

# [114] 高強度コンクリートの各種強度ならびにこれを使用した鉄筋コンクリートばりのせん断強度に関する実験研究

正会員 鄭 憲秀 (東京工業大学)

正会員 林 静雄 (東京工業大学)

正会員 黒正 清治 (東京工業大学)

## 1. まえがき

最近減水剤の開発によって、圧縮強度が  $1000\text{kgf/cm}^2$  程度までの高強度コンクリートが得られるようになってきたが、この高強度コンクリートは、普通強度コンクリートに比べ、ぜい性的な破壊をおこしやすい、といわれている。本論文は、高強度コンクリートの素材の性質を正確に把握し、その性質が鉄筋コンクリート部材のせん断強度にどう影響するかを調べる目的で行ったものである。

## 2. 高強度コンクリートの力学的特性

(1) コンクリートの調査 目標としたコンクリートの強度は、表-1に示すように  $200, 400, 600, 800\text{kgf/cm}^2$  とした。混和材料は、 $600, 800\text{kgf/cm}^2$  の場合だけ現在国内で代表的に使用されている高性能減水剤A種の Sulphonated melmaine formaldehyde condensates より Melment L10, B種の Sulphonated naphthalene formaldehyde condensates より MT150 の2種類を選んだ。養生条件は、空中養生と水中養生2種類である。

(2) 応力ひずみ関係 供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  シリンダーとし、加力は、高剛性フレームに  $300\text{ton}$  オイルジャッキを使いプレッシャーゲージ ( $600\mu/100\text{tf}$ ) を用いて検出した荷重とシリンダー中央の  $10\text{cm}$  間の縮み量を電気式変位計 ( $500\mu/\text{mm}$ ) を用いて検出し X-Yレコーダーに記録して、応力ひずみ関係を求めた。その代表的な応力ひずみ曲線 ( $c\sigma \sim c\epsilon$ ) を図-1に示す。

(3) 弾性係数 シリンダー圧縮試験による  $c\sigma \sim c\epsilon$  曲線より最大応力度 ( $c\sigma_B$ ) の  $1/4$  の応力に対するセカントモジュラス ( $cE(1/4)$ ) を求め、この  $cE(1/4)$  と  $c\sigma_B$  の関係を図-2に示し、回帰直線を得た。これは、気乾単位容積重量  $\gamma = 2.3\text{tf/m}^3$  としたときの日本建築学会式によるヤング係数  $cE$  と  $c\sigma_B$  の関係によく近

表-1 コンクリートの調査

Design strength, (kg/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/a (%)	Mix proportion by weight (kg/m <sup>3</sup> )				
			Cement	Water	Sand	Aggregate	Admixture
200	75	50	297	223	888	888	—
400	52	45	429	223	750	927	—
600	38	37	500	190	624	1067	2.5
800	27	35	700	190	532	992	5.6

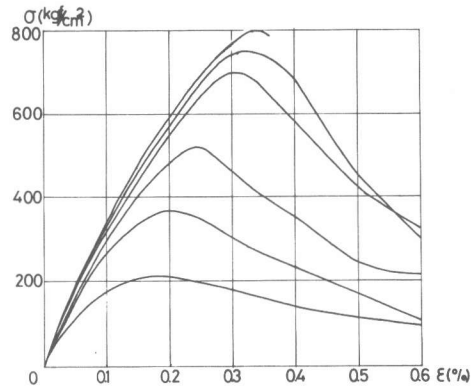


図-1 代表的なコンクリートの応力ひずみ曲線

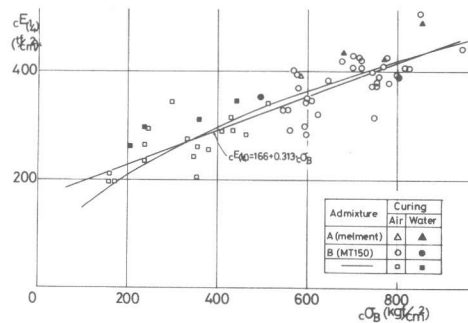


図-2  $c\sigma_B$  と  $cE(1/4)$  との関係

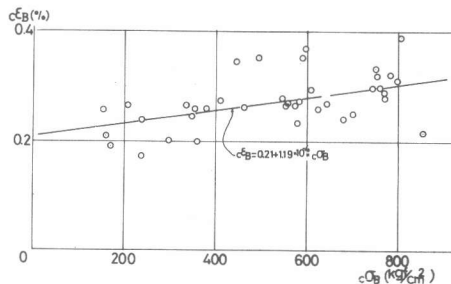


図-3  $c\sigma_B$  と  $c\epsilon_B$  との関係

似している。

(4)最大応力度時のひずみ度 応力ひずみ曲線より、最大応力度 ( $c^{\sigma_B}$ ) と最大応力度時のひずみ ( $c^{\epsilon_B}$ ) との関係を 図- 3 に示し、回帰直線を得た。

(5)引張強度 図- 4 にシリンダー割裂強度 ( $c^{\sigma_t}$ ) と  $c^{\sigma_B}$  との関係を示し、回帰直線を得た。

上述の高強度コンクリートの力学的性質では、養生条件と減水剤のちがいによる影響は認められなかった。

### 3. 高強度コンクリートと鉄筋の付着強度

(1)実験概要 高強度コンクリートと鉄筋の付着強度について、普通強度コンクリートの場合と比較検討する目的で ASTM C-234 に準じた試験法により鉛直筋の引抜き実験を行った。鉄筋としては、鉄筋が抜け出す前に降伏することがないように SD35 の異形鉄筋を焼入れして、降伏点強度を  $7.7 \text{ tf/cm}^2$  に高めたものを使用した。鉄筋の種類、割裂補強の有無 (R-type : 丸鋼 16φ, D-type : 波ふし異形棒鋼 D16, DS-type : D-type に 6 φ スパイラルを 3 cm ピッチで割裂補強したもの), とコンクリート強度を変えて実験を行った。調査は、Table 1 と同じで減水剤は MT150 を使った。又 養生は、水温 8 ~ 12°C の水中養生とした。

(2)実験結果 図- 5 に最大付着応力度 ( $\tau_{a \text{ max.}}$ ) と  $c^{\sigma_B}$  の関係を示す。異形鉄筋の D-type, DS-type は、コンクリート強度に比例して、最大付着強度が大きくなり、その増加の割合は、割裂強度の場合とほぼ同じであった。図- 6 に  $\tau_{a \text{ max.}}$  を  $c^{\sigma_B}$  で除した値 ( $\tau_{a \text{ max.}}/c^{\sigma_B}$ ) と  $c^{\sigma_B}$  との関係を示す。コンクリート強度が大きくなるに従って、 $\tau_{a \text{ max.}}/c^{\sigma_B}$  は小さくなっているが、800  $\text{kgf/cm}^2$  の高強度コンクリートの場合でも異形鉄筋の最大付着強度は、圧縮強度の 0.3 倍をこえている。

### 4. 鉄筋コンクリートばりのせん断強度

(1)実験概要 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリートばりのせん断強度及び変形状を調べる目的で行ったものである。実験は、主筋に異形鉄筋 SD35 ( $\sigma_y = 3.7 \text{ tf/cm}^2$ ) を使用した実験 "A" と主筋の降伏点強度を  $7.7 \text{ tf/cm}^2$  に高めたものを使用した実験 "B" の 2 通りがある。

(2)試験体及びパラメーター 試験体は、図- 7 に配筋図の 1 例を示すように、断面が  $12\text{cm} \times 20\text{cm}$  , シアスパン比  $a/D = 1.5$  , 鉄筋比  $p_t = p_c = 2.84\%$  (3-D16) でこれらは、32体の全試験体共通である。パラメーターとしては、コンクリート強度とせん断補強筋比 ( $p_w$ ) である。表- 2 にせん断補強筋比のリストを示す。

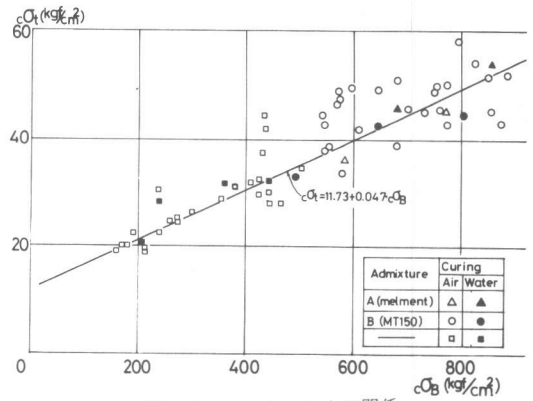


図- 4  $c^{\sigma_B}$  と  $c^{\sigma_t}$  との関係

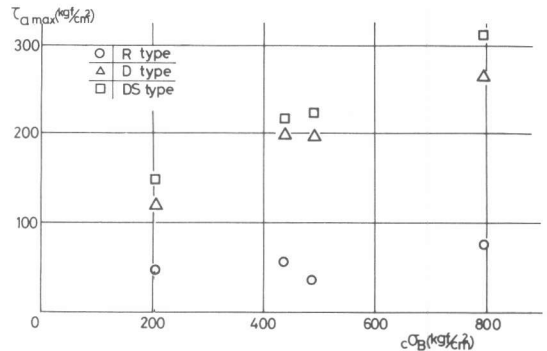


図- 5  $c^{\sigma_B}$  と  $\tau_{a \text{ max}}$  との関係

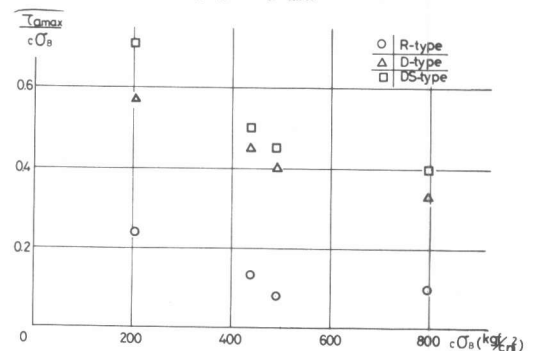


図- 6  $c^{\sigma_B}$  と  $\tau_{a \text{ max}}/c^{\sigma_B}$  との関係

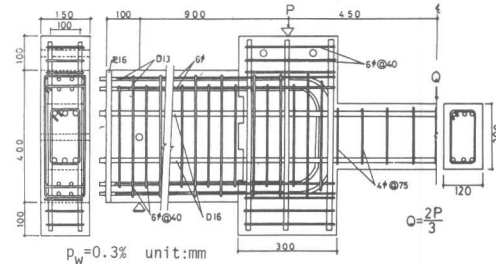


図- 7 配筋図の例 (200-N-0.3)

表一 3 に使用した鉄筋の力学的性質を示す。 調査は、表一 1 のもので、減水剤は、M T150 を使った。

(3) 加力及び測定方法 加力及び相対変形測定は、図一 8 に示す方法で逆対称一方向単調載荷を行い、変形は、ダイヤルゲージ A と B の平均を相対変形 ( $\delta$ ) とした。

(4) 実験結果及び検討 実験結果一覧表を 表一 4 に示す。試験体名は、目標としたコンクリート強度、主筋の強度 (N: 普通鉄筋, H: 高強度鉄筋) そして、せん断補強筋比の概数を表わす。実験値は、各試験体ごとのコンクリート強度 ( $c^{\sigma_B}$ )、せん断ひびわれ強度  $\tau_c$  ( $Q_c/b_j$ )、せん断終局強度  $\tau_u$  ( $Q_u/b_j$ ) を示した。計算値は、せん断ひびわれ強度式が荒川式(1)及び(2)式と Mathey 式 (3) せん断終局強度式が荒川式(4) 及び(5)式である。

$$(1) \tau_c \text{ min.} = 0.065kc(500+c^{\sigma_B}) / \{(M/Qd)+1.7\}$$

$$(2) \tau_c \text{ mean.} = \tau_c \text{ min.} / 0.77$$

$$(3) \tau_c \text{ Mathey} = (8/7)(0.82 \sqrt{c^{\sigma_B}} \times Qd/M + 280 p_t)$$

$$(4) \tau_u \text{ min.} = 0.092k_u \cdot k_p(180+c^{\sigma_B}) / \{(M/Qd)+0.12\}$$

$$+2.7\sqrt{p_w \cdot w^{\sigma_y}}$$

$$(5) \tau_u \text{ mean.} = k_u \cdot k_p(180+c^{\sigma_B}) \times 0.12 / \{(M/Qd)+0.12\}$$

$$+2.7\sqrt{p_w \cdot w^{\sigma_y}}$$

荷重 (P) と相対変形 ( $\delta$ ) 関係の 1 例として 図一 9 に普通鉄筋を用いたせん断補強筋比 ( $p_w$ ) 0.3% のものの P- $\delta$  曲線を示す。コンクリート強度が 200kgf/cm<sup>2</sup> のものは、初期剛性をもっとも小さく、せん断ひびわれ発生荷重以後の剛性低下も大きくなっている。他の試験体は、ほぼ同じ初期剛性を示し、最大荷重はコンクリート強度が高くなるに従って大きくなった。800 kgf/cm<sup>2</sup> のものだけ曲げ降伏し、最大耐力以後の耐力低下は、他の試験体よりやや急激であるが、最大耐力に達したのは部材角として、1/50 rad. で大きな変形能力を示した。

せん断ひびわれ強度  $\tau_c$  とコンクリート強度  $c^{\sigma_B}$  との関係を図一 10 に示す。コンクリート強度が 500 kgf/cm<sup>2</sup> 以下では、コンクリート強度が大きくなるほどせん断ひびわれ強度は大きくなり、それ以上になると頭打ちになっていた。その傾向は、荒川式より  $c^{\sigma_B}$  の平方根に比例するとしている R.C. Mathey 式に近い結果になっていた。

図一 11 にせん断終局強度  $\tau_u$  の実験値を荒川 min.

表一 2 せん断補強筋比のリスト

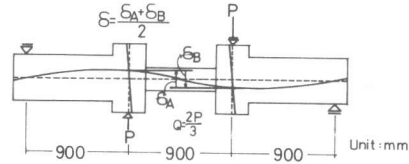
$P_w$ (%)	Diameter (mm)	Pitch (mm)
0.0	-	-
0.3	4	7.5
0.5	4	4
0.8	5	4
1.2	6	4

表一 3 鉄筋の力学的性質

Bars	$s^{\sigma_y}$ (tf/cm <sup>2</sup> )	$s^{\sigma_{max}}$ (tf/cm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
D16	3.7	5.5	28.5
D16	7.7	8.3	12.0
6 $\phi$	3.5	3.9	29.9
5 $\phi$	4.5	4.8	19.2
4 $\phi$	4.1	4.6	30.2

$s^{\sigma_y}$ : yield strength of reinforcing bar

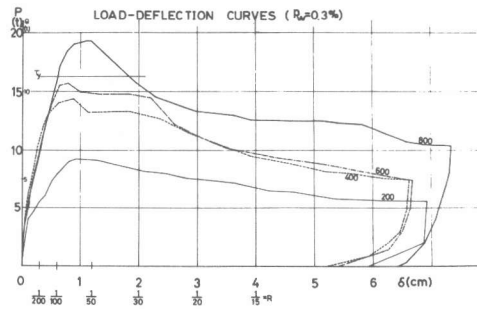
$s^{\sigma_{max}}$ : maximum strength of reinforcing bar



図一 8 加力及び変形測定方法

表一 4 実験結果一覧表

Specimen	$c^{\sigma_B}$ kgf/cm <sup>2</sup>	test values		test value/calculated value				
		$\tau_c$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\tau_u$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\tau_c$			$\tau_u$	
				(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
200-N-0.0	274	18.1	25.4	1.29	0.99	1.00	1.09	0.84
200-N-0.0	155	16.3	16.3	1.39	1.07	1.03	0.95	0.73
200-N-0.3	259	14.5	33.6	1.08	0.83	0.81	1.06	0.85
200-N-0.5	259	18.1	48.3	1.35	1.04	1.01	1.38	1.13
200-N-0.8	259	21.8	56.6	1.62	1.25	1.21	1.46	1.22
200-N-1.2	274	22.1	61.7	1.61	1.24	1.22	1.52	1.30
400-N-0.0	469	23.6	30.8	1.36	1.05	1.13	0.93	0.72
400-N-0.0	431	21.8	24.3	1.30	1.00	1.19	0.78	0.60
400-N-0.3	445	21.8	52.2	1.30	1.00	1.04	1.28	1.03
400-N-0.5	469	25.4	54.4	1.58	1.22	1.21	1.20	0.98
400-N-0.8	445	25.4	65.3	1.52	1.17	1.23		
400-H-0.8	335	21.8	63.5	1.45	1.12	1.14	1.49	0.95
400-N-1.2	431	29.0	72.9	1.73	1.33	1.42		
400-H-1.2	348	21.8	72.6	1.43	1.10	1.13	1.64	1.38
600-N-0.0	464	21.8	32.6	1.26	0.97	1.04	0.99	0.76
600-H-0.0	623	21.8	21.8	1.08	0.83	0.96	0.53	0.41
600-N-0.3	545	21.8	57.0	1.18	0.91	1.00	1.23	0.99
600-H-0.3	596	21.8	39.2	1.11	0.85	0.97	0.80	0.64
600-N-0.5	545	25.4	68.9	1.39	1.07	1.16		
600-H-0.5	591	21.8	68.1	1.11	0.85	0.97	1.31	1.07
600-N-0.8	545	25.4	71.8	1.39	1.07	1.16		
600-H-0.8	559	25.4	78.7	1.56	1.20	1.15	1.46	1.20
600-H-1.2	574	23.6	79.8	1.33	1.02	1.06	1.43	1.18
800-N-0.0	876	25.4	39.9	1.05	0.81	1.01	0.74	0.57
800-N-0.0	799	21.8	27.2	0.93	0.72	0.89	0.54	0.42
800-H-0.0	700	24.6	32.7	1.30	1.00	1.05	0.72	0.56
800-N-0.3	886	25.8	70.0	1.03	0.79	1.01		
800-H-0.3	744	23.6	45.4	1.06	0.82	0.98	0.81	0.64
800-N-0.5	856	30.8	77.6	1.26	0.97	1.23		
800-H-0.5	769	25.4	53.3	1.12	0.86	1.05	0.87	0.70
800-H-0.8	761	23.6	72.6	1.04	0.80	0.98	1.13	0.92
800-H-1.2	701	25.4	86.0	1.18	0.91	1.00	1.38	1.13



図一 9 荷重変形曲線例

式で除した値とコンクリート強度  $c\sigma_B$  との関係を示す。 $c\sigma_B$  が  $400 \text{ kgf/cm}^2$  以下の場合には、その値は荒川 min. 式に対し、ほぼ 1 以上であるが、 $c\sigma_B$  が  $400 \text{ kgf/cm}^2$  をこえると、せん断補強筋量が少ない場合には 1 以下となり、多い場合には 1 以上になっていて、高強度コンクリートばりのせん断終局耐力は、ある程度せん断補強筋が入ると荒川式でほぼ近似できる。図-12に  $p_w = 0$  の場合の  $\tau_u$  と  $c\sigma_B$  との関係を示す。図中の直線は(4)式の荒川 min. 式である。 $c\sigma_B$  が  $400 \text{ kgf/cm}^2$  をこえると、 $\tau_u$  の値は頭打ちになっている。そこで、無補強の高強度コンクリート部材のせん断終局強度を求める際、荒川 min. 式において  $c\sigma_B$  を  $400 \text{ kgf/cm}^2$  で頭打ちにすればよいと考え、その値を  $\tau_u(p_w=0)$  とすれば、せん断補強筋の効果を見るために  $\tau_u$  から  $\tau_u(p_w=0)$  を差し引いたものの  $\tau_u - \tau_u(p_w=0)$  と  $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$  との関係を図-13に示す。この結果からみると、せん断補強筋の効果は、荒川式で示される  $2.7\sqrt{p_w \cdot w \cdot \sigma_y}$  より、 $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$  に比例するという ACI 式に近い傾向を示している。

## 5. 結論

(1)コンクリートの弾性係数、引張強度、異形鉄筋との付着強度は、高強度コンクリートになるほど大きくなるが、圧縮強度の上昇に比べ、その上昇の割合は小さい。

(2)鉄筋コンクリートばりのせん断ひび割れ強度は、コンクリート強度が  $500 \text{ kgf/cm}^2$  以下では、コンクリート強度が大きくなるほど大きくなり、それ以上になると頭打ちになる。

(3)無補強の鉄筋コンクリートばりのせん断終局強度は、コンクリート強度が  $400 \text{ kgf/cm}^2$  程度までは、コンクリート強度とともに増大し、荒川 min. 式によく合うが、それ以上のコンクリート強度では頭打ちになる。高強度コンクリートばりのせん断補強筋による補強効果は、荒川式で考えているものより大きく、ある程度補強すればかなりのせん断終局耐力の上昇が期待できる。

謝辞：本研究に際し、御協力を頂いた株式会社神戸製鋼所と高周波熱練株式会社に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- (1)荒川卓, 「鉄筋コンクリートばりの許容せん断力とせん断補強について」, コンクリートジャーナル July 1970
- (2)R.C.Mathey, D.Watstein; "Shear Strength of Beams without Web Reinforcement Containing Deformed Bars of Different Yield Strengths" Journal of ACI 1963, №2
- (3)日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
- (4)ACI, Standard Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-77)
- (5)P.T.Wang, S.P.Shah, and A.E.Naaman; "Stress-Strain Curves of Normal and Light Weight Concrete in Compression" ACI Journal November 1978

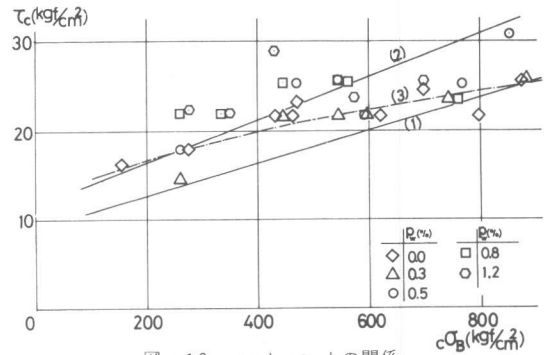


図-10  $\tau_c$  と  $c\sigma_B$  との関係

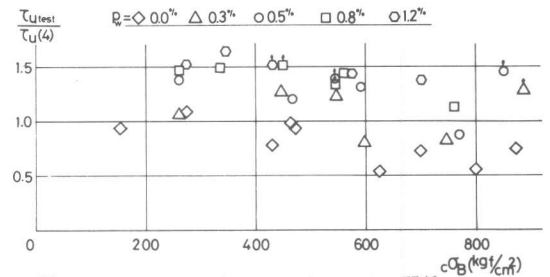


図-11  $\tau_u(\text{test}) / \tau_u(\text{min})$  と  $c\sigma_B$  との関係

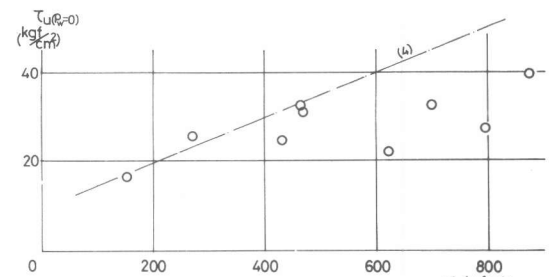


図-12  $\tau_u$  と  $c\sigma_B$  との関係 ( $p_w = 0$ )

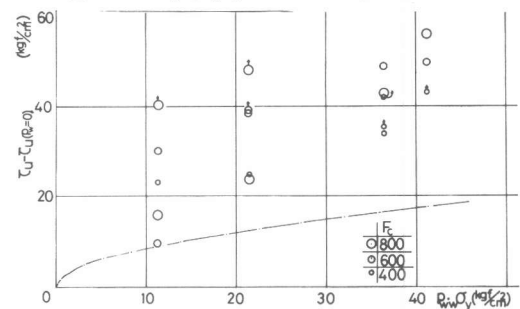


図-13  $\tau_u - \tau_u(p_w=0)$  と  $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$  との関係