

論文 高強度コンクリートの耐力劣化域における応力-歪曲線に及ぼす養生条件等の影響

北野敦則*1・城 攻*2・後藤康明*3・佐藤千鶴子*4

要旨：コンクリートシリンダーを用いて1軸圧縮応力試験を行い、フレコンクリートの歪軟化域を含む応力-歪曲線形状に及ぼす種々の影響に関して考察し、最大耐力以降の内部破壊状況と、歪軟化域における応力-歪曲線との対応を検討した。養生条件は含水量を用いて評価することができ、応力-歪曲線指標値との相関関係が示された。また、養生による破壊状況の相違が亀裂の可視化によって明瞭に把握できた。これらの結果から養生条件を考慮した応力-歪曲線算定式を提案した。

キーワード：高強度コンクリート、応力-歪曲線、歪軟化域、破壊過程、養生条件、含水量

1. はじめに

通常強度のコンクリートと比較して、高強度・超高強度コンクリートの応力-歪曲線の形状は、応力上昇域において直線的な推移を示し、最大耐力後の歪軟化域における剛性低下が著しいことが一般に知られている。しかし、高強度コンクリートでは、高剛性試験機を必要とすることもあり、その実測例は少ない。従来のコンクリートの応力-歪関係の研究は、主に標準養生条件で作られたコンクリートを対象としており、実際の構造体の養生条件に従って作成されたコンクリートについては、その発現強度や弾性係数を注視するのに留まり、その基本性状である応力-歪関係を未だ明かにしていない。

本研究では1軸圧縮応力下のフレコンクリートの歪軟化域を含む応力-歪曲線形状に及ぼす種々の影響を考慮した700kg/cm²級の高強度コンクリートに対応する応力-歪曲線算定式の提案を目的とした実験的検討を行った。

2. 実験計画

2.1 実験要因

供試体は10φ×20cmのシリンダーを用い、すべて機械研磨によりキャピリングを行った。細骨材は鶴川産の海砂(最大径5mm以下)、粗骨材は常盤産砕石(1.2~10, 5~13, 10~25mm)をそれぞれ使用した。表1に調合表を示す。

表1 調合表

【単位:kg/m³】

	F _c	水セメント比	水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤
1	800	34.0%	167	491	790	950	11.4
	500	50.0%	176	353	910	962	1.8
	210	75.0%	220	293	900	919	-
2	700	35.0%	172	491	790	950	10.8
	600	37.0%	169	456	845	962	9.9

実験要因を表2に示す。シリーズ1は応力-歪曲線の形状に及ぼす影響に関する基礎的資料を求めるためにコンクリート強度、セメントの種類、養生条件、試験材令を実験要因とした。シリーズ2はシリーズ1の結果から応力-歪曲線に大きい影響を与えた養生条件と含水量との関係を明らかにするもので、養生条件、供試体乾燥状態、試験材令に加えて粗骨材最大寸法を実験要因とした。シリーズ3は最大耐力以降の耐力下降域で加力を中止して、内部の破壊状況を観察するために、養生条件、加力中止点の荷重を実験要因とした。シリーズ2とシリーズ3では早強セメントを使用し、単調載荷を行った。

*1 北海道大学助手 工学部建築工学科、工修(正会員)

*2 北海道大学教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

*3 北海道大学助手 工学部建築工学科、工博(正会員)

*4 東急建設(株)、工修(非会員)

2. 2 加力及び計測

加力装置は図1に示すような電気制御油圧式7クチュエータ（最大300ton）と高剛性加力フレーム（剛性5000t/cm）を組み合わせたものを用いた。また、応力下降域で球座の回転によって供試体の非対称破壊を助長することを防ぐために、図2に示すような上部加圧板の4隅に設置したボルトを固定することにより球座の回転を拘束できるようにした。またシリーズ3の供試体については、最大耐力以降AD・WW75は最大耐力の75%、AD・WW50は50%まで荷重が低下した時点で加力を中止し、除荷することとした。AD・WW25は荷重が十分に低下し、安定し始める点（最大耐力の25%程度）で加力を中止し除荷することとした。

荷重値は7クチュエータ付属のロードセルで検出した。供試体の変形計測は、縦方向歪はコンプレッソメータと加圧板間の変位より計測し、横方向歪は、供試体中央部直径の変形を用いた。本実験では1水準につき3本の供試体を用い、シリーズ1では同一歪時の応力度の平均値 σ として得られる応力-歪曲線を、シリーズ2,3では σ_B と ϵ_m で規準化した曲線の同一歪時の応力度比を平均して得られた曲線に表1の σ_B 、 ϵ_m を乗じて求めた応力-歪曲線を用いて検討する。

3. 実験結果および考察

3. 1 既往の提案式との比較

シリーズ1の実験で実測した応力-歪曲線との比較に、Popovics式[1]、Fafitis・Shah式[2]、野口式[2]、白井式[2]の4提案式を使用した。図3に気中養生の実測値と計算値の比較を例示する。また、最大耐力時歪(ϵ_m)は、Popovics式、Fafitis・Shah式については原文に付記されたものを、野口式、白井式についてはNew・RC高強度鉄筋分科会FEM・WGの提案式[2]を使用した。Popovics式では、養生条件にかかわらず ϵ_m が実測値よりかなり小さく評価されているが、

表2 実験要因及び結果

【単位： $\sigma, \epsilon \times 10^4$ (kgf/cm²), ϵ (μ), ω (%)】

供試体	W/C	養生条件	セメント種類	材令				材令		
				ϵ_m	σ_B	$E_{1/3}$	$E_{2/3}$			
2HE	34	2日間密封後 気中養生	早強 ポルトランド	2850	342	3.13	2.79	2週		
2HE60				3130	616	3.11	2.77	60日		
7HE		7日密封気中		早強 ポルトランド	2780	561	3.25	2.87	2週	
14HE					2600	523	3.34	2.98	2週	
14HE60		密封			早強 ポルトランド	2530	590	3.53	3.17	60日
WHE						2850	653	3.38	3.01	2週
WHE60		水中	早強 ポルトランド			2950	728	3.69	3.26	60日
6HN						2750	535	3.32	2.92	4週
WHN		6日密封気中 水中		普通 ポルトランド		2460	522	3.33	2.92	4週
2WE						2680	369	2.75	2.35	2週
2WE60		2日密封気中			早強 ポルトランド	2780	430	2.93	2.50	60日
WWE						2350	392	2.98	2.56	2週
WWE60	水中	早強 ポルトランド	2580			450	3.25	2.77	60日	
6MN			2700			370	2.79	2.31	4週	
WNN	6日密封気中 水中		普通 ポルトランド	2310		386	2.98	2.60	4週	
2LE				2580		194	1.99	1.58	2週	
2LE60	2日密封気中			早強 ポルトランド	2780	242	2.14	1.73	60日	
WLE					1950	188	2.27	1.89	2週	
WLE60	水中	早強 ポルトランド			1930	215	2.51	2.13	60日	
6LN					2600	210	2.08	1.67	4週	
WLN	6日密封気中 水中		普通 ポルトランド		1810	192	2.52	2.09	4週	
6LN					1810	192	2.52	2.09	4週	

供試体	W/C	養生条件	粗骨材	ω	除荷条件				材令		
					ϵ_m	σ_B	$E_{1/3}$	$E_{2/3}$			
ADN0	35	2日間 乾試験	5~13 (mm)	5.10	3520	660	3.13	2.73	2週		
AW48				5.40	3150	646	3.22	2.85			
AWN6		湿試 2週	1.2~10	4.85	3640	677	3.20	2.80			
AD5				4.95	2880	574	3.09	2.74			
ADL		密封 乾試験	10~25	5~13	4.56	3620	741	3.27		2.89	2週
ADN8					5.72	3050	671	3.32		3.00	
WNN0	標準 湿試験	2週	5~13		5.53	3200	707	3.32	3.00		
WD48					5.00	3460	841	3.50	3.17		
WDN6	水中	6週			1.2~10	5.37	3180	680	3.44	3.00	2週
WWS						5.79	2610	592	3.36	2.99	
WWL	密封 湿試験	10~25		5~13		5.46	2840	733	3.69	3.35	8週
WNN8						5.41	3230	674	3.28	2.90	
CDN0	密封 乾試験	6週	5~13			5.41	3230	674	3.28	2.90	2週
CDN8						5.30	3110	749	3.66	3.27	
AD75	35	気中養生			σ_B の75%劣化時	3570	661	3.30	2.89	2週	
AD50						" 50% "	3260	672	3.30		2.92
AD25				" σ_B = 25% "		3350	668	3.25	2.84		
WW75		水中養生		σ_B の75%劣化時		3020	707	3.50	3.13		
WW50			" 50% "			2950	703	3.55	3.16		
WW25			" σ_B = 25% "			3120	724	3.53	3.16		

ϵ_m :最大耐力時歪 σ_B :最大耐力 $E_{1/3}, E_{2/3}$:1/3, 2/3ヤング係数
 ω :重量含水率

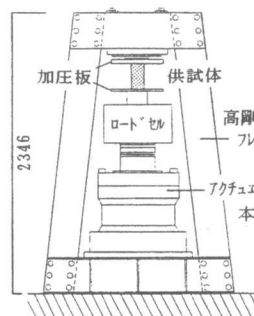


図1 加力装置

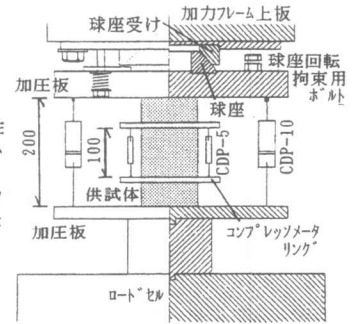


図2 加力装置詳細

(a) Popovics式

$$\eta = \frac{n \xi}{n-1+\xi^n} \quad \xi = \epsilon / \epsilon_m$$

$$\eta = \sigma / f_c, n=0.00571 f_c + 1$$

(b) Fafitis・Shah式

$$\sigma / f_c = 1 - (1 - \epsilon / \epsilon_m)^\lambda$$

$$\sigma / f_c = \exp\{-k(\epsilon - \epsilon_m)^{1.15}\}$$

$$A = E_c \cdot \epsilon_m / f_c, k = 0.17 \cdot f_c$$

(c) 野口式
 Fafitis・Shah式

$$\sigma = \frac{f_c - 100}{\epsilon_m - 0.005} (\epsilon - \epsilon_m) + f_c$$

$$\sigma = 100 \quad (\epsilon_m \leq \epsilon \leq 0.005)$$

$$\sigma = 100 \quad (\epsilon \geq 0.005)$$

(d) 白井式
 Fafitis・Shah式

$$\sigma = f_c (ax^3 + bx^2 + 1.0)$$

$$\sigma = 100 \quad (\epsilon_m \leq \epsilon \leq 2.7 \epsilon_m)$$

$$\sigma = 100 \quad (\epsilon \geq 2.7 \epsilon_m)$$

$$a = -(100/f_c - 1)/4$$

$$b = 3(100/f_c - 1)/4$$

$$x = 2(\epsilon / \epsilon_m - 1.0) / 1.7$$

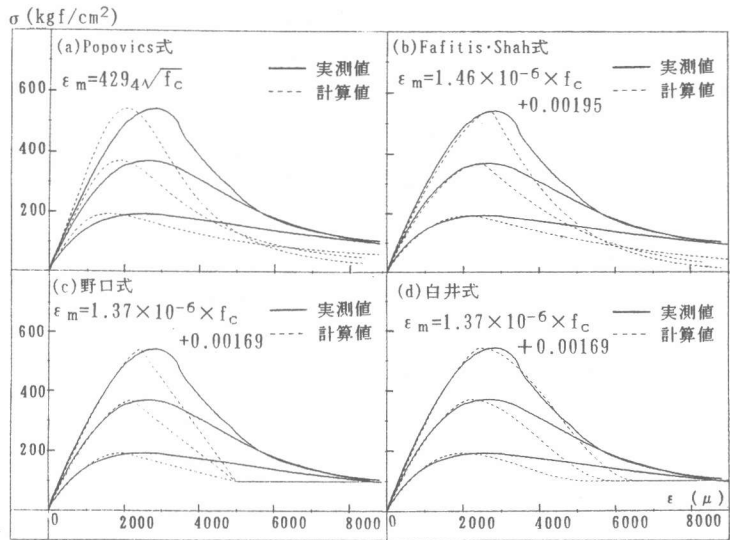


図3 計算値と気中養生実験値の比較

最大耐力から下降域への状況を連続した曲線で表示するため実測値の形状に近似しており、歪度 5000 μ 付近までの負勾配もかなり実測値に対応している。Fafitis・Shah式は、上昇域において概ね実験値をよく推定している。また、下降曲線においては実測値を大きく下回っている。野口、白井式とも最大耐力までFafitis・Shah式を使用しており、実測した応力-歪曲線の最大応力時の80~90%レベルまでの上昇曲線とほぼ一致しているが、最大耐力時近傍で若干剛性を高く評価している。また最大耐力以降の下降線を野口式は直線で表現しているため実測の下降曲線と大きく異なる。白井式は気中養生では高強度コンクリートの、水中養生では低中強度コンクリートの下降域の曲線を比較的よく評価しているが、その他の場合に対応できず、同一養生条件におけるコンクリート強度との対応に改良が必要である。いずれも気中養生より水中養生の供試体がよい対応を示した。

3. 2 破壊過程

破壊状況の観察には、シリーズ2のADNO(気中養生)とWWNO(水中養生)およびシリーズ3の各実験変数ごとに2本の供試体を用いた。圧縮試験した供試体の内部の亀裂を観察するため、着色塗料を混入した接着剤を注入し硬化させ、供試体を縦に4等分し破壊状況を観察した。

高歪域まで加力した供試体の最終破壊状況は、図4のA^oに大別することができる。それぞれについて主要な亀裂が供試体断面の対角線上に発生しているものを剪断型、供試体上部から中央に向けて斜め亀裂が発生し、中央より下部は軸方向亀裂が多くみられるものを端部圧壊型、上下に発生した斜め亀裂が中央の細かい軸方向の亀裂と連続し、弓状の亀裂となったものを剪断圧壊型と呼ぶことにする。

図5に各応力レベルにおける亀裂の進展状況を示す。これによると気中養生と水中養生で下降初期段階(最大耐力の75%, 50%)における亀裂角度が異なっているが、これは端面摩擦の影響と考えられる。また、水中養生では下降初期に軸方向亀裂が多く発生し、引張歪の破壊基準によって亀裂が発生すると思われるが、相対軸方向歪($\epsilon_{max} / \epsilon_m$)が1.7程度になるとモル・クロンの破壊基準により剪断亀裂が発生し、そこに破壊が集中して引張歪による亀裂はあまり入らなくなる。気中

養生に関してはどのような破壊基準で亀裂が発生しているかよくわからないが、やはり相対軸方向歪が 1.7 程度で破壊域と思われる領域が形成される。また、気中養生は水中に比べ、骨材とモルタルの付着が良くないためボンドクラックが多く発生し、その後の亀裂の伸展にも影響を与えている。

3.3 養生条件の影響

シリーズ1の供試体について養生条件の影響を検討した。図6に養生条件の相違による応力-歪曲線の影響を示す。低強度供試体では気中養生の方が若干最大耐力が高く、中・高強度では水中養生の方が最大耐力が高いが、いずれの強度でも水中養生供試体の応力-歪曲線での上昇・下降曲線勾配が気中および密封養生供試体に比べて急勾配になっている。特に下降曲線においては、最大耐力から歪度5000 μ までの勾配は気中養生よりかなり急峻であった。最大耐力時の歪度も気中養生供試体よりも水中養生供試体の方が小さくなっている。また、水中養生供試体はそれ以外の養生をした供試体よりも小さい歪度および応力度の値に収束している。

シリーズ1の結果をもとにシリーズ2では更に詳細な検討を行った。養生条件の指標として供試体の試験時重量から絶乾状態の重量の差を含水量と定義し、使用することにした。以下、含水量を試験時重量で除したものを重量含水率(ω)として用いることにする。

高強度コンクリートの軸方向応力-歪曲線は、耐力以降激しく劣化する区間と応力度の変化が少なく、歪が増加する区間に分割して考察する。ここで最大耐力以前を”上昇域”、下降曲線の曲率最大変化点までを”下降域”、それ以降を”安定域”と呼ぶ。(図7参照)

(1) 応力-歪曲線上昇域

養生条件を重量含水率 ω を用いて示すと、 ω (%)と応力-歪曲線上昇域の各指標値($\epsilon_m, E_{1/3}, E_{2/3}$)は明らかに相関関係を持っていた。この関係をさらに一般化するために、各指標値について養生条件以外は同一条件である供試体を水中養生供試体の指標値で除し、相対含水率 ω_n/ω_w と相対最大耐力時歪 $\epsilon_{mn}/\epsilon_{mw}$ 、相対

1/3ヤング係数 $E_{1/3n}/E_{1/3w}$ の関係について直線回帰を行うと以下のようなになる。また ϵ_m については、水中と他の供試体の差が10%を超えるものを除いた場合、耐力の影響が除かれ相関が高くなる。

$$\epsilon_{mn}/\epsilon_{mw} = -1.35 \omega_n/\omega_w + 2.32 \quad \gamma = 0.78 \quad (\text{全試験体}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{mn}/\epsilon_{mw} = -1.18 \omega_n/\omega_w + 2.20 \quad \gamma = 0.86 \quad (\text{強度差10\%以内}) \quad (2)$$

$$E_{1/3n}/E_{1/3w} = 0.58 \omega_n/\omega_w + 0.42 \quad \gamma = 0.95 \quad (3)$$

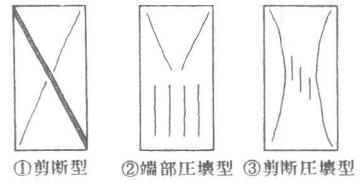


図4 破壊パターン

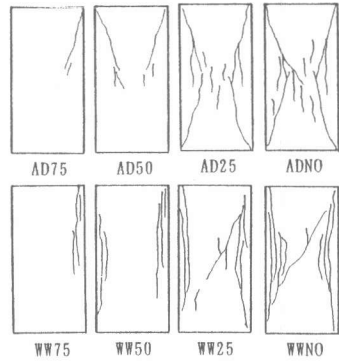


図5 亀裂の伸展状況

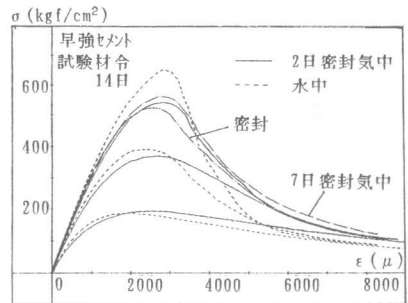


図6 養生条件の応力-歪曲線に与える影響

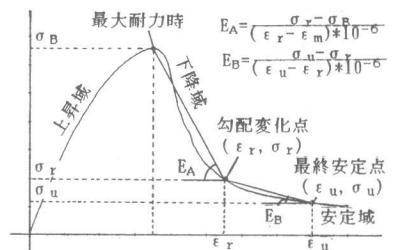


図7 歪み軟化域指標値の求め方

以上より、水中養生供試体の応力-歪曲線上昇域における指標値と相対含水率がわかれば、強度がほぼ等しい他の養生条件下にある供試体の力学特性値を推定することができる。

(2) 応力-歪曲線下降域

本研究では下降域の指標として、勾配の変化点(ϵ_r, σ_r)、最大耐力時~勾配変化点間の割線勾配(下降勾配 E_A)、最終安定点(ϵ_u, σ_u)及び安定域の勾配(安定勾配 E_B)を用いた。3.2破壊過程の結果より、コンクリートの破壊の支配的形態が変化する点を次のように定義する。

$$\epsilon_r = \epsilon_m \times 1.7 \quad (4)$$

上式は 500~700kgf/cm²程度の高強度コンクリートについての結果であり、上式から求めた ϵ_r を同一養生条件ごとに平均した。応力-歪曲線より低強度、中強度の ϵ_r もほぼ高強度の ϵ_r に一致すると思われる。これより強度に関わらず養生毎に ϵ_r を決定し、この時の応力を σ_r として求めた。変化点後は応力-歪曲線は収束し、安定した推移を示す。さらに、最終安定点歪を $\epsilon_u=8000(\mu)$ と定義し、その時の応力を σ_u として求めた。

(3) 圧縮強度の影響

圧縮強度と応力-歪曲線の各指標値について回帰を行うと、回帰式は以下ようになる。これらはいずれも圧縮強度と強い相関がある。ただし水中養生の σ_r は σ_B に関わらず、全ての供試体について平均値(163kg/cm²)にほぼ近い値を示した。

$$\text{気中養生} \quad \epsilon_m = 1.76 \times \sigma_B + 2130 \quad \gamma = 0.84 \quad (5)$$

$$E_c = 0.27 \times \sigma_B^{0.38} \quad \gamma = 0.97 \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sigma_r = 0.22 \sigma_B + 118 & \gamma = 0.93 \ (\sigma_B < 600) \text{ ADLを除く} \\ \sigma_r = -0.35 \sigma_B + 453 & \gamma = 0.83 \ (\sigma_B \geq 600) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{水中養生} \quad \epsilon_m = 2.10 \times \sigma_B + 1500 \quad \gamma = 0.96 \quad (8)$$

$$E_c = 0.51 \times \sigma_B^{0.30} \quad \gamma = 0.98 \quad (9)$$

(4) 応力-歪曲線式の検討

1・最大耐力時歪、初期弾性係数の表示式：これまでの検討結果より、水中養生の ϵ_m, E_c 算定式(8,9式)に養生の影響を取り入れた ϵ_m, E_c の比を乗じることによって、水中養生以外の養生下にあるコンクリートの ϵ_m, E_c を推定することができる。

$$\epsilon_m = (-1.18 \omega_n / \omega_w + 2.20) \times (2.10 \times f_c + 1500) \quad \gamma = 0.93 \quad (10)$$

$$E_c = (0.58 \omega_n / \omega_w + 0.42) \times (0.51 \times f_c^{0.30}) \quad \gamma = 0.96 \quad (11)$$

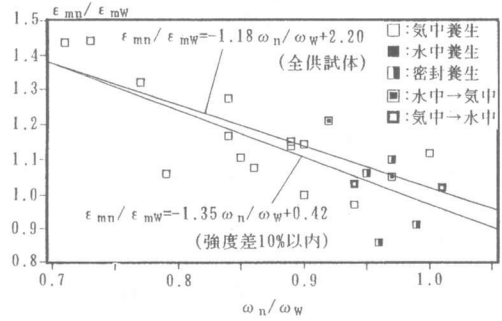


図8 相対最大耐力時歪-相対含水率関係

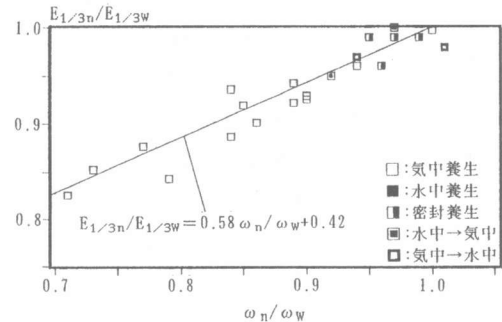


図9 相対1/3ヤング係数-相対含水率関係

ここで、 ω_n/ω_w (相対含水率)の値がない場合は、気中養生は $\omega_n/\omega_w=0.87$ 程度、密封養生は $\omega_n/\omega_w=0.97$ 程度を入れることでおおよその推定をする事が可能である。ただし、低強度コンクリートおよび長期材令のコンクリートについては若干小さい値を用いることが好ましいと思われる。

2・応力-歪曲線表示式：これまでの検討より、上昇域ではFafitis・Shah式が最も精度良く曲線形状を表現していた。そこで上昇域においては、Fafitis・Shah式を用いることにした。

最大耐力以降は2領域に分割し、分割点は下降勾配変化点を用いる。最大耐力点と変化点間の下降域はこの2点を極値とする3次関数で表現する。さらに安定域に関しては、勾配変化点-最終安定点間の2点を通る耐力下降勾配を有する直線で表現する。以上より、応力-歪曲線式を次のように提案する。

$$\sigma = \{1 - (1 - \varepsilon / \varepsilon_m)^3\} \times f_c$$

$$A = E_c \varepsilon_m / f_c \quad (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_m)$$

$$\sigma = a \{2\varepsilon^3 - 3(\varepsilon_m + \varepsilon_r)\varepsilon^2 + 6\varepsilon_m \varepsilon_r \varepsilon + b\}$$

$$a = -\frac{f_c - \sigma_r}{(\varepsilon_m - \varepsilon_r)^3} \quad b = -\varepsilon_m^2(3\varepsilon_r - \varepsilon_m)$$

$$(0 < \varepsilon_m \leq \varepsilon \leq \varepsilon_r)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_u - \sigma_r}{\varepsilon_u - \varepsilon_r} \varepsilon + \sigma_r - \frac{\varepsilon_r(\sigma_u - \sigma_r)}{\varepsilon_u - \varepsilon_r}$$

$$(0 < \varepsilon_r \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u)$$

4. 結語

7°レ-ンコンクリートの歪軟化域を含む応力-歪曲線に及ぼす影響について実験的検討を行った結果、養生条件が異なる場合、応力歪曲線形状及び破壊状況が相違することができ、応力歪-曲線指標値との相関関係が示された。これらの結果から、養生条件を考慮した応力-歪曲線算定式を提案することができた。

謝辞：本研究は文部省科学研究補助金一般C(課題番号04650507)の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 岡田、六車編集：改訂新版コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、1981
- [2] 谷川、畑中：応力-歪関係式の評価、平成4年度 高強度コンクリート分科会報告書、1993
- [3] 小阪、谷川：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響 第2報：マイクロラック観察による検討、日本建築学会論文報告集第231号
- [4] 西野、村上ら：低側圧3軸応力を受ける7°レ-ンコンクリートの最大応力以降の破壊性状、コンクリート工学年次論文報告集、16-2、1994

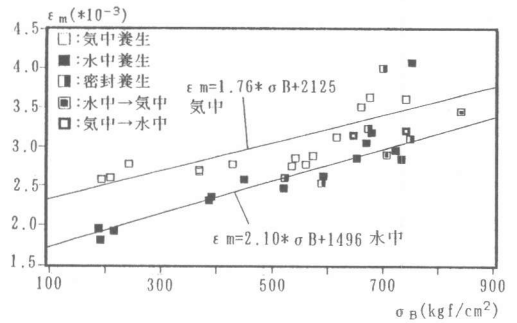


図10 最大耐力時歪み-最大耐力関係

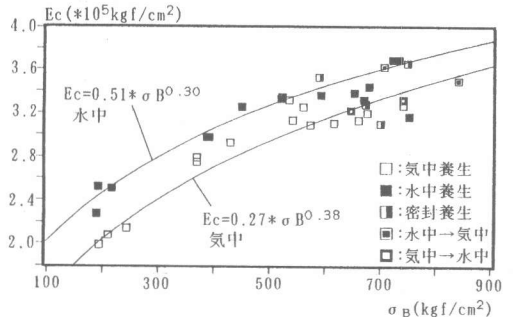


図11 最大耐力-初期剛性関係

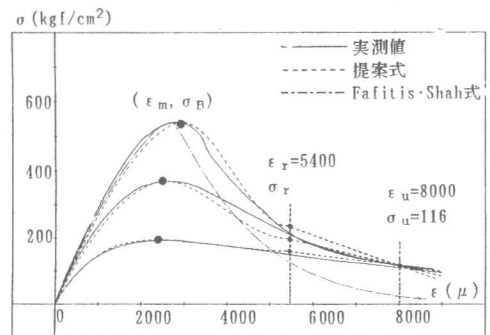


図12 実験値と提案式の比較(気中養生)

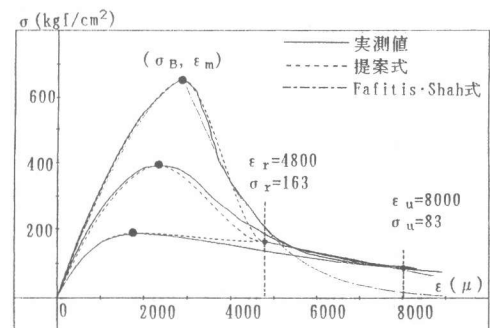


図13 実験値と提案式の比較(水中養生)