

論文 鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす寸法効果について

林 和彦*1・織地 啓*2・山口隆裕*3・池田尚治*4

要旨：本研究は、鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす寸法効果の影響を評価することを目的とした実証的な研究である。実験の要因は、供試体寸法、鉄筋径およびコンクリートの打込み方向等とした。その結果、部材寸法に対する骨材寸法の比や引張鉄筋比等がせん断強度に与える影響の大きいことを実証し、外形寸法だけでなく構成要素を含めてすべてを相似にすると寸法効果の影響は今まで認識されていたよりもはるかに小さくなることを示し、部材寸法に直接依存しない斜めひび割れ強度の算定式を提案した。

キーワード：寸法効果，斜めひび割れ，せん断，骨材寸法

1. はじめに

これまで鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に関する数多くの実験が行われてきた¹⁾。それらの研究の結果を基に、コンクリート標準示方書²⁾の棒部材の設計せん断耐力算定式の中には寸法効果の影響が有効高さの4分の1乗に反比例するとして考慮されている。しかしながら、寸法効果の要因については必ずしも明らかにされておらず、寸法効果が鉄筋コンクリート固有の性質として認識されていることは極めて多くの問題を現在でも引き起こしている。

鉄筋コンクリートのせん断耐力の本質的な寸法効果を実験的に求めるためには、外形だけでなく構成要素を含めたすべての寸法を相似にした部材を用いて行うことが必須であるが、現実的に完全に相似にすることは困難である。また、コンクリートという材料には定量的に評価することができない打込み時の沈下やブリーディング、硬化時の温度応力や乾燥収縮等の影響が含まれている。

本研究は、これらのことを考慮して系統的に実験を行い、鉄筋コンクリートのせん断耐力の

寸法効果について解明しようとするものであり、本文は其中で供試体寸法、骨材寸法、鉄筋径、およびコンクリートの打込み方向を要因として行った実験の結果を基に検討したことを述べるものである。

2. 供試体の概要および実験方法

2.1 実験供試体

供試体の形状を図-1に、諸元と実験結果を表-1に、使用鋼材の力学的特性を表-2にそれぞれ示す。

(1) 供試体形状・打込み方向・鉄筋

断面寸法が幅 300mm、断面高さ 600mm の供試体を大型供試体とし、その 1/2 スケールを中型供試体、1/4 スケールを小型供試体とした。すべての供試体でせん断スパン有効高さ比(以下、 a/d)を 2.5 とし、有効高さとかぶりも完全に相似にした。

コンクリートの打込み方向の種別で、正打ちとは載荷方向と打込み方向とが同一であり、逆打ちは打込み方向を逆としたものである。

基準となる主鉄筋を、大型では D19×6 本、中

*1 横浜国立大学大学院 工学研究科計画建設学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学 工学部建設学科

*3 横浜国立大学助手 博(工) (正会員)

*4 横浜国立大学教授 工博 (正会員)

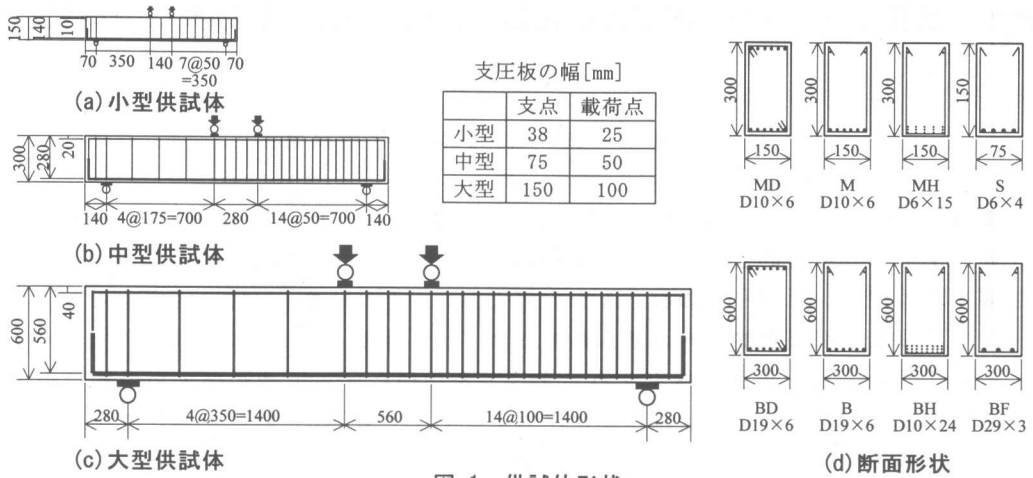


図-1 供試体形状

型では D10×6 本として鉄筋径と鉄筋比をほぼ相似にした。小型供試体は、D6×4 本を用いたため、鉄筋径と鉄筋比ともに大きくなっている。また、基準となる鉄筋に比べて太い鉄筋を使ったものと、細い鉄筋を使ったものを作製した。

大型、中型供試体は 0.06 程度の腹鉄筋を入れたが、斜めひび割れ発生荷重には影響はないものと思われる。せん断破壊が生じるスパンを左側に特定するために、腹鉄筋量は左右非対称とした。

(2) コンクリートの種類

セメントには早強ポルトランドセメントを用い、目標強度を 26MPa、目標スランプを 10cm として配合した。配合を表-3 に示す。

粗骨材には砕石を用い、目標の最大粗骨材寸法(以下、 G_{max})は 20mm、10mm、5mm の 3 種類とした。ただし 10mm については砕石 S-13(6 号)を用いた。骨材全体(粗骨材+細骨材)の粗粒率は、順に 4.91、4.40、2.91 である。骨材の寸法が相似に 1/2 になると粗粒率は 1 低下するため、本実験で用いた 20mm と 5mm の関係はほぼ相似にスケールダウンできているものと考えられる。これに対して G_{max} が 10mm の骨材は若干相似性が異なる。

有効高さが 2 メートルを超える既往の大型梁のせん断実験に用いられた供試体³⁾⁴⁾⁵⁾と本研究で用いられた供試体における G_{max} と有効高さ

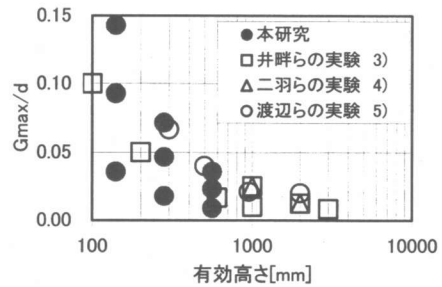


図-2 最大粗骨材寸法/有効高さ
と有効高さの関係

の比(以下、 G_{max}/d)と有効高さの関係を図-2 に示す。既往の実験においては、対象とする供試体の有効高さが大きくなるにつれて明らかに骨材の相対的な寸法が小さくなっている傾向がある。なお、本実験において有効高さが 560mm かつ G_{max} が 5mm の供試体は、有効高さが最大の 3000mm の供試体($G_{max}=25$ mm)とほぼ相似となっている。

一部の供試体はポリプロピレン繊維を混入(体積比 0.2%)し、その挙動を調べた。

(3) 供試体作製方法

大型供試体のコンクリートは 4 層に、中型と小型は 2 層に分けて打込み、各層毎にバイブレーターを用いて十分な締固めを行った。打込み時に型枠からの水漏れは無く、打込み後の乾燥収縮による影響を少なくするため、供試体をビ

表-1 供試体の諸元と実験結果

No.	供試体名 ※1	寸法 d[mm]	配筋	最大粗 骨材寸 法※2 [mm]	主鉄筋	主鉄 筋比 [%]	腹鉄 筋比 [%] ※3	圧縮 強度 [MPa]	引張 強度 [MPa]	弾性 係数 [GPa]	ポア ソン 比	斜めひび割 れ進展時の せん断強度 [MPa]	終局時の せん断強度 [MPa]	破壊 形式 ※4					
1	BD-S-N20-1	大型 560	複鉄筋	20	D19×6	1.02	0.060	24.3	2.75	19.7	0.219	0.88	1.13	SC					
2	BD-S-N20-2							25.4	2.35	19.4	0.208	0.82	1.30	SC					
3	BD-R-N20-1							24.3	2.75	19.7	0.219	0.74	1.55	D/F					
4	BD-R-N20-2							25.4	2.35	19.4	0.208	-	1.55	F					
5	B-S-N20		単鉄筋		D10×24	1.02		1.02	0.060	23.7	1.97	19.0	0.209	0.72	1.46	SC			
6	B-R-N20									23.6	1.97	19.0	0.209	0.88	0.85	SC			
7	BH-S-N20									23.6	1.97	19.0	0.209	0.86	0.85	SC			
8	BH-R-N20									25.6	2.42	19.5	0.216	0.93	1.53	D/F			
9	BF-S-N20									25.6	2.42	19.5	0.216	0.98	1.27	SC			
10	BH-S-N5									5	D10×24	1.02	25.4	1.53	16.0	0.186	0.63	1.49	D/F
11	B-S-P20									20	D19×6	1.02	23.5	1.94	19.9	0.220	0.96	1.40	SC
12	MD-S-N10-1	中型 280		複鉄筋			10			D10×6	1.02	0.057	31.9	2.21	23.0	0.226	0.99	1.56	D/F
13	MD-S-N10-2		20.4		2.07	17.0		0.199	0.97				-	DT					
14	MD-R-N10-1		31.9		2.21	23.0		0.226	0.89				1.49	SC					
15	MD-R-N10-2		20.4		2.07	17.0		0.199	0.92				1.24	SC					
16	MD-S-N20-1		20	単鉄筋	D6×15	1.13	0.057	25.6	2.42	19.5	0.216		0.90	-	DT				
17	MD-S-N20-2		25.6					2.42	19.5	0.216	1.02		-	DT					
18	M-S-N10-1		31.9					2.21	23.0	0.226	1.11		0.91	SC					
19	M-S-N10-2		21.0					2.07	17.0	0.199	0.90		0.92	DT					
20	M-R-N10-1		32.6					2.21	23.0	0.226	0.95		1.05	SC					
21	M-R-N10-2		21.0					2.07	17.0	0.199	0.88		1.45	D/F					
22	MH-S-N10-1		32.6					2.21	23.0	0.226	1.17		1.47	SC					
23	MH-S-N10-2		21.0					2.07	17.0	0.199	1.03		1.45	SC					
24	MH-R-N10-1		32.6					2.21	23.0	0.226	1.07		0.99	SC					
25	MH-R-N10-2		21.0					2.07	17.0	0.199	1.11		1.07	SC					
26	MH-S-N5-1	5	D10×6	1.02	0.057	26.3	1.53	16.0	0.186	0.85	1.48	SC							
27	MH-S-N5-2	27.1				1.53	16.0	0.186	0.85	1.54	SC								
28	M-S-P20	24.3				1.94	19.9	0.220	0.96	1.56	SC								
29	S-S-N20-1	20				D6×4	1.21	0	32.0	2.54	23.5	0.209	1.49	-	DT				
30	S-S-N20-2	32.0							2.54	23.5	0.209	1.28	1.83	SC					
31	S-S-N10-1	10							30.9	2.37	22.3	0.208	1.49	-	DT				
32	S-S-N10-2	30.9							2.37	22.3	0.208	1.45	-	DT					
33	S-S-N5-1	5							28.4	2.16	18.4	0.210	1.12	-	DT				
34	S-S-N5-2	28.4	2.16	18.4	0.210				1.28	-	DT								

※1 供試体名のつけ方

[B:大型, M:中型, S:小型][D:複鉄筋, 無:単鉄筋][F:太い鉄筋を使用, H:細い鉄筋を使用]-[S:正打ち, R:逆打ち]-
[N:基準コンクリート, P:ポリプロピレン繊維混入][最大粗骨材寸法]-[同一供試体がある場合の順番]

※2 10mmの粗骨材についてはS-13(6号)を使用したため若干最大寸法が大きい

※3 せん断破壊を起こさせるスパンの腹鉄筋比

※4 DT:斜引張破壊, SC:せん断圧縮破壊, D/F:斜めひび割れ発生後鉄筋が降伏して曲げ破壊, F:曲げ破壊

ニールシートで密閉して養生した。

2.2 荷重方法

大型、中型供試体の実験にはアムスラー式試験機を、また小型供試体は電動油圧ジャッキを用い、荷重分配桁を介して2点荷重した。図-1に示すとおり、支圧板の幅も相似にしている。

3. 実験結果と考察

本実験の a/d は 2.5 であり、既往のせん断実験の範囲においては比較的ショートビームに位

置する。過去の実験では、主に斜めひび割れが進展すると同時に耐力を失う斜引張破壊を対象としている。a/d=2.5 というのは、いわゆるせん断の谷¹⁾の最低点にあたり、斜引張破壊と斜めひび割れ進展後にタイドアーチが形成され耐力が上昇するせん断圧縮破壊との間の不安定領域である。そのため、既往のせん断実験との対応を図るために、本実験においては、斜めひび割れが形成され大きく進展した時点コンクリートの斜引張破壊とし、以降「斜めひび割れ進

表-2 鋼材の力学的特性

呼び名	規格	弾性係数 [GPa]	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
D29	SD345	179	362	553	32
D19	SD345	174	381	572	24
D10	SD345	171	392	567	23
D6	SD295A	168	352 ^{※1}	532	27
D6 ^{※2}	SD345	180	412	559	-
D3	-	178	279	343	-

※1 0.2%オフセット降伏応力

※2 小型供試体の主鉄筋に使用

表-3 コンクリートの配合

骨材の種類	W/C	s/a	W	C	S	G
20mm	65	48	175	270	906	1004
10mm	65	54	196	302	976	851
5mm	70	-	272	389	1538	-
5mm ^{※1}	70	-	249	356	1625	-

※1 小型供試体に使用

展時」として示す。斜めひび割れ進展時の荷重としては、斜引張破壊をしたものはその最大荷重を、せん断圧縮破壊をしたものは斜めひび割れが大きく進展して一時的に荷重が低下する直前のピーク荷重とした。

写真-1 に供試体の斜めひび割れ進展時ににおけるひび割れ状況の一例を示す。

作用せん断力を断面幅と有効高さで除した値をせん断強度とし、実験結果を表-1 に示す。通常、供試体間のコンクリート強度と主鉄筋比の違いの影響を除くために補正を行う⁹⁾が、現時点では最適な補正係数が確定していないために補正を行っていない。

なお、No. 4 供試体は曲げ破壊のため、斜めひび割れ進展時のせん断強度の比較にはデータを用いていない。

3.1 骨材寸法と有効高さの比とせん断強度

図-3 に G_{max}/d と斜めひび割れ進展時のせん断強度の関係を示す。 G_{max}/d が小さくなるにつれてせん断強度が低下する傾向が示されている。同じ有効高さの供試体において G_{max} が 20mm と 5mm ではせん断耐力が異なり、最大値は最小値の 1.5 倍に達している。

ポリプロピレン繊維を混入した供試体は、混

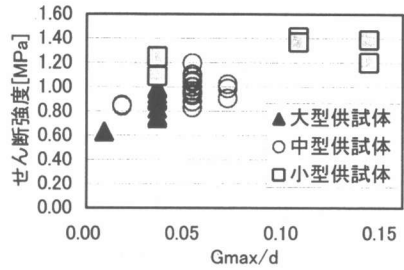


図-3 G_{max}/d と斜めひび割れ進展時せん断強度の関係

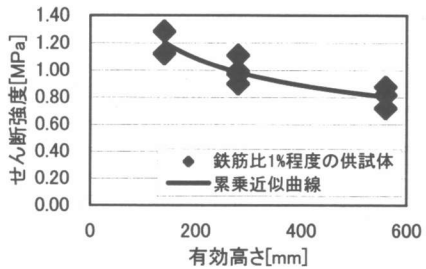


図-4 有効高さと斜めひび割れ進展時せん断強度の関係

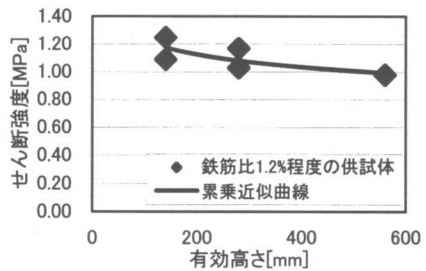
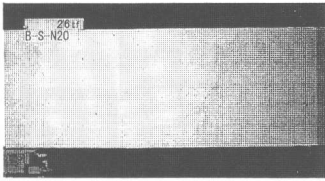


図-5 有効高さと斜めひび割れ進展時せん断強度の関係

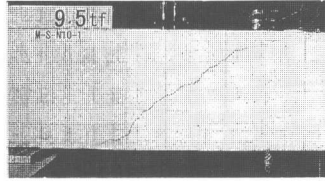
入しないものに比べゆっくりと斜めひび割れが進展する特徴があった。大型と小型で同じ骨材を用いたにもかかわらず、せん断強度の差は見られなかった。

3.2 供試体寸法による比較

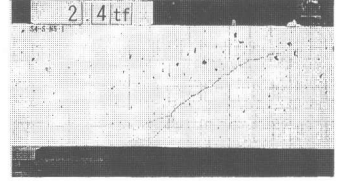
図-4 には正打ちで G_{max}/d がほぼ等しい供試体の実験より得られた有効高さとせん断強度の関係を示す。図を見ると一見寸法効果が存在するかのように見えるが、小型供試体では鉄筋比が 1.2 倍大きく、また他に比べ相対的に太い鉄筋を使っており、中型供試体では、骨材の粗粒率



(a) B-S-N20



(b) M-S-N10-1



(c) S-S-N5-1

写真-1 相似にした供試体の斜めひび割れ進展時のひび割れ状況

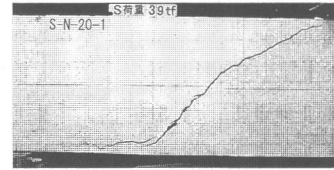
が相対的に大きいなど、完全に相似の供試体で比べられていないことを考慮する必要がある。図-5には鉄筋比が小型供試体の1.2%に近い中型と大型供試体の値を示す。この図においても鉄筋比は完全に相似にはなっておらず、中型供試体の骨材は図-4と同様であり、大型供試体の鉄筋径は相対的に大きい。しかし、図-4に比べて大型と小型の間の得られるせん断強度の差はかなり小さくなっており、最大値は最小値の約1.2倍程度に均一化されている。

図-3～図-5の結果から、 G_{max}/d と鉄筋比の値は得られるせん断強度値に大きな影響を与えていることがわかる。したがって、これらを含めて完全に相似にした部材を用いた場合に得られるせん断強度は有効高さに関係なく、ほぼ等しい値になるとみるのが妥当と判断できる⁶⁾。また、若干大型部材の方がせん断強度が低めの傾向が見られるのは、ブリーディング、沈下、乾燥収縮などのコンクリート特有の不均質性の影響もあると考えられる。

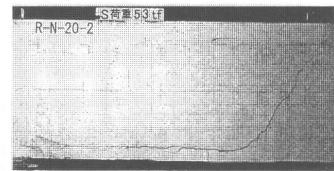
3.3 打込み方向による比較

写真-2に打込み方向のみが異なる供試体のひび割れ状況の比較を示す。打込み方向を逆にした場合に得られた斜めひび割れ進展荷重は、正打ちの場合の0.90倍から1.22倍の間となり、打込み方向の差による明確な差は見られなかった。破壊形態に着目すると、正打ちは斜引張破壊が見られたが、逆打ちは斜引張破壊が見られず、せん断圧縮破壊や曲げ破壊に至り、最大耐力は大幅に増大した⁷⁾。

一般にコンクリートは硬化前の材料分離により、打込み時の下部のコンクリートは密実で、上部のコンクリートは脆弱となる。ブリーディ



(a) BD-S-N20-1



(b) BD-R-N20-2

写真-2 打込み方向の違いによる最大荷重時のひび割れ状況

ングや沈下により、上部の鉄筋の付着力も低下する。そのために、逆打ちのほうが引張鉄筋の付着が弱く、引張鉄筋に沿った曲げひび割れが生じにくく、かつ圧縮側のコンクリートが相対的に密実となり、結果としてタイドアーチや曲げ破壊に移行しやすいものと思われる。

4. 寸法効果の評価

過去の大型供試体を用いたせん断実験³⁾⁴⁾⁵⁾において注目すべきことは井畔らの実験では等分布荷重が用いられ引張鉄筋比が0.4%と極めて低い値となっている。また評価するせん断力は斜めひび割れの発生位置とされ支点から1.5dの位置がとられている。この位置での曲げモーメントは集中荷重の場合に比べて大きく、曲げひび割れの影響を大きく受けているはずである。

本実験の結果とこれらの事柄を考慮し、 G_{max} と有効高さの比および鉄筋径と有効高さの比などを含めて斜めひび割れ進展時のせん断強度の

算定式(1)を提案することとした。

$$\tau_{cal} = 0.4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot f_{ct} \quad (1)$$

ここで、

<p>k_1: 載荷状態の影響 k_2: 引張鉄筋比の影響 k_3: 骨材寸法比の影響 k_4: 鉄筋径比の影響 k_5: 付着の影響 f_{ct}: コンクリートの引張強度 (一般に $0.23f_c^{2/3}$) M, S: 斜めひび割れ着目位置の 曲げモーメントおよびせん断力。集中荷重の場合はせん断スパン中央, 等分布荷重の場合は $1.5d$ の位置となる。 d: 有効高さ p: 鉄筋比[%], p_0: 鉄筋比(1%) G_{max}: 最大粗骨材寸法 ϕ: 鉄筋径</p>	$k_1 = 1.25 \frac{S \cdot d}{M}$ $k_2 = 0.5 + \frac{p}{2p_0}$ $k_3 = \sqrt[4]{\frac{20}{d/G_{max}}}$ $k_4 = \sqrt[4]{\frac{100}{d/\phi}}$ <p>異形鉄筋の場合 $k_5 = 1$</p>
--	---

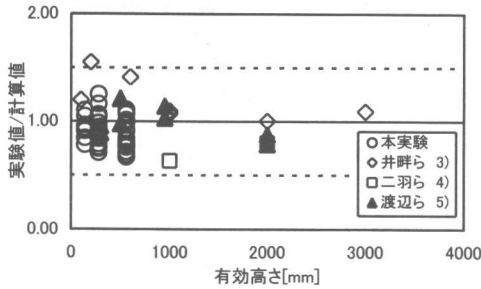


図-6 実験値と計算値の比較

図-6 に実験値と(1)式で求めた計算値の比と有効高さとの関係を示す。この図に示されるように、コンクリートのせん断強度は今まで言われてきたような一義的に有効高さに支配されるものではなく骨材や鉄筋の寸法と断面の有効高さとの相対的な相違の影響を主因として評価できると考えるのが妥当と言える。したがって今まで言われてきた寸法効果は実務上での便宜的な寸法の影響というべきものであって力学上からの絶対的なものではないと言える。

5. 結論

本実験の範囲内で得られた結果をまとめると次のとおりとなる。

- (1) コンクリート特有の不均質性のため、得られるせん断強度はある程度ばらつき、破壊形態は大きく異なる恐れのあることが示された。
- (2) 鉄筋コンクリート部材のコンクリートのせ

ん断強度は最大粗骨材寸法や鉄筋径と断面の有効高さとの比および引張鉄筋比に大きく影響を受け、本質的な寸法効果は認められないことが実証された。

(3) 今回得られた実験結果と既往の実験結果とから鉄筋コンクリートの斜めひび割れ強度に対して部材寸法に影響なく適用できる普遍的な算定式を提案することができた。

謝辞

本研究を行うにあたり横浜国立大学の森下豊技官には多大な協力を得た。供試体作製に際しては株式会社ピー・エスにお世話になった。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kani, G. N. J. : How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams?, Journal of American Concrete Institute, No. 64-12, pp. 128-141, Mar. 1967
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編 (平成8年制定), 1996. 3
- 3) 井畔瑞人, 塩屋俊幸, 野尻陽一, 秋山暉：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, 土木学会論文集, No. 348, V-1, pp. 175-184, 1984. 8
- 4) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫：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, No. 372, V-5, pp. 167-176, 1986. 8
- 5) 渡辺博志, 河野広隆：鉄筋コンクリート橋脚のせん断力照査におけるコンクリート負担分に関する検討, 基礎工, Vol. 25, No. 3, pp. 61-67, 1997. 3
- 6) 長田光司, 井上貴之, 山口隆裕, 池田尚治：炭素繊維シートでせん断補強された RC 柱部材の寸法効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 1411-1416, 1999. 6
- 7) 林和彦, 澤大輔, 山口隆裕, 池田尚治：鉄筋コンクリート梁および柱の斜引張破壊挙動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No. 3, pp. 601-606, 2000. 6