

[131] 鉄筋コンクリートはりのせん断強度に及ぼす骨材径の影響

正会員 ○塩屋俊幸 (清水建設技術研究所)

正会員 岡田武二 (清水建設技術研究所)

1. はじめに

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〔1〕, Taylor〔2〕, 井畔・塩屋・野尻・秋山〔3〕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」〔4〕, 土木学会「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」〔5〕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が〔6〕, 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 d と骨材の最大径を表-1に示す組み合わせとした。

- ① 載荷荷重は等分布荷重とする。
- ② 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。
- ③ 載荷スパン l と d の比を $l/d = 12$ とする。
- ④ せん断破壊を起すであろう支点付近の主鉄筋比 p を $p = 0.4\%$ とする。

表-2に本実験計画を示す。

表-1 有効高さ d と骨材の最大径の組合せ

		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-2 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 (kg/cm ²)	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 DT: 斜引張 (DT): 異常な 斜引張
	有効高 d (mm)	載荷 スパン l (mm)	載荷ス パン比 l/d	試験体 長さ L (mm)	試験体 高さ H (mm)	試験体 幅 b (mm)	粗骨材 最大寸法 G_{max} (mm)	試験時 材令 (日)	圧縮強度 f_c (kg/cm ²)	引張強度 f_t (kg/cm ²)	径 D (mm)	降伏点 f_{sy} (kg/cm ²)	軸方向 支点 ~1.5d 位置 Pr 1 (%)	中央 Pr 2 (%)		τ_{ut} (kg/cm ²)	τ_u (kg/cm ²)	
1	100	1200	12	1400	120	158	10 (配合4)	19	194	20.7	D6*	4500*	0.4	0.8	1.90	8.55	9.18	M
2	200	2400	"	2800	220	158	1.0 (配合1)	31	291	25.4	"	"	"	"	1.83	8.24	7.72	(DT)
3	"	"	"	"	"	"	25 (配合5)	43	220	19.8	"	"	"	"	1.90	8.55	8.80	"
4	600	7200	"	8400	655	300	2.5 (配合2)	24	278	19.3	D6	4500	"	"	0.87	3.92	3.73	DT
5	"	"	"	"	"	"	25 (配合5)	"	216	20.6	"	"	"	"	1.32	5.94	6.16	"
6	1000	12000	"	14000	1200	500	5 (配合3)	41	288	17.8	D10	3800	"	"	0.67	3.02	2.84	"

*) $d=100, 200$ mmの試験体ではD3鉄筋, $f_{sy}=3200$ kg/cm²を曲げ補強筋として用いた。
 **) $\tau_{ut} = V_c / bd = q_u \times 4.5$
 ***) 圧縮強度による補正値 $\tau_u = \tau_{ut} \times (240/f_c)^{1/3}$

2.1 形状寸法・配筋

試験体の形状寸法及び支点近傍の配筋を図-1に示す。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%づつ大きくし、3d~中央部では0.8%一定とした。

2.2 使用材料

(1) コンクリート及びモルタル

コンクリート及びモルタルの配合を表-3に示す。

(2) 鉄筋

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

2.3 コンクリート及びモルタルの養生

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スカルの原理により等分布荷重を与えた。d=100cmの場合の荷重装置を図-2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。荷重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〔7〕のはりとしての許容値 τ_{a1} に達する荷重まで。RC示方書では $\tau = Vc/bjd$ としているが、本研究では $\tau = Vc/bd$ 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 $\tau_{a1} = 4.5 \text{ kg/cm}^2$ であるが、本研究においては $\tau_{a1} = 3.9 \text{ kg/cm}^2$ に相当する。

(3) 第3サイクル

破壊荷重まで

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, 20cm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 60cm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、

- ① 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。
- 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。

等である。

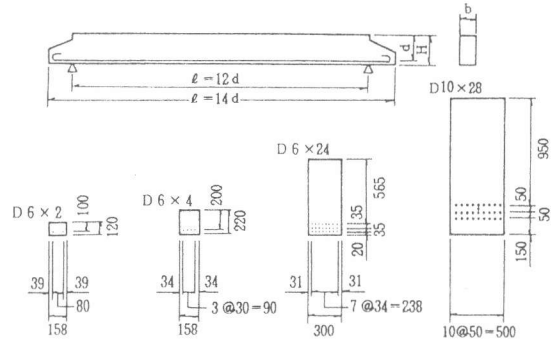


図-1 試験体の形状寸法と配筋

表-3 配合表 (目標圧縮強度 240 kg/cm²)

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	単位置 (m ³)				混和剤 (cc/m ³)	空気量 (%)
			水 W (kg)	セメント C (kg)	砂 S (kg)	砂利 G (kg)		
1	1	—	288	444	1328	—	1110	—
2	2.5	フロー (180mm)	288	444	1328	—	1110	—
3	5	フロー (220mm)	274	380	1520	—	950	3
4	10	15±2	176	287	915	927	718	4
5	25	15±2	149	266	785	1123	669	4

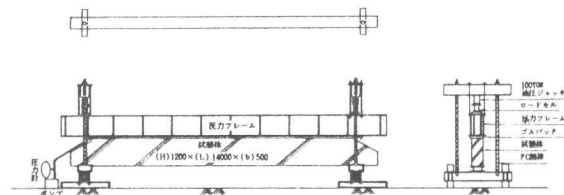


図-2 試験体加力方法 (d=100cm)

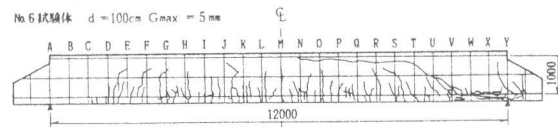


図-3 ひびわれ状況の一例

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 $\tau = Vc/bd$ の評価が異なってくるのであるが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以下の検討を行うものとする。

図-5は岡村・楢貝〔8〕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 τ_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わせ作用の減少のみが寸法効果の原因ではないことがわ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-6参照)。

τ_{cr} : 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時のせん断応力

τ_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 τ_{cr} 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 $\tau_{cr} \sim \tau_u$ 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-7は、骨材の最大径の相違による影響を有効高さ $d=20, 60, 100\text{cm}$ の場合について、Bažant〔9〕によるせん断強度の計算値とともに各応力を示したものである。

3.2で述べたように G_{max} の小さい方が τ_u が小さいが、その原因は図-7より

- ① G_{max} の小さい程 τ_{cr} が小さい。
- ② G_{max} の小さい程 $\tau_{cr} \sim \tau_u$ の領域が小さい。

ことがわかる。 G_{max} が小さい程、 τ_{cr} が小さいのは本実験における配合では $G_{max} = 2.5\text{mm} \sim 10\text{mm}$ の場合引張強度がやや小さい(図-8)ことも影響しているものと考えられる。 G_{max} が小さい程、骨材のかみ合わせ作用

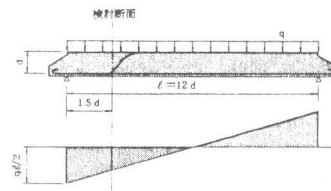


図-4 せん断力図と検討断面

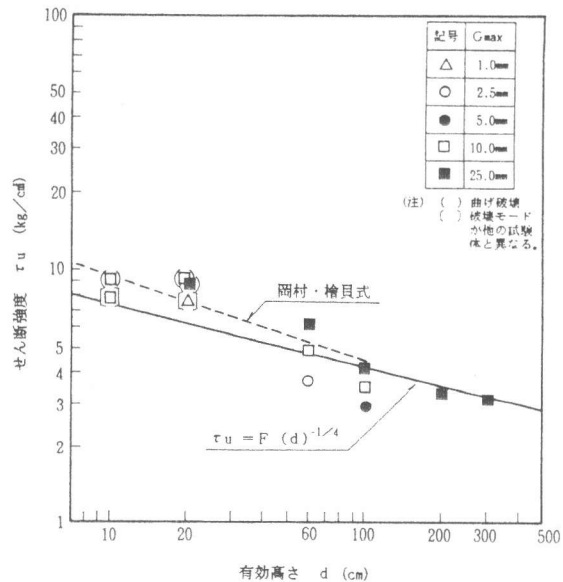


図-5 せん断強度と有効高さの関係

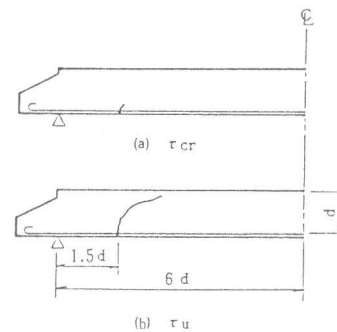


図-6 各せん断応力における支点から $1.5d$ 位置のひびわれ状態

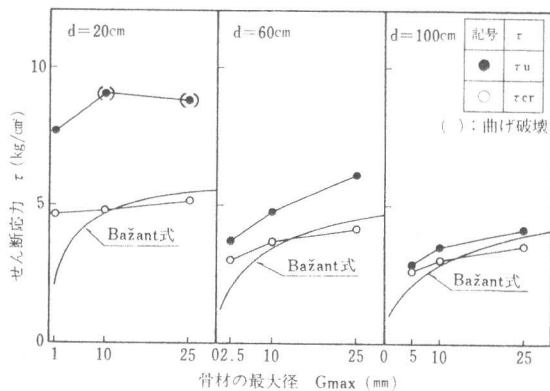


図-7 骨材の最大径とせん断強度の関係

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る。

図-9は $G_{max} = 25\text{mm}$ および 10mm の試験体について、Bažant (9) によるせん断強度の計算値とともに各応力を示したものである。図-9から

- ① d が大きい程 τ_{cr} が小さくなる。したがって d が大きい程 f_b が小さくなると考えられる。
- ② $d \leq 100\text{cm}$ では d が大きくなるほど $\tau_{cr} \sim \tau_u$ の領域が小さくなる。 $d \geq 100\text{cm}$ では $\tau_{cr} \sim \tau_u$ の領域はほぼ一定である。

ことがわかる。試験体が大きくなる程曲げ引張強度 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。 $d \leq 100\text{cm}$ では d が小さくなるほど $\tau_{cr} \sim \tau_u$ の領域が大きくなることから、 $d \leq 100\text{cm}$ 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、 $d \geq 100\text{cm}$ では $\tau_c \sim \tau_u$ の領域がほぼ一定であることから、 $d \geq 100\text{cm}$ 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。

Bažantによる計算値と本実験結果を比較すると $G_{max} \geq 10\text{mm}$ の範囲ではBažantによる τ_u は本実験結果の τ_{cr} にほぼ相当し τ_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、パラメーターの見直しを要するものと考えられる。

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、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。

4. まとめ

本報告は鉄筋コンクリートはりのせん断強度の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い、寸法効果に及ぼす要因を把握しようとしたものである。実験結果から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) Kani G.N.J. : "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams", Journal of ACI, No.64-12, March, 1967
- (2) Taylor H.P.J. : "Shear Strength of Large Beams", Journal of ST., Proc. of ASCE, November, 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) Leonhardt F. : "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) 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
- (9) Bažant Z.P. and Kim J-K. : "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams", Journal of ACI, Sept.-Oct. 1984

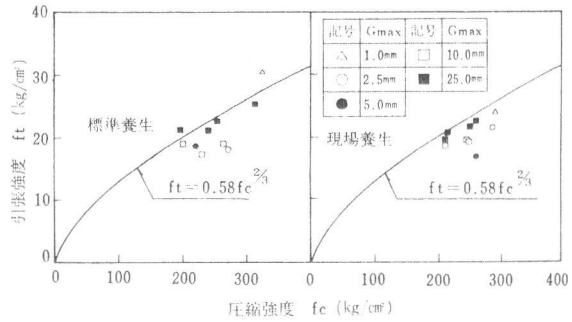


図-8 材令28日における圧縮強度と引張強度の関係

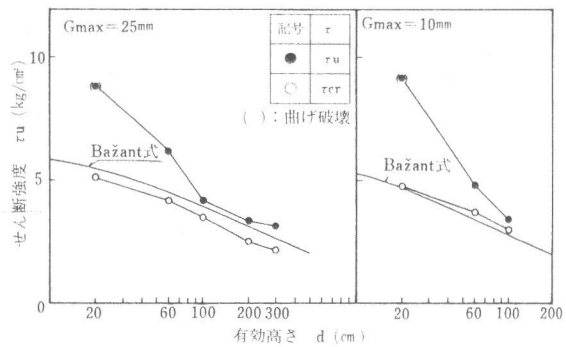


図-9 有効高さとせん断強度の関係