

膨張 RC はりのせん断強度に及ぼす寸法および鉄筋比の影響とその評価

広島大学大学院 学生会員 ○阪本祐人 笹田航平 宮本和也
 広島大学大学院 正会員 半井健一郎 小川由布子
 広島大学大学院 フェロー会員 佐藤良一

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の収縮ひび割れ制御の要求が高まっており、コンクリートの収縮が構造物の性能に及ぼす影響の評価や制御に関する研究が注目されている。

また、コンクリートの体積変化は RC はりのせん断強度に影響を与えることが知られており、コンクリートの膨張によって RC はりのせん断強度が向上することが報告されている¹⁾。コンクリートの体積変化を考慮した RC はりのせん断強度の評価手法の一例として、高強度コンクリートの過大な自己収縮の影響を考慮する手法である等価引張鉄筋比の概念²⁾が提案されている。

等価引張鉄筋比の概念は、膨張コンクリートを用いた RC はりのせん断強度の評価への拡張も試みられたが、普通強度の膨張コンクリートを用いた RC はりにおいては有効高さ 190mm の供試体に対する適用例しかなく、寸法の影響については実験的検討はなされていなかった。そこで著者らは水結合材比 50%の普通強度レベルで、ケミカルプレストレスを導入した有効高さ 250mm, 500mm の RC はりを用いて実験的検討を行った²⁾。

本検討では、有効高さ 250mm, 500mm の RC はりに加え 1000mm の RC はり供試体の載荷試験を実施し、普通強度膨張 RC はりに対して等価引張鉄筋比の概念を用いたせん断強度評価式の適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料と配合

表-1 に、本検討に用いたコンクリートの材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、混和材料には低添加型の石灰系膨張材および AE 減水剤を用いた。膨張材は標準添加量よりも多い 30kg/m³ をセメントに内割で添加した。表-2 に、コンクリートの配合を示す。水結合材比を 50%、単位水量

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類/物性
水	W	工業用水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3270cm ² /g
混和材	EX	低添加型石灰系膨張材(標準添加 20kg/m ³) 密度：3.16 g/cm ³ ，比表面積：3450 cm ² /g
細骨材	S	砕砂(石英粗面岩)，粗骨材最大寸法：20mm 表乾密度：2.62g/cm ³ ，吸水率：1.55%
粗骨材	G	碎石(石英粗面岩) 表乾密度：2.65g/cm ³ ，吸水率：0.379%
混和剤	AE	AE 減水剤標準型 I 種

表-2 コンクリートの配合

水結合材比 %	細骨材率 %	単位量 kg/m ³					
		W	C	EX	S	G	AE
50	45.1	175	320	30	791	976	2.63

表-3 RC はり供試体諸元

供試体名	寸法				軸方向鉄筋	
	d mm	a mm	b mm	a/d	p _s %	E _s kN/mm ²
Ex-0.8-25C,D	250	750	200	3	0.794 (D16)	186
Ex-1.6-25A,B					1.52 (D22)	201
Ex-0.8-50A,B	500	1500			0.760 (D22)	201
Ex-1.6-50A,B					1.59 (D32)	201
Ex-0.8-100A,B	1000	3000			0.78(D22)	201
Ex-1.6-100A,B					1.60(D32)	201

※ここで、d：有効高さ、a：せん断スパン、b：はり幅、p_s：引張鉄筋比、E_s：弾性係数を示す。
 ※鉄筋比の値の右の () は使用鉄筋径を示す。

は 175kg/m³ とした。全ての供試体で同一の配合のコンクリートを用いた。

2.2 コンクリートの力学特性

RC はり供試体に使用したコンクリートの強度を測定するため、圧縮強度および静弾性係数試験用に Φ100×200mm の円柱供試体を作製、割裂引張強度試験用に Φ150×200mm の円柱供試体を作製し、はりの載荷試験材齢に合わせて材料強度試験を実施した。

2.3 RC はり供試体の作製と載荷試験

(1) 諸元

RC はり供試体の概要を図-1 に、RC はり供試体諸元を表-3 に示す。引張鉄筋のみ使用し、引張鉄筋比の影響を確認するために、引張鉄筋比は、0.8%および約 1.6% とした。また、有効高さを 250mm, 500mm, 1000mm の 3 水準とし、鉄筋比と有効高さの組み合わせから異なる 6 種類の諸元の供試体を各 2 体作製した。供試体名称は Ex-(鉄筋比[%])-(有効高さ[cm])-供試体番号とした。

(2) 養生条件

RC はり供試体は、温湿度が管理されていない屋内で
存置し、その室内の温湿度を計測した。

十分なケミカルプレストレスを導入するために打込
み直後に打込み面をラップフィルムおよび湿布で覆い、
さらに型枠全体にブルーシートを掛け、水分逸散を防い
だ。材齢 7 日以降に型枠を脱枠し、供試体表面をアルミ
粘着テープで被覆し、載荷試験まで封緘状態を維持した。

(3) 鉄筋ひずみの経時変化計測

打込み直後から鉄筋ひずみの経時変化を計測し、鉄筋
ひずみを把握した。本検討では、支間中央断面をはさん
で両側の計測値を平均した値を鉄筋ひずみとした。また、
RC はり供試体の内部温度は、支点から約 150mm 外側
の鉄筋上面で熱電対により温度を計測した。

(4) 載荷試験

載荷試験は 2 点集中荷重による静的載荷とした。荷重、
支間中央たわみ、せん断スパン内の変形、鉄筋ひずみを
それぞれ計測し、荷重ごとにひび割れ状況を観察した。

図-1 に示した 6 変位計を 1 組として設置した変位計
群からはせん断変位および鉛直開口方向変位を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの力学特性

圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度の試験結果を表
-4 に示す。バッチ間および Ex-0.8, Ex-1.6 間で圧縮強
度および静弾性係数に有意な差異が生じた。

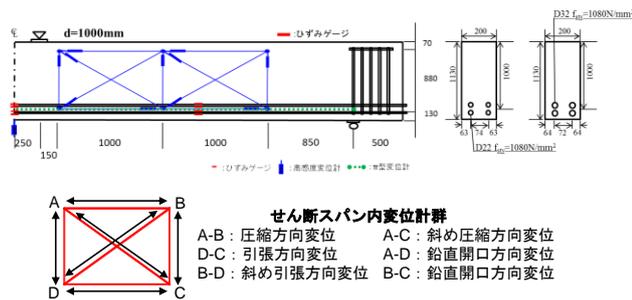


図-1 RC はり供試体概要

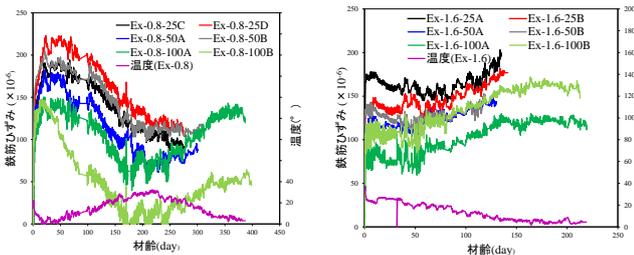


図-2 鉄筋ひずみおよび内部温度 (左 Ex-0.8, 右 Ex-1.60)

3.2 鉄筋ひずみの経時変化

Ex-0.8, Ex-1.6 シリーズの RC はり供試体のせん断ス
パン中央に生じた鉄筋ひずみ、内部温度を図-2 に示す。
載荷時の鉄筋ひずみを表-4 に示す。材齢 28 日におけ
る Ex-0.8 シリーズの鉄筋ひずみは約 $124 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$
であり、Ex-1.6 シリーズの鉄筋ひずみは約 $70 \times 10^{-6} \sim$
 140×10^{-6} であった。また、載荷時の鉄筋ひずみは 46×10^{-6}
 $\sim 196 \times 10^{-6}$ であった。

3.3 載荷試験結果

ひび割れ図面を図-3 に示す。有効高さを大きくする
と、ひび割れ本数が増え、有効高さに対する載荷点から
の主たる斜めひび割れ発生位置までの距離の比が相対
的に大きくなった。また、荷重と鉛直開口方向変位の関
係を図-4 に、せん断変位の関係を図-5 に、支間中央
たわみの関係を図-6 に示す。本検討では、ひび割れ観
察、鉛直開口方向変位、あるいはせん断変位により斜め
ひび割れ発生荷重を決定した。図中の鉛直開口方向変位
やせん断変位は、破壊側で判定に用いたものを示した。
決定した斜めひび割れ発生点を荷重-変位関係上に○
印で示し、決定したせん断強度を表-4 に示した。

3.4 せん断強度の評価手法の適用性の検討

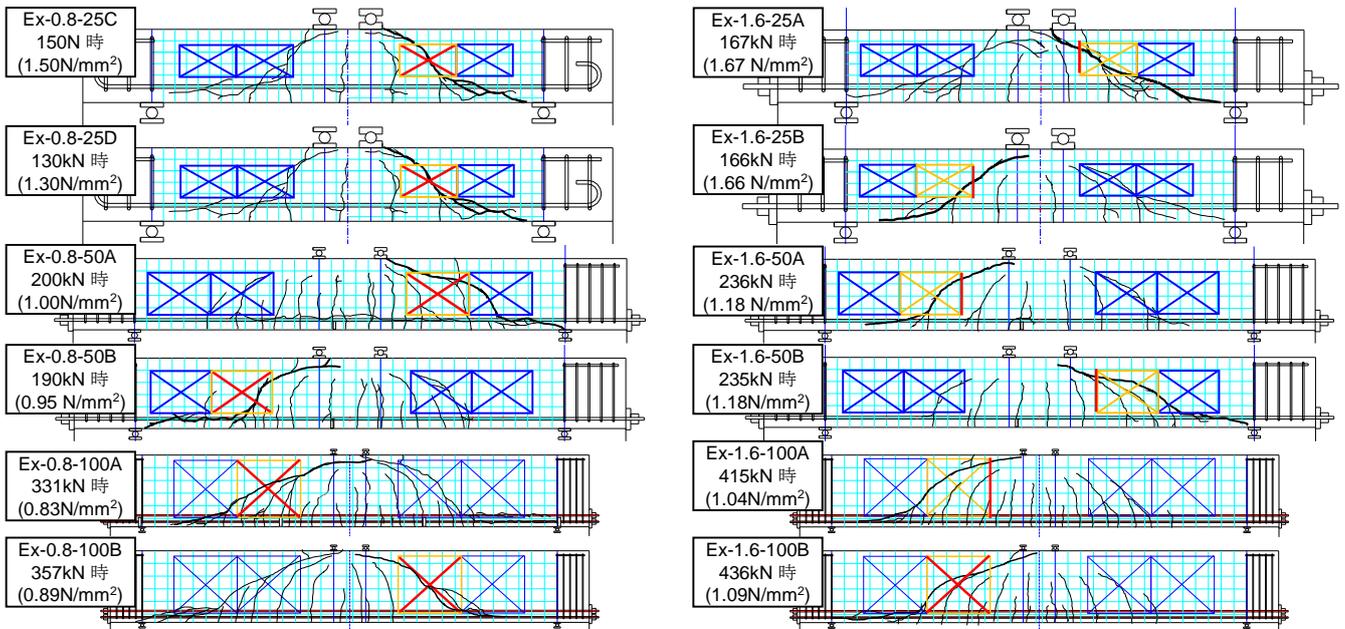
本節では、二羽式および等価引張鉄筋比の概念を二羽
式に導入した算定式 (以下、等価式) を用いて評価した
せん断強度の算定値を、せん断強度の実験値と比較する。
検討対象とした二羽式および等価式を式(1)および式(2)、
(3)に示す。

$$\tau_{c,cal} = 0.20 f'_c \frac{1}{3} p_s \frac{1}{3} \left(\frac{d}{1000} \right)^{-\frac{1}{4}} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) \quad (1)$$

$$\tau_{c,cal,e} = 0.20 f'_c \frac{1}{3} p_{s,e} \frac{1}{3} \left(\frac{d}{1000} \right)^{-\frac{1}{4}} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d} \right) \quad (2)$$

$$p_{s,e} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s - \epsilon_{s0,def}} p_s \quad (3)$$

ここに、 $\tau_{c,cal}$: 二羽式により算定されるせん断強度、
 $\tau_{c,cal,e}$: 等価式により算定されるせん断強度、 f'_c : コン
クリートの圧縮強度、 p_s : 公称引張鉄筋比、 $p_{s,e}$: 等価引
張鉄筋比、 d : 有効高さ、 a : せん断スパン、 ϵ_s : 曲げ理
論を用いて求めた斜めひび割れ発生時の載荷点から
 $1.5d$ の引張鉄筋ひずみ、 $\epsilon_{s0,def}$: コンクリート応力がゼ
ロ状態になる時の載荷点から $1.5d$ の引張鉄筋ひずみと
する。



※ 図中の黒太線は進展した斜めひび割れ，黒細線は荷重により生じたひび割れを示す。
 ※※図中の青線，赤線，橙線はせん断スパン内の変位計を示す。
 橙線は斜めひび割れが発生を記録した1組のせん断スパン内の変位計群を示す。
 赤線は斜めひび割れ発生根拠とした鉛直開口変位の計測位置，あるいはせん断変位計の計測位置を示す。

図-3 ひび割れ図面 (斜めひび割れ発生平均応力時)

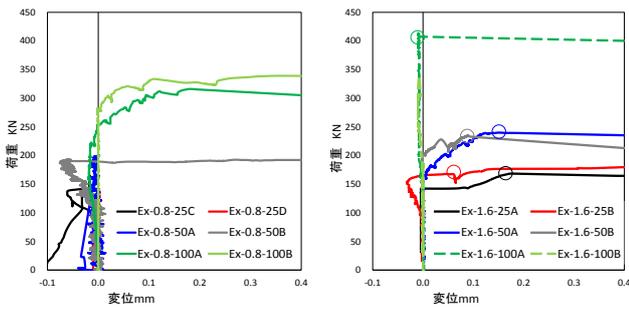


図-4 荷重-鉛直開口方向変位 (左 Ex-0.8, 右 Ex-1.60)

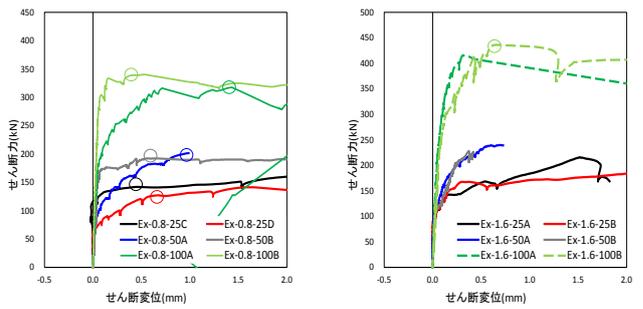


図-5 荷重せん断変位関係 (左 Ex-0.8, 右 Ex-1.60)

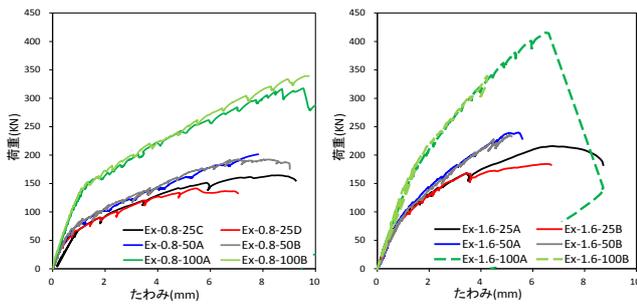


図-6 荷重たわみ関係 (左 Ex-0.8, 右 Ex-1.60)

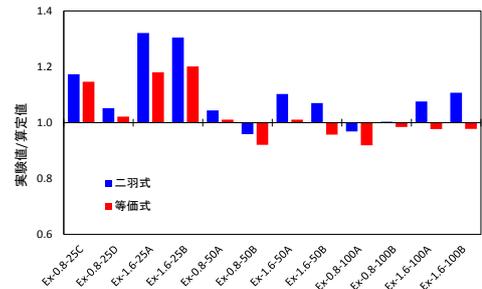


図-7 せん断強度の評価比較

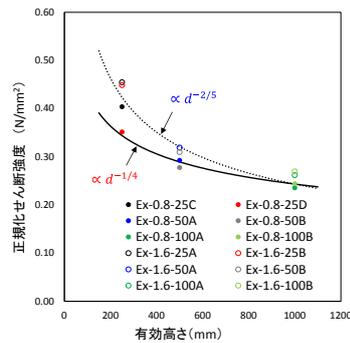


図-8 有効高さ-正規化せん断強度

表-1 実験結果

	載荷時					鉄筋比		せん断強度 (斜めひび割れ発生)						最大 せん断強度 (実験値)	破壊 形態			
	材齢 day	圧縮 強度 fc N/mm ²	静弾性 係数 Ec kN/mm ²	引張 強度 ft N/mm ²	鉄筋 ひずみ εs ×10 ⁻⁶	公称 比率 ps %	等価 比率 Pse %	実験値			二羽式		等価式					
								算定値	実験値/算定値	平均 (標準偏差)	算定値	実験値/算定値	算定値			平均 (標準偏差)		
																	τc,exp N/mm ² (*)	τc,cal N/mm ² (**)
Ex-0.8-25C	278	54.6	35.2	3.41	82	0.794	0.852	1.42 (SD)	1.21	1.17	1.10	1.24	1.15	1.03	1.65	斜め 引張		
Ex-0.8-25D	281	54.6	35.2	3.41	104	0.794	0.867	1.27 (SD)	1.21	1.05		1.25	1.02		1.41	斜め 引張		
Ex-0.8-50A	301	48.8	33.5	3.51	87	0.760	0.838	1.01 (SD)	0.965	1.04		1.00	1.01		1.01	斜め 引張		
Ex-0.8-50B	308	54.6	35.2	3.41	114	0.760	0.859	0.961 (SD)	1.00	0.959		1.04	0.921		0.963	せん断 圧縮		
Ex-0.8-100A	387	49.0	36.7	3.10	120	0.780	0.91	0.79 (SD)	0.82	0.97		0.86	0.92		0.83	せん断 引張		
Ex-0.8-100B	399	54.4	36.5	4.22	46	0.780	0.82	0.85 (SD)	0.85	1.00		0.86	0.98		0.89	せん断 引張		
Ex-1.6-25A	140	33.4	30.3	3.03	196	1.52	2.13	1.68 (VO)	1.27	1.32		(0.11)	1.43		1.18	(0.09)	2.16	せん断 圧縮
Ex-1.6-25B	143	34.4	29.0	3.02	144	1.52	1.95	1.68 (VO)	1.29	1.30			1.40		1.20		1.84	せん断 圧縮
Ex-1.6-50A	130	33.4	30.3	3.03	117	1.59	2.06	1.20 (VO)	1.09	1.10			1.19		1.01		1.20	せん断 圧縮
Ex-1.6-50B	121	34.4	29.0	3.02	150	1.59	2.22	1.17 (VO)	1.10	1.07			1.23		0.957		1.17	せん断 引張
Ex-1.6-100A	219	38.9	33.6	3.24	117	1.60	2.14	1.04 (VO)	0.96	1.08	1.06		0.98	1.04	せん断 引張			
Ex-1.6-100B	212	41.4	32.8	3.20	152	1.60	2.33	1.09 (SD)	0.98	1.11	1.12		0.98	1.09	せん断 引張			

* せん断強度内の () は、強度の決定に用いた変位の種類の略記を示し、SD：せん断変位、VO：鉛直開口方向変位とする。
** (算定値)-(実験値)とする。

せん断強度の実験値および算定値を表-4に示す。二羽式と等価式の算定値の差は、膨張による鉄筋ひずみの大小あるいは供試体諸元により、約0.03~0.16N/mm²であった。式(1)、(2)の評価精度を相互比較するために、実験値を算定値で除して正規化した値を表-4に、評価精度の相互比較結果を図-7に示す。ここでは二羽式で除したものを実験値/二羽式とし、等価式で除したものを実験値/等価式とする。図より、等価式は、Ex-0.8-100A,B Ex-0.8-50Bの場合を除き、二羽式に対してより1に近い値になった。また、実験値/二羽式の平均値は1.10、平均値に対する標準偏差は0.11であり、実験値/等価式の平均値は1.03、平均値に対する標準偏差は0.09であった。等価式を用いると、実験値/算定値が1により近接し、標準偏差の程度も抑えられた。すなわち、本検討において普通強度膨張RCはりにおける等価式の適用性が確認された。

3.5 せん断強度と有効高さの関係

圧縮強度および公称鉄筋比率の1/3乗で除すことで正規化したせん断強度(=Vc/bc/f'c^{1/3}*Ps^{1/3})と有効高さの関係を図-8に示す。図より寸法依存性は、鉄筋比0.8%の供試体では二羽式³⁾で評価されている寸法依存性である

dの-1/4乗に依存したが、鉄筋比1.6%では影響が顕著で-2/5乗に依存した。ここで-2/5乗は、高強度コンクリートにおける寸法依存性⁴⁾と一致する値であった。

4. まとめ

膨張コンクリートを用いたRCはりの載荷試験を実施し、せん断強度の評価手法の適用性について検討を行った。本試験により、RCはりのせん断強度の評価は、等価鉄筋比の概念を二羽式に導入することで実験値に対する算定値の比の平均が1.10から1.03に改善され、標準偏差も0.12から0.10小さくなり、精度が向上した。

5. 参考文献

- (1) 岡村甫, 辻幸和: ケミカルプレストレストコンクリート部材の力学的諸性状, セメント技術年報, 1972
- (2) 笹田航平ほか: 寸法および鉄筋比の異なる膨張RCはりのせん断強度評価, コンクリート工学年次論文集, 2014(掲載予定)
- (3) 河金甲, 佐藤良一: 高強度RCはりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価, 土木学会論文集, Vol.65, No.2, pp.178-197, 2009.4
- (4) 二羽淳一郎ほか: せん断補強鉄筋を用いない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
- (5) 鈴木基行ほか: コンクリート圧縮強度130MPaまでを対象とした腹鉄筋のないRCはりのせん断強度式, 土木学会論文集, V-60, pp.75-91, 2003.