

## 論文 鉄筋コンクリートはりにおける自己収縮による自己応力が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響

崔 益暢\*<sup>1</sup> ・ 田澤栄一\*<sup>2</sup> ・ 林 少容\*<sup>3</sup>

**要旨**：本研究は実大鉄筋コンクリートはりを用い、コンクリートと補強筋の自己収縮の経時変化を測定し、その結果からはりの断面内に生じた自己応力発生機構を明らかにする。次いではりの載荷実験を行い、自己収縮がコンクリートはりの斜めひび割れ発生時におけるせん断耐力に及ぼす影響について検討した。その結果、高強度コンクリートを用いた RC はりでは斜めひび割れ発生時におけるせん断耐力の実験値は、土木学会コンクリート標準示方書の評価式による算定値に対して約 70～80%であることが明らかとなった。

**キーワード**：高強度コンクリート、自己収縮、自己応力分布、せん断耐力

### 1. はじめに

近年高強度コンクリートはプレストレストコンクリートや集合住宅を中心とする超高層鉄筋コンクリート造建築物にも用いられるようになってきた。この背景には、高性能 AE 減水剤の開発、構造解析技術の進歩などの鉄筋コンクリートに関連するシーズ面での発展があり、また都市部の土地事情とも相まって建築物高層化などの社会的・経済的ニーズがあったことも見逃せない。現在、設計基準強度 80～100N/mm<sup>2</sup> の現場打ち高強度コンクリートの実験が盛んに行われており、また建設省総合開発プロジェクト「鉄筋コンクリート構造物の超軽量・超高層化技術の開発」では、設計基準強度 120N/mm<sup>2</sup> までを開発目標として設計・施工技術の研究・開発が推進されている。このことから、今後さらに高強度コンクリートの実用化が進むものと期待されている。

一方、田澤ら<sup>1)</sup>の研究によれば、極めて水結合材比を低くした高強度コンクリートでは凝結直後から極めて大きな自己収縮が生じる

ことが報告されている。すなわち、極めて水結合材比の低い高強度コンクリートは、乾燥を受けなくとも水和により自己乾燥状態となり、大きな収縮ひずみが発生する。しかしながら、実大鉄筋コンクリート（以下 RC と表記）はりに対する自己収縮に関する研究はほとんどされていないことが現状である。

また、高強度コンクリートを用いた RC はりのせん断の研究<sup>2)</sup>では斜めひび割れ発生時のせん断耐力が土木学会コンクリート標準示方書による計算値よりも低下すると報告されている。

高強度コンクリートを用いた RC はりの斜めひび割れ発生時のせん断耐力の低下がコンクリートの自己収縮による補強筋の拘束によって生じる自己応力がコンクリートのせん断耐力の低下の原因であると思われる。

そこで本研究では、養生方法とコンクリート圧縮強度が異なる実大 RC はりの実験を行い、RC はりでの自己収縮の経時変化を測定する。その結果から自己応力発生機構を明ら

\*1 韓国木浦海洋大学講師 工学部海洋土木工学科 工博（正会員）

\*2 広島大学教授 工学部第四類（建設系） 工博（正会員）

\*3 パシフィックコンサルタンツインターナショナル エンジニアリング事業部 工修

かにする。すなわち、無筋コンクリートはりに生じる自己収縮ひずみの測定値と補強筋により、拘束されるRCはりでの自己収縮ひずみの測定値との比較より自己応力発生機構を明らかにする。さらにコンクリートの圧縮強度が大きい場合の、RCはりの斜めひび割れ発生せん断耐力を土木学会の計算値と比較検討する。

## 2. 鉄筋コンクリートはりの実験概要

### 2.1 供試体の諸元

本実験を行ったRCはりの形状および寸法を図.1に示す。供試体は総計13本であり、幅は14cm、全長は190cm、高さは22cmとした。

実験パラメータは、水結合材比(W/C=20%・30%・53%)、引張鉄筋比( $p_w=0\%・3.02\%・5.02\%$ )である。養生方法は、打設後材齢1日で脱型し、その後3つの養生条件、水中(20℃の水中内で養生)、封緘(アルミ箔粘着テープではりを封緘し室温20℃、湿度95%の部屋で養生)、乾燥(材齢3日まで水中養生後、室温20℃、湿度50%の部屋で養生)の各養生方法で材齢28日まで養生を行った(表-1参照)。ただし、せん断スパン比(a/d)は3.55、せん断補強筋比は0.12%で一定とした。荷重は、等曲げ区間30cm、せん断スパン70cmの対称2点荷重とした。

### 2.2 使用材料

実験で用いた材料は早強ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末(粉末度8010cm<sup>2</sup>/g)、高性能減水剤および高性能AE減水剤などであり、粗骨材の最大寸法は20mmである。コンクリートの配合は表-2に示している。材齢28日のコンクリート圧縮強度は39.5~106.4N/mm<sup>2</sup>であった。なお補強筋の力学的特性は表-3に示している。

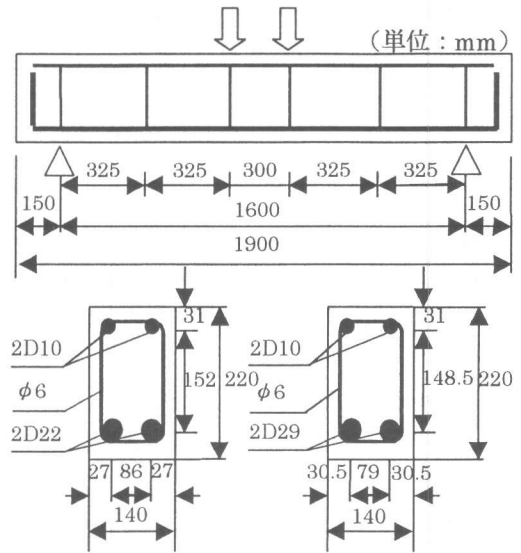


図.1 RC梁の形状及び寸法

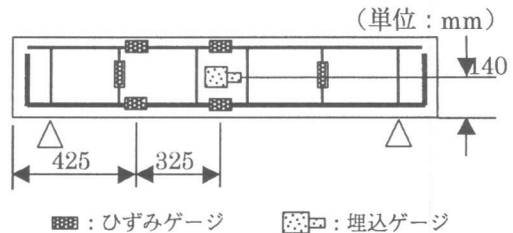


図.2 RC梁のひずみ測定位置

表.1 供試体一覧

供試体名	水結合比 (%)	引張鉄筋比 $p_w$ (%)	養生方法
20W-d22	20	3.02	水中養生
20S-d22			封緘養生
20W-d29		5.02	水中養生
20S-d29			封緘養生
20S-d00			封緘養生
30W-d22	30	3.02	水中養生
30W-d29			水中養生
30S-d29		5.02	封緘養生
30D-d29			乾燥養生
53S-d22	53	3.02	封緘養生
53W-d29			水中養生
53S-d29		5.02	封緘養生
53D-d29			乾燥養生

表.2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (Kg/m <sup>3</sup> )						
		W	C	S	G	F	Ad	
							減水剤	AE減水剤
53	42	177	334	757	1059	-	1.8	-
30	38	165	275	612	1038	275	-	1.27
20	31	160	400	442	1022	400	-	3.6

表 3 鉄筋の力学的特性

種類	規格	断面積 (mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
φ6	SR235	28.3	2.12 × 10 <sup>5</sup>	295	438
D10	SD295	71.33	2.04 × 10 <sup>5</sup>	389	522
D22	SD490	387.1	2.10 × 10 <sup>5</sup>	593	852
D29	SD490	642.4	2.10 × 10 <sup>5</sup>	572	837

### 3. 実大のRCはりにおける自己収縮の経時変化

RCはりの収縮ひずみの経時変化はゲージ長 100mm の埋め込みゲージによるRCはりの断面中央コンクリートの自己収縮ひずみ変化とひずみゲージによる補強筋のひずみ変化を測定した。図 2 にはRCはりにおけるひずみの経時変化の測定点を示している。ひずみの経時変化は打ち込みの1日後から載荷直前(材齢 28 日)まで測定した。

#### 3. 1 コンクリートの自己収縮の経時変化

図 3 ~ 図 5 には埋め込みゲージによるRCはりの断面中央コンクリートの自己収縮の経時変化を示している(図-2 参照)。

図 3 には水結合材比が異なる封緘養生(アルミ粘着テープで封緘養生)の供試体における断面中央コンクリートの自己収縮の経時変化が示されており、水結合材比が小さくすなわちコンクリートの圧縮強度が高くなるほどコンクリートの収縮ひずみが大きくなることが示されている。ここで封緘養生とは乾燥収縮が生じず、自己収縮のみが生じる養生方法で、図 3 に示されているように、水結合材比の 53% の場合に対して、水結合材比の 30%、20% の場合は著しく自己収縮が大きいことがわかる。すなわち、実大 RC はりにおいてもコンクリートが高強度になるほど自己収縮ひずみが増加していくことが確認された。

図 4 には水結合材比 20% の高強度コンクリートを用いた RC はりにおける水中養生と封緘養生した供試体の自己収縮ひずみが示されており、水中養生より封緘養生の方が自己収縮が大きく生じることを示している。

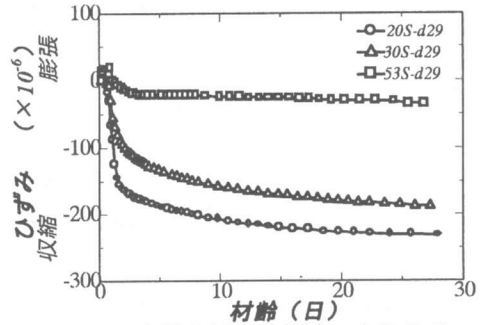


図 3 水結合材比の相違による RC はりの自己収縮変化

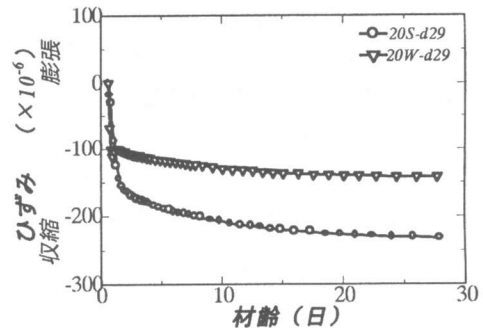


図 4 養生方法の相違による RC 梁の自己収縮の経時変化

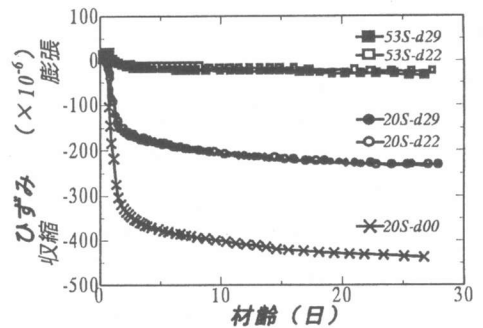


図 5 鉄筋量の相違による RC 梁の自己収縮の経時変化

次に補強筋による拘束が RC はりの自己収縮に及ぼす影響を調べる。図 5 は封緘養生の水結合材比 20% の無筋コンクリートはり鉄筋コンクリートはり、水結合材比 53% の鉄筋コンクリートはりにおける自己収縮ひずみの経時変化を示すものである。水結合材比 20% のコンクリートはりの場合、無筋の供試体より鉄筋補強の供試体の方が収縮ひずみは小さ

くなる。これは収縮が鉄筋の拘束によって減少したためであり、その分がRCはりの断面内部に自己応力として残ると思われる。

しかしながら、鉄筋比による影響はあまりないことが示されている。これは鉄筋補強筋比の差がわずかであったためであると思われる。

### 3. 2補強筋のひずみの経時変化

図. 2に示すひずみ測定点でのコンクリートの収縮により発生する補強筋のひずみの経時変化を調べる。図. 6、図. 7は封緘養生した供試体の補強筋のひずみの経時変化であり、それぞれ引張補強筋とせん断補強筋のひずみの経時変化を示している。

図. 6に示しているように、水結合材比が小さくなるほど補強筋のひずみの経時変化が大きくなる。すなわち、図. 3に示したように水結合材比が小さくなるとコンクリートに生じる自己収縮が大きくなるので、補強筋に作用する拘束力は大きくなる。しかしながら、水結合材比 53%の鉄筋コンクリートはりには図. 3に示したようにコンクリートの自己収縮があまり生じなかったため、補強筋に作用する拘束力も小さかったがことわかる。

図. 6は、RCはりの補強筋の収縮ひずみの経時変化を示す。引張補強に D29 と圧縮鉄筋に D10 を用いたはりであり、引張補強筋 (D29) より圧縮鉄筋 (D10) が、大きなひずみ変化を示している。これは圧縮鉄筋の剛性が引張補強筋より小さいからであると思われる。

図. 7には封緘養生したRCはりのせん断補強筋のひずみの経時変化を示す。はりの軸方向の収縮ひずみを示している図. 3と同じように断面の高さ方向にも同様な傾向を示している。すなわち。断面の高さ方向に対しても水結合材比が小さくなるほど自己収縮ひずみは大きくなる。

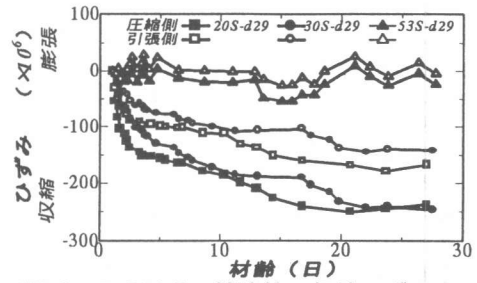


図. 6 RCはりの補強筋の収縮ひずみの経時変化

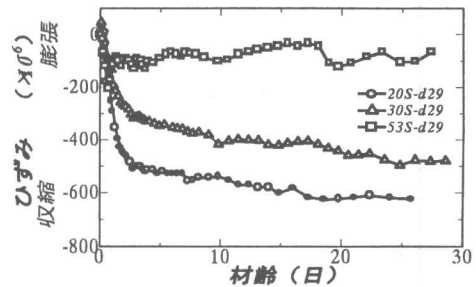


図. 7 RCはりのせん断補強筋の収縮ひずみの経時変化

## 4. 高強度コンクリートを用いたRCはりのせん断耐力

### 4. 1 実験結果の概要

表. 4に実験結果から得られた全供試体のコンクリート圧縮強度、収縮ひずみ（埋め込みゲージによるRCはりの中央コンクリートの材齢 28 日のひずみ）、斜めひび割れ発生時のせん断耐力および計算結果、終局せん断耐力および計算結果、破壊モードを示す。ここで示した計算結果は、斜めひび割れ発生時のせん断耐力は式(1)、終局せん断耐力は式(2)を用いたものである。

破壊モードとしては、本実験のすべての供試体はせん断破壊であり、7本は曲げひび割れが急激に発達することにより破壊に至る斜め引張破壊（写真1(a)）、4本は荷点付近でのコンクリート圧縮破壊によってタイドアーチ的機構の破壊に至るせん断圧縮破壊（写真1(b)）、1本(53-d29)はコンクリートと鉄筋の付着が破壊されることによるせん断付着破壊（写真1(c)）であった。

表.4 実験結果の概要

No.	供試体	収縮 ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	圧縮 強度 ( $N/mm^2$ )	斜めひび割れ発生荷重 (kN)			終局せん断耐力 (kN)			破壊 モード
				計算値	実験値	実/計	計算値	実験値	実/計	
1	20W-d22	187	166.44	44.13	61.41	0.72	53.94	58.58	0.79	S.t
2	20W-d29	142	103.44	49.04	70.98	0.69	57.37	78.01	0.74	S.t
3	20S-d22	235	95.03	44.13	59.14	0.75	55.41	59.14	0.94	S.t
4	20S-d29	231	92.20	49.04	68.31	0.72	76.98	68.31	1.13	S.c
5	30W-d22	114	70.50	51.49	53.53	0.96	58.35	53.53	1.09	S.t
6	30W-d29	121	81.62	51.49	65.59	0.79	61.29	65.59	0.93	S.t
7	30S-d29	188	67.25	53.94	61.49	0.88	66.69	61.49	1.08	S.t
8	30D-d29	207	80.83	51.49	65.38	0.79	81.40	65.38	1.25	S.c
9	53W-d29	33	47.10	53.94	54.61	0.99	96.60	54.61	1.77	S.c
10	53D-d29	167	52.97	56.39	56.79	0.99	63.74	56.79	1.12	S.t
11	53S-d22	26	39.56	44.13	44.16	1.00	64.23	44.16	1.45	S.c
12	53S-d29	33	39.46	51.49	51.48	1.00	80.90	51.48	1.57	S.f
13	20S-d00	445	***	***	***	***	***	***	***	***

\*No.13は無筋コンクリートである。破壊モードについて、S.cはせん断圧縮破壊

S.tはせん断引張破壊 S.fはせん断付着破壊を示す

#### 4. 2高強度コンクリートを用いたRC はりのせん断耐力

土木学会コンクリート標準示方書に規定されているコンクリートはりの斜めひび割れ発生時のせん断耐力の算定式は式(1)に示すせん断耐力評価式である二羽式<sup>3)</sup>に基づいている。

$$V_c = 0.2 (p_w \cdot f'_c)^{1/3} (d/1000)^{1/4} [0.75 + 1.4/(a/d)] b_w d \quad (1)$$

ここに、 $f'_c$ はコンクリートの圧縮強度 ( $N/mm^2$ )、 $p_w$ は主筋比(%)、 $a/d$ はせん断スパン比、 $b_w$ は断面の幅、 $d$ は有効高さ(mm)である。また、せん断補強筋を有するコンクリートはりにおいて、修正トラス理論によるせん断耐荷力  $V_y$  の算定式は、以下のよう示される。

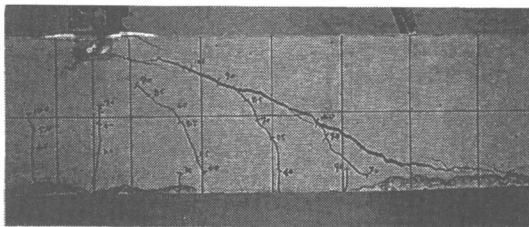
$$V_y = V_c + V_s \quad (2)$$

ここに、 $V_c$ は式(1)に示されたコンクリート貢献分、 $V_s$ は式(3)に示すせん断補強筋により受け持たれる分である。

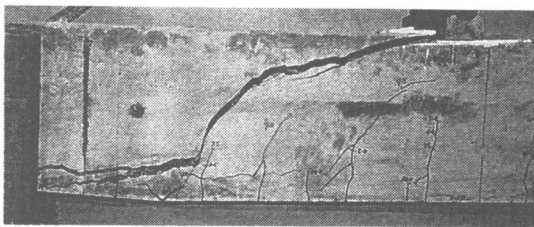
せん断補強筋により受け持たれるせん断耐力はトラス理論に基づき、以下のとおりである。

$$V_s = A_w \cdot f_y \cdot z/s \quad (3)$$

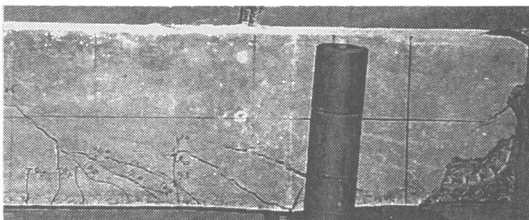
ここに、 $A_w$ はせん断補強筋1組の断面積 ( $mm^2$ )、 $f_y$ はせん断補強筋の降伏強度



(a)



(b)



(c)

写真1 はりの終局状態

( $N/mm^2$ )、 $s$  はせん断補強筋の配置間隔 (mm)、 $z$  はせん断圧縮応力の合力位置から軸方向引張補強筋図心までの距離である。

図-8には実験供試体のコンクリート圧縮強度をパラメータとして、斜めひび割れ発生時のせん断耐力において式(1)による計算結果と実験結果の比を示している。

水結合材比 53% (コンクリート圧縮強度約  $40\sim 53N/mm^2$ ) の供試体は実験結果と計算結果がほぼ一致しているが、コンクリート圧縮強度が高くなると計算値に比べて実験値が低下する。このような傾向は養生方法に関係無く現れている。コンクリートの圧縮強度が  $80\sim 110N/mm^2$  の場合は  $70\sim 80\%$  まで低下する。すなわち、高強度コンクリートを用いた RC はりの斜めひび割れ発生荷重時のせん断耐力の実験値は、土木学会コンクリート標準示方書の斜めひび割れ発生せん断力の評価式(式(1))による算定値に対して約  $70\%$  であることがわかる。

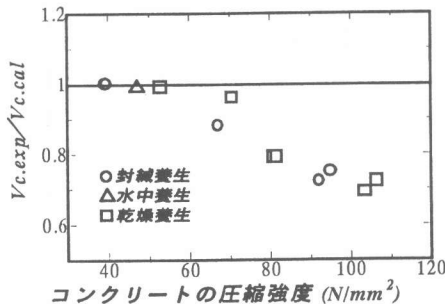


図.8 コンクリートの圧縮強度と斜めひび割れ発生時における荷重比の関係

## 5. 結論

本研究は高強度コンクリートを用いた実大 RC はりの実験を行い、RC はりでの自己収縮の経時変化を測定した。その結果から自己応力発生機構を明らかにした、さらにコンクリートの圧縮強度が大きくなるに伴い、RC はりの斜めひび割れ発生せん断耐力と計算値の

比が変化することを確認した。

研究結果から得られた結論は以下の通りである。

- 1) 実大 RC はりにおいてもコンクリート圧縮強度が増加すると、自己収縮が増加することが実測を通じて確認された。
- 2) 自己収縮は補強筋により拘束され、コンクリートに自己応力を発生させることがわかった。
- 3) 水結合材比 20% である高強度コンクリートを用いた RC はりの斜めひび割れ発生時におけるせん断耐力の実験値は、土木学会コンクリート標準示方書の評価式による算定値に対して約  $70\sim 80\%$  であることがわかった。

## 参考文献

- 1) 田澤栄一：水和反応によるセメントペーストの自己収縮、セメント・コンクリート、No. 565、1994
- 2) Nilson, A.H: "High Strength Concrete : An Overview of Cornell Research." Proc. Symp. On Utilization of High Strength Concrete, Stavanger, Norway, pp. 27-38, 1987
- 3) 二羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村甫：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、No.372/V-5, pp.167-176, 1986