

論文

[2029] RC単純ばりの曲げ・せん断破壊の寸法効果についての検討

正会員○近藤 吾郎 (京都大学工学部)

同 藤井 栄 (京都大学工学部)

同 森田 司郎 (京都大学工学部)

1. 序

鉄筋コンクリート部材の挙動は寸法の影響を受けて変化することが古くから指摘されている。近年、Bazant[1]やHillerborgら[2]の破壊力学からのアプローチによって、この現象を理論的に説明できることが示された。しかし、材料特性から複合応力下にある実際のRC部材での寸法依存性を定量的に評価できる段階には到達していない。本稿で取り扱うせん断破壊に関しても、ひびわれ面での骨材の噛み合い作用やひびわれ直交方向の応力伝達特性(引張軟化特性)、ダボせん断伝達等の種々の抵抗機構が寸法との関係からどのように全体の挙動に影響を与えるかについてはほとんど明かにはなっていない。本稿は、著者等が以前に行った寸法を変数とした単純ばりの実験の概要を示し、近年の破壊力学によるアプローチと対比して再検討を行ったものである。さらに本実験供試体に対して有限要素法を用いてひびわれ面での応力伝達特性をパラメーターとした解析を行い、寸法効果を引き起こしている要因を考察する。

2. RC単純ばりの曲げ・せん断実験

2.1 供試体

図-1に供試体を示す。供試体はせん断スパンでの補強筋の有無により、曲げ型(Fシリーズ)、せん断型(Sシリーズ)の2種類に分類され、各シリーズとも7体を用意した。表-1に供試体の一覧を示す。実験変数は、供試体寸法と、コンクリートの骨材最大寸法である。供試体寸法は4種類であり、梁せい40cm、幅16cm、梁主筋 2-D25のものをプロトタイプ(1/1供試体)とし、その1/2、1/4、1/8の縮尺率の梁を用意した。コンクリートの骨材最大寸法(G_m)は、1/1供試体で20mmとし、1/2、

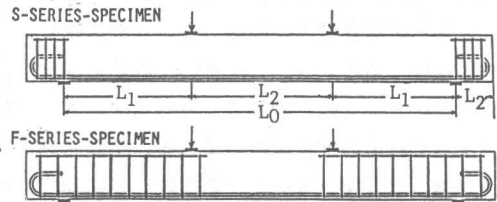


図-1 供試体図

表-1 供試体一覧表

SCALE	SPECIMEN DESIGNATION	SPECIMENS' SIZE							REINFORCEMENT				MAX AGGREGATE (mm)	MIX PROPORTION W:C:G:S
		L (cm)	b (cm)	D(d) (cm)	L ₀ (cm)	L ₁ (cm)	L ₂ (cm)	L ₃ (cm)	TENS. REINF. (mm)	Pt (%)	stirrup (mm)	Pv (%)		
1/1	S-1/1-20	400	16	40 (36)	336	108	120	32	2025	1.76	2010 Ø150 (F-TYPE)	0.60	20.0	0.6:1:2.17:2.26
	F-1/1-20													
	S-1/1-10												10.0	0.6:1:1.42:3.01
	F-1/1-10													
1/2	S-1/2-10	200	8	20 (18)	168	54	60	16	2013	1.76	207 Ø75 (F-TYPE)	1.28	10.0	0.6:1:1.42:3.01
	F-1/2-10													
1/4	S-1/4-10	100	4	10 (9)	84	27	30	8	207	2.14	203 Ø37.5 (F-TYPE)	1.02	10.0	0.6:1:2.17:2.26
	F-1/4-10													
	S-1/4-5												5.0	0.6:1:0.4:4.3
	F-1/4-5													
1/8	S-1/8-2.5-1	50	2	5 (4.5)	42	13.5	15	4	203	1.57	2*1 Ø18.75 (F-TYPE)	0.42	2.5	0.6:1:0.4:4.3
	S-1/8-2.5-2													
	F-1/8-2.5-1													
	F-1/8-2.5-2													

NOTE: REINFORCEMENT YIELD STRENGTH; σ_y (kgf/cm²)
 D25=3340, D13=3480, D7=3010, D3=3380 (for tens.reinf.)
 D10=3730, D7=3010, D3=3380, #1=plano wire (for stirrup)

1/4、1/8供試体では、各々の縮小率にあわせて10、5、2.5mmとした。また、1/1、1/4スケール供試体には、1/2供試体と同一のコンクリート(G_m=10mm)で作成したものを用意した。

2.2 使用材料

コンクリートは、普通ポルトランドセメント、細骨材に城陽山砂、粗骨材に野洲川砂利を使用した。配合は水セメント比60%、骨材容積率65%と一定で、骨材最大寸法 G_m のみ異なる。 $G_m=5、2.5mm$ の配合では高性能流動化剤（セメント量の1.6%）を添加した。重量配合比は表-1中に示す。また梁寸法に比例した大きさのシリンダー(1/2、1/4、1/8供試体それぞれに対し、 $\phi 5、2.5、1.25cm$ のシリンダー)を $\phi 10cm$ の標準シリンダーと共に作成した。養生は現場湿布養生である。鉄筋の降伏強度は表-1脚注に併記する。

2.3 荷荷方法

3点曲げ荷荷を行った。環境条件を揃えることに注意し、実験終了まで供試体の湿潤を保持した。はり中央のたわみ、曲げスパンの曲率を計測し、ひびわれは、1/1、1/2供試体ではルーペで、1/4、1/8供試体では実験終了後に実体顕微鏡（拡大率15~60倍）で観察した。

3. 実験結果と検討

3.1 概要

図-2に供試体の最終ひびわれ状況を示す。Fシリーズは曲げ圧縮破壊、Sシリーズはせん断破壊である。表-2にそれぞれFシリーズ、Sシリーズの実験結果一覧を示す。耐力はすべて自重の補正を行ってある。試験時材令の強度管理用シリンダーの圧縮、割裂強度は表中に併記してある。シリンダーの圧縮強度については寸法による影響は明確でないが、割裂強度は寸法が小さくなるほど大きくなるという傾向が強く表れている。

3.2 Fシリーズ供試体の寸法効果

曲げ降伏する供試体のひびわれ状況は、図-2に示すように縮小化に伴う差は見られず、表-2に示すように、相似供試体での曲げひびわれの本数もほぼ等しい。また曲げひびわれ強度はシリンダー割裂強度の寸法効果と

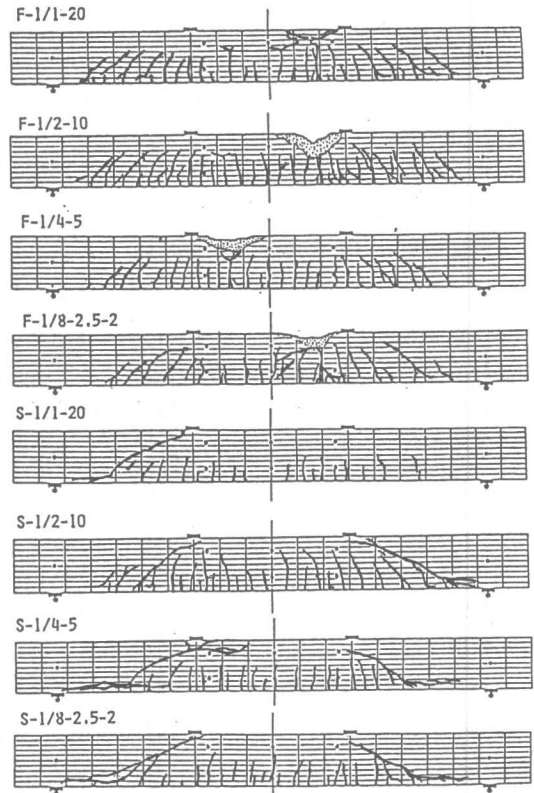


図-2 実験終了後のひび割れ状況図

表-2 実験結果一覧表

SPECIMEN DESIGNATION	CONCRETE STRENGTH				CRACKS (MIDSPAN)			Mu-exp (kgf cm)	Mu-exp bd ² (kgf/cm ²)	Mu-cal 0.9 σ_y ·At·d (kgf cm)	Mu-exp Mu-cal
	Fc		Ft		NUMBER	AVERAGE CRACK SPACING	MINIMUM SPACING (cm)				
	$\phi 10$	scale	$\phi 10$	scale							
F-1/1-20	220	---	23.7	---	14	8.57	3.5	1100000	53.0	1100000	1.0
F-1/1-10	252	---	22.9	---	9	13.3	10.0	1070000	51.6	1100000	0.97
F-1/2-10	252	247	22.9	28.3	14	4.20	1.5	139000	53.6	143000	0.97
F-1/4-10	252	274	22.9	25.5	13	2.31	1.0	18700	57.7	18800	0.99
F-1/4-5	247	229	23.3	23.1	12	2.50	1.3	18700	57.7	18800	0.99
F-1/8-2.5-1	182	159	18.0	21.2	10	1.50	0.4	1960	48.4	1940	1.01
F-1/8-2.5-2	182	159	18.0	21.2	11	1.36	0.3	1890	46.7	1940	0.97

SPECIMEN DESIGNATION	CONCRETE STRENGTH				MAXIMUM SHEAR; Q* (kg)	$\tau=Q/bd$ (kgf/cm ²)	$\tau/\sqrt{F_c^*a}$	$\tau/\sqrt{F_c^*b}$	τ/F_t^*a	τ/F_t^*b
	Fc		Ft							
	10 scale	10 scale	10 scale	10 scale						
S-1/1-20	260	---	28.0	---	6250	10.9	0.676	0.676	0.389	0.389
S-1/1-10	259	---	26.0	---	5440	9.44	0.587	0.587	0.363	0.363
S-1/2-10	259	260	26.0	32.5	1500	10.4	0.646	0.645	0.400	0.320
S-1/4-10	259	320	26.0	31.9	600	16.7	1.04	0.922	0.642	0.524
S-1/4-5	269*	274	21.6	28.1	530	14.7	0.896	0.888	0.680	0.523
S-1/8-2.5-1	223	227	19.9	32.4	128	14.2	0.951	0.942	0.713	0.438
S-1/8-2.5-2	223	227	19.9	32.4	122	13.6	0.911	0.902	0.683	0.419

Q: MAXIMUM SHEAR ADDING THE DEAD LOAD *; STRENGTH EVALUATED IN $\phi 5$ Cylinder.
 F_c^*a ; STRENGTH BY 10 Cylinder F_c^*b ; STRENGTH BY SCALED Cylinder
 F_t^*a ; STRENGTH BY 10 Cylinder F_t^*b ; STRENGTH BY SCALED Cylinder

同様に寸法の小さい梁ほど大きくなる傾向にある。図には示さないが、モーメント-曲率関係、荷重-変形関係上では寸法効果は顕著でなく、曲げ終局強度も計算値とよく一致する。以上のことから、全般的に寸法の相違は重大な影響を及ぼさないと結論できる。

3.3 Sシリーズ供試体の寸法効果

せん断破壊する供試体のひびわれ状況は、図-2に示すように寸法変化に伴う差は顕著でないにも関わらず、せん断強度は変化した。

図-3(a)は、同一コンクリートを用いた場合の実験結果を既往のせん断強度の寸法効果指標式と共に、梁有効せい180mmの強度に対する強度比で表したものである。指標式は、(1)Reinhardtが指摘した供試体寸法の2乗根に反比例するという線形破壊力学(LEFM)による関係[3]、(2)Bazant等の提案する最大骨材寸法(G_m)と供試体寸法の関数で表される式[4]、(3)Gustafsson等の提案する破壊エネルギー G_f に基づく特性長さ l と供試体寸法の比の4乗根に反比例するという式[2]である。いずれも標準シリンダーの圧縮強度の平方根でせん断強度を無次元化し、その強度比と各推定曲線との関係を記してある。なお指標式中の破壊エネルギー G_f は実測していないため、CEB-FIPモデルコードの改訂案[5]の値を補間して与えた。ここにLeonhardtらの実験結果[6]も同時に記す。実験結果は、線形破壊力学(LEFM)から得られる関係よりは緩やかな推移を示している。一方他の指標式では、供試体を縮小化した場合かなり実験結果より低く評価している。

図-3(b)にはモデルコンクリートを用いた場合の各指標式と本実験結果を示し、図-3(c)にはTaylorの実験結果[7]との関係を示す。これらの図からは、Bazantらの指標が比較的实验結果と適合している。材料の基本特性値の不変量としての性格をもつのはGustafssonらの指標であるが、マイクロコンクリートまでのせん断強度評価にはこの指標の4乗根に反比例するとの経験則は十分でない。

図-4は、スケールシリンダーの割裂引張強度でせん断強度を無次元化した場合の寸法効果を示す。縮小シリンダーの割裂試験自体が誤差を大きく含むことを念頭におく必要があるが、1/4 供試体の鉄筋比が大きいことを考慮すると寸法による差はかなり小さく、骨材径の5倍のシリンダーの割裂引張強度を用いてせん断強度を評価すると寸法効果がなくなることを表している。

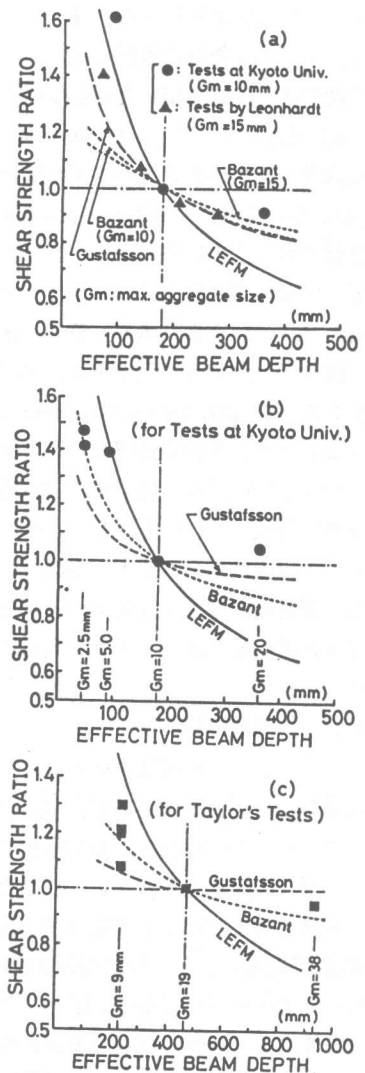


図-3 既往の寸法効果指標式と実験結果の比較

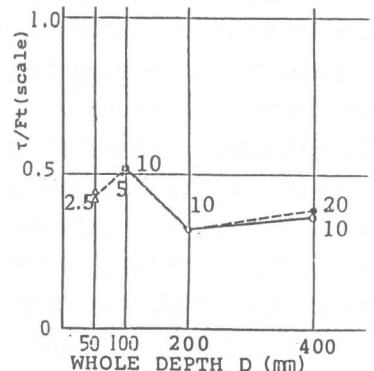


図-4 スケールシリンダーの割裂強度で評価したせん断強度

4. 有限要素法によるパラメーター解析

4.1 解析対象と解析方法

解析は、実験で用いたRC単純梁の1/1、1/2、1/4供試体を対象とし、供試体の縮尺率に応じて最大骨材粒径(G_m)を比例させた場合と一定($G_m=10\text{mm}$)とした場合について行った。解析では、最大骨材粒径の大小に関わらずコンクリートの圧縮強度、引張強度は同一で、鉄筋比も共通である。表-3に、解析供試体の一覧表を示す。

表-3 解析供試体一覧表

SPECIMEN DESIGNATION	SCALE	Pt	Pw	MAX AGGREGATE
S-1/1-20	1/1	1.75%	0%	20mm
F-1/1-20			0.6%	
S-1/1-10			0%	10mm
F-1/1-10			0.6%	
S-1/2-10	1/2	1.75%	0%	10mm
F-1/2-10			0.6%	
S-1/4-10	1/4	1.75%	0%	10mm
F-1/4-5			0.6%	

Yield strength of main bar and stirrup ; 3500 kgf/cm²

図-5に要素分割図を示す。実験結果のひびわれパターンに基づいてクラックリンク要素を配し、コンクリート、主筋とも一様ひずみ三角形要素に分割した。鉄筋とコンクリート間の付着はボンドリンク要素で、せん断補強筋はトラス要素で表した。

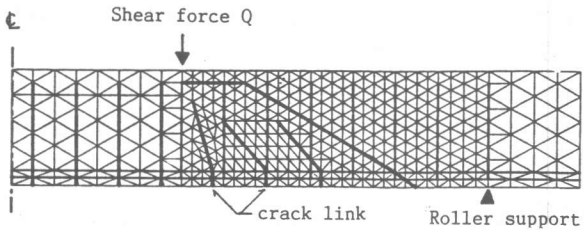


図-5 要素分割図

解析は平面応力解析であり、荷重増分型の非線形解析を行った。

4.2 解析の材料モデル

コンクリートの構成モデルには、直交異方性モデルを用いた。図-6に、主応力方向の応力-歪関係をコンクリートの材料特性と共に示す。主筋は、弾性としミーゼスの降伏強度に達した時点で曲げ降伏と見なし解析を終了した。主筋並びにせん断補強筋は、降伏強度 3500kgf/cm²、弾性係数2000000kgf/cm²とした。付着応力-すべり関係は、図-7に示すようにすべりを鉄筋径で無次元化したモデルを用いた。また、クラックリンクは、リンクの伝達応力が引張強度に達するまでは弾性で、引張強度に達した後の引張軟化域は直線で表した。その勾配は、図-8に示すようにCEB-FIPモデルコードの改訂案[5]から求めた破壊エネルギー G_f に等しくなるように決定した。解析に用いた破壊エネルギー G_f を図-8中に示す。ひび割れ発生後の骨材の噛み合いは、図-9に示すようにひび割れ面でのせん断すべりがひび割れ幅の3分の1に達した時に生じ、その後のせん断応力-せん断すべり剛性は、青柳等の提案式[8]を参考に $36/w$ (kgf/cm³)とした (w ; ひび割れ幅(cm))。骨材径のせん断すべり剛性に及ぼす影響については、既往の研究では必ずしも大きくないとするものもあり、解析では考慮していない。

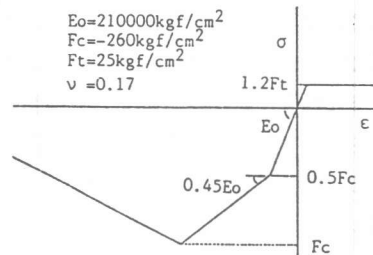


図-6 コンクリートの応力-歪関係

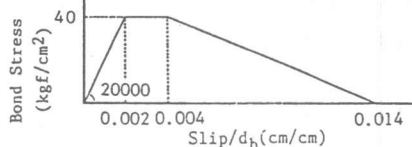


図-7 付着応力-すべり関係

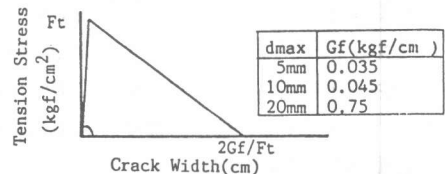


図-8 ひび割れ面での引張応力伝達特性

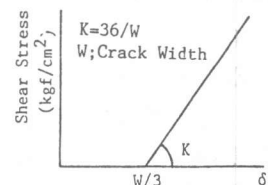


図-9 ひび割れ面でのせん断応力伝達特性

4.3 解析結果の検討

解析から得られた最大耐力を表-4に示す。Fシリーズの最大耐力は主筋が弾性域にとどまる最終荷重段階であるので、部材の曲げ降伏荷重よりは若干低いものとなっているが、実験結果と同様寸法の違いによる影響はほとんど表れていない。

図-10に、 $Q/bd - \delta/L'$ (供試体寸法で無次元化した曲げスパン中央点のたわみ) 曲線を示す。(a)のFシリーズでは1/4供試体の変形が若干小さいことを除いて供試体寸法、最大骨材粒径の違いによる影響はほとんど表れていない。一方、Sシリーズの最大耐力には、寸法効果が明確に表れている。しかしその効果は、実験結果に比べかなり緩慢である。図-10(b)に同一コンクリート、(C)に供試体の縮尺に合わせて最大骨材粒径を変化させたモデルコンクリートを用いたSシリーズの $Q/bd - \delta/L'$ 曲線を示す。モデルコンクリートの場合ほとんどせん断強度に寸法効果が表れていないことがわかる。

図-11に、同一コンクリートを用いたSシリーズ供試体のせん断強度を1/2供試体に対する強度比で実験値と共に示す。なお、実験値は $\phi 10$ シリンダー割裂強度で正規化している。実験における1/4供試体の引張鉄筋比が大きかったことを考慮にいれても解析値はかなり実験値より低い。これは、1/4供試体においては、せん断スパン域での要素寸法は最大骨材径を下回ることになり、このような場合にコンクリート要素の構成関係を均質材料として取り扱うことになりかなり無理があったと思われる。

図-12に、同一コンクリートを用いたSシリーズ供試体の $Q/bd = 12.2 \text{ kgf/cm}^2$ (1/1供試体のせん断強度時)におけるひび割れ状況を示す。この図から、1/2及び1/4供試体では斜めひび割れが引張軟化域に留まっているのに対し1/1供試体ではこのひび割れ面は完全に分離し骨材の噛み合いによるせん断伝達も行われていないのが特徴である。従って、本解析対象では骨材の噛み合いによるせん断伝達能力は、せん断強度に寄与していないことを示している。また、このひび割

表-4 解析結果の一覧表

SPECIMEN DESIGNATION	MAX SHEAR FORCE(kgf)	Q/bd (kgf/cm ²)
F-1/1-20	9800	17.0
F-1/1-10	9800	17.0
F-1/2-10	2450	17.0
F-1/4-5	625	17.4
S-1/1-20	7400	12.8
S-1/1-10	7000	12.2
S-1/2-10	1900	13.2
S-1/4-10	500	13.9
S-1/4-5	475	13.2

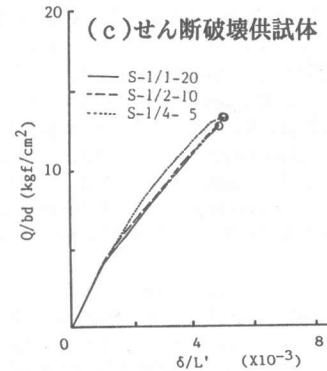
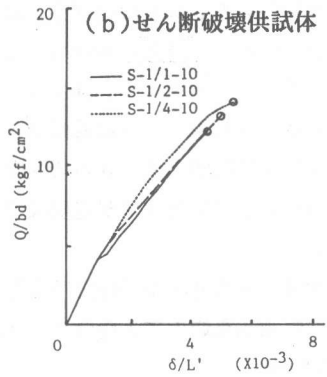
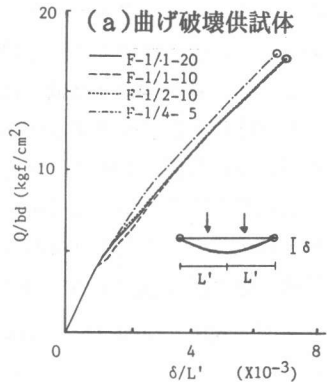


図-10 荷重-変形曲線

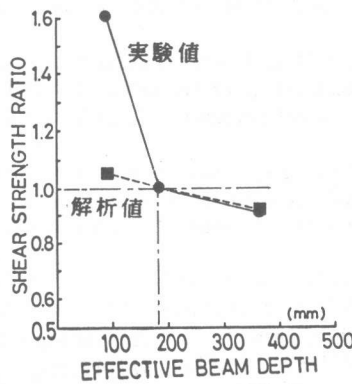


図-11 せん断強度の寸法効果の比較

れ位置における引張主筋のダボ作用による伝達せん断力は、829kgfであり、これは総せん断力の約1/8に相当する。これらのことから、本解析における寸法効果は、供試体寸法の相違によるせん断ひび割れ幅の差に起因するひび割れ直交方向の応力伝達状況の違いが主要因であるといえる。Gfのみを変化させた解析では、ほとんど寸法効果が表れていない。これに対し、実験でのせん断強度は、モデルコンクリートを用いた場合においても1/4、1/8供試体での強度上昇が著しい。この違いは、最大骨材径が5mm以下になるとコンクリートの物性は急激に変化する[9]にもかかわらず、本解析に用いた構成関係には全く考慮されていないこと、さらにGfがCEBモデルコード中の値から外挿によって与えたことにあると思われる。し

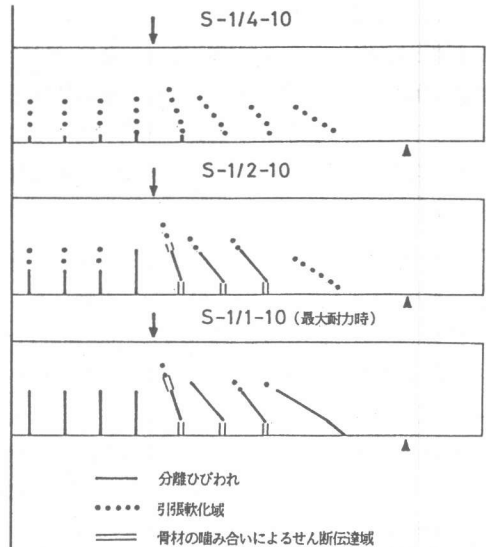


図-12 せん断破壊供試体のひび割れ状況

かし骨材最大径10mm以上の1/1と1/2供試体ではせん断強度は同等であると考えてよく、モデルコンクリートを用いた場合には寸法効果はほとんど表れていない。

5. まとめ

○本実験より、はりの曲げ性状に対する寸法効果は、ひび割れ強度時にわずかに認められるが、強度、変形、ひび割れ本数などにはほとんど表れない。

○はりのせん断強度は、はり寸法に比例させたシリンダーによるコンクリートの割裂強度で評価すれば寸法効果は大いに低減できる。

○本解析の範囲では、せん断強度の寸法効果はせん断ひび割れの発生、進展過程でのコンクリートの引張応力伝達性状が主要因であり、破壊エネルギーGfから評価することができることがわかった。

○骨材の最大寸法を5mm以下としたコンクリートは、通常の物性とは異なるため、既往の寸法効果の評価式を適用する場合には注意を要する。

参考文献

- [1]Z.P.Bazant et.al.; "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams," ACI Journal Proc. V.81, No.5, 1984
- [2]Per J.Gustafsson and A. Hillerborg; "Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete," ACI Journal Proc. No.3, 1988,
- [3]H.W. Reinhardt; "Masstabeinfluss bei Schubversuchen im Licht der Bruckmechanik," Beton und Stahlbetonbau (Berlin), No.1, 1981
- [4]Z.P. Bazant and H. Sun; "Size Effect in Diagonal Shear Failure: Influence of Aggregate Size and Stirrups," ACI Materials Journal Proc. Vol.84, No.4, 1987
- [5]COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON: CEB-FIP MODEL CODE 1990, BULLETIN D'INFORMATION, NO.190a 1988
- [6]F. Leonhardt and R. Walther; "THE STUTTGART SHEAR TESTS, 1961," C&CA Library Translation, No.111("Beton und Stahlbetonbau", Vol.56 No.12, 1961, Vol.57, Nos.2, 3, 6, 7 and 8, 1962)
- [7]H.P.J. Taylor; "The Shear Strength of Large Beams," Proceedings ASCE, V.98, ST11, 1972
- [8]青柳, 山田; "面内力を受ける鉄筋コンクリートシェル要素の耐力変形特性", 土木学会論文報告集 第331号, 1983年3月
- [9]藤井, 中西, 石塚, 森田; "鉄筋コンクリート縮小模型実験における寸法効果に関する研究(その1. コンクリート、付着特性の寸法効果)", 日本建築学会近畿支部研究報告集 昭和60年5月