁の塑性変形挙動

も供試体寸法によって相違する可能性がある。

本報では、空中養生された等曲げを受けるRC梁の塑性変形挙動に及ぼす供試体寸法の影響について検討する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験の概要

供試体寸法とあばら筋比の異なるRC梁の等曲げ実験、並びにRC梁の曲げ圧縮部のコンクリートを模した帯筋で補強されたコンクリート角柱体の一軸圧縮実験を併せ行った。表-1に、RC梁の実験要因を示す。実験要因として供試体の寸法 ( $b \times h$ 、ここに  $b$ : 梁幅で梁せい  $h$  の  $1/2$ 、 $h$ : 梁せい)、

あばら筋比（あばら筋のピッチX：梁せいに対する比で表示）および引張鉄筋比をとりあげた。供試体の寸法は、梁せいhが14.5、19.4、25.0cmの3種類、あばら筋間隔Xはh/2、h/4およびh/8の3種類、合計9体を基本とし、これらの梁では引張鉄筋比 $p_t$ を2.1%とした。このほかに、h=19.4cm、あばら筋間隔h/2の梁で $p_t$ を1.4と2.8%の2本、h=30.0cm、あばら筋間隔h/2の梁で $p_t=2.1%$ の梁を1体追加した。あばら筋径は、あばら筋間隔Xが梁せいの1/2の梁（X=h/2）であばら筋比が約0.3%となるように、寸法の異なる梁試験体ごとに鉄筋径を変えた。

図-1に梁の配筋図の一例を示す。等曲げスパン内は単筋梁とした。引張側主筋には、SD30異形鉄筋D10、D13、D16およびD19を各鉄筋比に応じて2~4本

使用した。梁のせん断スパン内には、せん断破壊防止のためにあばら筋をあばら筋比が1.2%以上となるように配置した。

表-2に、RC梁と併せて製作したコンクリート角柱体の概要を示す。角柱供試体は、高さが幅Wの3倍とし、Wは梁の幅bに等しくした。コンクリート角柱体の帯筋は、梁の圧縮部のコンクリートと対応させるために、梁のあばら筋と径および間隔が等しくなるように配置した。コンクリート角柱体では、ブレンコンクリートおよびX=h/3の帯筋間隔の供試体も追加した。コンクリート角柱体は、表-2に示す実験要因のすべての組合せを取り上げ、各要因ごとに3体、合計60体の圧縮試験を実施した。

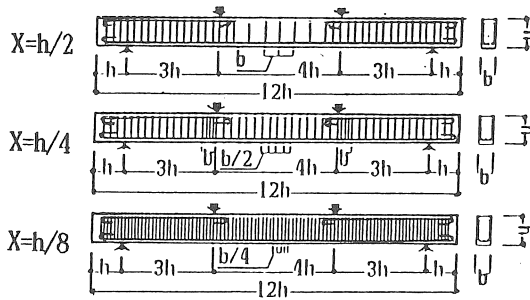


図-1 RC梁の寸法および配筋図

表-1 RC梁供試体の概要

Beam section (cm)			Spacing of stirrup (cm) X	Tension reinforcement Number-Diameter	Ratio of tension reinforcement (%) Pt
Width (b)	Height (h)	Effective depth (d)			
9.7	19.4	17.5	h/2	2-D13	2.1
7.3	14.6	13.1	h/2, h/4, h/8	3-D10	
9.7	19.4	17.5	h/2, h/4, h/8	3-D13	
12.5	25.0	22.5	h/2, h/4, h/8	3-D16	
15.0	30.0	27.0	h/2	3-D19	2.8
9.7	19.4	17.5	h/2	4-D13	

[Notes] Diameter of stirrups; h=14.5-series:  $\phi=3.2\text{mm}$ , h=19.4-series:  $\phi=3.9\text{mm}$   
 h=25.0-series:  $\phi=4.9\text{mm}$ , h=30.0-series:  $\phi=5.9\text{mm}$

表-2 コンクリート角柱体の概要

Beab section (H=3W)		Hoop	
Section (W×W) (cm)	Height (H) (cm)	Diameter ( $\phi$ ) (mm)	Spacing (X)
7.3×7.3	21.9	$\phi 3.2$	h/8
9.7×9.7	29.1	$\phi 3.9$	h/4
12.5×12.5	37.5	$\phi 4.9$	h/2
15.0×15.0	45.0	$\phi 5.7$	$\infty$

2.2 供試体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂（5mm未満）、川砂利（5～25mm）を使用した。水セメント比は55%、単位水量は185kg/m<sup>3</sup>、スランプは15cmとした。使用した主筋とあばら筋（帯筋）の力学的性質をそれぞれ表-3および4に示す。供試体はすべて横打ちとし、材令6週まで実験室内で空中養生した。

2.3 実験方法

図-2に、梁供試体の荷重方法と曲率の測定方法の概要を示す。荷重は、せん断スパンが3hの単純梁による2点対称集中荷重とし、等曲げ区間の長さは4hとした。曲げスパンの中央部の3hの部分を6分割して、各区間の境界に予めセットした2本の寸切りボルトを利用して変位計を取り付けて各区間の曲率を測定した。コンクリート角柱体の圧縮ひずみの測定長は、中央部の2W（W=b）とし、剛性試験機で圧縮ひずみが10000×10<sup>-6</sup>に至るまで継続荷重した。

3. 実験結果とその考察

3.1 コンクリートの圧縮強度

図-3に、コンクリート角柱体の圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響を示す。プレーンコンクリートや帯筋の間隔の粗いもの（X=h/2）では、寸法の小さなものが若干低い強度を示す傾向がみられる

が、帯筋間隔が密になるにつれて、寸法の小さなものの方がかえって強度が増大する傾向がみられる。

3.2 コンクリートの圧縮強度時のひずみ（ε<sub>m</sub>）

図-4に、コンクリート角柱体のε<sub>m</sub>に及ぼす供試体寸法の影響を、帯筋間隔別に示す。プレーンコンクリート（X=∞）や帯筋の間隔の粗いもの（X=h/2）では、寸法が小さなもの（W=7.3cm）で若干低い値を示している。しかし、帯筋の間隔が密になると（X=h/4, h/8）、寸法が小さくなるほどε<sub>m</sub>の値は逆に増大する。

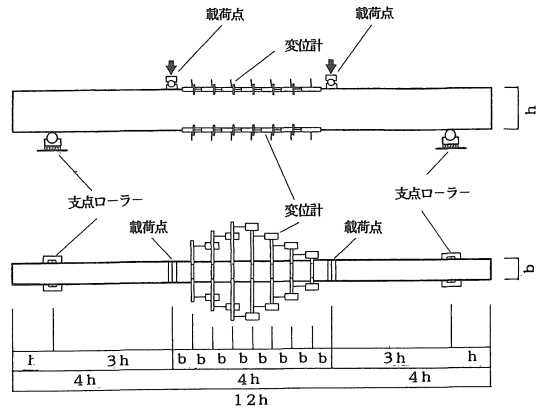


図-2 RC梁の荷重と曲率の測定方法

表-3 RC梁の主筋の力学特性

Nominal diameter (mm)	Yield strength	Tensile strength	Elongation
	Ave. (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ave. (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ave. (%)
D10	3740	5280	29.6
D13	3750	5360	30.3
D16	3850	5900	31.5
D19	3880	6040	24.8

[Notes] Ave.: Average

表-4 あばら筋の力学特性

Nominal diameter (mm)	Yield strength	Tensile strength	Elongation
	Ave. (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ave. (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ave. (%)
φ3.2	2500	3540	25.6
φ3.9	2510	3800	27.8
φ4.9	1870	3070	40.9
φ5.7	3000	4270	25.7

[Notes] Ave.: Average

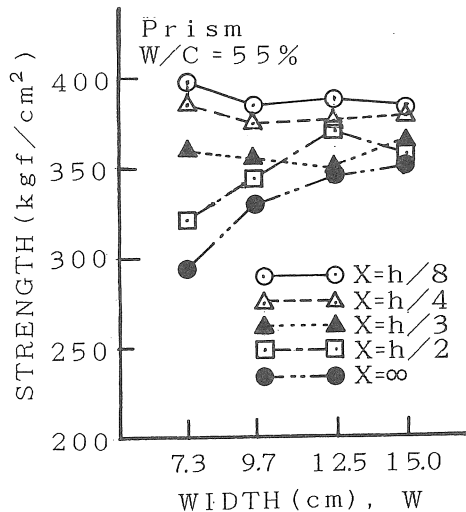


図-3 角柱体の圧縮強度

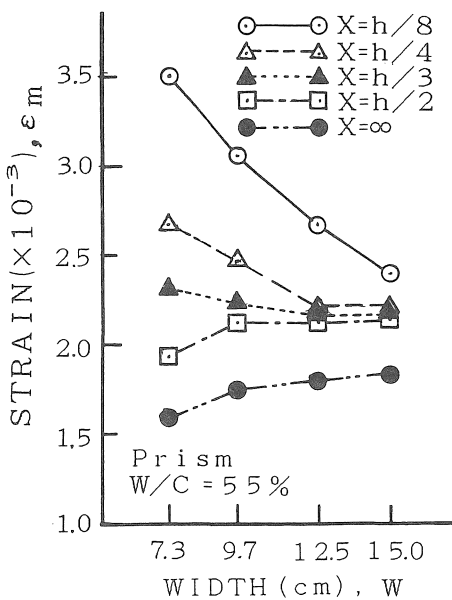
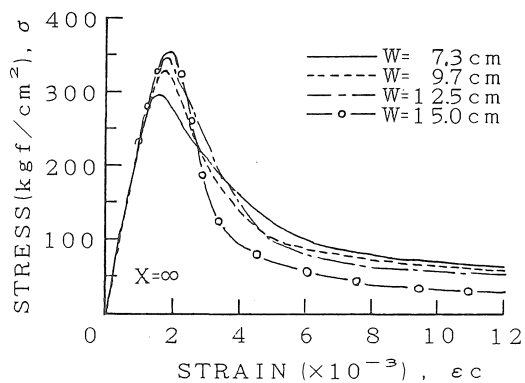
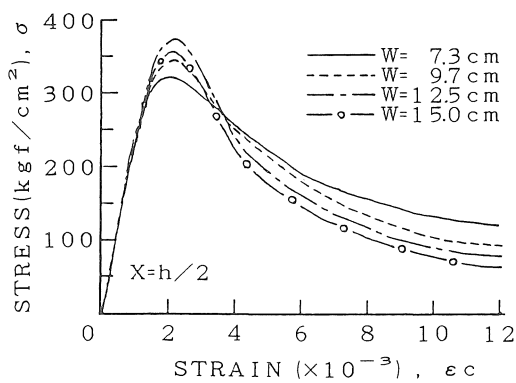


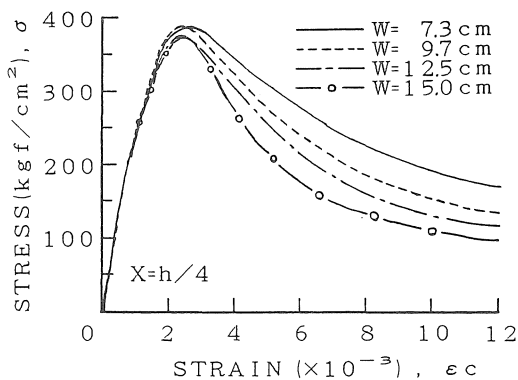
図-4 角柱体の最大応力時のひずみ



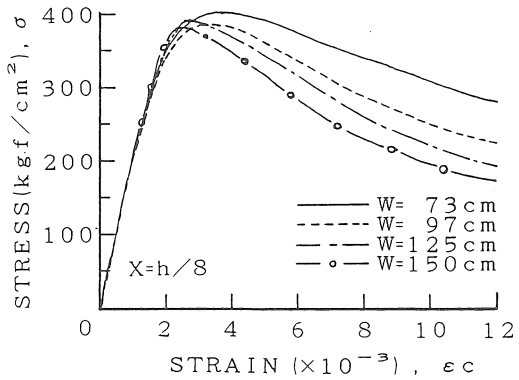
(a) plain



(b) X=h/2



(c) X=h/4



(d) X=h/8

図-5 角柱体の応力-ひずみ曲線

3.3 コンクリートの $\sigma$ - $\epsilon$ 曲線

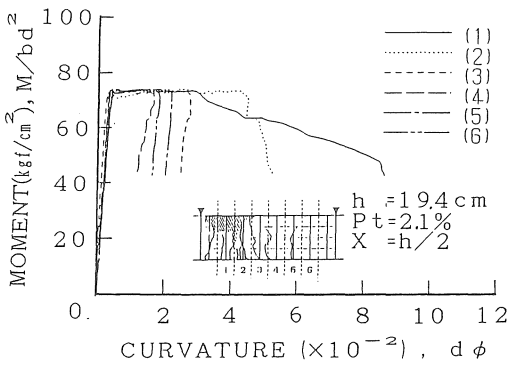
図-5に、コンクリート角柱体の応力-ひずみ曲線に及ぼす供試体寸法の影響を、帯筋の間隔別に示す。図-5(a)は $X=h/2$ 、図-5(b)は $X=h/8$ の角柱体の応力-ひずみ曲線を示したものである。供試体寸法が大きなものほど、応力下降域の形状は脆性的である[2]。また、帯筋が密なコンクリートほど、強度が高く延性的な塑性変形挙動を示すが、この傾向は寸法の小さなものほど顕著であるといえる。

3.3 RC梁の $M/bd^2-d\cdot\phi$ 曲線

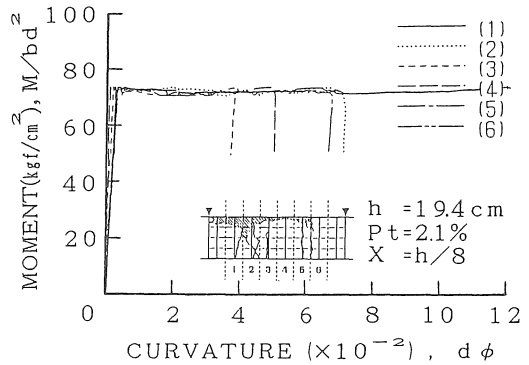
供試体寸法の異なるRC梁の曲げ塑性変形性能を比較するために、ここでは、 $M/bd^2$ をモーメントと呼び、 $d\cdot\phi$ (ここで、 $d=0.9h$ )を曲率と呼び、以下の考察では、両者の関係をモーメント-曲率関係と呼ぶ。

図-6に、 $h=19.4\text{cm}$ 、 $Pt=2.1\%$ の梁の等曲げモーメント区間内の各区間のモーメント-曲率関係の一例を示す。図-6によれば、終局時に降で曲率が増大している区間が、破壊が最も進んでいる区間に対応している。図-6(b)のあばら筋間隔が $h/8$ の梁では、図-6(a)のあばら筋間隔が $h/2$ の梁に比べて破壊領域が広く、梁全体として延性的な変形挙動を示す。すなわち、あばら筋による横拘束によって、断面内の挙動が延性的になり、かつ、破壊領域が広がったものと考えられる。

図-7に、RC梁の破壊領域の長さ( $l_p$ )と本実験で取り上げた供試体寸法とあばら筋間隔の関係を示す。ただし、ここでは圧縮縁ひずみが $3500\times 10^{-6}$ を越える領域、または断面の曲率が $d\cdot\phi=0.04$ を越える領域を破壊領域とみなした[3,4]。図によれば、 $l_p$ の値は、供試体寸法の影響をあまり受

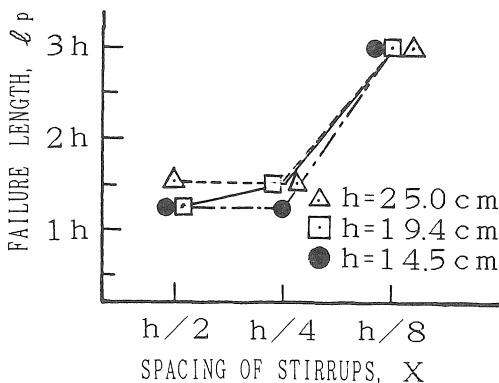


(a)  $X=h/2$

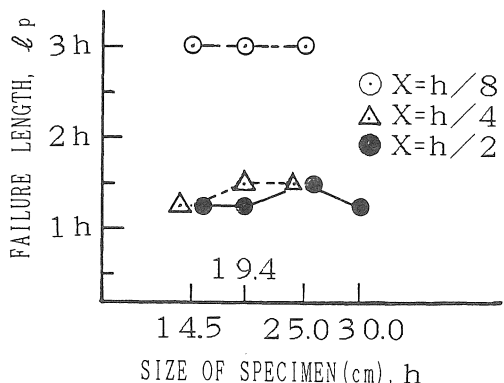


(b)  $X=h/8$

図-6 等曲げスパン内の各部位における $M/bd^2-d\cdot\phi$ 関係 ( $h=19.4\text{cm}$ ,  $Pt=2.1\%$ )

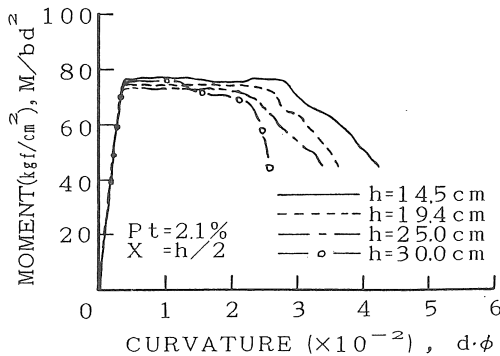
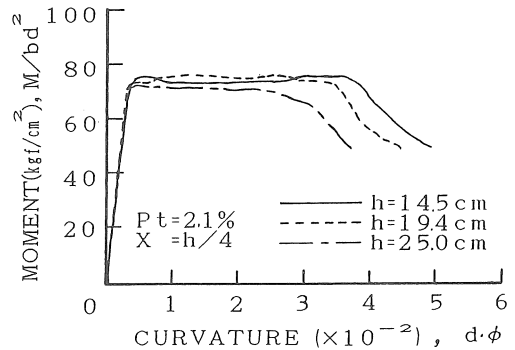
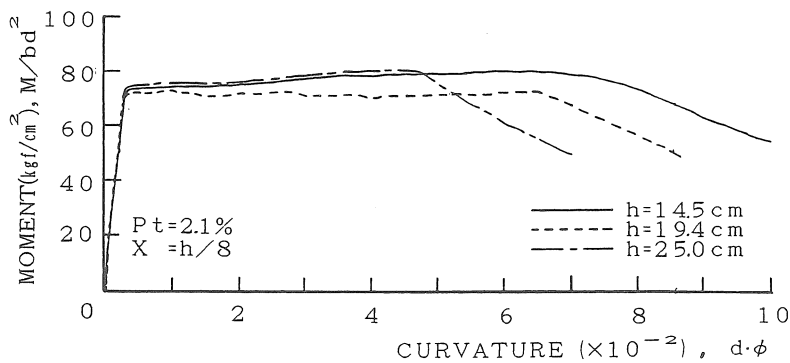


(a) 供試体寸法の影響



(b) あばら筋のピッチの影響

図-7 破壊領域長さ

(a)  $X=h/2$ (b)  $X=h/4$ (c)  $X=h/8$ 図-8 等曲げスパン内の中央部3h区間で平均化した $M/bd^2-d\cdot\phi$ 関係 ( $Pt=2.1\%$ )

けない。すなわち、モーメント-曲率曲線が異なるとすれば、それは破壊領域中のコンクリートの挙動が異なるためであると考えることができる。

図-8は、 $Pt=2.1\%$ の梁について、曲げスパン中央部3hの区間の平均曲率をあばら筋間隔別に示したものである。図によれば、モーメント-曲率曲線は寸法の小さい梁ほど延性的であり、その傾向はコンクリートの応力-ひずみ関係の傾向と一致している。

図-9は、 $Pt=2.1\%$ の梁について、図-7に示す破壊領域の範囲で曲率を平均化したものを、あばら筋間隔別に示したものである。破壊領域の範囲で平均化したモーメント-曲率関係は、図-8と同様に寸法の小さい梁ほど延性的である。

#### 4. まとめ

供試体寸法、引張鉄筋比およびあばら筋比を変え

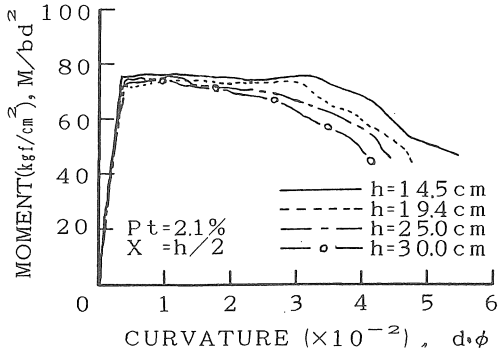
たRC単筋梁の曲げ載荷実験を実施し、塑性変形挙動に及ぼすこれらの要因の影響について調べた。その結果、以下の事項が明らかになった。

(1) 帯筋で拘束されたコンクリート角柱体では、圧縮強度時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) は供試体寸法の縮小とともに増大し、その傾向は帯筋の間隔が密になるほど顕著である。

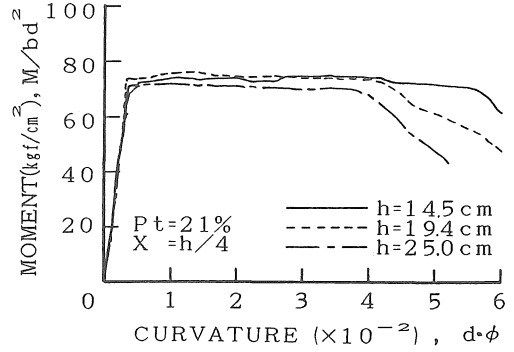
(2) 等曲げを受けるRC梁の塑性変形挙動は、一般に供試体寸法が小さいものほど延性的である。

(3) 等曲げを受けるRC梁のモーメント-曲率関係における寸法効果は、RC梁の圧縮部のコンクリートを模したコンクリート角柱体の応力-ひずみ関係における寸法効果と傾向が一致した。

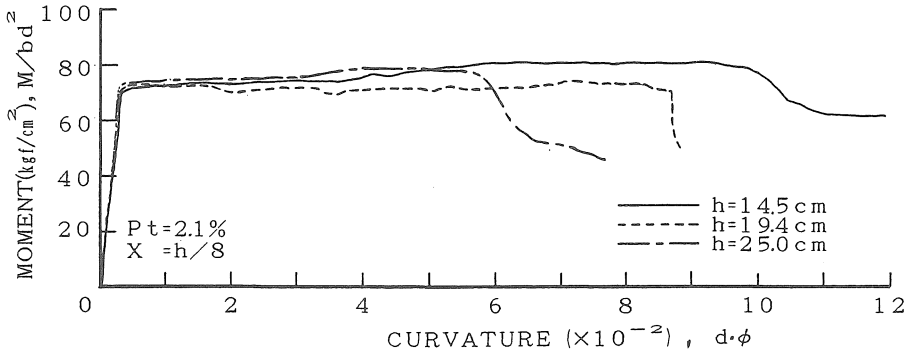
〔謝 辞〕 本実験に際し、セメントを提供いただいたN社並びに実験を担当していただいた本学の卒研に深謝いたします。



(a)  $X=h/2$



(b)  $X=h/4$



(c)  $X=h/8$

図-9 破壊領域で平均化した $M/bd^2-d\cdot\phi$ 関係 ( $Pt=2.1\%$ )

〔参考文献〕

1) Koike, S.: CAJ Review of the General Meeting, pp.77-80, (1981)  
 2) Koike, S., Okufuji, K. and Kobayashi, K : CAJ Review of the General Meeting, pp.244-247, (1987)

3) 小阪・谷川・畑中・三輪：セメント技術年報、第40巻、pp.580-583, (1986)  
 4) 小池、畑中、奥谷：コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第2号、pp.27-32, (1989)

(受理 平成3年3月20日)