

## 論文 RC梁のせん断強度の寸法効果に及ぼす破壊エネルギーの影響

藤田学<sup>\*1</sup>・大館武彦<sup>\*2</sup>・松元香保里<sup>\*3</sup>

要旨: RC梁部材のせん断強度の寸法効果に関する検討に破壊力学を適用した。破壊エネルギー試験から破壊エネルギーを求め、過去に実施したせん断破壊試験結果に適用した。その結果、高強度コンクリートのせん断強度の寸法効果は、中低強度コンクリートのそれとは異なった。せん断強度は有効高さに対し、圧縮強度 $60\text{N/mm}^2$ 以下のコンクリートでは $-1/4$ 乗に、圧縮強度 $100\text{N/mm}^2$ 程度の高強度コンクリートでは $-1/2$ 乗に比例する傾向にあった。

キーワード: せん断強度、寸法効果、高強度コンクリート、破壊力学、破壊エネルギー

## 1. はじめに

せん断補強筋のない鉄筋コンクリート(以下、RC)梁部材のせん断強度には、寸法効果の存在が認められており、寸法効果を考慮したせん断耐力算定式の提案もなされている<sup>1)</sup>。しかしながら、既往のRC梁部材におけるせん断強度の寸法効果に関する研究は、ほとんどがコンクリート圧縮強度にして $60\text{N/mm}^2$ 程度までを対象としており、高強度コンクリートの領域まで網羅しているとは言い難い。著者らは、圧縮強度( $35\sim 100\text{N/mm}^2$ )、有効高さ( $250\sim 1000\text{mm}$ )およびせん断スパン比( $2\sim 5$ )をパラメータとしたRC梁部材のせん断破壊試験を行ない、せん断強度の寸法効果は圧縮強度に依存し、高強度ほど部材寸法の影響が大きく現れることを確認している<sup>2)</sup>。また、BazantやHillerborgらは、破壊力学に基づくせん断強度の寸法効果を検討し、それぞれ提案式を示している<sup>3)</sup>。

本研究では、せん断補強筋のないRC梁部材のせん断強度の寸法効果を検討するため、破壊エネルギー試験から得られた破壊エネルギーを用いて、せん断破壊試験における斜めひび割れ発生時の公称せん断応力度(以下、せん断強度)の寸法効果に関する検討を行った。

## 2. 破壊エネルギー試験の概要

本試験は、(社)日本コンクリート工学協会「コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会」が公開している「ブレンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案-01)」(以下、試験法案)に準じて実施した。

## 2.1 試験水準

本試験は、コンクリート圧縮強度、最大骨材寸法、養生条件をパラメータとして行った。試験水準を表-1にまとめる。試験ケースのL、M、Uは圧縮強度のパラメータを示し、各シリーズの基準とする強度は $36, 60, 100\text{N/mm}^2$ である。なお、養生条件のみ異なるケースのコンクリートは同一バッチとした。

## 2.2 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は鬼怒川産川砂(表乾比重:2.62、吸水率:1.65%)、粗骨材は葛生産碎石(表乾比重:2.63、吸水率1.59%)であり、せん断破壊試験時に使用した骨材と同じである。高強度コンクリートの製作には、シリカフェームおよび高性能AE減水剤を用いた。

配合はL、M、U各強度シリーズの最大骨材寸法 $20\text{mm}$ のケースを基本配合とし、これをせん断破壊試験時の配合と一致させた。最大骨材寸法

\*1 住友建設(株) 技術研究所 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 住友建設(株) 技術研究所

\*3 住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

表-1 試験水準とコンクリートの配合

CASE	配合強度 (N/mm <sup>2</sup> )	養生条件	最大骨材寸法 Gmax (mm)	水結合材比 W/B (%)	細骨材比 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
						水 W	B		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 ×C(%)	消泡剤 ×C(%)
							セメント C	シリカフューム Si				
L-5-G	36	気中	5	56.5	47.9	162	287	0	881	—	1.07	0.009
L-5-H	36	水中										
L-10-G	36	気中	10	56.5	50.0	250	443	0	773	779	0.80	—
L-10-H	36	水中										
L-20-G	36	気中	20	56.5	47.9	162	287	0	881	962	1.07	0.009
L-20-H	36	水中										
M-5-G	60	気中	5	35.0	46.1	165	472	0	804	—	1.30	—
M-5-H	60	水中										
M-10-G	60	気中	10	35.0	48.0	195	558	0	765	835	1.80	—
M-10-H	60	水中										
M-20-G	60	気中	20	35.0	46.1	165	472	0	804	944	1.30	—
M-20-H	60	水中										
U-5-G	100	気中	5	21.0	42.2	160	686	76	667	—	1.80	0.009
U-5-H	100	水中										
U-10-G	100	気中	10	21.0	45.0	190	814	90	579	713	2.00	—
U-10-H	100	水中										
U-20-G	100	気中	20	21.0	42.2	160	686	76	667	917	1.80	—
U-20-H	100	水中										

5mmおよび10mmの配合は、材料分離が生じないよう細骨材率を微調整したが、各強度シリーズの基本配合にできるだけ一致させている。各ケースの配合を表-1に示す。

### 2.3 コンクリートの力学特性

使用したコンクリートの材料試験結果を表-2に示す。材料試験時の材令は28日である。

### 2.4 コンクリートの破壊エネルギー試験方法

本試験は、切欠き梁の3点曲げ試験によりコンクリートの荷重-ひび割れ開口変位および破壊エネルギーを求めるものである。試験時の材令は28日、各ケースの試験体数は6以上とした。

#### (1) 試験体

試験法案に準拠し、試験体寸法は、100mm×100mm×400mm、試験体中央の切欠き深さは50mmとした。各試験体とも、載荷試験前日にコンクリートカッターで切欠きを加工した。なお、切欠き幅は約4mmであった。

#### (2) 試験方法

本試験は載荷スパン300mmで行った。荷重制御は、294kNアムスラーを用いて手動で行ない、載荷装置は両支点下にはローラーを配置し、水平方向に可動な構造とすると共に、支点の一方

表-2 コンクリートの力学特性

CASE	圧縮強度 $f_c$	引張強度 $f_t$	弾性係数 $E_c$	ポアソン比 $\nu$	密度 $\rho$
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	—	g/cm <sup>3</sup>
L-5-G	49.7	3.42	23100	0.181	2.18
L-5-H	61.3	2.94	26500	0.200	2.23
L-10-G	40.9	3.58	22700	0.179	2.23
L-10-H	51.0	3.61	26000	0.212	2.26
L-20-G	35.1	2.87	29000	0.175	2.28
L-20-H	43.0	3.90	30000	0.189	2.33
M-5-G	66.9	4.23	27800	0.202	2.24
M-5-H	88.7	4.04	34300	0.212	2.30
M-10-G	64.9	5.33	30300	0.194	2.31
M-10-H	63.2	4.92	36700	0.205	2.36
M-20-G	50.2	4.19	32100	0.182	2.34
M-20-H	88.0	5.09	31100	0.223	2.38
U-5-G	95.6	5.60	30900	0.202	2.29
U-5-H	112.6	6.38	36100	0.224	2.32
U-10-G	99.0	6.02	34700	0.208	2.34
U-10-H	112.9	7.12	39400	0.223	2.36
U-20-G	85.6	5.47	37200	0.182	2.40
U-20-H	101.0	7.06	40900	0.208	2.40

は、試験体の軸方向にも回転できる構造とした。

計測項目は、載荷荷重、ひび割れ開口変位(CMOD)、切欠き先端開口変位(CTOD)、載荷点および支点の鉛直変位とした。載荷荷重の計測は、ロードセル(感度:5N)で行った。CMODは試験体底面の切欠き部中央で、CTODは試験体両側面においてクリップゲージ(感度:1/1000mm)を直接取り付け、鉛直変位は試験体底面の切欠

きを挟んだ2点で、ひずみゲージ式変位計（感度：1/1000mm）により計測した。載荷装置および計測位置を図-1に示す。

### (3) 破壊エネルギーの評価方法

試験方法案に従い、破壊エネルギー $G_f$ は次式により求めた。

$$G_f = (0.75W_0 + W_1) / A_{lig} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75(S/L \cdot m_1 + 2m_2) \cdot CMOD_c$$

ここに、

$W_0$ ：破断までの荷重-CMOD 曲線下の面積

$W_1$ ：試験体自重と載荷治具がなす仕事

$A_{lig}$ ：リガメント面積

$m_1$ ：試験体重量

$S$ ：載荷スパン

$L$ ：試験体の全長

$m_2$ ：破断まで試験体に載る治具の重量

$CMOD_c$ ：破断時のひび割れ開口変位

また、破壊の脆性度を表す指標である特性長さ $l_{ch}$ は次式より求めた<sup>3)</sup>。

$$l_{ch} = E_c \cdot G_f / f_t^2 \quad (2)$$

ここに、 $E_c$ ：弾性係数  $f_t$ ：引張強度

## 3. 試験結果

本試験では、計測された荷重-CMOD曲線より荷重低下域も比較的安定して計測できたと判断された試験体について検討対象とした。各ケースの検討可能な試験体数は5～8であった。

### 3.1 荷重-CMOD 曲線

試験結果例として、気中養生のケースの荷重-CMOD曲線を図-2に示す。なお、図中の破壊エネルギーは各ケースの平均値である。図-2より、圧縮強度の増大に伴い曲げ強度は増大する傾向にあるが、最大骨材寸法と曲げ強度の関係は明確ではない。水中養生のケースも定性的には同じ傾向が認められた。

また、破壊後の試験体破断面の観察より、最大骨材寸法10mmおよび20mmのケースは、Lシリーズでは粗骨材の破壊はほとんどなかったが、圧縮強度の増大に伴い粗骨材の破壊する確率が高

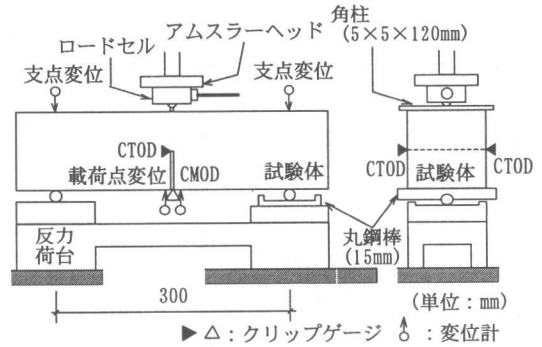


図-1 載荷装置および計測位置

くなる傾向にあった。即ち、圧縮強度が高いほど脆性的な破壊性状を示す傾向にあった。

### 3.2 材料特性値

式(1)、(2)より破壊エネルギーおよび特性長さを求めた。各ケースの平均値をそのケースにおける試験結果とし、これらの一覧を表-3に、圧縮強度と破壊エネルギーの関係を図-3に、引張強度と破壊エネルギーの関係を図-4に、圧縮強度と特性長さの関係を図-5に示す。各図中の点線は、各相関関係の定性的な傾向を表している。

図-3から、粗骨材の影響のない、または小さい最大骨材寸法5mmおよび10mmのケースでは、モルタル部分の材料特性に支配されるため、圧縮強度が高いほど破壊エネルギーは大きくなる傾向にある。一方、最大骨材寸法20mmのケースでは、圧縮強度85N/mm<sup>2</sup>程度を境に破壊エネルギーは低下する傾向にある。コンクリート強度の増大は、配合における単位水量の減少、およびUシリーズではシリカフュームの使用によるモルタル部分およびモルタル-粗骨材界面の緻密化によるものである。これらに対し、粗骨材の強度は相対的に低下するため、脆性的な破壊となり、破壊エネルギーは減少したと理解できる。図-4の引張強度と破壊エネルギーの関係も、図-3と定性的には同じ傾向を示している。

図-5では圧縮強度と脆性度の関係がより明確に確認できる。圧縮強度と特性長さの関係は、最大骨材寸法によって相関は異なるが、定性的な傾向は類似し、圧縮強度の増大に伴い特性長さは減少する、即ちより脆性的な破壊となること

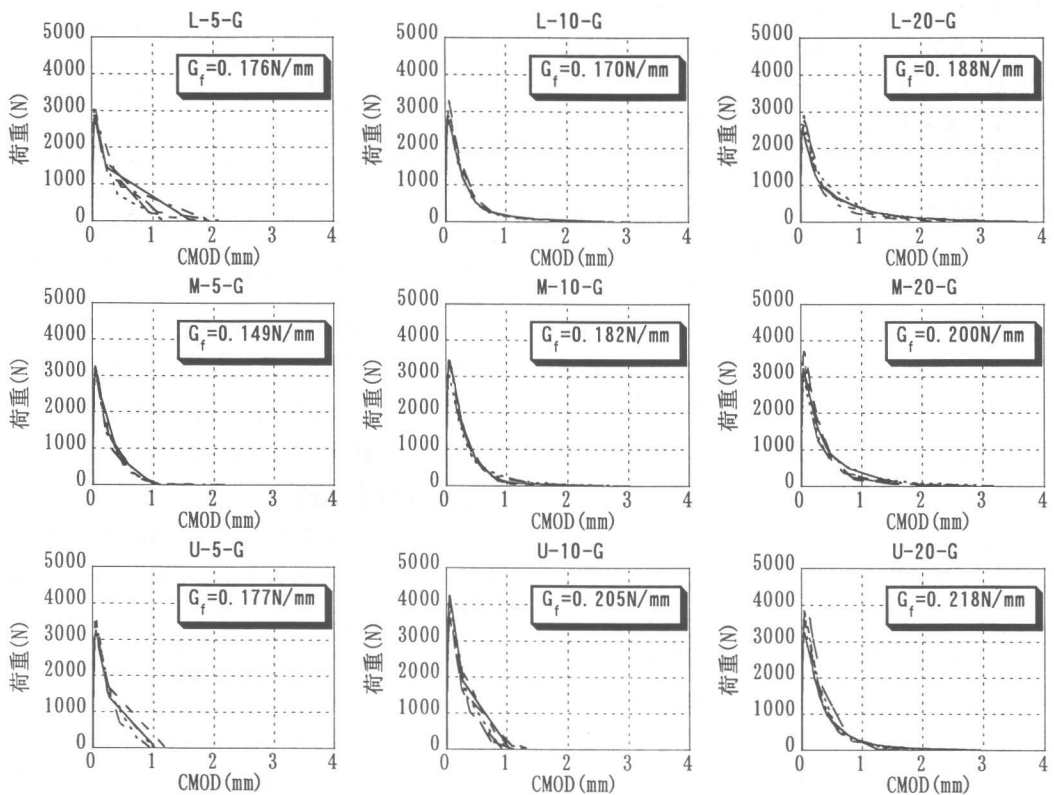


図-2 荷重-CMOD 曲線

が分かる。

以上より、本試験で対象した試験体は、圧縮強度の増大に伴い脆性的な破壊形態を示すことが明らかとなった。破壊エネルギー試験は曲げ破壊によるものであり、せん断破壊と異なる破壊モードである。しかし、せん断破壊試験においても圧縮強度の増大に伴い脆性的な破壊となる傾向は認められており、破壊モードは異なっても何らかの相関はあると考えられる。次章では、これら試験値を用いてせん断強度の寸法効果に関する検討を行う。

#### 4. せん断強度の寸法効果に関する検討

本章では、破壊エネルギー試験ケースのうち各強度シリーズの20-G(最大骨材寸法20mm、気中養生)を対象とした。このケースとせん断破壊試験の材料および各強度シリーズの配合は同じであるが、コンクリートの力学特性は一致しなかった。せん断破壊試験体に使用したコンク

表-3 破壊エネルギー試験結果

CASE	破壊エネルギー $G_f$ (N/mm)	特性長さ $l_{ch}$ (mm)
L-5-G	0.176	348.5
L-5-H	0.199	609.8
L-10-G	0.170	300.4
L-10-H	0.149	298.0
L-20-G	0.188	660.6
L-20-H	0.196	387.4
M-5-G	0.149	232.3
M-5-H	0.133	278.5
M-10-G	0.182	194.5
M-10-H	0.196	297.6
M-20-G	0.200	366.3
M-20-H	0.201	241.0
U-5-G	0.177	174.9
U-5-H	0.207	183.7
U-10-G	0.205	196.2
U-10-H	0.228	177.3
U-20-G	0.218	271.3
U-20-H	0.183	150.0

リートの材料試験結果を表-4に示す。破壊エネルギーは、材料の力学特性と密接に関係するが、本研究では3章の試験結果を用いることにした。

#### 4.1 せん断破壊試験の概要<sup>2)</sup>

試験体は、せん断スパン比( $a/d=3$ )を一定と

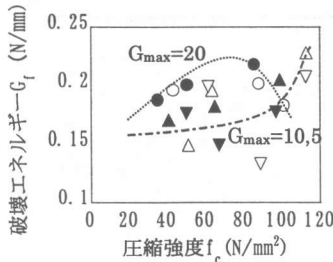


図-3  $f_c-G_f$  の関係

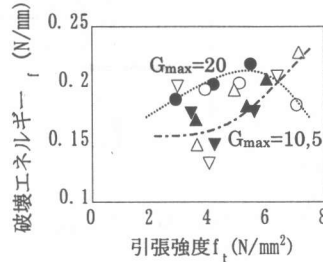


図-4  $f_t-G_f$  の関係

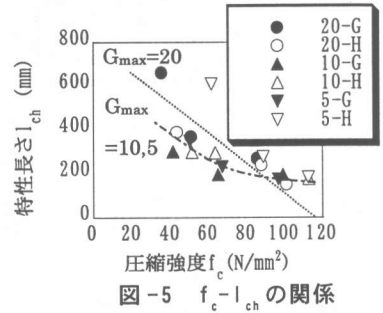


図-5  $f_c-l_{ch}$  の関係

表-4 せん断試験体の諸元およびコンクリートの力学特性

試験体 番号	全長 L	支 間 長 L1	幅 b	有効 高さ d	せん断 スパン a	引張 鉄筋比 P <sub>f</sub>	圧縮強度 f <sub>u</sub>			引張強度 f <sub>t</sub>			弾性係数 E <sub>c</sub> (×10 <sup>3</sup> )		
	mm	mm	mm	mm	mm	%	N/mm <sup>2</sup>			N/mm <sup>2</sup>			N/mm <sup>2</sup>		
L-25-3	2750	1750	150	250	750	1.53	36.1	36.4	36.4	2.90	2.90	2.90	26.8	31.6	31.6
L-50-3	4500	3500	150	500	1500	1.53	34.3	34.7	33.7	2.60	2.71	3.16	26.1	28.7	28.7
L-100-3	9000	7000	350	1000	3000	1.36									
M-25-3	2750	1750	150	250	750	1.53	67.1	51.9	51.9	3.80	3.46	3.46	34.6	29.8	29.8
M-50-3	4500	3500	150	500	1500	1.53									
M-100-3	9000	7000	350	1000	3000	1.36	56.8	53.7	53.0	3.80	3.43	3.28	30.4	33.2	33.2
U-25-3	2750	1750	150	250	750	1.53	97.5	92.9	92.9	4.40	4.91	4.91	36.2	40.8	40.8
U-50-3	4500	3500	150	500	1500	1.53									
U-100-3	9000	7000	350	1000	3000	1.36	99.1	89.8	92.1	4.60	3.92	4.28	38.2	28.7	28.7

注) 圧縮強度、引張強度、弾性係数は、せん断破壊試験時の材料試験結果をあらわす。

し、コンクリート圧縮強度 $f_c$ および有効高さ $d$ をパラメータとした。せん断補強筋はなく、載荷スパンは有効高さに等しい。試験体の諸元を表-4に示す。各ケースの試験体数は3である。破壊形態は全試験体とも斜め引張破壊であり、せん断破壊時における各試験体の引張鉄筋は降伏ひずみ(1980 $\mu$ )には達していなかった。

#### 4.2 せん断強度の寸法効果に関する検討

斜めひび割れ発生時のせん断強度と圧縮強度の関係を図-6に、有効高さとの関係を図-7に示す。なお、有効高さ1000mmのケースは他と引張鉄筋比が異なるため、文献1)に示されているせん断耐力算定式により補正を行った(但し、式の適用範囲は圧縮強度80N/mm<sup>2</sup>以下とされているが、本研究では範囲外のUシリーズにも適用した)。両図より、全ての強度の試験体で有効高さの増大に伴いせん断強度は低下しており、寸法効果が明らかに存在することがわかる。また、その低下率は強度が高いほど大きいことが確認されている<sup>2)</sup>。

前述のように、破壊エネルギーには3章で得られた各強度シリーズの値を適用した。特性長さは、せん断破壊試験時の弾性係数と引張強度を用いて式(2)より求めた。せん断強度を引張強度で除した $\tau_v/f_t$ と、有効高さを特性長さで除した $d/l_{ch}$ の関係を図-8に示す。図中の2つの点線は、 $\tau_v/f_t \propto (d/l_{ch})^{-1/4}$ および $\tau_v/f_t \propto (d/l_{ch})^{-1/2}$ の関係を表している。これより、 $\tau_v/f_t$ と $d/l_{ch}$ には相関が認められるが、LおよびMシリーズとUシリーズでは相関が異なり、 $\tau_v/f_t$ は $d/l_{ch}$ に対して前者は-1/4乗に、後者は-1/2乗に比例することが分かる。この関係を図-9に示す。縦軸は $\tau_v/f_t$ を $d/l_{ch}$ の-1/4乗、あるいは-1/2乗で除した値を表し、この値は有効高さの関数である $d/l_{ch}$ に関係なくほぼ一定の値となっている。LおよびMシリーズの検討結果は、HillerborgらのFEM解析による検討結果<sup>3)</sup>と一致する共に、せん断強度は有効高さの-1/4乗に比例する既往の評価式<sup>1)</sup>とも一致する。一方、Uシリーズの寸法効果は、式(2)より次式の関係で表せる。

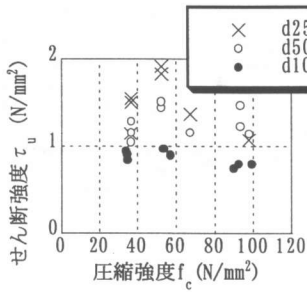


図-6  $\tau_u$  と  $f_c$  の関係

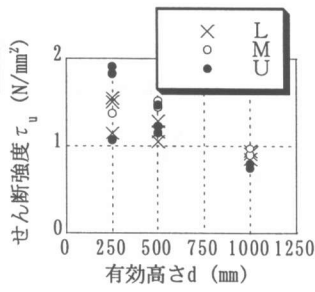


図-7  $\tau_u$  と  $d$  の関係

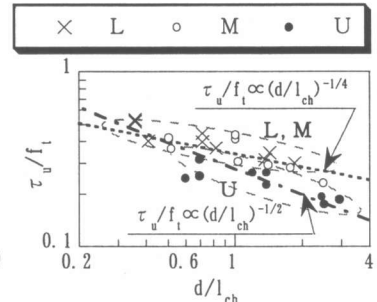


図-8  $\tau_u/f_t$  と  $d/l_{ch}$  の関係

$$\tau_u \propto f_t \cdot (d/l_{ch})^{-1/2} = (d/E_c G_f)^{-1/2} \quad (3)$$

これは、有効高さが十分大きい時、せん断強度は有効高さの $-1/2$ 乗に比例し、線形破壊力学に漸近するというBazantの寸法効果則<sup>3)4)</sup>と同じである。線形破壊力学は、脆性破壊や亀裂先端の塑性域の影響が大きい現象に適用される。高強度コンクリートは、中低強度コンクリートに比べ脆性的な破壊性状を呈するため、線形破壊力学に近い寸法効果を示す可能性は有り得る。また、Bazantの実験<sup>4)</sup>は最大骨材寸法の小さい試験体であるため、せん断強度に寄与する骨材のかみ合わせ効果は小さいと思われる。高強度コンクリートでは、高強度化したモルタルマトリックスの強度に対し、骨材のかみ合わせ効果は相対的に低下し、Bazantの寸法効果則に近づくと考えられることもできる。

以上より、高強度コンクリートのせん断強度の寸法効果は、中低強度コンクリートのそれとは異なることが分かった。また、寸法効果を考慮したせん断強度の評価において、破壊力学の適用は有効と考えられる。

## 5. まとめ

コンクリート圧縮強度  $35 \sim 100 \text{N/mm}^2$ 、有効高さ  $250 \sim 1000 \text{mm}$  のせん断補強筋のないRC単純梁におけるせん断強度(せん断スパン比3)の寸法効果に関する検討を行った。その結果、せん断強度の寸法効果は、高強度コンクリートと中低強度コンクリートでは異なった。せん断強度は有効高さに対して、圧縮強度  $60 \text{N/mm}^2$  以下の

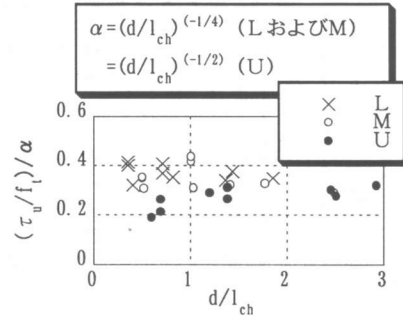


図-9 寸法効果の検討

中低強度コンクリートでは有効高さの $-1/4$ 乗に、圧縮強度  $100 \text{N/mm}^2$  程度の高強度コンクリートでは $-1/2$ 乗に比例する傾向があった。

今後、本研究で得られたせん断強度の寸法効果を確認するため、FEMによるせん断破壊解析を行う予定である。

## 【参考文献】

- 1) 二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号, V-5, pp. 167-176, 1986
- 2) 藤田学ほか：鉄筋コンクリートはり部材のせん断耐力におけるコンクリート強度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 955-960, 2000
- 3) コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学に関するコホーム, 委員会報告, 日本コンクリート工学協会, JCI-C19, 1990
- 4) Bazant et al. : Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams without Stirrup, ACI Structural Journal, pp.268-276, May-June 1991