

# 鉄筋コンクリートはりのせん断強度の寸法効果に及ぼす要因について

塩屋 俊幸  
(技術研究所)

岡田 武二  
(技術研究所)

## § 1. はじめに

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次第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、せん断に対する評価が挙げられる。せん断補強筋を用いていない鉄筋コンクリートはりのせん断強度は、有効高さ  $d$  が大きくなると次第に減少することが Kani<sup>1)</sup>、Taylor<sup>2)</sup>、井畔・塩屋・野尻・秋山<sup>3)</sup> 等の実験的研究によって明らかにされている。これは一般に寸法効果と呼ばれており、CEB-FIP「Model Code for Concrete Structures」<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> 等の示方書でも一部取り入れられている。寸法効果の原因は、一般にひびわれ表面間の骨材のかみ合わせ作用の減少と、ひびわれ間のコンクリートのくし歯部分の曲げ剛性の減少とによって説明される<sup>6)</sup> が、実験的に確認された例は少ない。そこで本報告は、寸法効果の原因を探る目的で、骨材の最大寸法  $G_{max}$  を  $d$  に比例させた実験を行ない、せん断強度の寸法効果に及ぼす要因を把握しようとしたものである。

## § 2. 実験概要

基本的な実験条件は、以下に示すように井畔らの実験と同一条件とし、有効高さと骨材の最大径を表-1に示す組合わせとした。

	有効高さ $d$ (cm)						記号
	10	20	60	100	200	300	
骨材の最大径 (mm)	1		○				○本実験 ●文献3)
	2.5			○			
	5				○		
	10	○					
	25	●	●	●	●	●	

表-1 有効高さと骨材の最大径の組合せ

- (i) 載荷荷重は等分布荷重とする。
- (ii) 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。
- (iii) 載荷スパン  $l$  と  $d$  の比を  $l/d=12$  とする。
- (iv) せん断破壊を起すであろう支点付近の主鉄筋比  $\rho$  を  $\rho=0.4\%$  とする。
- (v) 鉄筋径は原則として有効高さに比例して変化させるものとする。

諸検討を行なう際に井畔らによる実験結果と照合するため、表-2に井畔らによる試験体とともに本実験計画を示す。以下、井畔らの実験と本実験を併わせて概要を述べる。

### 2.1 形状寸法・配筋

試験体の形状寸法および支点近傍の配筋を図-1に示す。有効高さ  $d=200, 300\text{cm}$  の試験体は鉄筋比  $\rho=0.4\%$  一定であるが、 $d \leq 100\text{cm}$  の試験体は支点近傍のせん断破壊よりもスパン中央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、 $3d$  ~ 中央部では  $0.8\%$  一定とした。

### 2.2 使用材料

(1) コンクリートおよびモルタル

コンクリートおよびモルタルの配合を表-3に示す。

(2) 鉄筋

鉄筋はD3, D6, D10, D16, D25を使用し、それぞれの鉄筋の降伏点については表-2に示した。

### 2.3 コンクリートおよびモルタルの養生

試験体は、打設直後から材令28日まで散水養生を行なった。

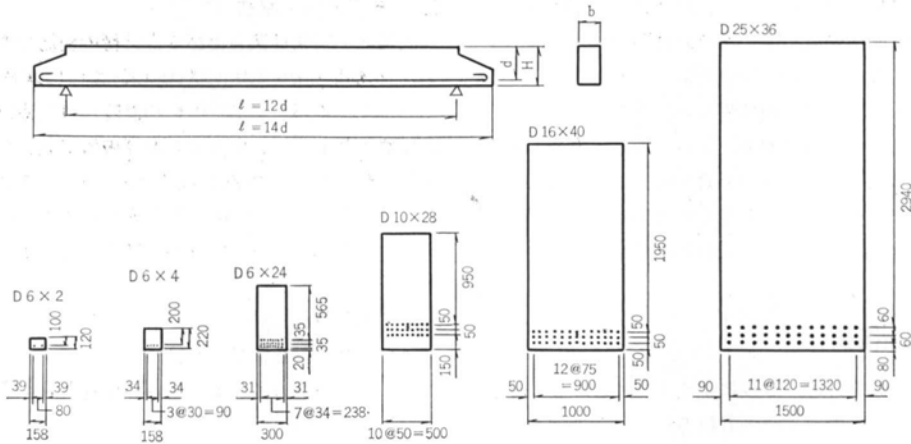
### 2.4 実験方法

支持条件は単純支持とし、ゴムバッグに水圧をかけパ

試験体 No	試験体寸法						コンクリート			鉄筋		鉄筋比		破壊 荷重 qu (kg/cm <sup>2</sup> )	破壊時作用 せん断応力 支点から1.5d 位置で評価		破壊モード (M:曲げ破壊 DT:斜引張 破壊)	加力方向 上 下	
	有効高	載荷 スパン	載荷 スパン比	試験体 長さ	試験体 高	試験体 幅	粗骨材 最大 寸法 Gmax (mm)	試験時 材令 (日)	圧縮強度 fc (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 ft (kg/cm <sup>2</sup> )	径 D (mm)	降伏点 fy (kg/cm <sup>2</sup> )	軸方 向 支 点 ~ 1.5d 位 置 Pr1 (%)		中央 Pr2 (%)	τu (kg/cm <sup>2</sup> )			τuc (kg/cm <sup>2</sup> )
	d (mm)	ℓ (cm)	ℓ/d	L (mm)	H (mm)	b (mm)													
1	100	1200	12	1400	120	158	10 (配合4)	48	210	18.9	(D3) D6	(3200) 4500	0.4	0.8	1.65	7.43	7.77	DT	上
②	"	"	"	"	"	"	"	19	194	20.7	"	"	"	"	1.90	8.55	9.18	M	"
③	200	2400	"	2800	220	"	1.0 (配合1)	31	291	25.4	"	"	"	"	1.83	8.24	7.72	DT	"
4	"	"	"	"	"	"	10 (配合4)	44	201	19.1	"	"	"	"	1.91	8.60	9.12	M	"
⑤	"	"	"	"	"	"	25 (配合5)	43	220	19.8	"	"	"	"	1.90	8.55	8.80	"	"
⑥	600	7200	"	8400	655	300	2.5 (配合2)	24	278	19.3	D6	4500	"	"	0.87	3.92	3.73	DT	"
7	"	"	"	"	"	"	10 (配合4)	28	215	18.5	"	"	"	"	1.03	4.64	4.81	"	"
⑧	"	"	"	"	"	"	25 (配合5)	"	216	20.6	"	"	"	"	1.32	5.94	6.16	"	"
⑨	100	12000	"	14000	1200	500	5 (配合3)	41	288	17.8	D10	3800	"	"	0.67	3.02	2.84	"	"
10	"	"	"	"	"	"	10 (配合4)	42	277	20.9	"	"	"	"	0.807	3.63	3.49	"	"
11	"	"	"	"	"	"	25 (配合5)	41	223	22.7	"	"	"	"	0.90	4.05	4.15	"	"
12	2000	24000	"	28000	2100	1000	25 (配合5)	35	291	27.8	D16	"	"	0.4	0.79	3.56	3.33	"	下
13	3000	36000	"	42000	3140	1500	25 (配合5)	"	248	22.3	D25	3700	"	"	0.71	3.20	3.16	"	"

(注) \* ) ○印:本実験, \*\* ) 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  $\tau_{uc} = \tau_u \times (240/f_c)^{1/3}$

表一 試験体の種類および主な実験結果



図一 試験体の形状寸法と配筋

スカルの原理により等分布荷重を与えた。d=100cm の場合の載荷装置を図二に示す。自重分の取扱いについて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えた。載荷サイクルは以下に示すサイクルを原則とした。

(1)第1サイクル

試験体の縁応力度がコンクリートの引張強度に達する荷重まで。

(2)第2サイクル

支点から1.5d 内側の断面に作用するせん断応力度が現行の土木学会 RC 示方書<sup>7)</sup>のはりとしての許容値  $\tau_a$  に達する荷重まで。RC 示方書では  $\tau = V_c/bjd$  としているが、本研究では  $\tau = V_c/bd$  としてせん断応力度を評価している。したがって、RC 示方書では  $f_c = 240 \text{ kg/cm}^2$  の場合  $\tau_a = 4.5 \text{ kg/cm}^2$  であるが、本研究においては  $\tau_a = 3.9 \text{ kg/cm}^2$  に相当する。

(3)第3サイクル  
破壊荷重まで。

## 2.5 測定項目

測定項目および計器の仕様を  
表-4に示す。

## § 3. 実験結果と考察

### 3.1 ひびわれ状況について

図-3に試験体のひびわれ状況の例を示す。一部の試験体を除き  $d=10, 20\text{cm}$  の試験体はせん断破壊に至る前に中央部で曲げ破壊となった。 $d \geq 60\text{cm}$  の試験体は斜め引張破壊となったが、破壊時のひびわれ状況は有効高さ、骨材の最大径あるいは荷重レベルが異なるにもかかわらず良く似ている。共通点としては、

- (i)部材の中立軸まで延びるような主たるひびわれはほぼ  $d/2$  ピッチである、
- (ii)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、

等である。

等分布荷重の場合は、集中荷重の場合と異なり、せん断力分布がせん断スパンで一定ではなく、図-4に示すようにスパン中央へ向かって直線的に減少する分布となる。したがって、破壊断面をどの位置とするかによってせん断強度  $\tau = V_e/bd$  の評価が異なってくるのであるが、

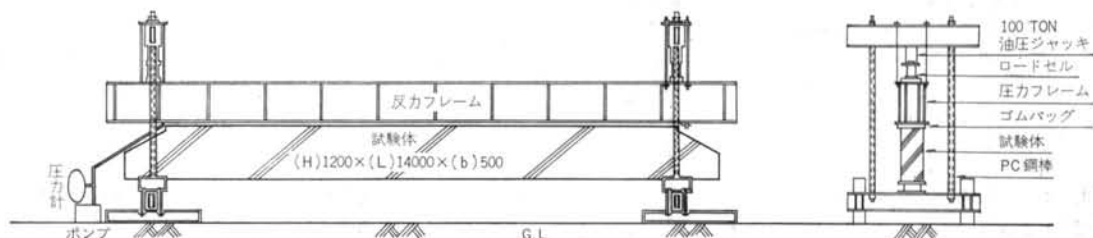
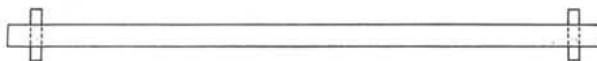


図-2 試験体加力方法 ( $d=100\text{cm}$ )

配合	目標圧縮強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	粗骨材の最大寸法 ( $\text{mm}$ )	スランブの範囲 ( $\text{cm}$ )	水セメント比 (%)	細粗骨材率 (%)	単 位 量 ( $\text{m}^3$ )				混和剤 ( $\text{cc}/\text{m}^3$ )	空気量 (%)
						水 W ( $\text{kg}$ )	セメント C ( $\text{kg}$ )	砂 S ( $\text{kg}$ )	砂利 G ( $\text{kg}$ )		
1	240	1	—	65	—	288	444	1328	—	1110	—
2	240	2.5	フロー (180mm)	65	—	288	444	1328	—	1110	—
3	240	5	フロー (220mm)	72	—	274	380	1520	—	950	3
4	240	10	$15 \pm 2$	61.5	50	176	287	915	927	718	4
5	240	25	$15 \pm 2$	56.0	41.5	149	266	785	1123	669	4

表-3 配合表

測定項目	測定目的	測定方法	計器仕様	測定点数	備 考
載 荷 荷 重	耐力の確認	ロードセル	容量 (100~600ton)	1 or 2	
載 荷 圧 力	"	圧力計	容量 (2~5 $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	2	
コンクリートひずみ	破壊モードの確認	ひずみゲージ	PL-60 または KM100F	10	$d=200, 300\text{cm}$ の試験体は19点
鉄筋ひずみ	"	"	FLA-6-11 または FCA-6-11	10	$d=200, 300\text{cm}$ の試験体は19点
た わ み	"	変位計	CDP-50またはVPS	15	
ひびわれ分布	"	目視	—	—	
ひびわれ幅	"	変位計	CE-5, PI-5または クラックスケール	8	
破 壊 状 況	"	目視	—	—	

表-4 測定項目および計器の仕様

本検討ではこれらのひびわれ状況を参考にして支点から  $1.5d$  位置を破壊断面と定め、この位置でせん断強度を評価することとした。

### 3.2 寸法効果について

実験結果の一覧は表-2に示したとおりであるが、各

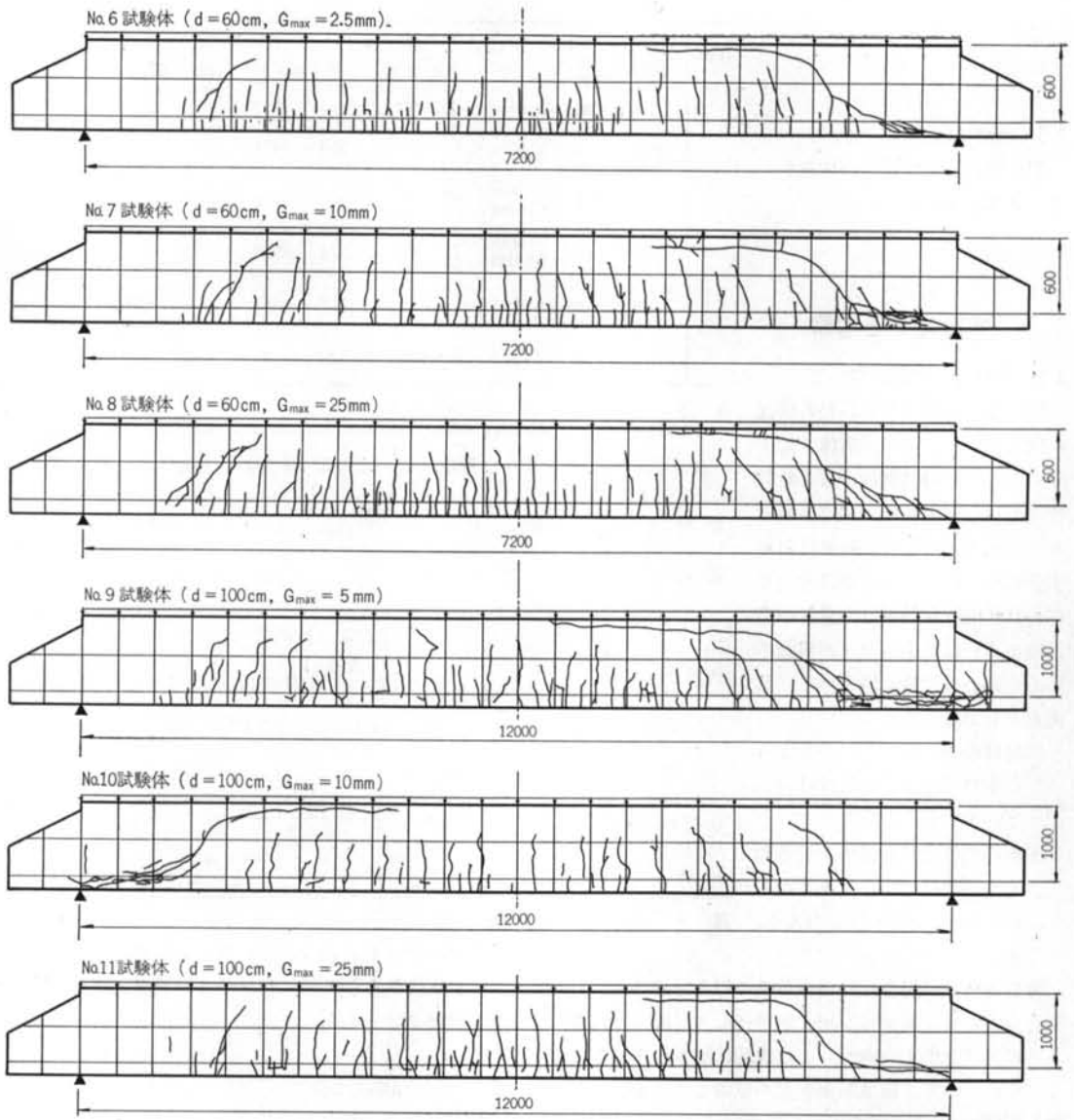


図-3 ひびわれ状況

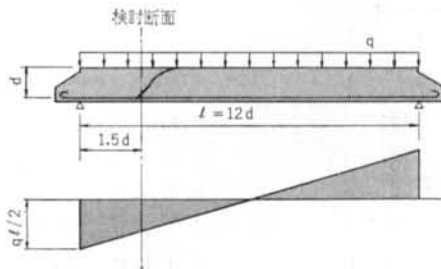
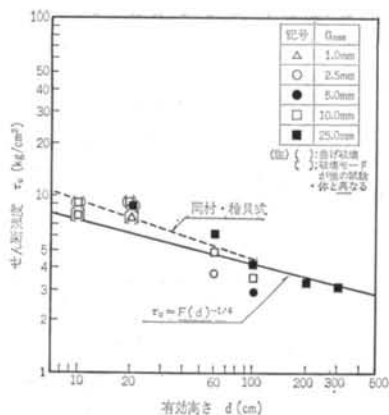


図-4 せん断力図と検討断面

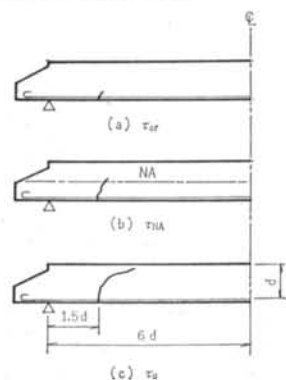
試験体でコンクリート強度にばらつきがあるため、せん断強度は圧縮強度の3乗根に比例すると考えて強度補正

し、以下の検討を行なうものとする。

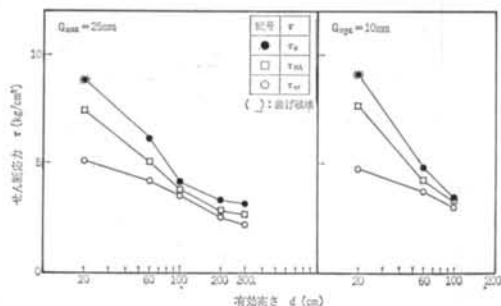
図-5は、岡村・檜貝<sup>8)</sup>によるせん断強度の計算値とともに、本実験結果と井畔らによる実験結果を示したものである。図-5によれば、有効高さが大きくなるとせん断強度は減少し、その減少率は従来の研究と同じくほぼ有効高さの4乗根に反比例している。また、Taylorが実験したように  $G_{max}$  を  $d$  に比例させた場合は  $d$  の  $\tau_u$  に対する影響が小さくなっている。Taylorは、このことから  $d$  の影響はひびわれ表面間の骨材のかみ合わせ作用の減少によるものではないかと結論づけているが、実験結果を詳細に検討した結果、必ずしも骨材のかみ合



図一五 せん断強度と有効高さの関係



図一六 各せん断応力における支点から 1.5d 位置のひびわれ状態



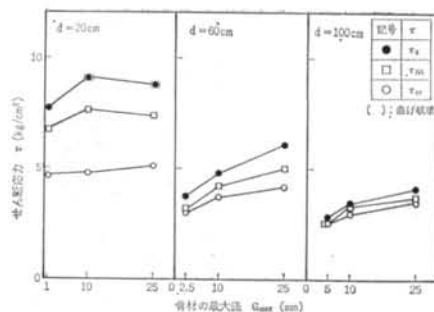
図一七 せん断応力と有効高さの関係

わせ作用の減少のみが寸法効果の原因ではないことが分かったので、以下に報告する。

### 3.3 寸法効果の原因に関する検討

寸法効果の原因を検討するために、以下のせん断応力を考える (図一六参照)。

$\tau_{er}$ : 最終的にせん断破壊の引き金となる支点から 1.5d 位置のひびわれが生じたときのせん断応力



図一八 せん断応力と骨材の最大径の関係

$\tau_{1A}$ : 支点から 1.5d 位置のひびわれが伸長して断面の中立軸を越えたときのせん断応力

$\tau_u$ : 破壊時せん断応力

上記のように定義したせん断応力のうち、 $\tau_{er}$  は主としてコンクリートの曲げ引張強度  $f_b$  に影響される。また、 $\tau_{er} \sim \tau_u$  の領域は主として骨材のかみ合わせ作用によるせん断抵抗増分と考えられる。

図一七は、 $G_{max} = 25mm$  および  $10mm$  の試験体について各応力を示したものである。図一七から、

- (i)  $d$  が大きいほど  $\tau_{er}$  が小さくなる。したがって、 $d$  が大きいほど  $f_b$  が小さく考えられる、
- (ii)  $d \leq 100cm$  では  $d$  が大きくなるほど  $\tau_{er} \sim \tau_u$  の領域が小さくなる。 $d \geq 100cm$  では  $\tau_{er} \sim \tau_u$  の領域はほぼ一定である、

ことが分かる。試験体が大きくなるほど曲げ引張強度  $f_b$  が小さくなることは井畔らによっても指摘されており、寸法効果の一因であると考えられる。

$d \leq 100cm$  では  $d$  が小さくなるほど  $\tau_{er} \sim \tau_u$  の領域が大きくなることから、 $d \leq 100cm$  の試験体では骨材のかみ合わせ作用によるせん断伝達がせん断強度にかなり寄与しているものと考えられる。また、 $d \geq 100cm$  では  $\tau_{er} \sim \tau_u$  の領域がほぼ一定であることから、 $d \geq 100cm$  の試験体では  $d/2$  ピッチに入った主たるひびわれの幅が大きく、骨材のかみ合わせ作用によるせん断伝達はかなり小さく、無視しうる程度になっているものと考えられる。

図一八は、骨材の最大径の相違による影響を有効高さ  $d = 20, 60, 100cm$  の場合について示したものである。

3.2で述べたように  $G_{max}$  の小さい方が  $\tau_u$  が小さいが、その原因は図一八より、

(i)  $G_{max}$  の小さいほど  $\tau_{er}$  が小さい、

(ii)  $G_{max}$  の小さいほど  $\tau_{er} \sim \tau_u$  の領域が小さい、  
 ことが分かる。 $G_{max}$  が小さいほど  $\tau_{er}$  が小さいのは、本実験における配合では  $G_{max} = 2.5mm \sim 10mm$  の場合、引張強度がやや小さい (図一九) ことも影響しているものと考えられる。 $G_{max}$  が小さいほど、骨材のかみ合わせ

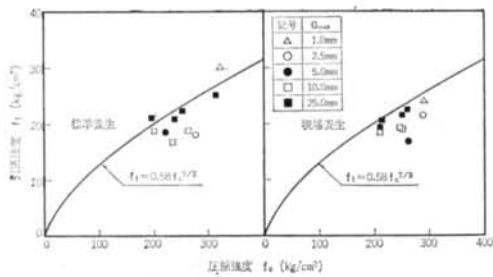


図-9 材令28日における圧縮強度と引張強度の関係

せ作用によるせん断抵抗増分  $\tau_{cr} \sim \tau_u$  が小さくなるのは容易に想像出来ることであり、Hamadi<sup>9)</sup>の直接せん断実験結果でも示されている。

以上述べたように、実験結果から寸法効果の原因は、(1)コンクリート強度そのものの寸法効果と(2)骨材のかみ合わせ作用の減少とが複合されたものであるといえる。

### 3.4 既往の解析的研究に対する評価

鉄筋コンクリートはりのせん断強度の寸法効果に対する解析的研究は少ない。筆者の一人も有限要素法による解析を試み一応の成果は得たが<sup>10)</sup>、ここでは先駆的な2人の研究者の解析に対して、本実験結果を踏まえて評価を試みる。

#### (1)Bažant の研究<sup>11)</sup>

Bažant は、まずコンクリートの材料強度の寸法効果に着目し、非線形破壊力学を用いて材料強度の寸法効果を論じた<sup>12)</sup>。その結果、Bažant は次式により材料強度を考慮した。

$$\text{寸法効果} = (1 + \lambda/\lambda_0)^{-1/2} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $\lambda$  : テストピースの大きさ  
 $\lambda_0$  : 常数

さらに、この結果をせん断補筋のない鉄筋コンクリートはりのせん断破壊に適用し、

$$\text{寸法効果} = (1 + d/G_{\max}\lambda_0)^{-1/2} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 $\lambda_0$  : 定数 = 25

と定義し、せん断強度式として次式を提案した。

$$\tau_u = 8 \sqrt{p} \{ \sqrt{f_c} + 3000 \sqrt{p/(a/d)^5} \} / \sqrt{1 + d/G_{\max}} \quad (\text{psi}) \quad \dots\dots(3)$$

Bažant 式と本実験結果を比較すると図-10、11となり、 $G_{\max} \geq 10\text{mm}$ の範囲ではBažantによる $\tau_u$ は本実験結果の $\tau_{cr}$ にほぼ相当し、 $\tau_u$ は $d \leq 100\text{cm}$ でかなり異なる。これは、骨材のかみ合わせ作用を軽視したためではないかと考えられ、式(2)におけるパラメータの見直しを要するものと考えられる。

#### (2)Blaauwendraad の研究<sup>13)</sup>

Blaauwendraad は、恐らくせん断破壊するはりの寸

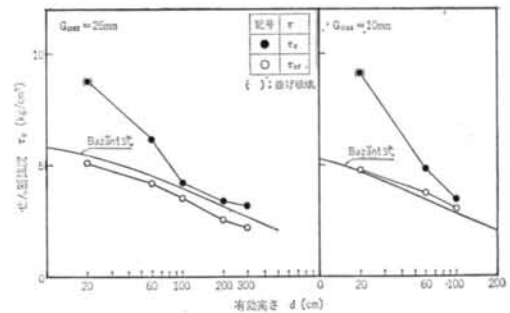


図-10 Bažant による計算式との比較

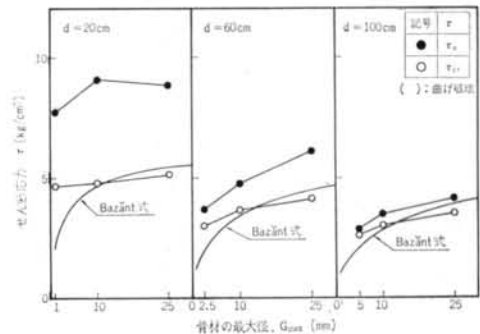


図-11 Bažant による計算式との比較

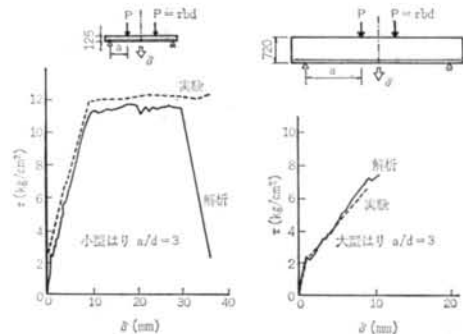


図-12 Blaauwendraad の解析結果

法効果を有限要素法で解析した初めての研究者であると思われる。彼はひびわれ表面間のせん断伝達に着目し、discrete なひびわれにWalravenの研究成果をとり入れ解析した。解析結果は図-12に示すとおりであり、ほぼ実験結果と対応しているが、 $d$ の小さいはりの解析結果は実験結果を下廻り、大きいはりの解析結果では逆に実験結果を上廻っている。Blaauwendraadの解析においてはコンクリート強度はばらつきを考慮し、要素それぞれに対して異なった引張強度を適当にばらつかせて与えるようになっているが、材料強度そのものの寸法効果を取り入れた解析を行えば、さらに解析の精度が上がるものと思われる。

## § 4. まとめ

せん断補強筋を用いない鉄筋コンクリートはりのせん断強度は、有効高さが大きくなると次第に減少することが実験的に知られている。寸法効果の原因は、一般にひびわれ表面間の骨材のかみ合わせ作用の減少と、ひびわれ間のコンクリートのくし歯部分の曲げ剛性の減少とによって説明されるが実験的に確認された例は少ない。そこで本報告は、寸法効果の原因を探る目的で骨材の最大径を有効高さに比例させた実験を行ない、せん断強度の寸法効果に及ぼす要因を把握しようとしたものである。

主な結果を以下に示す。

(1)最終的にせん断破壊の引き金となる支点から  $1.5d$  位置のひびわれが生じたときのせん断応力を  $\tau_{cr}$ 、破壊時せん断応力を  $\tau_u$  とすると、 $d$  が大きいほど  $\tau_{cr}$  が小さくなる。したがって、 $d$  が大きいほどコンクリートの曲げ引張強度が小さく、コンクリート強度そのものの寸法効果もせん断破壊に対する寸法効果の一因であると考えられる。

(2) $d \leq 100\text{cm}$  では  $d$  が大きくなるほど  $\tau_{cr} \sim \tau_u$  の領域が小さくなり、 $d \geq 100\text{cm}$  ではほぼ一定である。これは

$d \leq 100\text{cm}$  の試験体では  $d/2$  ピッチに入った主たるひびわれの幅が相対的に小さく、骨材のかみ合わせ作用による分担せん断力がかなり大きいためと考えられる。しかしながら、 $d \geq 100\text{cm}$  の試験体ではひびわれ発生とほぼ同時にかなり大きなひびわれ幅となるため、骨材のかみ合わせ作用は小さくなり、ひびわれ発生以後のせん断耐力増加にはほとんど寄与しなくなるものと考えられる。

(3)骨材の最大径  $G_{\max}$  を変化させた場合、 $G_{\max}$  の小さいほど  $\tau_u$  は小さくなる。本実験の場合、この原因は  $G_{\max}$  が小さいと曲げ引張強度が小さかったことと、骨材径が小さいことによるかみ合わせ作用の減少との複合作用によるものであった。

以上述べたように、寸法効果の原因はコンクリート強度そのものの寸法効果と、骨材のかみ合わせ作用の減少との複合作用によるものと考えられる。しかしながら、今回の実験は試験体数も少なく分担せん断力の分離もなかなか困難であり、定量的には評価出来なかった。したがって、今後とも材料の寸法効果と骨材のかみ合わせ作用との複合作用について研究する必要があるものと考えられる。

## <参考文献>

- 1) G.N.J. Kani: "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams" Journal of ACI (March 1967)
- 2) H.P.J. Taylor: "Shear Strength of Large Beams" Journal of Structural Div., Proc. of ASCE (Nov. 1972)
- 3) 井畔・塩屋・野尻・秋山: "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" 土木学会論文報告集 (1984年8月)
- 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 (1983年12月)
- 6) F. Leonhardt: "コンクリート構造物におけるせん断に関する諸問題" 橋梁と基礎 (1977年4月)
- 7) 土木学会: "コンクリート標準示方書 昭和45年制定 (昭和55年版)"
- 8) H. Okamura & T. Higai: "Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement" Proc. of JSCE, No.300 (Aug. 1980)
- 9) Y.D. Hamadi & P.E. Regan: "Behaviour in Shear of Beams with Flexural Cracks" Magazine of Concrete Research, Vol.32, No.111 (June 1980)
- 10) 塩屋・川崎: "鉄筋コンクリートはりのせん断強度の寸法効果に関する検討" RC 構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集 (1984年12月)
- 11) Z.P. Bazant & J.-K. Kim: "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams" Journal of ACI (Sept.-Oct. 1984)
- 12) Z.P. Bazant: "Size Effect in Blunt Fracture; Concrete, Rock, Metal" Journal of Structural Eng., ASCE Vol. 110, No.4 (Apr. 1984)
- 13) J. Blaauwendraad: "The Use of Rough Crack Model of Walraven and the Fictitious Crack Model of Hillerborg in F.E. Analysis" IUTAM (1983)

