

論文

[2002] 鉄筋コンクリート梁の塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響

正会員 小池 狭千朗 (愛知工業大学工学部)

正会員 畑中 重光 (三重大学工学部)

奥谷 伸幸 (愛知工業大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)部材の塑性変形挙動、とくにその回転性能を論じるには、破壊集中領域(塑性ヒンジ領域)における変形性能と塑性ヒンジ領域の広がり、に及ぼす各種要因の影響を把握しておく必要がある。筆者らの一部は、既にRC梁の塑性域の曲率分布の性状を実験的に調べ、破壊領域におけるコンクリートの靱性を増大させると破壊領域が広がり、部材の塑性変形能力が向上することなどを明かにした〔1~4〕。本報では、曲げ破壊が先行するように設計された曲げとせん断を受けるRC梁の塑性変形性能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

寸法の異なるRC梁の曲げ・せん断載荷実験、並びにRC梁の曲げ圧縮部のコンクリートを模擬したコンクリート角柱体の一軸圧縮実験を併せ行った。

RC梁の曲げ・せん断実験では、表-1に示すように、供試体の寸法 ($b \times h \times \ell_s$ 、ここに b : 梁幅で7.3、9.7、12.5、15.0および20.0cmの5種類、 h : 梁せいで梁幅 b の2倍、 ℓ_s : せん断スパン長さで4h、6hおよび8hの3種類)、あばら筋のピッチ (S : ∞ 、 b 、 $b/2$ および $b/4$ の4種類)および引張鉄筋比 (P_t : 1.4、2.1および2.8%の3種類)を取り上げた。あばら筋径は、あばら筋間隔 S が b の梁であばら筋比が約 0.3%となるように選んだ。実験に用いた梁供試体の個数は、単筋梁では $P_t=1.4\%$ の梁が18体、 $P_t=2.1\%$ が 39体および $P_t=2.8\%$ が18体、合計75体である。 $b=9.7\text{cm}$ の梁では全要因について調べ、 $b=7.3$ 、12.5および15.0 cm の寸法の梁では、 $P_t=2.1\%$ のものは ℓ_s と S を変化させ、 $P_t=1.4$ と 2.8% のものでは $S=b$ のものについてのみ実験を行った。 $b=20.0\text{cm}$ の梁では、 $P_t=2.1\%$ 、 $\ell_s=6h$ としてあばら筋のピッチのみを変化させた。

図-1に実験に用いたRC梁の配筋図の一例を示す。梁供試体は中央部の断面のせい(高さ)を高くした柱型つき梁とした。非測定スパン側には圧縮主筋を2本と腹筋を追加して曲げ補強し、せん断破壊防止のためにあばら筋を $P_w=1.2\%$ 以上 (P_w : あばら筋比)となるように配置した。

表-1 RC梁の曲げ載荷実験の概要

供試体寸法 ($b \times h \times \ell_s$), ($h=2b$)				S	Pt (%)
断面: $b \times h$ (cm)	主筋径	あばら筋径	ℓ_s		
7.3x14.6	D10	$\phi 3.2$	4h	b/4	1.4
9.7x19.4	D13	$\phi 3.9$		b/2	2.1
12.5x25.0	D16	$\phi 4.9$	8h	b	2.8
15.0x30.0	D19	$\phi 5.7$			
20.0x40.0	D25	$\phi 8.0$			

表-2 角柱体の一軸圧縮実験の概要

供試体寸法 ($H=3b$)		帯筋	
断面: $b \times b$ (cm)	高さ: H (cm)	鉄筋径 (mm)	間隔 S
7.3x7.3	21.9	$\phi 3.2$	b/4
9.7x9.7	29.1	$\phi 3.9$	
12.5x12.5	37.5	$\phi 4.9$	b/2
15.0x15.0	45.0	$\phi 5.7$	
20.0x20.0	60.0	$\phi 8.0$	∞

[注] ℓ_s : せん断スパン長さ, S: あばら筋間隔
Pt: 引張鉄筋比

表-2にコンクリート角柱体の実験要因を示す。RC梁の曲げ圧縮部に関わる要因を考慮して、角柱体の断面の一辺を梁幅**b**と等しく取り、横補強筋は梁のあばら筋に対応するように配置した。角柱体の高さ(H)は幅(b)の3倍とした。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12体、合計240体の圧縮試験を実施した。

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、水セメント比を55%、単位水量を180kg/m³、スランプを15cmとした。使用した主筋とあばら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

供試体の荷重方法および曲率とたわみの測定方法を図-2に示す。供試体は、測定する側のせん断スパン(柱型の端部から支点まで)が4~8h(h:梁せい)の柱型付き単純梁とし、柱型の中

表-3 主筋の力学的性質

種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	伸び率 (%)
D10	3912	5589	26.5
D13	3644	5325	27.3
D16	3662	5387	24.1
D19	3822	5793	24.1
D25	3640	5714	24.8

表-4 あばら筋の力学的性質

種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強さ (kgf/cm ²)	伸び率 (%)
φ3.2	2415	3426	29.2
φ3.9	2280	3347	40.9
φ4.9	1937	3069	41.6
φ5.7	2983	3890	31.5
φ8.0	2654	3531	32.5

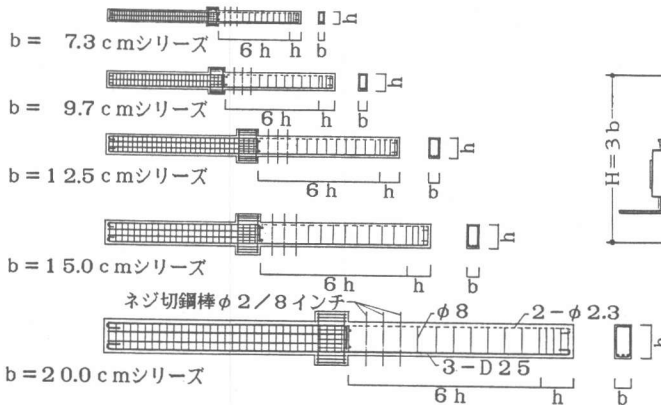


図-1 RC梁の配筋図($l_s = 6h$ シリーズ)

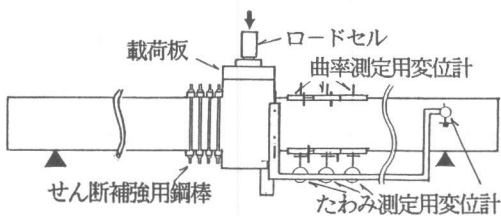


図-2 荷重および測定方法

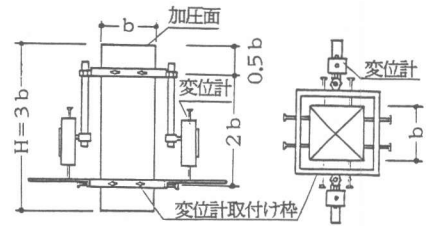


図-3 角柱体

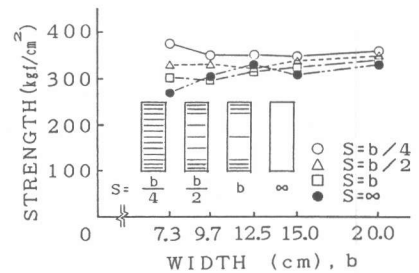


図-4 角柱体の圧縮強度に及ぼす供試体寸法(断面寸法: $b \times b$)の影響

中央部に集中荷した。荷重は、一方向漸増繰返し荷重とし、原則として第1測定区間（後述）の曲率指標（ $d \cdot \phi_1$ ）の増分が0.02に達するごとに除荷した。

曲率およびたわみの測定対象領域は、柱型端部から1.5hの領域とし、この領域を0.5hずつ3等分した3区間（中央部の柱型端部から第1、第2、第3区間と呼ぶ）について曲率と相対たわみ量を測定した。このほかに、測定スパン側の柱型端部と支点との相対たわみ量を測定した。曲率の測定は、梁の上下端面に取り付けた合計12個の変位計により行った。変位計は、コンクリートの打設時に各区間の境界に予めセットした鋼製の寸切りボルトに固定した。

図-3に、コンクリート角柱体のひずみの測定方法を示す。角柱体の圧縮ひずみの測定域は、供試体の高さの中央部の2bの領域とした。荷重には、最大容量200tのアクチュエーターを使用し、毎分約 2×10^{-3} のひずみ速度で、縦ひずみが 15×10^{-3} 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-4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、あばら筋のピッチ別

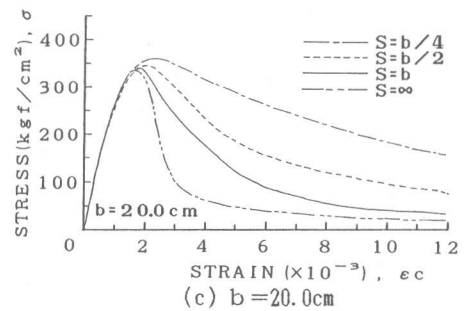
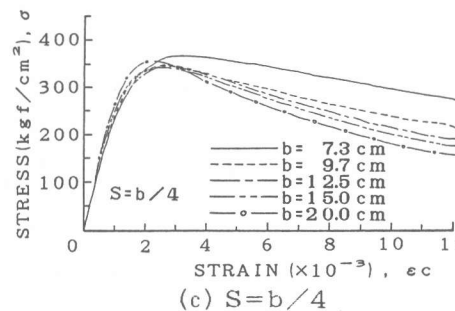
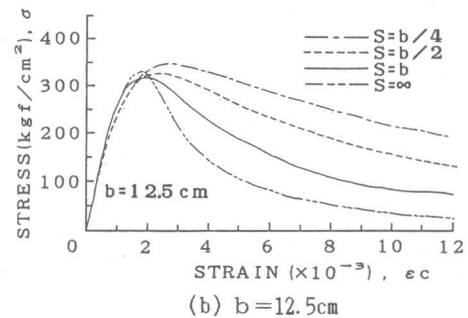
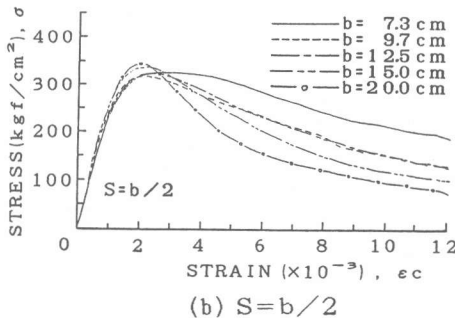
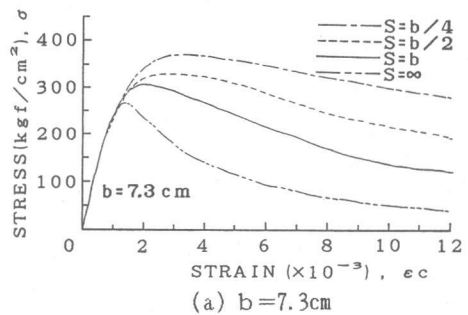
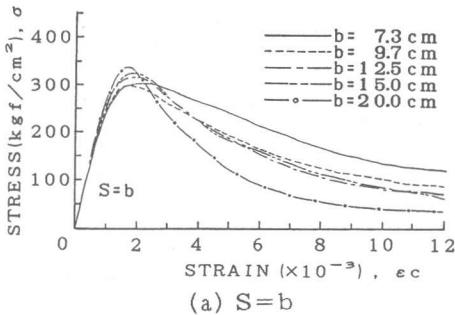


図-5 角柱体の応力度-ひずみ度曲線に及ぼす供試体寸法（断面寸法： $b \times b$ ）の影響

図-6 角柱体の応力度-ひずみ度曲線に及ぼす横補強筋ピッチ（S）の影響

に示す。プレーンコンクリートやあばら筋のピッチの粗いもの ($S=b$) では、寸法が小さくなると若干低い強度を示す。しかし、この寸法効果は、あばら筋のピッチの減少に伴ってほとんどみられなくなる。

3. 2 コンクリートの応力度-ひずみ度曲線

あばら筋で補強されたコンクリート角柱体では、破壊はすべて供試体のほぼ中央部に集中して生じ、ひずみの測定区間に納まった。図-5に、コンクリート角柱体の応力度-ひずみ度関係を及ぼす供試体寸法の影響を、あばら筋のピッチ別に示す。各曲線は12体の平均値である。あばら筋のピッチに拘らず、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。図-6に、あばら筋のピッチの影響を、供試体の寸法別に示す。あばら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している。この傾向は、寸法の小さなものほど顕著である。

3. 3 モーメント-曲率曲線

図-7に、第1区間の曲率を漸増载荷 ($d \cdot \phi = 0.02$ ごとに除荷)して得た各測定区間の繰返し $M/bd^2 - d \cdot \phi$ 曲線 (以下、 $M-\phi$ 曲線と略記) の実測例を示す。ただし、各区間の曲げモーメントとして、当該区間の曲げモーメントの最大値を用いてあり、第2、第3区間については、包絡線を示してある。以下の考察は、すべて、この包絡線について行う。図中には、曲率測定区間の破壊状況も併示してある。図によれば、最大モーメント断面に最も近い第1区間の近傍に破壊が集中している。すなわち、実測の $M-\phi$ 曲線は曲率の測定位置によって大きく異なる。第1区間がモーメント低下域に至っても、第2区間の曲率は減少せず、かなり増加している。第3区間では、若干の塑性曲率が生じた後、モーメント低下に伴い曲率も低下している。すなわち、第2および第3区間では、第1区間の降伏モーメントより低いモーメントで曲率が増加し、塑性変形が始まることになる。

したがって、同じ供試体でも曲率の測定区間の長さが異なると、得られる曲率の値に大きな違いが生じる。図-8は、図-7に示した供試体について、柱型端部からそれぞれ0.5h、1.0h および1.5hの位置までの $M-\phi$ 曲線の平均値を示したものである。図から明かなように、曲率の測定区間が長くなるほど $M-\phi$ 曲線は脆性的になる。

一般に、柱型端部から1.0hの区間に破壊領域が集中することが多い。そのため、1.0h区間の平均曲率を用いた $M-\phi$ 曲線の実測値の包絡線によって梁の曲げ変形能に及ぼす各種要因の影響を評価する。図-9は、柱型端部から1.0h区間を曲率の測定区間として求めた、 $l_s=6h$ 、 $S=b$ の梁の $M-\phi$ 曲線に及ぼす供試体寸法の影響を、 P_t 別に示したものである。図によれば、一部の梁の結果にばらつきはみられるが、一般に、寸法の小さな梁の $M-\phi$ 曲線の方がより延性的で

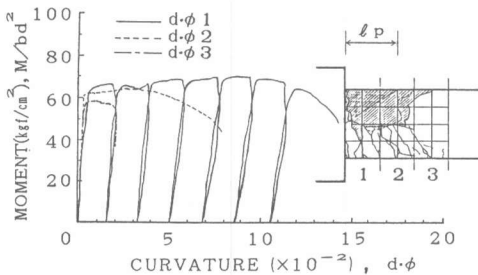


図-7 各曲率測定区間の $M-\phi$ 曲線の実測例

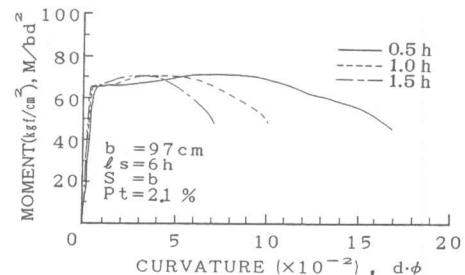


図-8 柱型端から任意区間で平均した $M-\phi$ 曲線

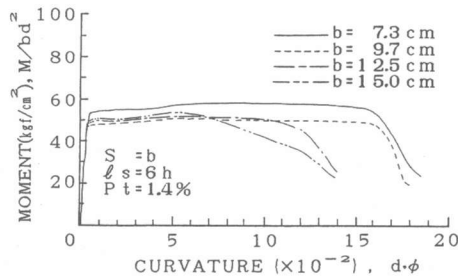
ある。図-10は、1.0h区間のM-φ関係に及ぼすあばら筋のピッチの影響を調べたものである。

図-11は、コンクリート角柱体のσ-ε関係を用いて解析的に求めたM-φ関係の一例である。図-9(b)と図-10の1.0h区間のM-φ関係と比較すると、供試体寸法の影響やあばら筋ピッチの影響は、定性的によく一致しているが、解析値は実験値よりもかなり脆性的である。

3.4 1.5h区間のたわみ

梁の曲げ破壊は、多くの場合、柱型端部から1.0hの区間で発生しており、非破壊領域も含めて最大モーメント断面から1.5h区間のたわみを評価すれば、部材全体の变形能力をほぼ把握できると考えられる。ただし、この区間の变形には、せん断变形によるたわみがかなりの割合で含まれている。

図-12は、柱型端部から1.5hの位置のたわみ(δ)に及ぼす供試体寸法の影響を、S=b、ℓ_s=6hの梁についてP_t別に比較したものである。図の横軸は、寸法の影響を除くため、1.5h区間のたわみを梁せい(h)で無次元化した相対たわみδ/hとしてある。以下、M/bd²-δ



(a) P_t=1.4%

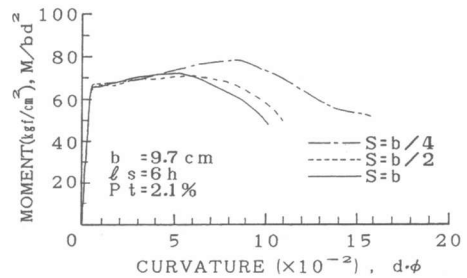
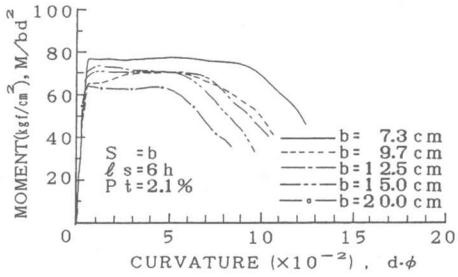
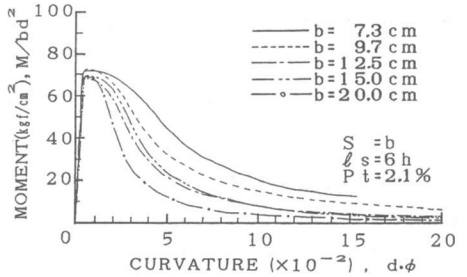


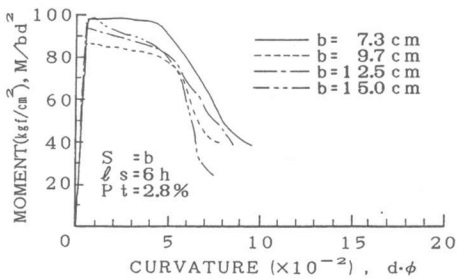
図-10 1.0h区間のM-φ曲線に及ぼすあばら筋ピッチ(S)の影響



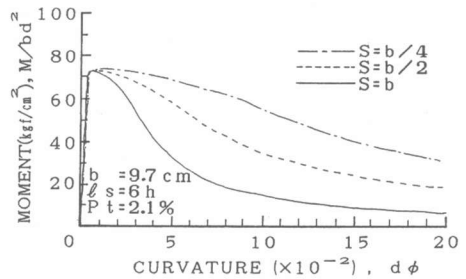
(b) P_t=2.1%



(a) 供試体寸法(梁幅b)の影響



(c) P_t=2.8%



(b) あばら筋ピッチ(S)の影響

図-9 1.0h区間のM-φ曲線に及ぼす供試体寸法(梁幅b)の影響

図-11 M-φ曲線の計算値(P_t=2.1%、ℓ_s=6h)

／h関係を、単にM- δ 関係と呼ぶ。1.5h区間のたわみは、供試体寸法の小さなものの方が大きな塑性変形状を示しており、図-9に示したM- ϕ 関係と傾向が一致する。また、 $l_s=4h$ および $8h$ の場合においても、この傾向が確認された。

3.5 破壊領域長さ

図-13(a)~(d)に破壊領域の長さ(l_p)と本実験で取り上げた各種要因との関係を示す。ただし、ここでは圧縮縁ひずみが 3500×10^{-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。図によれば、 l_p の値は供試体寸法の影響をあまり受けない。せん断スパン長さが $6h$ と $8h$ の梁の値はあまり変わらず、別に行った純曲げの場合とほぼ一致した。せん断スパンの短い $4h$ のものでは、モーメント勾配の存在によって破壊領域が抑えられ、 l_p は小さくなるが、 l_p の中での断面の挙動は極めて延性的である。あばら筋のピッチが密になると、 l_p の値は大きくなる傾向がみられる。また、引張鉄筋比($P_t=1.4\sim 2.8\%$)が l_p の値に及ぼす影響はほとんどみられない。

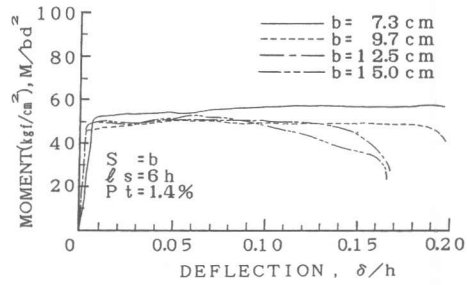
4. 結論

1) コンクリートの応力度-ひずみ度曲線、並びにRC梁のM- ϕ 曲線の形状はあばら筋のピッチに拘らず供試体寸法の大きなものほど脆性的である。

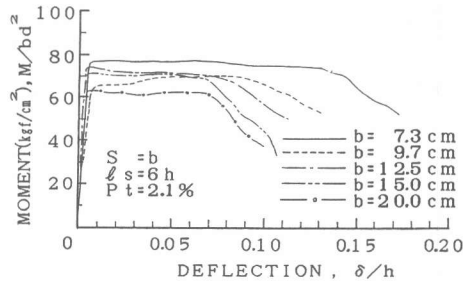
2) 破壊領域長さに及ぼす供試体寸法の影響は、ほとんど認められない。その他の要因の影響については既往の研究〔文献2〕と同じ傾向を示した。

〔参考文献〕

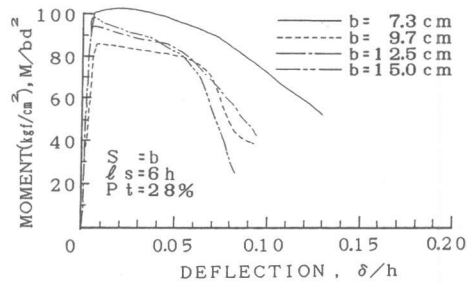
1) 畑中・小阪・谷川・三輪：純曲げを受ける鉄筋コンクリート梁の破壊集中性、日本建築学会論文報告集、第371号、pp.27-38、1987。 2) 小阪・谷川・畑中・三輪：鉄筋コンクリート梁の塑性ヒンジに関する研究、セメント技術年報、第40巻、pp.580-583、1986。 3) 小池・奥藤・奥谷：寸法の異なるコンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線の表示式とRC梁への適用、コンクリート工学年次論文報告集 9-2、pp.121-126、1987。 4) 小池・奥谷：主筋比の異なるRC梁の曲げ強度と変形挙動の寸法効果、日本建築学会学術講演梗概集、(関東)C構造II、pp.255-256、1988



(a) $P_t=1.4\%$



(b) $P_t=2.1\%$



(c) $P_t=2.8\%$

図-12 1.5h区間のM- δ 曲線に及ぼす供試体寸法(梁幅b)の影響($S=b$, $l_s=6h$)

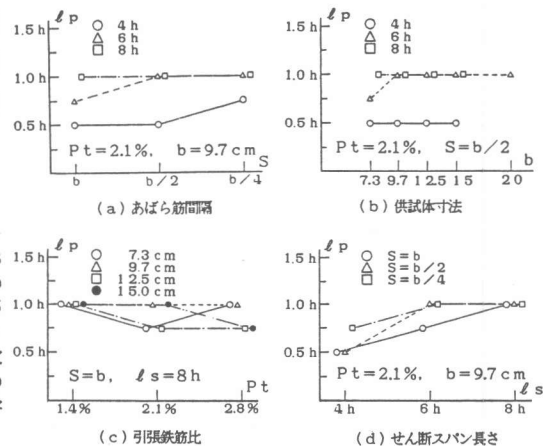


図-13 破壊領域長さ