

論文 乾燥収縮が RC はりのせん断強度低下に及ぼす影響評価

兵頭 彦次^{*1}・中山 紘紀^{*2}・宮本 和也^{*2}・佐藤 良一^{*3}

要旨：コンクリートの過大な乾燥収縮が、せん断補強筋のない RC はり部材のせん断挙動に及ぼす影響を評価することを目的とし、強度レベル 50N/mm² の普通コンクリートを対象に、有効高さ(250mm, 500mm, 1000mm)および乾燥収縮の有無をパラメータとした載荷実験を行った。その結果、乾燥収縮によって斜めひび割れ発生時のせん断強度が低下すること、寸法効果が大きくなることを確認した。等価引張鉄筋比の概念を適用することで、これらを統一的に評価が可能であることを示すとともに、既存のせん断評価式に組み込むことでせん断強度の予測精度の向上が図れることを明らかとした。

キーワード：せん断強度, 乾燥収縮, RC はり, 寸法効果, 等価引張鉄筋比, 普通コンクリート

1. はじめに

近年、骨材品質にともなうコンクリートの高収縮化が大きな問題となっている。収縮によってひび割れ発生リスクが高まることは良く知られているが、実構造物において甚大な損傷¹⁾が生じたことから、改めて構造性能への影響を評価する重要性が認識されてきている。

乾燥収縮は、ひび割れ、変形、プレストレスロスなどの構造性能に影響を及ぼす。土木学会コンクリート標準示方書[設計編]²⁾でも設計段階からこれらの影響を考慮できるようになっている。ただし、終局耐力に及ぼす影響はそれほど大きくないと認識されており、一般に収縮が考慮されることはほとんどない。実際、RC はり部材の曲げ耐力には乾燥収縮の影響がほとんどないことが報告されている³⁾。一方、せん断耐力については、最近、高強度コンクリートの自己収縮によって耐力低下を生じることが、実験的に確認された。また、その評価手法として等価鉄筋比という新たな概念も提案されている⁴⁾。

普通コンクリートにおいては乾燥収縮が主となるが、低品質骨材によって過大な収縮が生じた場合、高強度RCと同様に、せん断耐力の低下を生じる可能性が考えられる。筆者らは、強度レベルが 30N/mm² のコンクリートを対象に、過大な乾燥収縮によってせん断耐力が低下することを確認している^{5),6)}。また、森戸・半井はコンクリートの収縮量の大小によってせん断耐力が変化する⁷⁾ことを報告している。今後、実験データを蓄積することで現象の一般性を確認するとともに、乾燥収縮が及ぼす影響を定量化していくことが重要と考えられる。

本検討では、強度レベルを既報と異なる 50N/mm² に設定し、乾燥収縮がせん断強度に及ぼす影響評価およびその現象解明を目的として、乾燥収縮の有無、有効高さをパラメータとした RC はり部材の載荷試験を行った。ま

た、等価引張鉄筋比を用いたせん断強度評価の適用性についても併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

表-1 に、コンクリートの使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。細・粗骨材は、同一産地の硬質砂岩系の砕砂および砕石 2005 である。コンクリートの乾燥収縮が比較的大きいとされるものを用いており、収縮特性値(供試体寸法：10×10×40cm, 試験方法：JIS A 1129, 試験条件：20 水中-7 日, 20 -60%R.H.-6 か月の長さ変化率)は 1000×10⁻⁶以上となる。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤および AE 剤を用いた。比較として収縮を抑制する配合には、石灰系の低添加型膨張材を使用した。引張鉄筋には、PC 異形鋼棒 C 種 1 号(記号：SBPD1080/1230)を用い、曲げ降伏前にせん断破壊を生じるよう設計した。なお、載荷時の鉄筋とコンクリートのずれを防止する目的で、はり端部をアンカープレートで定着した。

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類
水	W	工業用水
セメント	C	普通ポルトランドセメント
混和材	EX	低添加型膨張材(石灰系)
細骨材	S	砕砂(硬質砂岩)
粗骨材	G	砕石 2005(硬質砂岩)
混和剤	-	高性能 AE 減水剤, AE 剤

表-2 コンクリートの配合

養生方法	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	EX	S	G
乾燥	35	41.0	170	486	-	686	1001
封緘	35	41.0	170	466	20	686	1001

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科 社会基盤環境工学専攻 (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究科 特任教授 工博 (正会員)

表-3 供試体諸元

W/B (%)	養生条件	供試体名	b (mm)	h (mm)	L (mm)	c (mm)	a (mm)	d (mm)	a/d	p_s (%)
35	封緘	S35-250EX-A,B	300	305	2300	200	750	250	3.0	1.03 (2D22)
		S35-500EX-A,B		580	4500	500	1500	500		1.06 (2D32)
		S35-1000EX-A,B		1130	7500	500	3000	1000		1.06 (4D32)
	乾燥	D35-250-A,B		305	2300	200	750	250		1.03 (2D22)
		D35-500-A,B		580	4500	500	1500	500		1.06 (2D32)
		D35-1000-A,B		1130	7500	500	3000	1000		1.06 (4D32)

b : はり幅, h : 高さ, L : 長さ, c : 載荷点距離, a : せん断スパン, d : 有効高さ, p_s : 引張鉄筋比($=A_s/bd$), A_s : 引張鉄筋の公称断面積

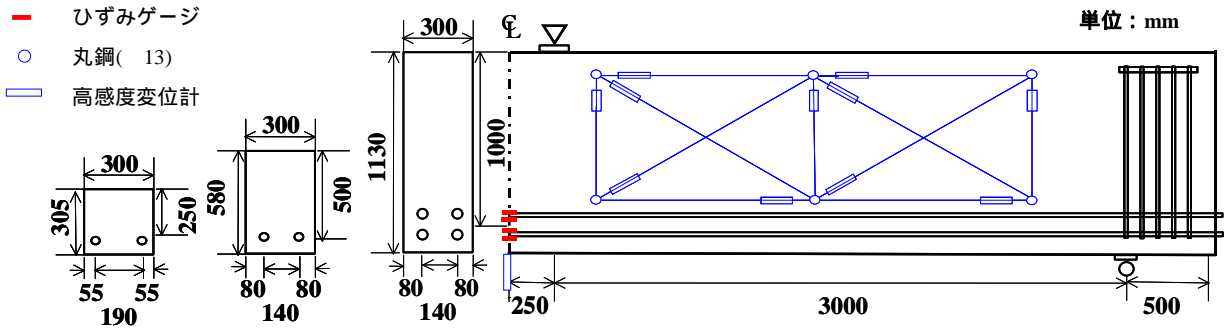


図-1 供試体概要

表-2に、コンクリートの配合を示す。単位水量は 170kg/m^3 、水結合材比は35%とした。スランプおよび空気量の目標値は、それぞれ $15 \pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5 \pm 1.5\%$ とし、高性能AE減水剤およびAE剤を用いて調整した。封緘養生するコンクリートには、自己収縮を抑制する目的で膨張材を 20kg/m^3 内割添加した。

2.2 供試体概要

RC はり供試体の諸元を表-3 に、断面図および有効高さ 1000mm の供試体の側面図を、図-1 に示す。本検討では、せん断補強筋のない RC はり部材を対象とする。せん断強度に及ぼす寸法の影響を検討するため、有効高さを 250mm, 500mm, 1000mm に変化させ、相似の3種類の供試体を用意した。有効高さによらず幅を 300mm, せん断スパン有効高さ比を 3.0 の一定とし、さらに引張鉄筋比は 1.03% ~ 1.06%と同程度に設定した。供試体は、乾燥収縮を生じさせないために封緘養生するもの、および乾燥養生するものとし、各水準 2 体ずつ作製した。

供試体を作製する際、型枠にはポリエステルフィルムとテフロンシートを設置し、摩擦を極力低減した。コンクリートの打込み終了後、打込み面をポリエステルフィルムと養生マットで覆い、材齢 7 日まで型枠内で養生した。脱型後、封緘養生するものについては、アルミ粘着テープを全面に貼り付け 載荷直前まで保存した。封緘、乾燥供試体ともに雨がかりのない屋内で保存した。それぞれ作製時期や保存期間が異なったが、養生中の相対湿度は平均で 65.9 ~ 67.4%であった。

載荷試験時のコンクリートの力学特性を確認するため、 $100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体(圧縮強度、ヤング係数

用)、 $150 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体(割裂引張強度用)、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体(破壊エネルギー用)を作製した。また、いずれも、RC はり供試体と同一環境で養生を行った。

2.3 試験方法

RC はり供試体の載荷試験方法は、2点集中荷重による単調載荷とした。測定項目は、荷重、支間中央位置のたわみ、曲げせん断区間のせん断変位とした。せん断変位は、曲げによる影響を除いた変位の鉛直成分であり、図-1に示す予め埋め込んだインサート金具に取り付けた丸鋼間の鉛直、水平、斜め方向変位を変位計によって測定し、既往の算定式⁸⁾に基づいて計算した。なお、いずれの評価においても、供試体の自重の影響は無視した。

コンクリートの収縮・膨張によってRC供試体の引張鉄筋に蓄積された養生期間中のひずみを、支間中央部に貼り付けた電気抵抗線式ひずみゲージ(ゲージ長: 5mm)で測定した。温度変化にともなう零点移動量は、コンクリート打込み時に埋設したダミー鉄筋のひずみを引張鉄筋の実測ひずみから差し引くことで補正した。

コンクリートの強度特性として、圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度、破壊エネルギーを測定し、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1149, JIS A 1113および、日本コンクリート工学協会の「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験方法(案)」に準じて行った。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの強度特性

表-4 に、RC はり載荷時のコンクリートの強度特性を

表-4 コンクリートの強度特性および RC はり供試体の載荷試験結果

供試体記号	載荷材齢 (日)	コンクリートの強度特性				載荷直前の引張鉄筋ひずみと応力		斜めひび割れ発生時のせん断耐力・強度	
		f_c	f_t	E_c	G_f	$\varepsilon_{s,def}$	$\sigma_{c,def}$	V_c	τ_c
S35-250EX-A	141	51.8	3.6	27.5	0.18	-56	0.2	112	1.49
S35-250EX-B						-71	0.3	109	1.45
S35-500EX-A	219	51.9	3.7	27.5	0.17	-4	0.0	152	1.01
S35-500EX-B						-30	0.1	155	1.05
S35-1000EX-A	177	51.9	3.6	27.5	0.17	2	0.0	242	0.81
S35-1000EX-B						-23	0.1	250	0.83
D35-250-A	210	47.0	3.4	22.5	0.22	-405	1.4	96	1.28
D35-250-B						-409	1.4	90	1.20
D35-500-A	300	47.1	3.4	22.5	0.16	-376	1.6	150	1.00
D35-500-B						-321	1.4	161	1.07
D35-1000-A	266	47.1	3.4	22.5	0.16	-329	1.6	224	0.75
D35-1000-B						-318	1.5	182	0.61

f_c : 圧縮強度(N/mm²), f_t : 割裂引張強度(N/mm²), E_c : ヤング係数(kN/mm²), G_f : 破壊エネルギー(N/mm), l_{ch} : 特性長さ ($=E_c G_f / f_t^2$)(mm), $\varepsilon_{s,def}$: 引張鉄筋ひずみ($\times 10^{-6}$), $\sigma_{c,def}$: はり下縁応力(N/mm²), V_c : 斜めひび割れ発生時のせん断耐力(kN), τ_c : 斜めひび割れ発生時のせん断強度 (V_c / bd) (N/mm²)

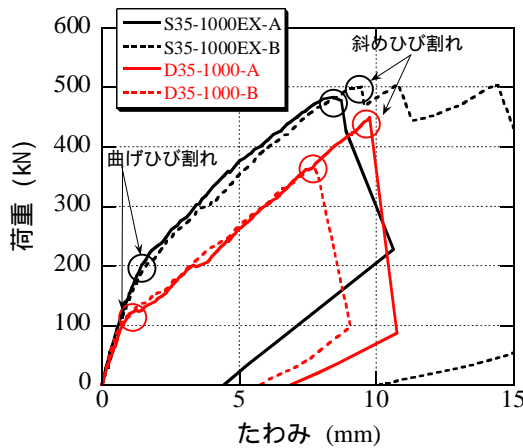


図-2 荷重-たわみ関係

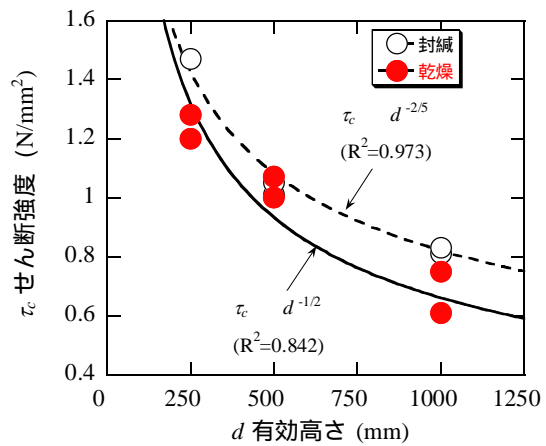


図-3 有効高さとせん断強度の関係

示す。圧縮強度は 47.1 ~ 53.5N/mm²であった。ヤング係数は、乾燥供試体が封緘養生に比べ明らかに小さい傾向が認められた。一方、破壊エネルギーは乾燥養生したほうがやや大きくなる傾向であった。

3.2 収縮特性

表-4 に、載荷試験直前の支間中央における引張鉄筋ひずみおよび、平面保持を仮定し全断面有効とした場合のはり下縁応力を示す。なお、乾燥養生供試体には下縁から鉄筋位置付近まで鉛直のひび割れ(図-4 赤線)が生じていたが、計測位置での鉄筋ひずみを用いて応力を算定した。封緘供試体は、膨張材添加による初期膨張ひずみが 50×10^{-6} 程度生じた後、徐々に収縮が進行し、載荷時点でのひずみは概ねゼロであった。乾燥供試体は脱型時点で 100×10^{-6} 程度の自己収縮が、その後、乾燥収縮が生じ、載荷時点の鉄筋ひずみは供試体寸法に応じて $-300 \sim -400 \times 10^{-6}$ 程度となった。はり下縁のコンクリート応力は、封緘養生供試体の場合ほぼゼロ、乾燥供試体の場合 1.5N/mm^2 程度の引張応力が蓄積されていると算出された。

3.3 荷重-たわみ関係

図-3 に、載荷試験時の荷重-たわみ関係を、有効高さ 1000mm の供試体について示す。同一荷重時のたわみは、封緘供試体と比べ乾燥供試体のほうが大きくなった。これは、乾燥供試体における載荷以前に生じた乾燥ひび割れが曲げ剛性を低下させたこと、コンクリートの収縮が鉄筋に拘束されることで導入された引張応力が曲げひび割れ発生荷重を低下させ、その後のひび割れ進展が早くなったことなどが考えられる。

表-4 に、斜めひび割れ発生時のせん断耐力およびせん断強度を示す。いずれの供試体も、引張鉄筋が降伏する前に斜め引張破壊を生じた。乾燥供試体のせん断強度は、おおむね封緘供試体を下回り、改めて乾燥収縮によるせん断強度の低下が確認された。強度の低下率は、有効高さ 1000mm の供試体が最も大きく 17%であった。

3.4 寸法効果

図-4 に、有効高さとせん断強度との関係を示す。また、有効高さ 1000mm のせん断強度の平均値を通るべき乗関数で、最小二乗法で回帰した曲線を併記する。同図より、

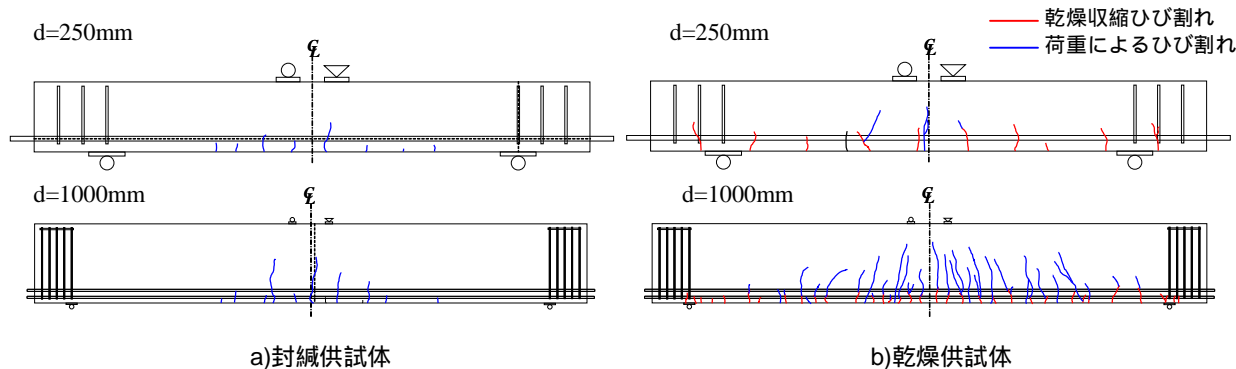


図-4 ひび割れ発生状況 (せん断応力 0.4N/mm^2 時点)

供試体の有効高さが大きくなるほどせん断強度は低下し、その傾向は乾燥供試体のほうが顕著であることがわかる。有効高さに対する回帰曲線の指数は、封緘供試体が $-2/5$ 乗に、乾燥供試体が $-1/2$ 乗に則った。既報^{5),6)}の強度レベル(30N/mm^2 , W/C50%)では、封緘供試体は有効高さの $1/4$ 乗、乾燥供試体は $1/3$ 乗に則り、指数が異なるものの乾燥収縮によって寸法効果が助長される傾向は同様であった。後述するように、乾燥収縮がせん断ひび割れ幅の増大に影響を及ぼすこと、ひび割れが局所化しやすい寸法が大きい供試体ほどその影響が相対的に大きくなること、などが要因として考えられる。なお、寸法効果則については、さらにデータ数を拡充し検証が必要と考える。

3.5 ひび割れ発生状況

図-4 に、せん断応力 0.4N/mm^2 時点での封緘および乾燥供試体のひび割れ発生状況を、有効高さ 250mm および 1000mm について例示する。封緘供試体の場合、ひび割れパターンは寸法によらずほぼ同じであったが、有効高さ 1000mm の供試体のほうがより深くまでひび割れが進展している。これは、大きい供試体のほうが同一せん断応力下でのひび割れ幅が大きいためである。

一方、乾燥供試体は、同一寸法の封緘供試体よりもさらに深くひび割れが進展し、一部は斜めひび割れに移行しているものも観察された。荷重以前に生じた乾燥ひび割れは、多くが荷重によるひび割れの起点となったが、必ずしも全てが進展するわけではない。特に有効高さ 1000mm の供試体では徐々にひび割れが集約化・局所化しながら進展する様子が確認された。これは、有効高さが大きくなると引張鉄筋のひび割れ分散効果の影響範囲が相対的に小さくなり、ひび割れの局所化が生じるとする藤田らの報告⁹⁾と一致する。

3.6 せん断変形

図-5 に、破壊側のスパンを対象として、せん断応力の増加にともなうせん断ひずみの変化を有効高さ 250mm および 1000mm について例示する。なお、せん断ひずみはせん断変位を測定区間長で除すことで算出した。同一

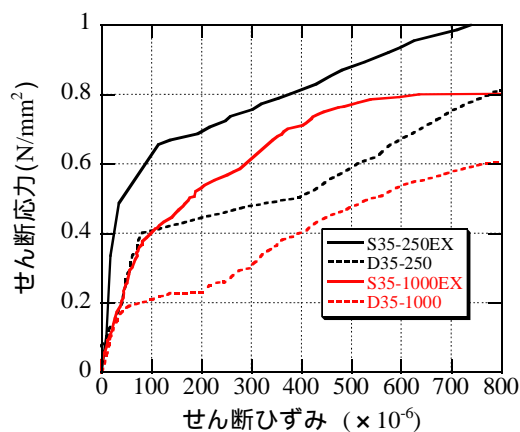


図-5 せん断応力-せん断ひずみ関係例

せん断応力で比較すると、有効高さが大きく、乾燥収縮が生じている供試体のほうが、早期にせん断ひずみが進展することがわかる。せん断ひずみは、ひび割れの鉛直方向成分と見なせ、乾燥収縮が曲げひび割れだけでなく、せん断ひび割れの増大にも影響を及ぼしていることを示唆する結果と考えられる。

上述の、ひび割れ発生状況と併せて考えると、コンクリートの乾燥収縮は、RC はりのひび割れを早期に進展させるとともに、せん断ひび割れを増大させる要因となっている。これらのことが、図-3 に示したようにせん断強度の低下と寸法効果の増大の両方に影響したと推察される。

4. 収縮を考慮したせん断評価法

4.1 等価引張鉄筋比の概念

せん断補強筋のない RC はりのせん断抵抗要素として、圧縮部コンクリート、ひび割れ面でのかみ合い、ダウエル作用があり、せん断評価式²⁾にはこれらを包括的に評価する因子として鉄筋比の項が含まれている。

一方、収縮によって引張鉄筋に蓄積された圧縮ひずみがひび割れ発生によって解放されると、図-6 に示すように、同一曲げモーメント時のひずみ変化量が、収縮の無い場合よりも収縮がある場合のほうが大きくなる。ひず

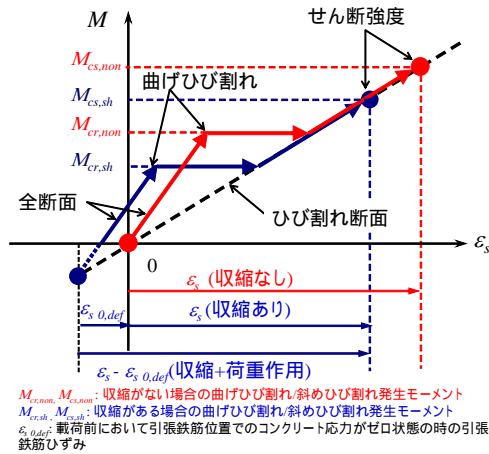


図-6 等価引張鉄筋比の概念

み変化量の増大は、ひび割れ面でのかみ合い、ダウエル作用を低下させ、ひび割れが早期に進展することで圧縮部コンクリートを減少させる。これを、機能的に鉄筋比の減少とみなし、せん断強度を評価する手法として等価引張鉄筋比の概念が以下の式(1)で提案されている⁴⁾。

$$p_{s,e} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s - \epsilon_{s0,def}} p_s \quad (1)$$

ここで、 $p_{s,e}$: 等価引張鉄筋比、 p_s : 実際の引張鉄筋比、 ϵ_s : 曲げせん断スパン中央での斜めひび割れ発生時の引張鉄筋ひずみ、 $\epsilon_{s0,def}$: コンクリート応力ゼロ状態時の鉄筋ひずみ

4.2 等価引張鉄筋比によるせん断強度の換算

図-7に、せん断強度が鉄筋比の1/3乗に比例するとし、式(1)で算出した等価引張鉄筋比と実引張鉄筋比の比から、収縮がない場合のせん断強度に換算した結果を示す。式(2)によって換算したせん断強度と有効高さの関係は、養生条件によらずほぼ統一的に整理できることがわかる。全データを対象に最小二乗回帰した曲線より、換算したせん断強度は有効高さの-2/5乗に比例した。既報^{5),6)}の強度レベル 30N/mm²の場合には、有効高さの-1/4乗則であり、本検討結果のほうが寸法効果が大きくなった。高強度コンクリートの自己収縮を対象とした検討⁴⁾では有効高さの-2/5乗則で整理されていることから、普通コンクリートの範囲内でも高強度化することで寸法効果が変化する可能性が考えられる。これについてはさらにデータを拡充し包括的に検証する必要がある。

$$\tau_{c,e} = \tau_c \times \left(\frac{p_s}{p_{s,e}} \right)^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{c,e}$: 収縮がない場合の換算せん断強度、 τ_c : せん断強度の実測値、 $p_{s,e}$: 等価引張鉄筋比、 p_s : 実引張鉄筋比

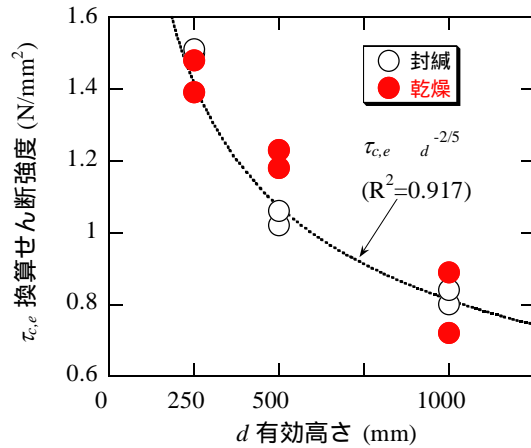


図-7 等価引張鉄筋比によるせん断強度評価

4.3 等価引張鉄筋比のせん断評価式への適用性

等価引張鉄筋比を、既存のせん断強度評価式に適用した場合の予測精度について、既報データ^{5),6)}と併せて検討した(合計24体)。せん断強度評価式には、式(3)に示す示方書²⁾式式である二羽式¹⁰⁾を用い、鉄筋比の項 β_p に実際の引張鉄筋比と等価引張鉄筋比を入力した場合について比較した(ケース ,)。また、上述の図-7の回帰結果に基づき、W/B35%については有効高さの項 β_d が-2/5乗に則ると仮定して、等価鉄筋比を用いたケース(ケース)も併せて検討した。図-8に、実測値と計算値の関係、表-5にせん断強度の予測精度として、実測値と予測値の比の平均値(Ave.)、標準偏差(S.D.)および変動係数(C.V.)を養生条件別に示す。

$$\begin{aligned} \tau_c &= f_{vcd} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot bd \\ f_{vcd} &= 0.2 f_c^{1/3} \\ \beta_d &= (d/1000)^{-1/4} \text{ or } (d/1000)^{-2/5} \quad (3) \\ \beta_p &= (100p)^{1/3} \\ \beta_a &= (0.75 + 1.4/(a/d)) \end{aligned}$$

封緘供試体については、いずれの検討ケースにおいても実測値を再現できていることがわかる。一方、乾燥供試体については、実鉄筋比を用いたケースの精度が低下し、予測値は実測値を平均で10%以上大きく見積もる結果となった。等価引張鉄筋比を用いたケース , は、乾燥供試体のせん断強度と良く一致した。データのばらつきは標準偏差および変動係数の結果より、実鉄筋比、等価鉄筋比のいずれを用いてもほとんど変わらないことが確認された(ケース ,)。しかし、有効高さの影響項 β_d が、-2/5乗に則る場合を考慮したケースでは、ばらつきが明らかに小さくなり、予測精度がさらに高くなった。これらのことから、等価引張鉄筋比を既存の評価式に適用することは十分に可能であると考えられ、乾燥収縮の有無にかかわらずRCはり部材のせん断強度の予測精度向上を図ることができると判断された。

表-5 せん断強度の予測精度

検討 ケース	鉄筋比	養生条件	β_d		実測値 / 予測値		
			W/B35%	W/C50%	Ave.	S.D.	C.V.
	実鉄筋比	封緘	-1/4	-1/4	0.96	0.09	9.4
		乾燥			0.89	0.09	10.7
	等価鉄筋比	封緘	-1/4	-1/4	0.98	0.10	9.8
		乾燥			1.02	0.11	10.5
	等価鉄筋比	封緘	-2/5	-1/4	0.93	0.06	6.0
		乾燥			0.97	0.07	7.4

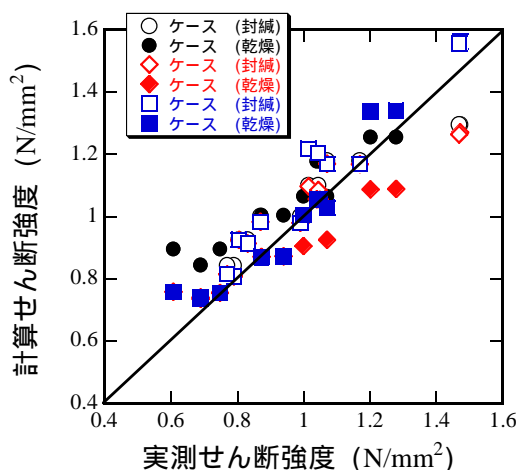


図-8 等価引張鉄筋比の評価式への適用性

5. まとめ

コンクリートの過大な乾燥収縮が、せん断補強筋のないRCはりのせん断挙動に及ぼす影響を評価するために、強度レベル50N/mm²の普通コンクリートを対象に、有効高さ(250mm, 500mm, 1000mm)および乾燥収縮の有無をパラメータとした載荷実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾燥供試体の斜めひび割れ発生時のせん断強度は、封緘供試体と比べ最大で17%低下し、乾燥収縮のせん断強度低下への関与が確認された。
- (2) せん断強度の寸法効果は、封緘供試体が有効高さの-2/5乗、乾燥供試体が有効高さの-1/2乗に則り、乾燥収縮によって大きくなった。その要因として、乾燥収縮が載荷時のひび割れを早期に進展させること、せん断ひび割れ幅を増大させることが考えられた。
- (3) 等価引張鉄筋比を用いて乾燥収縮のないせん断強度に換算することで、収縮の有無によらず統一的な評価が可能であり、寸法効果は有効高さの-2/5乗で整理された。
- (4) 等価引張鉄筋比を既存のせん断評価式の鉄筋比の項に用いることで予測精度が向上し、十分な適用性が確認された。

謝辞

本研究は、(独)日本学術振興会科学研究費補助金(基盤

研究(A)「高収縮コンクリート部材の耐久性力学」(課題番号: 21246071, 研究代表者: 佐藤良一)により実施したものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書，2008.3
- 2) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2008.3
- 3) 長谷川俊昭，関博：乾燥収縮ひびわれが鉄筋コンクリート部材に及ぼす影響，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6, pp.617-620，1984.6
- 4) Ryoichi Sato and Hajime Kawakane: A New Concept for the Early Age Shrinkage Effect on Diagonal Cracking Strength of Reinforced HSC Beams, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.1, pp.45-67, 2008.2
- 5) 三谷昂大，兵頭彦次，太田光貴，佐藤良一：収縮による普通強度RCはりのせん断強度低下とその評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.721-726，2011.6
- 6) 兵頭彦次，三谷昂大，太田光貴，中山紘紀，佐藤良一：コンクリートの収縮がRCはりのせん断挙動に及ぼす影響，耐久性力学に基づく収縮影響評価に関するワークショップ論文集，pp.101-108，2011.8
- 7) 森戸重光，半井健一郎：乾燥収縮ひび割れがRCはりのせん断耐力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.2, pp.751-756，2009.6
- 8) 前田匡樹，有園祐介，幸村信行：鉄筋コンクリート梁部材の変形評価法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.19, No.2, pp.861-866，1997.6
- 9) 藤田学，佐藤良一，松元香保里，高木康宏：高強度コンクリートを用いたRCはりのせん断強度と寸法効果，土木学会論文集，No.711, V-56, pp.161-172，2002.8
- 10) 二羽淳一郎，山田一宇，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，V-5, pp.167-176，1986.8