

論文 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

三谷 昂大^{*1}・兵頭 彦次^{*2}・太田 光貴^{*1}・佐藤 良一^{*3}

要旨:水セメント比が 0.5 の収縮の大きいコンクリートを用いて,引張鉄筋比が 1.03%~1.06%,有効高さ 250, 500, 1000mm の 3 種類の,せん断補強筋及び圧縮鉄筋を有さない RC はりを作製し,収縮の大小がせん断強度に及ぼす影響を検討した。収縮の大小は乾燥暴露と封緘養生により制御した。収縮の影響を定量的に把握するために,打込み直後から載荷直前までの鉄筋ひずみを経時的に計測した。実験の結果,載荷直前の鉄筋ひずみは,乾燥暴露で $-247\times 10^{-6}\sim -268\times 10^{-6}$,封緘で $-43\times 10^{-6}\sim -78\times 10^{-6}$ であり,せん断強度は最大で 12%強低下した。寸法効果は,乾燥暴露で有効高さの-1/3 乗,封緘で-1/4 乗であったが,等価鉄筋比により収縮の大小にかかわらず統一的に評価できた。

キーワード:鉄筋コンクリート,収縮,せん断強度,寸法効果,等価引張鉄筋比

1. はじめに

実構造物におけるひび割れ発生事例¹⁾を契機に,コンクリートの乾燥収縮に対する関心が高まっている。コンクリートの乾燥収縮の要因のひとつとして,骨材自体の収縮の影響が知られている。後藤ら²⁾は,多数の骨材の収縮とコンクリートの乾燥収縮との関連性を評価し,骨材自身の収縮が影響を与えることを指摘した。

一方,高強度コンクリートにおいて若材齢時に生じる自己収縮応力が,斜めひび割れ発生強度を低下させることが明らかにされ,収縮の影響を取り入れた等価引張鉄筋比の概念に基づく,斜めひび割れ発生強度算定式が提案されるに至っている^{3),4)}。

そこで本研究では,広く用いられている普通の強度で乾燥収縮の大きいコンクリートに焦点を縛り,せん断補強筋のない RC はりのせん断強度およびその寸法効果に及ぼす収縮の影響とその評価について,収縮およびクリープの影響下で生じた引張鉄筋ひずみに基づいて検討する。

2. 実験概要

2.1 材料, 配合, 供試体の作製

本研究で用いた使用材料を表-1 に,コンクリートの配合を表-2 に示す。骨材には,それ自体が収縮する可能性のある砂岩碎石,砂岩砕砂を用いた。コンクリートの水セメント比(W/C)は,せん断に及ぼす収縮の影響を一般化するため,広く用いられている 0.5 とした。

RC はり供試体は,引張鉄筋比が 1.03%~1.06%の一定とし,有効高さ 250, 500, 1000mm の 3 水準,暴露条件が 2 種類のそれぞれについて 2 体,計 12 体作製した。供試体作製時,型枠の側面と底面にはポリエチレンフィ

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類/物理的性質
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
細骨材	S	砕砂(砂岩), 表乾密度: 2.65g/cm^3 , 吸水率: 1.86%
粗骨材	G	碎石 2005(砂岩), 表乾密度: 2.69g/cm^3 , 吸水率: 0.89%
混和剤	—	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系), AE 剤

表-2 コンクリートの配合

目標値		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)			
スランプ (cm)	空気量 (%)			W	C	S	G
10 ± 2.5	4.5 ± 1.5	50	46.4	170	340	832	977

ルム(厚さ 0.1mm)を二重に貼り付け,その間にグリススプレーを吹き付けることにより型枠とコンクリートの拘束を極力低減した。打込み終了後は,直ちに打込み面をラップフィルムと養生マットで覆い,材齢 7 日まで封緘養生を保った。その後,各有効高さ 2 体ずつ計 6 体については,脱型し屋内で気中暴露した。暴露期間中の平均温度は 15.2°C ,平均相対湿度は 46.1%であった。なお,乾燥条件が長手方向で変化しないよう,両端部は質量減少防止に有効⁵⁾なアルミ粘着テープを貼り付けた。残りの 6 体については,脱型後直ちに全面アルミ粘着テープを貼り付け,封緘養生した。以後,有効高さ $d=250\text{mm}$ の供試体を Drying250, Sealed250 と表記し,他も同様に表記する。供試体の形状,寸法,配筋状態の一例として, $d=1000\text{mm}$ の RC はりを図-1 に示す。また,図-2 に示

*1 広島大学大学院 工学研究科 (正会員)

*2 太平洋セメント 中央研究所 (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究院教授 工博 (正会員)

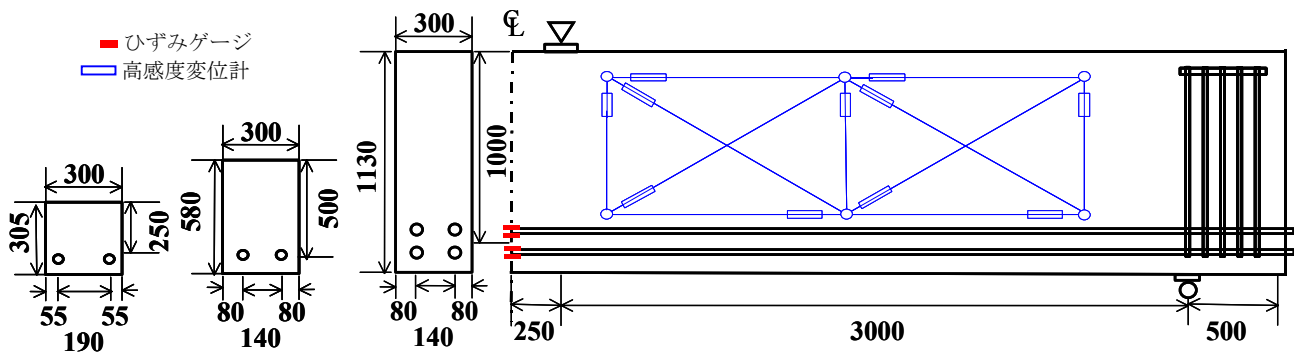


図-1 RCはり供試体概要(単位: mm)

すように、自由収縮ひずみ測定用の寸法 100mm×100mm×400mm の供試体を作製した。さらに、寸法 100mm×100mm×400mm の破壊エネルギー測定用の供試体もそれぞれ 10 体合わせて作製した。これらの全ての供試体の養生条件は、RC はりと同様とした。

2.2 RC はりの計測および載荷試験方法

計測は、打込みから RC はりの載荷試験までの自由収縮ひずみと RC はりの鉄筋ひずみの経時変化とともに、図-1 に示すように、2 点集中載荷に伴う RC はりの支間中央たわみ、曲げせん断域のせん断変位および鉄筋ひずみを、高感度変位計、ワイヤストレインゲージにより測定した。載荷は単調増加とし、所定の荷重で計測を行った。載荷時までの自由収縮ひずみは、供試体に設置した埋込み型ひずみ計(標点距離 100mm, 弾性係数 40N/mm²)により、RC はりの鉄筋ひずみは、スパン中央位置に貼付したひずみゲージ(ゲージ長 5mm)により、それぞれ計測した。

2.3 破壊エネルギー試験概要

破壊エネルギー試験は、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法(案)」⁴⁾に準じて行い、供試体中央に幅 4mm、深さ 50mm の切欠きを設けた。供試体の概要を図-3 に示す。載荷は、荷重の降下域の変形を測定するため、容量 100kN の変位制御型試験機を用いて行った。供試体のスパンは 300mm とし、両支点はローラを配置して水平方向に可動な構造とした。計測項目は、荷重、ひび割れ開口変位(CMOD)、載荷点の鉛直変位である。CMOD は供試体底面の切欠き部中央で、クリップゲージ(感度: 1/1000mm)により計測した。

3. 実験結果

3.1 コンクリート特性と載荷以前の収縮挙動

載荷時のコンクリートの圧縮強度 f_c' 、ヤング係数 E 、引張強度 f_t および破壊エネルギー G_f を表-3 に示す。こ

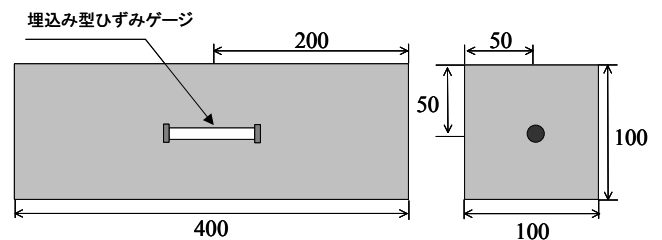


図-2 自由収縮供試体(単位: mm)

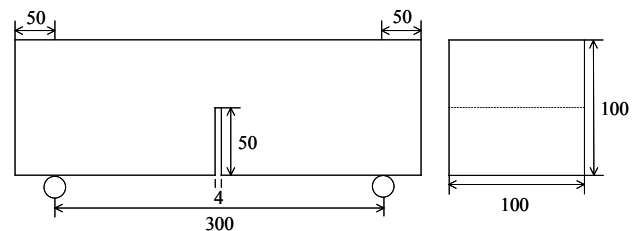


図-3 破壊エネルギー供試体(単位: mm)

表-3 載荷試験時のコンクリート特性

供試体名	材齢(日)	圧縮強度 f_c N/mm ²	ヤング係数 E_c kN/mm ²	割裂引張強度 f_t N/mm ²	破壊エネルギー G_f N/mm
Drying	125	37.3	20.9	3.3	0.20
	288	39.7	21.5	3.3	0.19
	288	39.7	21.5	3.3	0.19
Sealed	91	38.6	23.9	3.2	0.15
	120	36.7	25.9	3.2	0.15
	120	36.7	25.9	3.2	0.15

れらの値は強度・ヤング係数は 3 体、破壊エネルギー値は、10 体の平均値(ただし、誤差の大きい実験値は除外)である。Sealed に比べて、Drying の圧縮強度およびヤング係数は小さく、破壊エネルギーは大きくなる傾向が認められた。図-4 に自由収縮ひずみを、図-5 にスパン中央の鉄筋ひずみの経時変化を示す。本研究で用いたコンクリートの自由収縮ひずみは土木学会「2007 年版コンクリート標準示方書[設計編]」(以下示方書)による推定に比べかなり大きい。また載荷時における鉄筋ひずみは、Drying で $-247 \times 10^{-6} \sim -268 \times 10^{-6}$ 、Sealed で $-43 \times 10^{-6} \sim$

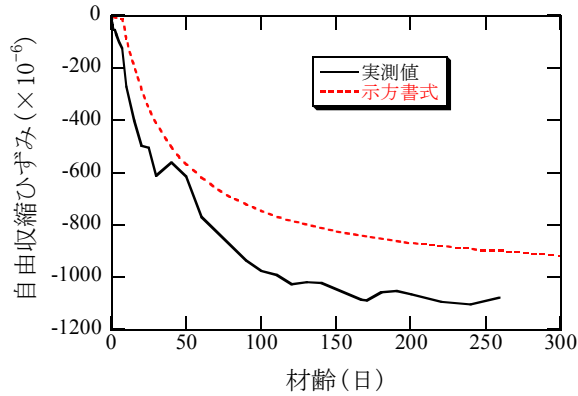


図-4 コンクリートの自由収縮ひずみ

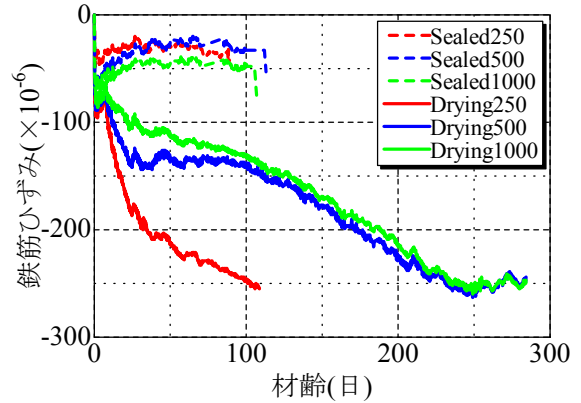


図-5 引張鉄筋ひずみ

-78×10^{-6} であった。なお、Sealed 供試体の荷重直前における鉄筋ひずみの急増は、荷重直前にアルミ粘着テープを剥がしたことにより供試体が乾燥暴露状態となったことによる。

3.2 破壊エネルギー特性

コンクリートの破壊エネルギーは、以下の算定式(1)から求めた⁴⁾。また、特性長さ l_{ch} は式(2)より求めた⁵⁾。

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

ここで、 W_0 : 供試体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積[N・mm]、 W_1 : 供試体の自重及び荷重治具がなす仕事[N・mm]、 A_{lig} : リガメントの面積[mm²]

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

ここで、 E_c : ヤング係数[N/mm²]、 f_t : 引張強度[N/mm²]

図-6に Drying および Sealed の荷重-CMOD 曲線の一例を示す。また、試験結果一覧を表-4に示す。図-6の Drying と Sealed の比較に見られるように、乾燥供試体の架橋効果域の面積は封緘供試体のそれより大きく、その結果、破壊エネルギーは約 25%大きい。しかし、ここで得られたコンクリートの破壊エネルギーは、0.15-0.2N/mm の範囲にあり、一般的なコンクリートと大きく異なるものではないと言えよう⁸⁾。ただし、ヤング係数が小さいため、特性長さは小さい。

3.3 RC はりのせん断特性

表-5に RC はりの荷重試験結果とともに、荷重直前における引張鉄筋ひずみ $\varepsilon_{s,def}$ 、引張鉄筋図心位置でのコンクリートの収縮応力 $\sigma_{s,def}$ 、引張鉄筋図心位置でのコンクリート応力がゼロのときの引張鉄筋ひずみ $\varepsilon_{s0,def}$ をそれぞれ示す。 $\varepsilon_{s0,def}$ は $\varepsilon_{s,def}$ および $\sigma_{s,def}$ を用いて次式で求めた。

$$\varepsilon_{s0,def} = \varepsilon_{s,def} - \sigma_{s,def} / E_c \quad (3)$$

式(3)において、収縮ひずみおよび圧縮応力の場合は負

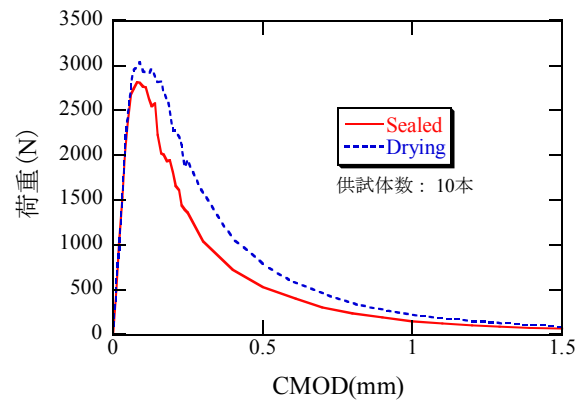


図-6 荷重-CMOD 曲線

表-4 破壊エネルギー試験結果一覧

供試体名	材齢 (日)	破壊エネルギー G_f N/mm	割裂引張強度 f_t N/mm ²	ヤング係数 E_c kN/mm ²	特性長さ l_{ch} mm
Drying	125	0.20	3.3	20.9	369
	288	0.19	3.3	21.5	373
	288	0.19	3.3	21.5	373
Sealed	91	0.15	3.2	23.9	350
	120	0.15	3.2	25.9	404
	120	0.15	3.2	25.9	404

値としている。 $\sigma_{c,def}$ は、荷重直前の引張鉄筋ひずみ($\varepsilon_{s,def}$)の実測値を用い、かつ平面保持の仮定に基づいて得られる次式により求めた。

$$\sigma_{c,def} = -P_s / A_c \left[1 + A_c (d - C_g)^2 / I_c \right] \quad (4)$$

ここで、 $P_s (=A_s E_s \varepsilon_{s,def})$: 引張鉄筋に生じる軸力、 A_c : コンクリートの断面積、 C_g : 圧縮縁からコンクリート断面の図心軸までの距離、 I_c : コンクリート断面の図心まわりの断面二次モーメント

図-7に荷重と支間中央たわみの関係の結果を示す。乾燥暴露した RC はりは、収縮の影響により、また有効

表-5 実験結果一覧

供試体名	載荷直前				せん断耐力				破壊形態*
	材齢 (日)	$\varepsilon_{s,def}$ ($\times 10^{-6}$)	$\sigma_{c,def}$ (N/mm ²)	$\varepsilon_{s0,def}$ ($\times 10^{-6}$)	斜めひび割れ発生時		終局時		
					V_c (kN)	τ_c (N/mm ²)	V_u (kN)	τ_u (N/mm ²)	
Drying250-1	125	-255	0.89	-299	79	1.05	96	1.28	斜め引張破壊
Drying250-2	125	-268	0.93	-315	78	1.04	114	1.52	せん断圧縮破壊
Drying500-1	288	-250	1.07	-303	140	0.94	154	1.03	斜め引張破壊
Drying500-2	288	-265	1.14	-322	131	0.88	131	0.88	斜め引張破壊
Drying1000-1	288	-247	1.17	-305	208	0.69	208	0.69	斜め引張破壊
Drying1000-2	288	-264	1.25	-326	208	0.69	208	0.69	斜め引張破壊
Sealed250-1	91	-43	0.15	-49	80	1.07	80	1.07	斜め引張破壊
Sealed250-2	91	-43	0.15	-49	88	1.17	88	1.17	斜め引張破壊
Sealed500-1	120	-53	0.23	-62	130	0.87	152	1.01	斜め引張破壊
Sealed500-2	120	-44	0.19	-51	149	0.99	149	0.99	斜め引張破壊
Sealed1000-1	120	-78	0.38	-93	238	0.79	238	0.79	斜め引張破壊
Sealed1000-2	120	-62	0.30	-74	232	0.77	232	0.77	斜め引張破壊

$\varepsilon_{s,def}$: 載荷直前の引張鉄筋ひずみ, $\sigma_{c,def}$: 載荷直前の引張鉄筋図心位置でのコンクリート応力(式(4)より算出), $\varepsilon_{s0,def}$: 載荷直前の引張鉄筋図心位置でのコンクリート応力がゼロ状態時の引張鉄筋ひずみ, $V_{c,u}$: 斜めひび割れ発生時, 終局時の実測せん断力, $\tau_{c,u}$: 斜めひび割れ発生時, 終局時の実測せん断強度($=V_{c,u}/bd$), $*V_u/V_c \leq 1.25$ の場合, 斜め引張破壊と定義した

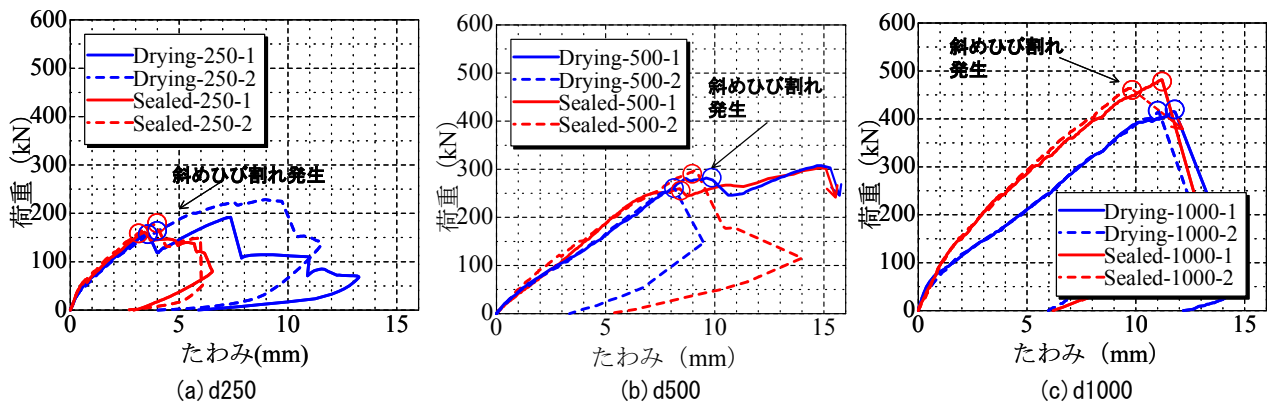


図-7 荷重-たわみ関係

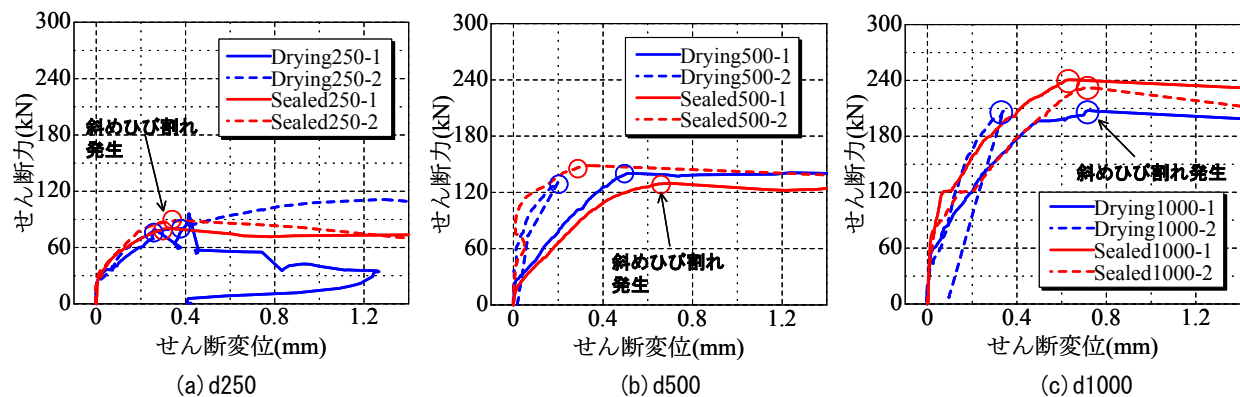


図-8 せん断力-せん断変位関係

高さが大きくなるにつれて, 斜めひび割れ発生荷重(V_c)が低下するとともに, たわみも大きくなる傾向がある。図-8 はせん断力とせん断変位の関係を示したものである。せん断変位は, 曲げせん断域の二つの区間で計測しているが, 載荷点側の区間の計測値を示している。これによれば, せん断変位も, 有効高さが大きくなるにつれて, 大きくなる傾向にある。また, Drying500-2 および Drying1000-2 については, せん断変位の急増が認められ

ないのは, 斜めひび割れが支点側に寄ったためである。

4. 斜めひび割れ発生強度の検討

式(5)に示す, 普通強度を対象とした二羽式⁹⁾をもとに, 収縮が普通強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度 $\tau_c (=V_c/bd)$ に及ぼす影響を検討する。

$$\tau_c = V_c / bd = 0.2 f_c^{1/3} (100 p_s)^{1/3} (d/1000)^{-1/4} \quad (5)$$

$$(0.75 + 1.4/(a/d))$$

4.1 収縮が斜めひび割れ発生強度に及ぼす影響

斜めひび割れ発生強度 τ_c に及ぼす収縮の影響は、水結合力 0.23 の高強度コンクリートだけでなく、収縮ひび割れが卓越する場合を除けば普通強度の場合であっても、等価鉄筋比 $p_{s,e}$ の概念³⁾により、ほぼ評価できることが指摘されている¹⁰⁾。ここで、等価鉄筋比の概念とは、図-9 に示すように、収縮による載荷前後の引張鉄筋ひずみ変化量の増大は、機能的には、引張鉄筋比 p_s が小さくなることと等価であるとするもので、式(6)で定義される。

$$p_{s,e} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s - \varepsilon_{s0,def}} p_s \quad (6)$$

ここで、 ε_s ：曲げせん断スパン中央断面の、曲げ理論を用いて求めた斜めひび割れ発生時の引張鉄筋ひずみ、 $\varepsilon_{s0,def}$ ：コンクリート応力ゼロ状態時の引張鉄筋ひずみ

本実験で得られた τ_c と有効高さ d の関係を図-10 に示す。 τ_c は、収縮が増大することにより、1.5～12.3%低下し、さらに寸法効果も卓越した。封緘養生した場合であっても、表-5 に示すように、鉄筋は圧縮されるため、式(7)を用いて求めた収縮をゼロとした場合のせん断強度 $\tau_{c,e}$ も同図に示した。

$$\tau_{c,e} = \tau_c \times (p_s / p_{s,e})^{1/3} \quad (7)$$

収縮がゼロの場合の検証を待つ必要があるが、この結果によれば、封緘であっても無収縮と比べ 1.8%～5.5% 低下した。また、乾燥暴露された場合の τ_c は、封緘と比べて 1.5%～12.4%，無収縮と比べ 3.3%～17.8% 低下した。ちなみに、乾燥暴露された場合の載荷直前における引張鉄筋位置でのコンクリート応力がゼロ状態の時の引張鉄筋ひずみは $-299 \times 10^{-6} \sim -326 \times 10^{-6}$ であった。

4.2 等価鉄筋比に基づく斜めひび割れ発生強度の評価

Drying および Sealed の斜めひび割れ発生強度の実験値を式(7)により換算した $\tau_{c,e}$ と有効高さの関係を図-11 に示す。同図に示すように、Drying と Sealed の斜めひび割れ発生強度とその寸法効果は、等価引張鉄筋比を考慮することにより、収縮の大きさおよび有効高さにかかわらず、ほぼ統一的に評価できることがわかる。この場合の $\tau_{c,e}$ は収縮がゼロの場合の強度であり、寸法効果は d の $-1/4$ 乗に従うことになる。

4.3 材料特性が斜めひび割れ発生強度に及ぼす影響

斜めひび割れ発生強度 τ_c の一般化を図るために、収縮およびヤング係数、割裂引張強度、破壊エネルギー等のコンクリートの特性が及ぼす影響を検討する。すなわち、本実験値に加え高強度コンクリートを対象とした河金らの実験データ⁴⁾12 体 ($d=250\text{mm}, 500\text{mm}, 1000\text{mm}$, $p_s=1.55\% \sim 1.59\%$, 圧縮強度 $f_c=117\text{N/mm}^2 \sim 126\text{N/mm}^2$,

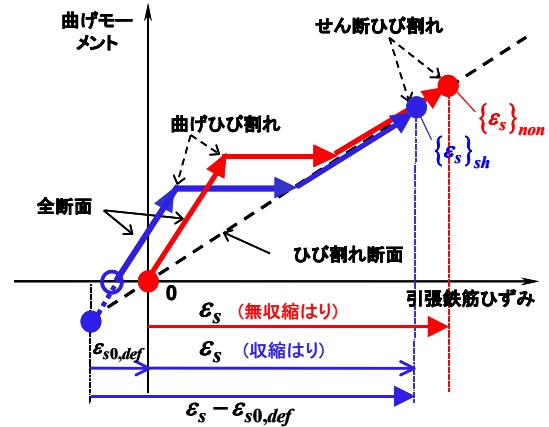


図-9 収縮による載荷前後の鉄筋ひずみ変化量の増大

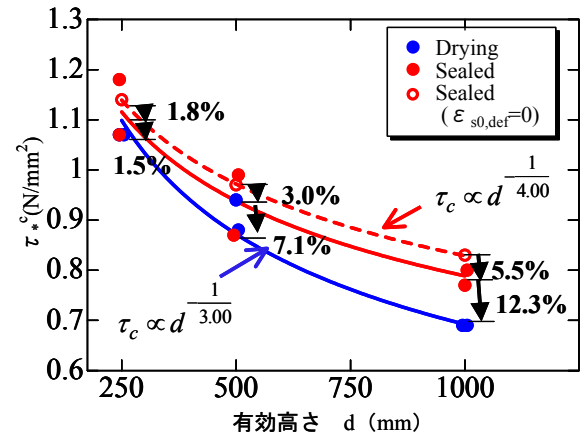


図-10 斜めひび割れ発生強度

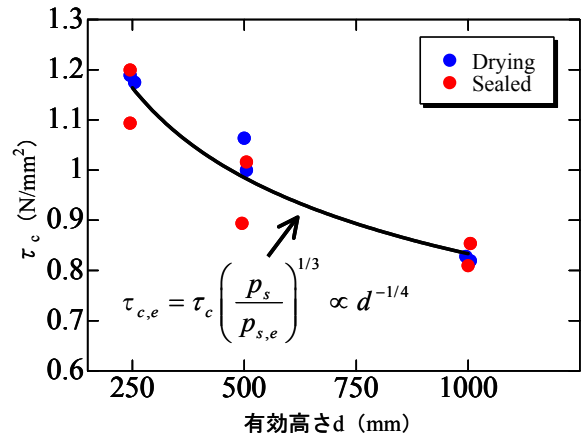


図-11 収縮を考慮した斜めひび割れ発生強度

割裂引張強度 $f_t=6.6\text{N/mm}^2 \sim 7.4\text{N/mm}^2$ 、破壊エネルギー $G_f=0.201\text{N/mm} \sim 0.231\text{N/mm}$) を、式(6)の等価鉄筋比とそれを用いて式(7)により求めたゼロ収縮時の $\tau_{c,e}$ と d の関係を図-12 に示す。さらに、Gustafsson ら⁹⁾の手法に基づいて本実験値を $\tau_{c,e} f_t \propto (d/l_{ch})^{-1/4}$ に、高強度コンクリートを用いた河金らの実験データ 12 体を $\tau_{c,e} f_t \propto (d/l_{ch})^{-2/5}$ にそれぞれ従って整理した結果を図-13 に示す。なお、いずれの場合も、河金らの RC はりの鉄筋比は本実験のそれより 50%大きいので、式(5)に従い $(1/1.5)^{1/3}$ を掛けて

せん断強度を補正している。これらの図に示すように、コンクリートの特性が変わると統一的に評価できず、特に引張強度の影響や寸法効果について検討する必要がある。

5. まとめ

収縮が大きく、ヤング係数の小さいコンクリートを用いた引張鉄筋比 1.03%-1.06% の RC はりのせん断強度を検討した結果以下の結論が得られた。

- (1) 破壊エネルギーは乾燥暴露した場合、封緘養生した場合に比べが約 25%大きかったが、通常のコンクリートと大幅な違いは認められなかった。
- (2) 収縮により引張鉄筋ひずみはおよそ -250×10^{-6} に達し、その後はほとんど変化しなかった。
- (3) 乾燥暴露した場合のせん断強度は封緘養生した場合に比べ、1.5～12.3%低下し、収縮がゼロとした場合に比べ、3.3%～17.8%低下した。
- (4) 乾燥暴露、封緘養生した場合の寸法依存性は、それぞれ有効高さの $-1/3$ 乗、 $-1/4$ 乗と収縮により、寸法依存性は鋭敏になった。
- (5) 等価引張鉄筋比で評価したせん断強度および寸法依存性は、収縮の大小に拘わらずほぼ一致し、統一的に評価できることがわかった。
- (6) せん断強度は、コンクリートの特性が変わると等価引張鉄筋比を用いても評価できず、特に引張強度の影響や寸法効果について検討する必要がある。

本研究は、科学研究費（基盤研究(A)，課題番号：21246071，代表：佐藤良一）の補助を受けて実施したものであり、紙面を借りて厚くお礼申しあげたい。

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) 後藤幸正，藤原忠司：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響，土木学会論文集，286 号，pp.125-137，1989.6
- 3) Sato, R. and Kawakane, H. : 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
- 4) 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，V-65，pp.178-197，2009
- 5) 楊楊，佐藤良一，今本啓一，許明：高強度コンクリ

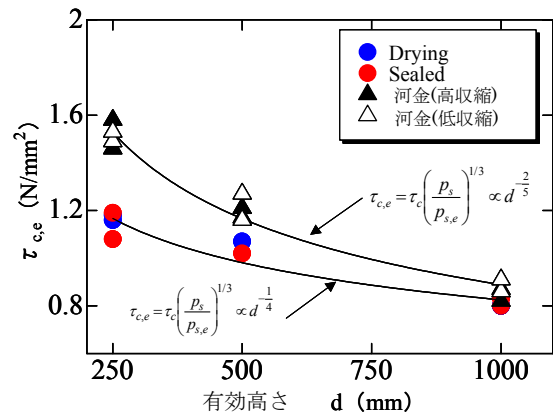


図-12 斜めひび割れ発生強度におよぼす材料特性の影響

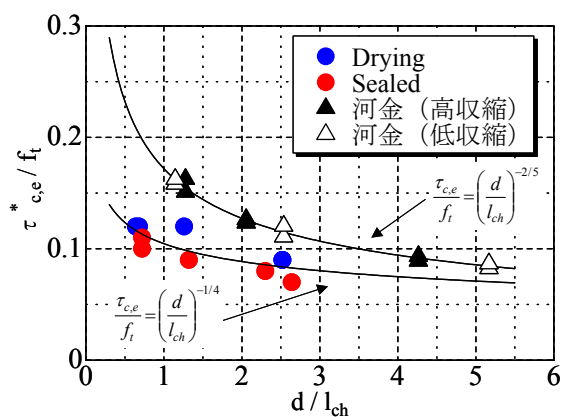


図-13 $\tau_{c,e}/f_t$ と d/l_{ch} の関係におよぼす材料特性の影響

ートの自己収縮応力の予測，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No 1，pp.757-762,1997

- 6) 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報告書，2001
- 7) Gustafsson, P. J. et al. : Sensitivity in Shear Strength of Longitudinally Reinforced Concrete Beams to Fracture Energy of Concrete, *ACI Structural Journal*, May-June, pp.286-294, 1988
- 8) 土木学会：2002 年版コンクリート標準示方書改定資料，コンクリートライブラリー108，2002.3
- 9) 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
- 10) 森戸重光，半井健一郎：収縮応力および収縮ひび割れが RC はりのせん断耐力に及ぼす影響，日本コンクリート工学年次論文集，Vo 32, No 2, pp.673-678，2010