

# 等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDIES ON THE SHEAR STRENGTH OF LARGE REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD

井 畔 瑞 人\*・塩 屋 俊 幸\*\*・野 尻 陽 一\*\*\*・秋 山 暉\*\*\*\*

By Mizuhito IGURO, Toshiyuki SHIOYA, Yoichi NOJIRI and Hikaru AKIYAMA

In the past, scale effect on the shear strength of reinforced concrete beams has been studied by some researchers, and it is found that the nominal shear strength  $V_c/bd$ , of beams without shear reinforcement decreases as the effective depth of the member increases. However, the effective depth in the previous studies was limited only to 110 cm. In order to investigate the scale effect for larger-size reinforced concrete members, this study was undertaken on members with six different depths ranging from 10 to 300 cm, all with constant  $b/d$  ratio, under uniformly distributed loads. The result reveals that the scale effect exists even for members deeper than 100 cm and the nominal shear strength is inversely proportional to the fourth root of the effective depth.

### 1. ま え が き

近年、鉄筋コンクリート構造物は材料の進歩、設計施工技術の向上と社会的要請等が相まってしだいに大型化する傾向にある。大型化に伴う設計上の課題の一つとして、せん断に対する設計法が挙げられる。鉄筋コンクリート部材の研究は現在も盛んに行われており、またせん断についても、これまで、非常に多くの研究が行われてきたが、その設計法は世界共通のものとなっていないのが現状である。各国の基準類においては実験結果を統計的に整理した実験式を用いたり、実験結果に基づく許容値を定めているのが通例である。

大型構造物の設計においても、これらの実験式あるいは許容値を参照してせん断に対する設計が行われるのであるが、せん断補強していない鉄筋コンクリートはりのせん断強度は、図-1に示すように有効高さ  $d$  が大きくなるとしだいに減少することが Kani<sup>1)</sup>、Kennedy<sup>2)</sup>、

Taylor<sup>3)</sup>等の研究によって実験的に明らかにされている。これは一般にスケール効果と呼ばれており、CEB/FIP「コンクリート構造物設計施工国際指針」<sup>4)</sup>、土木学会「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」<sup>5)</sup>等の基準でも一部取り入れられている。しかしながら、 $d > 110$  cmの鉄筋コンクリートはりのスケール効果についての実験例はない。また大型構造物では死荷重等の分布荷重が占める割合が大きいが、既往の実験では集中荷重によるものがほとんどであり、等分布荷重を受ける

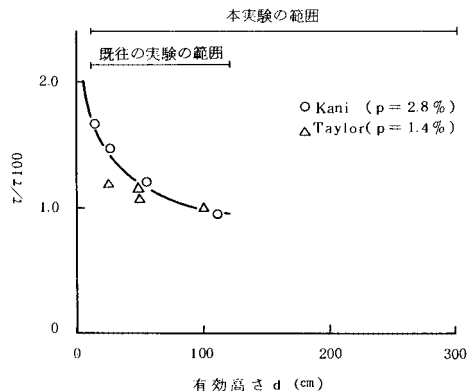


図-1 有効高さ  $d=100$  cm のはりのせん断強度  $\tau_{100}$  に対する  $\tau$  と  $d$  の関係

\* 正会員 清水建設(株)土木本部開発部長  
(〒108 港区三田3丁目13-16 三田43森ビル)  
\*\* 正会員 清水建設(株)技術研究所研究員  
(〒135 江東区越中島3-4-17)  
\*\*\* 正会員 鹿島建設(株)技術研究所土木部部长  
(〒182 調布市飛田給2-19-1)  
\*\*\*\* 正会員 鹿島建設(株)技術研究所主任研究員  
(同上)

場合については実験例が少ないため、大型構造物のせん断耐力を正確に推定することが困難であった。このため本研究では  $d=10\sim 300$  cm のせん断補強筋を用いない鉄筋コンクリートはりの等分布荷重下における実験を行い、主に  $d>100$  cm のはりのせん断強度に及ぼすスケール効果の有無およびその大きさの把握を試みたものである。

## 2. 実験概要

次のような条件のもとに表-1 に示す試験体を作製した。

- ① 試験体の有効高さ  $d$  を 10 cm, 20 cm, 60 cm, 100 cm, 200 cm, 300 cm の 6 段階とする。
- ② 荷重荷重は等分布荷重とする。
- ③ 粗骨材の最大寸法  $G_{max}$  は  $d \leq 100$  cm の場合  $G_{max} = 10$  mm,  $d \geq 100$  cm の場合  $G_{max} = 25$  mm とし、 $d=100$  cm で  $G_{max}$  の差によるせん断強度の差を調べる。
- ④ 試験体の形状は矩形断面のはりとし、試験体の幅  $b$  と  $d$  の比  $b/d=1/2$  を原則とする。
- ⑤ 荷重スパン  $l$  と  $d$  の比を  $l/d=12$  とする。集中荷重の場合、図-2 に示すように斜引張破壊となるせん断スパン  $a$  と  $d$  の比は  $a/d \geq 3$  であり、また Kani<sup>7)</sup> によれば図-3 に示すように等分布荷重の場合のせん断スパン  $a$  は  $a=l/4$  となる。したがって  $l/d \geq 12$  とすれば斜引張破壊となりディープビーム的な支持機構とはならず、下限値に近い値が得られ

ることから  $l/d=12$  とした。

- ⑥ せん断破壊を起こすであろう支点付近の主鉄筋比  $p$  を  $p=0.4\%$  とする。鉄筋コンクリート部材をせん断破壊させるためには  $p$  が大きいほど容易となるのであるが、ここでは実際に用いられる鉄筋比の

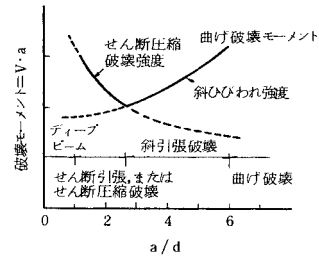


図-2  $a/d$  とせん断強度との関係<sup>6)</sup>

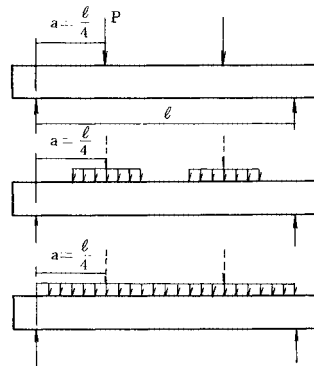


図-3 等分布荷重の場合のせん断スパン比<sup>7)</sup>

表-1 試験体の種類および主な実験結果

試験体 No.	試験体寸法						コンクリート			鉄筋		鉄筋比		破壊荷重 $q_u$ (MPa)	破壊時作用せん断応力			破壊モード	加力方向	
	有効高さ $d$	荷重スパン $l$	荷重スパン比 $l/d$	試験体長さ $L$	試験体高 $H$	試験体幅 $b$	粗骨材最大寸法 $G_{max}$ (mm)	試験時材令 (日)	圧縮強度 $f_c$ (MPa)	引張強度 $f_t$ (MPa)	径 $D$ (MPa)	降伏点 $f_{sy}$ (MPa)	軸方向 支点～1.5d 位置 $pr1$ (%)		中央 $pr2$ (%)	支点から 1.5d 位置で評価 $\tau_u$ (MPa)	** $\tau_{uc}$ (MPa)			*** $\tau_{uc}$ (MPa)
	(cm)	(cm)		(cm)	(cm)	(cm)	(mm)	(日)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)				(MPa)	(MPa)			(MPa)
1	10	120	12	140	12	15.8	10 (配合1)	48	20.6	1.85	(D3) 320 (D6) 440	0.4	0.8	0.186	(0.837)	(0.875)	曲げ破壊	上		
2	20	240	12	280	22	15.8	10 (配合1)	44	19.7	1.87	(D3) 320 (D6) 440	0.4	0.8	0.187	(0.843)	(0.894)	曲げ破壊	上		
3	60	720	12	840	65.5	30	10 (配合1)	28	21.1	1.81	(D6) 440 (D6) 440	0.4	0.8	0.103	0.464	0.481	斜引張破壊	上		
4	100	1200	12	1400	120	50	10 (配合1)	42	27.2	2.05	(D10) 370 (D10) 370	0.4	0.8	0.079	0.356	0.339	斜引張破壊	上		
5	100	1200	12	1400	120	50	25 (配合2)	41	21.9	2.23	(D10) 370 (D10) 370	0.4	0.8	0.088	0.397	0.407	斜引張破壊	上		
6	200	2400	12	2800	210	100	25 (配合2)	35	28.5	2.73	D16 370	0.4	0.4	0.077	0.349	0.327	斜引張破壊	下		
7	300	3600	12	4200	314	150	25 (配合2)	35	24.3	2.19	D25 360	0.4	0.4	0.070	0.314	0.311	斜引張破壊	下		

\* ) 曲げ補強に用いた鉄筋    \*\* )  $\tau_u = V_c / bd = q_u \times 4.5$     \*\*\* ) 圧縮強度による補正值     $\tau_{uc} = \tau_u \times (23.5 / f_c)^{1/2}$

下限に近いと考えられる鉄筋比として  $p=0.4\%$  とし、せん断強度としての下限値を求めることとした。

⑦ 鉄筋径は有効高さに比例して変化させるものとする。

(1) 形状寸法・配筋

試験体の断面寸法および支点近傍の配筋を図-4に示す。有効高さ  $d=200\text{ cm}$ ,  $300\text{ cm}$  の試験体は鉄筋比  $0.4\%$  一定としたが、 $d \leq 100\text{ cm}$  の試験体はせん断破壊よりもスパン中央部での曲げ破壊が先行することが予想されたため支点から  $1.5d$  ~ 中央部を曲げ補強した。補強量は  $1.5d$  から  $0.25d$  ピッチで  $3d$  まで  $0.05\%$  ずつ大きくし、 $3d$  ~ 中央部までは  $0.8\%$  一定とした。

(2) 使用材料

a) コンクリート

コンクリートの配合を表-2に示す。

b) 鉄筋

鉄筋は D3, D6, D10, D16, D25 を使用した。それぞれの鉄筋の降伏点については表-1に示した。鉄筋の表面デフォーメーションは D6 が波ふし、その他の鉄筋は竹ふしのものを使用した。なお D3 鉄筋<sup>8)</sup>は曲げ補強のみに用いた。

(3) コンクリートの打設および養生

$d=200\text{ cm}$ ,  $300\text{ cm}$  の大型試験体についてはコンクリートポンプで打設した。試験体は多層に分けて打設され一層は約  $80\text{ cm}$  で打設速度は  $50\text{ cm/h}$  であった。したがって、 $d=300\text{ cm}$  の試験体は4層に分け1層当たり  $1.5$  時間要し、約6時間かけて打設された。なお、品質管理用のテストピースはポンプから出た後で採取したコンクリートを用いることとした。大型試験体以外の試験体はシュート打とした。試験体は打設直後から材令28日まで散水養生を行った。

(4) 実験方法

支持条件は単純支持とし、ゴムバッグに水圧をかけパスカルの原理により等分布荷重を与えた。大型試験体の場合の載荷装置を図-5に示す。なお、本実験方法で試験体に等分布荷重が作用することは予備実験において圧力フィルム等により確認した。また実験時は水圧計とロードセルの2系統により荷重を測定し所定の荷重が作用していることを確認しつつ実験を行った。

自重分の取り扱いについては加力方向が上からの場合は自重をロードセルを用いて測定し等分布荷重に換算し作用荷重として加算した。加力方向が下からの場合は試験体が水を入れたゴムバッグ上に浮いている状態を作用荷重零とした。載荷サイクルは以下に示すサイクルを原

表-2 配合表

配合	圧縮強度 (MPa)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランの範囲 (cm)	水セメント比 W/c (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (m <sup>3</sup> )			混和剤 (cc/m <sup>3</sup> )	空気量 (%)	
						水 W (kg)	セメント C (kg)	砂利 S G (kg)			
1	23.5	10	15 ± 2	61.5	50	176	287	915	927	718	4
2	23.5	25	12 ± 2	56.0	41.5	149	266	785	1123	669	4

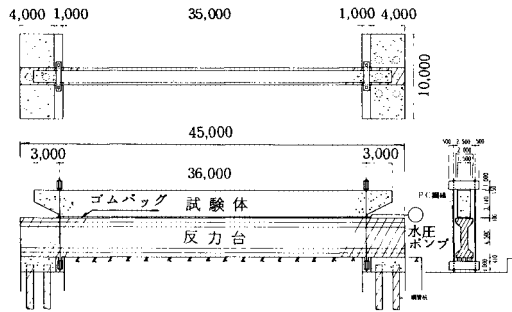


図-5 No.7 試験体加力方法

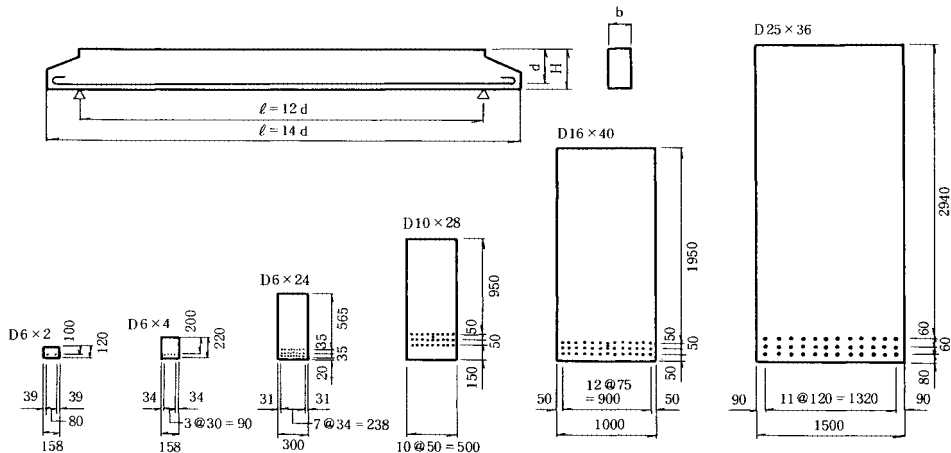


図-4 試験体の断面寸法および配筋



よれば  $d > 60 \text{ cm}$  でスケール効果を考慮していないが、既往の実験の範囲外である  $d > 100 \text{ cm}$  でもスケール効果は依然としてある。特に  $d = 300 \text{ cm}$ 、主鉄筋比  $0.4\%$  のせん断補強筋を用いない試験体の場合、せん断強度は  $\tau_u = 0.31 \text{ MPa}$  となり、かなり小さな値を示した。土木学会「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」に採用されている岡村・楳貝<sup>10)</sup>によるせん断強度式は内外の文献から引用した集中荷重によるせん断実験結果を整理して導いたものであるが、本実験のような等分布荷重の場合でも斜引張破壊となる場合、 $a/d = l/4d$  として評価すれば、 $d < 100 \text{ cm}$  の範囲でほぼ対応している。図-10 はスケール効果だけを調べるために  $d = 100 \text{ cm}$ 、 $G_{\max} = 25 \text{ mm}$  の試験体のせん断強度  $\tau_{100.25}$  を基準として、有効高さとせん断強度の関係を両対数グラフに示したものである。実験結果によるとスケール効果はわずかに下に凸の傾向を示し、 $d = 200 \sim 300 \text{ cm}$  で下限界があるようにも見受けられるものの、実験データが少ないため、現状では  $d > 100 \text{ cm}$  でも図中の実線のようにせん断強度は  $d^{1/4}$  に反比例すると考えた方がよいようである。

なお、 $d = 100 \text{ cm}$  で骨材の最大寸法  $G_{\max}$  の差によるせん断強度差を調べたが、 $G_{\max} = 25 \text{ mm}$  の方が  $G_{\max} = 10 \text{ mm}$  の場合より強く  $20\%$  程度の差が認められた。

以上のように  $d > 100 \text{ cm}$  でもせん断強度に対するスケール効果があることが判明した。そこで、以後の検討においては、特に  $d = 300 \text{ cm}$  の試験体の挙動を詳細に述べスケール効果の要因に関して検討する。

(2) ひびわれ状況について

図-11 に各試験体のひびわれ状況を示す。

すべての試験体でははじめ曲げひびわれが中央部の引張縁に入り、さらに荷重が大きくなると、すでに生じている曲げひびわれが圧縮縁に伸びるとともに、中央部だけでなく、その左右にもひびわれが発生する。 $d = 10, 20 \text{ cm}$  の試験体では、せん断破壊に至る前に中央部で曲げ破壊となったが、 $d \geq 60 \text{ cm}$  の試験体では、支点から  $1.5d$  付近から発生した斜めひびわれが中央部での曲げひびわれよりも優勢となり最後にきわめて急激な破壊に至る。 $d \geq 60 \text{ cm}$  の試験体は斜引張破壊となったが、破壊時のひびわれ状況は荷重レベルが異なるにもかかわらずよく似ている。共通点としては、

① 部材の中立軸まで伸びるような主たるひびわれはほぼ  $d/2$  ピッチである。

② 最終的にせん断破壊を引き起こす斜めひびわれは支点から約  $1.5d$  の鉄筋位置から入る。

$d$  の大小に関係なくせん断破壊時の主たるひびわれ本数がほぼ同じであるということは、同じ荷重では、 $d$  が大きい場合、 $d$  が小さい場合に比べてひびわれ幅が大き

いことになる。一般に、せん断補強筋を用いないはりのせん断耐力は主として骨材のかみ合わせ作用、軸方向鉄筋のほぞ作用、および圧縮部コンクリートのせん断抵抗によって定まるとされている。このうち骨材のかみ合わせ作用に着目すると  $d$  が大きいとひびわれ幅が大きくなり骨材のかみ合わせ作用が小さくなるため、 $d$  が大きいとせん断耐力は小さくなると考えることができる。

図-12 は  $d = 300 \text{ cm}$  のはりの中央部におけるひびわれ発生状況を示したものである。中央部では、両引試験におけるようなひびわれ間隔で入ったひびわれが、部材の中立軸まで伸びるような主たるひびわれに寄り沿うように伸長している。この情況は後藤ら<sup>11)</sup>が研究した異形

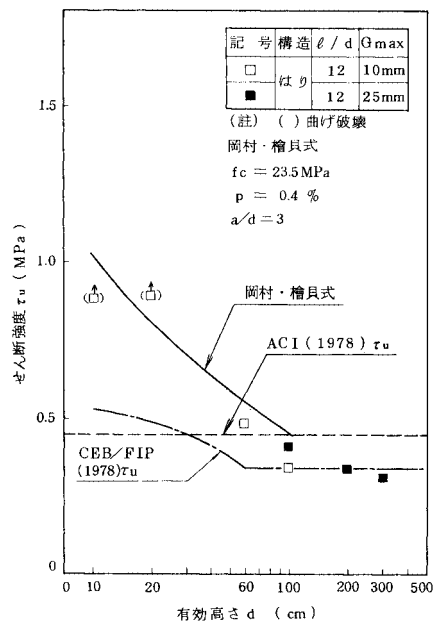


図-9 せん断強度と有効高さの関係—支点から  $1.5d$  で評価—圧縮強度による補正

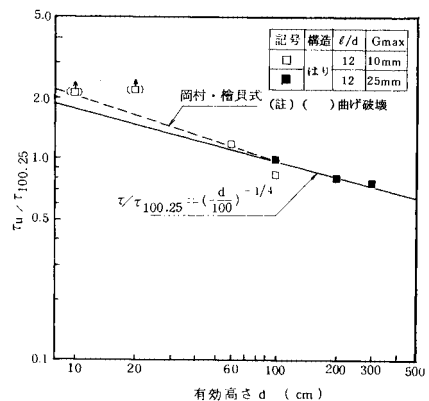


図-10 せん断強度比と有効高さの関係

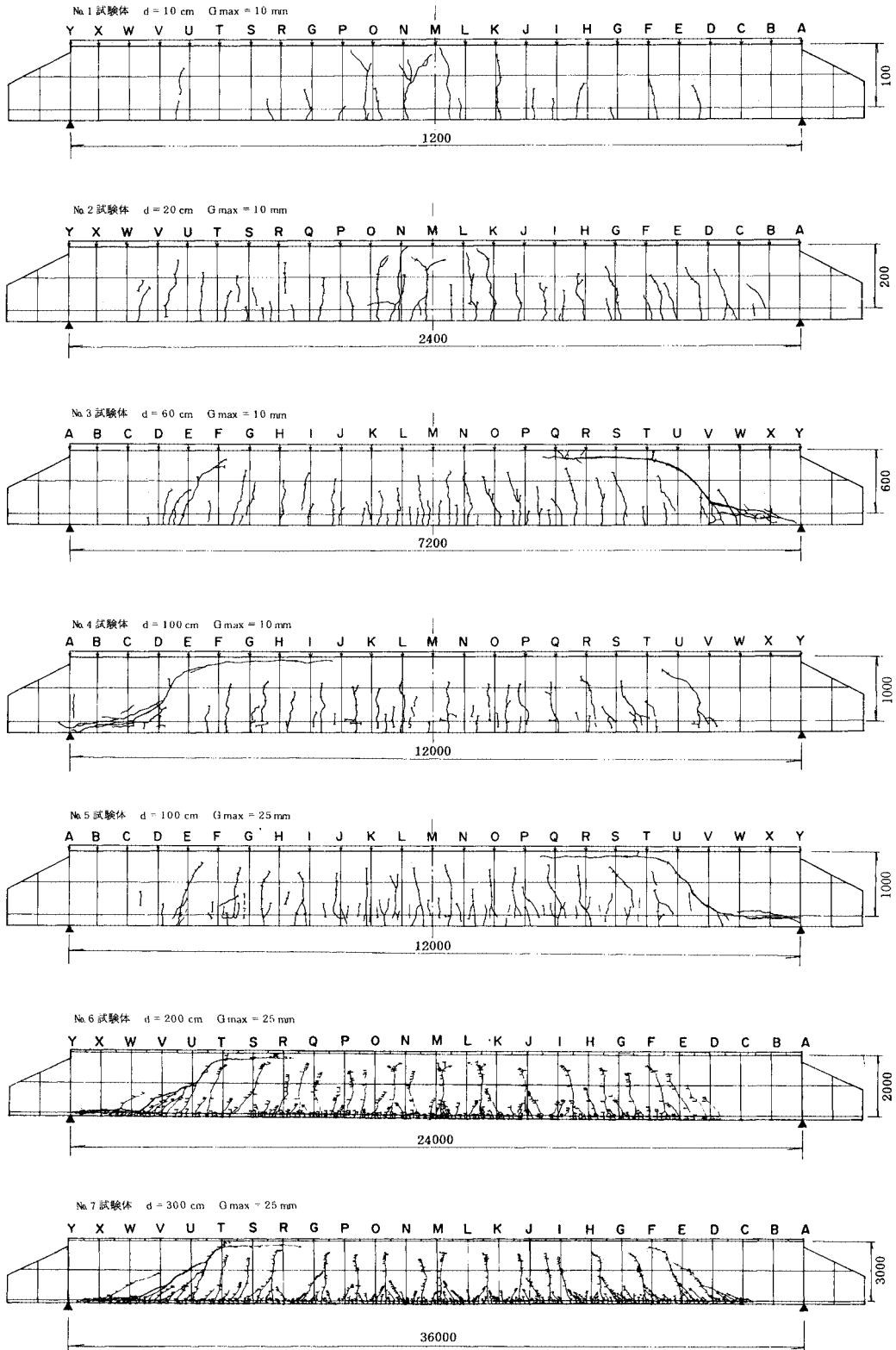


図-11 ひびわれ状況図

鉄筋周辺のコンクリートに発生する内部ひびわれの状況とよく似ており、後藤が研究した微視的なひびわれ性状と大型はりにおける巨視的なひびわれ性状がよく似ているのは興味深い。

図-13は  $d=300\text{ cm}$  のはりのせん断スパン部におけるひびわれ発生状況を示したものである。A側とY側を比較してみると、Y側がせん断破壊し、A側は破壊直前の様子を示していると考えられるが、Kani<sup>12)</sup>が述べているように楕円の付け根が曲げ破壊すると最終破壊に至るといった図-14に示すような性状がうかがわれる。

(3) 荷重と鉄筋ひずみ

図-15, 16は荷重と鉄筋ひずみの一例として、 $d=300\text{ cm}$  の試験体で支点より  $1.5d$  内側と中央の場合を示したものである。図中の計算値は通常の鉄筋コンクリート計算（以後、RC計算と称す）式から求めたもの

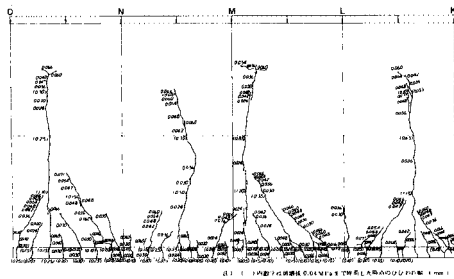
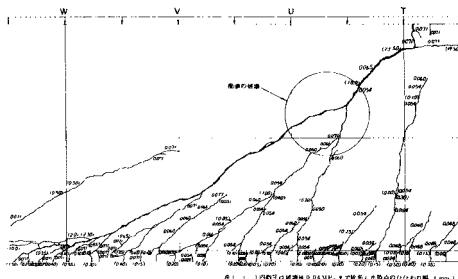
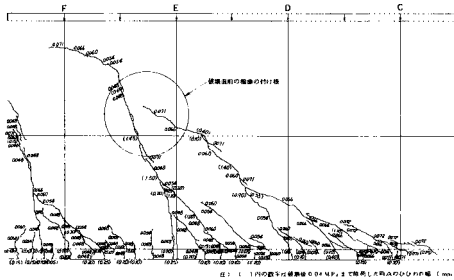


図-12 中央部におけるひびわれ状況 (No. 7 試験体)



(Y側)



(A側)

図-13 せん断スパン部におけるひびわれ状況 (No. 7 試験体)

であるが、せん断スパンでは、曲げせん断ひびわれが生ずると、はり理論より求めた作用モーメントから計算される鉄筋ひずみより大きなひずみが生じる。これに対処する方法として作用モーメントをモーメントの小さい方へずらした状態で鉄筋のひずみを算出する方法をモーメントシフトと呼んでいるが<sup>13)</sup>、実験ではモーメントシフトを  $1d$  考慮したRC計算値に沿ってひずみが大きくなる。

図-17は  $d=60\text{ cm}$  の鉄筋ひずみを示したものであるが、 $d=60\text{ cm}$  と  $300\text{ cm}$  の場合を比較してみると、鉄筋に貼ったひずみゲージがひびわれを感知して急にひずみが伸びる点は、部材の有効高さ  $d$  が大きいほど小さな荷重である。この変曲点を仮想曲げ引張強度  $f_c$  と

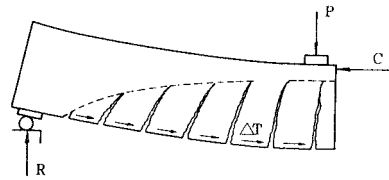


図-14 Kaniの楕円の破壊<sup>12)</sup>

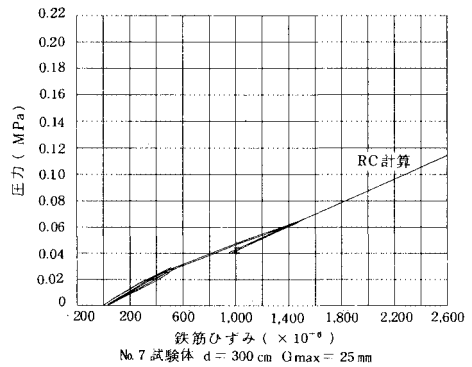


図-15 荷重と中央部の鉄筋ひずみの関係 (No. 7 試験体)

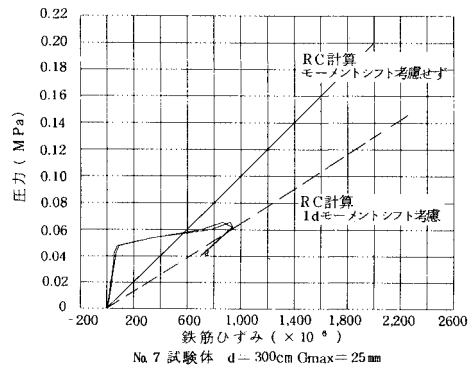
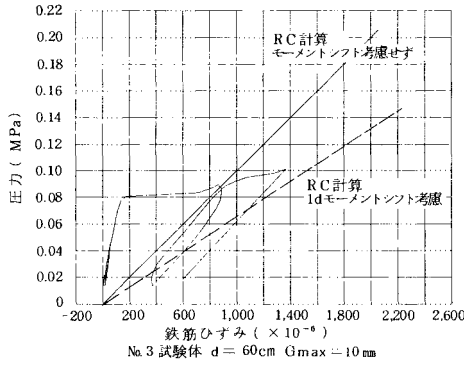
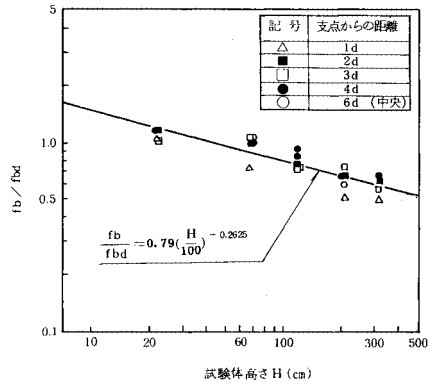


図-16 荷重と支点より  $1.5d$  内側の鉄筋ひずみの関係 (No. 7 試験体)



図一七 荷重と支点より1.5d内側の鉄筋ひずみの関係 (No.3 試験体)



図一八 試験体高さ H と  $f_b$  の関係

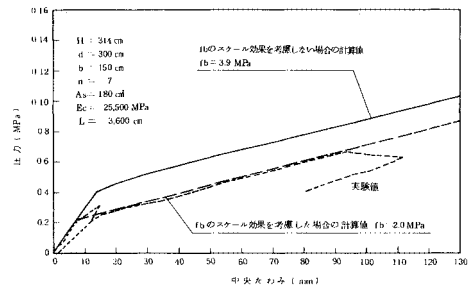
称して通常の 15 cm×15 cm の断面の供試体による曲げ引張強度を  $f_{bd}=0.46 f_c^{2/3}$  であるとしコンクリート強度を補正して試験体高さ  $H$  と  $f_b$  の関係を示すと図一八のようになる。図によれば、明らかに  $f_b$  は  $H$  が大きくなると小さくなっている。これは  $d=100$  cm 以下の場合と  $d=200$  cm 以上の場合では加力方向が上下逆であり、 $d=200$  cm 以上の場合にはブリージングの影響があることも考えられるが、コアコンクリートの圧縮強度試験結果によれば部材上下位置でのコンクリート強度差はほとんどなく  $f_b$  そのもののスケール効果ではないかと考えられる。斜めひびわれの発生または Kani の櫛歯理論における付け根の曲げ破壊等は曲げ引張強度と関連が深い。せん断耐力に及ぼすスケール効果はコンクリート強度そのもののスケール効果も一因であると考えられる。

(4) 荷重とたわみ

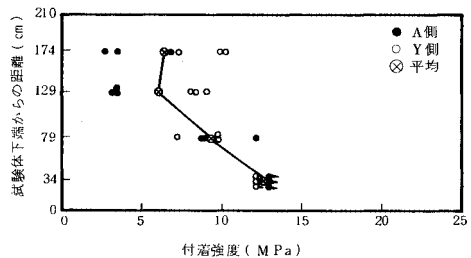
図一十九は  $d=300$  cm の試験体の荷重とたわみの関係を示したものである。図中の計算値は Branson<sup>14)</sup> の提案式によるものであるが、ここでコンクリートの曲げ引張強度  $f_{bd}$  が  $f_{bd}=0.46 f_c^{2/3}$  であるとして計算すると計算値と実験値が合わない。これは前述のように、コンクリートの曲げ引張強度にスケール効果があるためであると考えられ、鉄筋ひずみゲージがひびわれを感知した荷重から求めた仮想曲げ引張強度  $f_b$  を用いて計算するとすべての試験体で荷重とたわみの関係がよく一致した。したがって、大型構造物でたわみを計算する場合、コンクリートの曲げ引張強度に対するスケール効果を考慮する必要があるものと考えられる。

(5) 鉄筋の付着強度試験結果

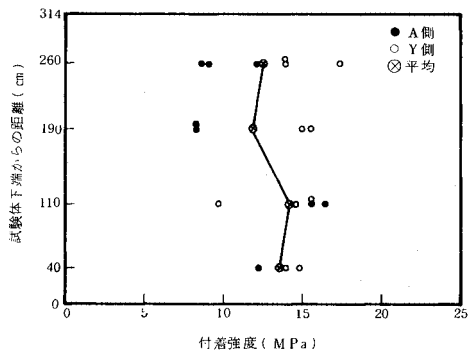
大型試験体 ( $d=200, 300$  cm) に埋設した鉄筋 (D 16, D 25) の引張試験結果から、自由端すべり量が  $\delta=0.25$  mm となった強度を付着強度と仮定し、整理した結果を図一二十、二十一に示す。D 16 を用いた試験では、試験体上方で付着強度が低下する傾向が認められたが、D 25 を



図一十九 荷重と中央たわみ (No.7 試験体)



図一二十 D 16 の付着強度試験結果 (No.6 試験体)



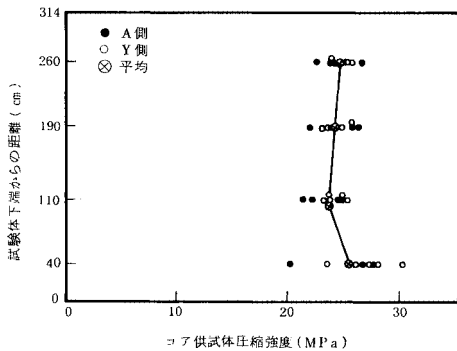
図一二十一 D 25 の付着強度試験結果 (No.7 試験体)



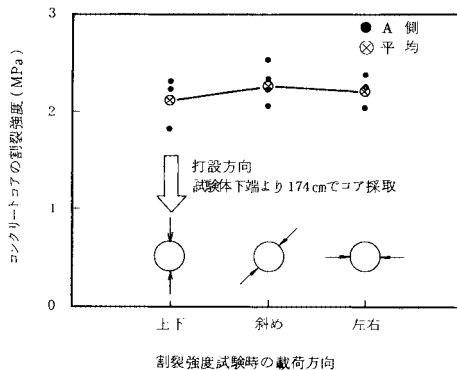
用いた試験では顕著な差は認められなかった。大型試験体はいずれも Y 側でせん断破壊をしたが、付着強度試験結果によれば、Y 側の方が付着強度が高い。これは一見矛盾するようであるが、付着とせん断強度については池田<sup>13)</sup>が付着をパラメーターとしたはりの耐力の概念図を示しており、必ずしも高付着の方がせん断強度が大きくなるとは限らない。いずれにしても付着とせん断強度については密接な関係があるにもかかわらず、まだ解明されていない点が多く、本実験結果からは明確な結論を導くことはできなかった。

(6) コンクリート・コア強度試験結果

図一22に試験体下端からの距離とコンクリート・コア強度の関係を示す。一般にブリージングの影響によって、コンクリート強度は部材上下位置で異なり、部材上方の強度は小さいとされているが、本実験では、一層の打上がり高さを 80 cm 程度に制限したため、高さ方向の強度差はほとんど認められなかった。また図一23に示すように  $d=200$  cm の試験体で打設方向に対する載荷方向を変えて割裂強度試験を行ったが、強度差は認められなかった。



図一22 コア強度試験結果 (No. 7 試験体)



図一23 載荷方向の差によるコンクリートコア割裂強度 (No. 6 試験体)

4. 結 論

せん断補強していない鉄筋コンクリートはりのせん断強度は、はり高が大きくなるとしだいに減少することが実験的に明らかにされており、一般にスケール効果と呼ばれている。各種基準でも一部その影響が取り入れられているが、有効高さ  $d$  が  $d > 110$  cm の鉄筋コンクリートはりのスケール効果に関する実験例はない。また大型構造物では死荷重等の分布荷重が占める割合が大きいが、等分布荷重下での実験例が少ないため、大型構造物のせん断耐力を正確に推定することが困難であった。このため、本研究では  $d=10\sim 300$  cm のせん断補強筋を用いない鉄筋コンクリートはり 7 体の等分布荷重下における実験を行い、主に  $d > 100$  cm のはりのせん断強度に及ぼすスケール効果の有無およびその大ききの把握を試みたものである。主な結果を以下に示す。

① せん断強度のスケール効果について

本実験結果によれば、Kani, Taylorの研究と同様に、有効高さが大きくなるとせん断強度はしだいに減少する。しかも、CEB/FIP「コンクリート構造物設計施工国際指針」によれば有効高さ  $d > 60$  cm でスケール効果を考慮していないようであるが、既往の実験の範囲外である  $d > 100$  cm でもスケール効果は依然としてある。 $d > 100$  cm でのスケール効果は  $d^{1/4}$  に反比例すると考えてよい。

② ひびわれ状況について

$d$  の大小に関係なくせん断破壊時の主たるひびわれは  $d/2$  ピッチでありほぼ同じ本数であった。したがって  $d$  が大きい場合、 $d$  が小さい場合に比べてひびわれ幅が大きいことになり骨材のかみ合わせ作用はひびわれ幅が大きくなると小さくなるため  $d$  が大きいとせん断強度は小さくなると思えることができる。

③ 荷重と鉄筋ひずみについて

鉄筋のひずみは、曲げせん断ひびわれが生ずると、はり理論より求めた作用モーメントから計算される鉄筋ひずみよりも大きなひずみが生ずる。これに対処する方法として作用モーメントをモーメントの小さい方へずらした状態で鉄筋のひずみを算出する方法をモーメントシフトと呼んでいるが、実験ではモーメントシフトを  $1d$  考慮した RC 計算値に沿ってひずみが大きくなる。

鉄筋ひずみゲージがひびわれを感知した荷重から求めた仮想曲げ引張強度  $f_s$  は明らかに試験体高さ  $H$  が大きくなると小さくなっており、せん断補強筋を用いないはりのせん断強度のスケール効果はコンクリート強度そのもののスケール効果も一因であると考えられる。

④ 荷重とたわみについて

荷重-たわみの実験値と計算値を比較したが、通常の

曲げ引張強度を計算に用いるよりも、スケール効果を考慮した仮想曲げ引張強度を用いた方が、実験値と計算値がよく一致した。したがって、大型構造物でたわみを計算する場合、コンクリートの曲げ引張強度に対するスケール効果を考慮する必要があるものと考えられる。

謝 辞：本研究を行うにあたり、横浜国立大学工学部土木工学科 池田尚治教授、東京大学工学部土木工学科 岡村 甫教授ならびに電力中央研究所 青柳征夫室長に終始ご指導を頂きました。ここに、深く感謝致します。

#### 参 考 文 献

- 1) Kani, G.N.J. : How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams ? ; Journal of the American Concrete Institute, No.64-12, March, 1967.
- 2) Kennedy, R.P. : A Statistical Analysis of the Shear Strength of Reinforced Concrete Beams, Ph.D. Dissertation to Stanford University, 1967.
- 3) Taylor, H.P.J. : Shear Strength of Large Beams, Journal of Structural Division, Proc. of ASCE, November, 1972.
- 4) CEB/FIP : Model Code for Concrete Structures, 1978.
- 5) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針(案), コンクリートライブラリー, 第52号, 昭和58年11月.
- 6) 檜貝 勇：鉄筋コンクリート部材の諸性状(その4), コンクリートライブラリー, 第34号, 昭和47年8月.
- 7) Kani, G.N.J. : Basic Facts Concerning Shear Failure, Journal of the American Concrete Institute, June, 1966.
- 8) 村山八州雄・野田 進・岩城 良：試作D3鉄筋を用いた縮小部材実験, 第4回コンクリート工学年次講演会, 1982.
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書, 昭和49年制定(昭和55年版).
- 10) Okamura, H. and Higai, T. : Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, Proc. of JSCE, No.300, August 1980.
- 11) 後藤幸正・大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第294号, 1980年2月.
- 12) Kani, G.N.J. : The Riddle of Shear Failure and Its Solution, Journal of the American Concrete Institute, April, 1964.
- 13) 池田尚治：無筋および鉄筋コンクリート標準示方書・設計編の1部改訂について, コンクリート・ライブラリー第46号, 昭和55年4月.
- 14) Branson, D.E. : Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams, Report No.7, Alabama Highway Research Report, Bureau of Public Roads, August, 1963.
- 15) 池田尚治・宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着に関する研究, 土木学会論文報告集, 第293号, 1980年1月.

(1984. 2. 9・受付)