

[67] コンクリートの全応力度—ひずみ度関係に関する研究

正会員 鈴木 計夫 (大阪大学)

同 〇中塚 信 (同)

出口 兼 (和歌山県庁)

1. まえがき

最大応力度以降の下降部を含む、コンクリートの全応力度—ひずみ度関係(以下全S—S関係と略記)は曲げ部材の終局性能とくに変形性能に大きな影響を与えるため、その性状の解明は変形性能も考慮する設計法を確立していく上での重要な研究課題と考えられる。

試験体とその最大耐力以降で試験機の剛性によって起す急な破壊のために、困難であったコンクリートの全S—S関係の測定が、複雑なあるいは高価な剛性試験機を用いずとも、通常の耐圧試験機と極めて簡便な剛性装置とによって十分可能であること、およびその性能などを筆者等はすでに示してきた。本研究はその装置によって^{3),5)} 砕石コンクリートの全S—S関係におよぼす強度、材令、養生条件の影響を実験的に明らかにするとともに、全S—S関係の諸特性値のばらつきが、鉄筋コンクリート梁部材断面の終局性能におよぼす影響についても若干の検討を加えたものである。

2. 実験方法

試験体の種類およびその概要を表-1に示す。試験体はすべてφ10 x 20cmの円柱体である。使用した材料は早強ポルトランドセメント、最大粒径5mmで建築学会JASS5での粒度分布を満足する川砂、および最大粒径が20mmで粒度分布が同様に適合する水洗した砕石である。試験体は鋼製型枠に打設後1日でキャッピングを行い、材令2日で脱型し載荷前日までそれぞれの養生を行なった。表-1における気乾イおよびロは温度が20±1°Cで湿度が65±5%および50±5%の養生条件を示す。屋内および屋外は実験室内での空中養生および屋上に放置したことを示す。

載荷は試験体と並列にPC鋼棒を配置した図-1に示す剛性装置と通常の200トン耐圧試験機とで行なった。

上昇部分でのひずみ度は鋼製枠を介して試験体に検長1.8cmで取りつけた2個の変位変換器で、下降部では試験体両端にセ

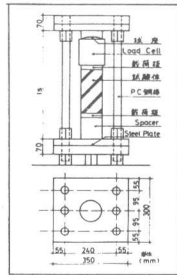


図-1 剛性装置図

表-1 調査および試験体種類

記号	調査強度	配合 (kg/m ³)					材令(日)	試験体数	養生条件
		w/c	w	C	S	G			
F2	200	70	182	260	814	1083	25	10	標準
F8	300	53	175	330	797	1057	19		
F4	400	43	189	430	692	1038	26		
F5	500	35	186	530	633	1033	35		
F6	600	30	200	660	520	970	35		
A							3, 7, 28, 8ヶ月		
B	300	53	175	330	797	1057	28, 8ヶ月	気乾(ロ)、屋内、屋外	
C								標準、気乾(イ)、気乾(ロ)	

ットする載荷板に直接取りつけたコンプレッソメータにより測定した。試験体に作用する応力の測定にはロードセルを用い、ひずみおよび応力はすべてX—Yレコーダーによって自動記録した。

3. 実験結果および考察

全応力度—ひずみ度関係の種々の式が提案されている。しかし、同一コンクリートを用いた試験体間でも強度あるいは変形性質は周知のようにばらつき、とくに曲げ部材の終局性能に対する重要要因である下降部分のばらつきはきわめて大きい。また、実験結果を正確に表示する式であってもその形式が複雑であれば、実的な設計面への適用が困難であると予想される。これらの点を考慮して、筆者等は部材の曲げ解析にも容易に利用できる簡単な全S—S表示式：上昇部分を2次曲線、下降部分を直線で表示する方法を提案している³⁾。この表示法によれば全S—S関係は8つの特性値、すなわち、コンクリート強度(f'_c)、そのときのひずみ度(ϵ_0)、および下降部の勾配($\tan\theta$)で決定されることになる。

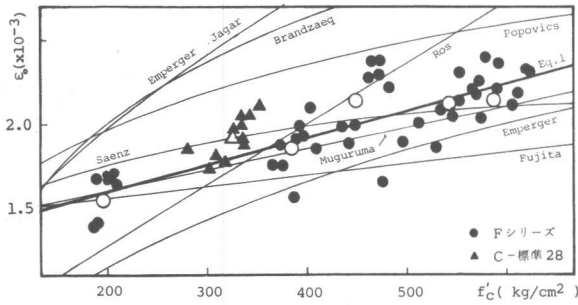


図-2 f'_c と ϵ_0 の関係

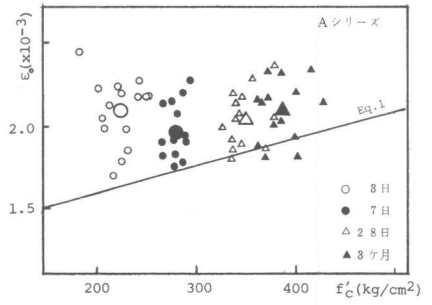


図-8 ϵ_0 と材令の関係

8-1: 最大応力度時のひずみ度 ϵ_0 。
 図-2は標準養生をうけた試験体の強度とその ϵ_0 との関係を示したものである。既報の川砂利の場合と同様に ϵ_0 は f'_c の増大とともに増加する傾向がみられ、図中に併記した従来のいくつかの提案式の傾向と一致し、実験値はそれら提案式の中間的な所に位置している。ひずみ度 ϵ_0 は同一強度であってもコンクリートの調合比、使用する骨材の品質など数多く

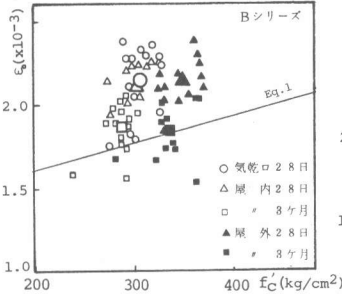


図-4 ϵ_0 におよぼす養生条件の影響

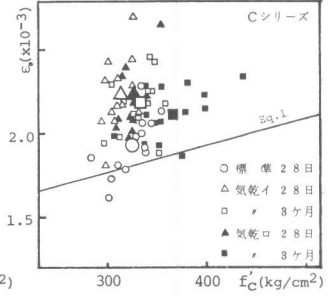


図-5 ϵ_0 におよぼす養生条件の影響

の要因によって影響を受けるため確定的な値を決定し難い面を有するが、JASS5を満足する砕石および川砂を用いた普通の調合による本実験結果では、 $\epsilon_0 = (1.6 \times 10^{-3} f'_c + 1.28) \times 10^{-3}$ (1) を実験式として得た。材令による ϵ_0 の変化を調べたのが図-8である。同一養生下では f'_c が材令とともに増加するのに対し、 ϵ_0 は材令との間に有意な差はみられずほぼ一定値を示している。同様の傾向が養生条件が異なる場合を示した図-4、5でも見られる。これらの結果から、 ϵ_0 は調合と養生条件に対応する一定値を材令にかかわらず示すことが推測できる。一方、材令が同一である試験体を比較すると ϵ_0 と養生条件の間に明確な有意差が認められた。図-4、5中に標準養生の場合の ϵ_0 を示す(1)式を実線で示しているが、気乾養生をうける試験体の ϵ_0 は、標準養生の場合に比べ大きい値を示す。図-5における実験結果によれば気乾養生での ϵ_0 の平均値は標準養生のそれよりも約1割程度大きい。図-4において実験室内に放置した試験体と屋上に放置した試験体とを比較すると後者は f'_c および ϵ_0 とも前者よりそれぞれ約5%および10%程度小さい。

8-2: 下降勾配 $\tan\theta$

全S-S関係の実験結果を梁断面の圧縮部に適用して求めたモーメント-曲率関係をほぼ忠実に追跡するように無次元化全S-S関係の $\tan\theta$ を決定した。すなわち、 $\tan\theta$ は $1 \leq \epsilon/\epsilon_0 \leq 2$ の範囲における下降部の実験結果を最小自乗法を用いて直線化することによって求めた。標準養生した試験体の強度と $\tan\theta$ との関係を図-6に示す。強度が大となる程 $\tan\theta$ は大きくなり、両者の間にはほぼ直線関係が認められる。この関係を最小自乗法によって求めると $\tan\theta = 1.4 \times 10^{-3} f'_c - 0.066$ (2) を得た。図-7は $\tan\theta$ におよぼす材令の影響を示したものである。同図中実線で(2)式を示しているが、各材令での強度が分かればその $\tan\theta$ は(2)式で推定できることが分る。図-8、9は養生条件が下降勾配に与える影響を調べたものであるが、養生条件のいかんにかかわらず、 $\tan\theta$ は強度のみの関数である(2)式によってほぼ推定しうることが明らかである。これらのことから、 $\tan\theta$ は調合、材令、養生条件にかかわらず強度のみの関数であると云える。

8-8: f'_c 、 ϵ_0 および $\tan\theta$ のばらつき

コンクリート曲げ部材に対し終局性能に基づく設計を適用していくには、それら終局性能のばらつきの程度も明らかにしておく必要がある。部材性能のばらつきは構成材料のばらつきに依存すると考えられるので、本報告

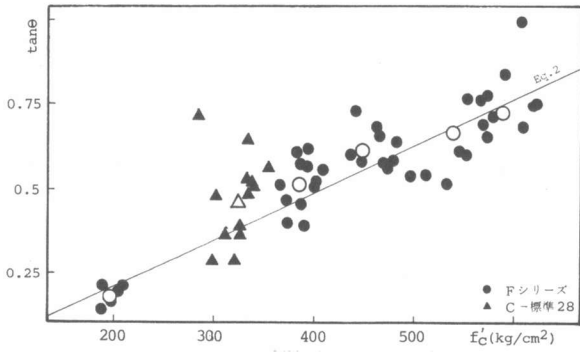


図-6 f'_c と $\tan\theta$ との関係

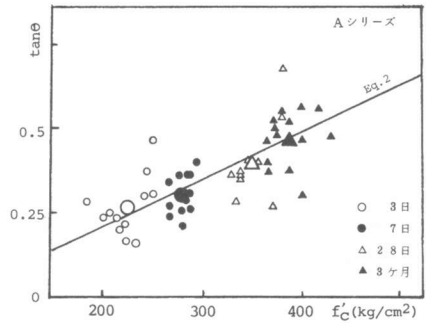


図-7 $\tan\theta$ と材令の関係

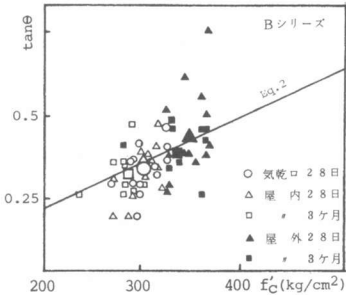


図-8 $\tan\theta$ におよぼす養生条件の影響

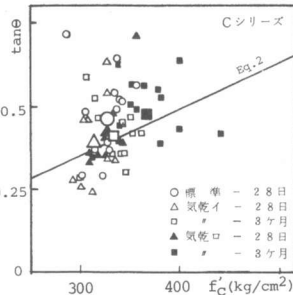


図-9 $\tan\theta$ におよぼす養生条件の影響

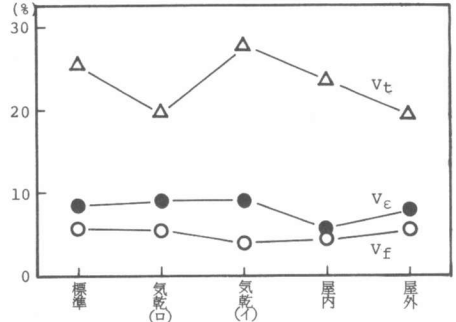


図-10 各特性値の変動係数の例

では全 S-S 関係での 8 つの特性値、 f'_c 、 ϵ_0 および $\tan\theta$ のばらつきの程度を調べた。ばらつきの程度をそれぞれの変動係数 (V_f 、 V_ϵ 、 V_t) で表わした結果の 1 例を図-10 に示す。強度、材令、養生条件が諸特性値の変動係数におよぼす明確な影響は見られず、 V_f 、 V_ϵ 、 V_t はそれぞれ約 2~9%、5~11%、10~80% の値であった。図-11 は V_f と V_ϵ および V_t との間の相関性を調べたものであるが、 V_f と V_ϵ 、ならびに V_f と V_t との間には殆ど相関性が見られず、また、ひずみ度 ϵ_0 および下降勾配 $\tan\theta$ のばらつきの方が強度のそれよりも大きいことが分る。

3-4: 単筋長方形断面の終局性能のばらつき

コンクリートの全 S-S 関係のばらつきが断面の終局性能におよぼす影響を、降伏強度が 8500 kg/cm² の引張鉄筋を鉄筋比 $p_t = 1.3\%$ で有する単筋長方形梁を用いて検討した。コンクリートの平均圧縮強度は 800 kg/cm² とし、それに対応する ϵ_0 、 $\tan\theta$ の平均値は (1) および (2) 式よりそれぞれ 0.176%、0.854 とした。解析においては、(i): 鉄筋も含めた平面保持が成立すること、(ii): 曲げ圧縮部コンクリートに単軸応力下での全 S-S 関係が適用できること、(iii): 鉄筋の S-S 関係は完全弾塑性で表わせること、などを仮定した。コンクリートの 8 つの諸特性値はそれぞれ独立にばらつき、その変動係数はそれぞれの実験結果での平均値を参考にして、 $V_f = 5\%$ 、 $V_\epsilon = 8\%$ 、 $V_t = 20\%$ であるとし、正規分布に従うものと仮定した。計算に用いた各特性値はそれぞれの分布から得た 200 箇の乱数から決定した。断面の終局性能を表わす限界点として、鉄筋降伏時点(記号 Y)、曲げ圧縮部ストレスブロック係数 k_2/k_1k_3 最小時点(記号 M_u)、 k_1k_3 最大時点(記号 K_u)、および筆者等^{1), 2)} が提案している終局限界点¹⁾ 断面の曲率は増大するにもかかわらず鉄筋の引張力が減少しはじめる時点(記号 F_u) の 4 点を取り上げた。各限界点での断面性能の計算

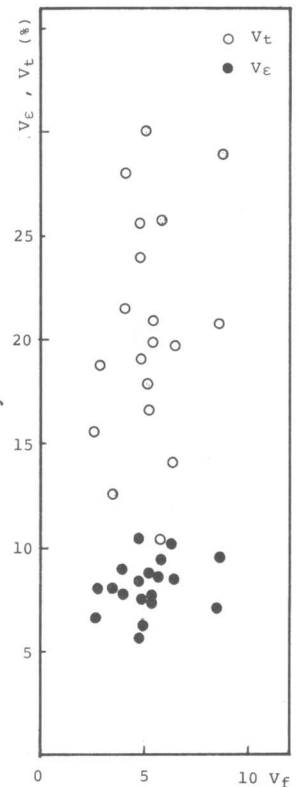


図-11 V_f と V_ϵ および V_t との関係

4) は既報の方法によった。

表-2 は全 S-S 関係の諸特性値がそれぞれあるいは同時に変動するときの、さらに鉄筋の降伏強度のみが変動するときの、各限界点での断面性能のばらつきの程度を変動係数で表わしたものである。I はコンクリート強度のみが変動する場合を示すが、 f'_c の変動によってモーメント係数 ($C = M/bd^2$) は殆どばらつかない。これは鉄筋降伏後 $C = P_t \sigma_{sy} (1 - qk_2/k_1k_3)$, $q = P_t \sigma_{sy} / f'_c$ となるため f'_c が括弧内の第 2 項のみに極くわずかに影響したことによる。一方、鉄筋降伏後の曲率は

$\phi d = \epsilon_c / x_{n1}$, $x_{n1} = q/k_1k_3$ で表わされるため、 f'_c の変動が中立軸比 x_{n1} に直接影響し、各限界点での曲率は f'_c と同程度のばらつきを示すことになる。 f'_c が小なる方向に変動するとき曲率は大なる方向に変動する。II は最大応力度でのひずみ度 ϵ_0 のばらつきの影響を調べたものであるが、各限界点での曲げ圧縮縁ひずみ度が ϵ_0 に依存するため曲率の変動に V_ϵ の影響が直接反映されている。 ϵ_0 が小なる方向にばらつければ曲率も小さい方向に変動する。III は $\tan\theta$ についての結果であるが、 f'_c の場合と同様モーメント係数の変動に与える影響は小さい。曲率が小なる限界点に進む程ばらつきが大となっている。これは M_u および K_u 点が全 S-S 関係の最大応力度近傍に位置するため、 $\tan\theta$ の変動の影響を受けにくいことによる。 $\tan\theta$ が大きい方 (下降勾配が急な方) に変動すると限界点の曲率は小なる方向にばらつく。IV は全 S-S 関係での 8 つの特性値を変動させたときの結果である。コンクリートの全 S-S 関係のばらつきが断面耐力の変動に及ぼす影響は小さいが、その変形性能には大きな影響を与えることが分る。これに対し、鉄筋係数と直接結びついている鉄筋の降伏強度の変動は、主に x_{n1} に全面的な影響を与えるため V に示すように、曲率および耐力を V_s と同程度にばらつかせる。降伏強度が小なる方向に変動するとき、耐力および曲率はそれぞれ小なる方向に、大なる方向にばらつく。

表-3 の I は 8 つの特性値のそれぞれの平均値から、 σ をそれぞれの標準偏差として、 f'_c 、 ϵ_0 については 1σ だけ小さい、 $\tan\theta$ については 1σ だけ大きい、コンクリート強度、そのときのひずみ度および下降勾配をもつ全 S-S 関係を前述の梁断面に適用したとき各限界点での断面性能がどの程度に評価されるかを示したものである。同表の II および III はすべての特性値をその平均値から 1.64σ および 3σ 過小あるいは過大に評価したときの結果である。ここで、 $\beta = (\mu - a) / \sigma$ μ : 8 種の特性値を変動させたときのそれぞれの特性値の平均値 a : 8 種の特性値を過大あるいは過小に評価したときの断面の諸性能値である。

4. まとめ

- 1) 最大応力度でのひずみ度 ϵ_0 は、コンクリートが同じであれば材令にかかわらずほぼ一定値を示すが、養生条件によって影響をうける。気乾養生したときの ϵ_0 は標準養生の場合のそれに比べ若干大きい値を示す。
- 2) 無次元化全 S-S 関係における下降勾配 $\tan\theta$ は材令、養生条件にかかわらず強度のみの関数となる。
- 3) 材令、養生条件および調合がコンクリートの強度 f'_c 、 ϵ_0 、 $\tan\theta$ のばらつきにおよぼす明確な影響はみられず、それらの変動係数は $\tan\theta$ 、 ϵ_0 、 f'_c の順に大きいものであった。
- 4) コンクリートの全 S-S 関係の諸特性値をそれぞれ単独に変動させた場合、いずれも断面の耐力のばらつきへの影響は殆どないのに対し、変形性能のばらつきには大きな影響を与える。引張鉄筋の降伏強度のばらつきは降伏強度が断面性能と密接に関係する鋼材係数と直接結びついているため、すべての性能に降伏強度と同程度の変動を与える。

●文献

1. 鈴木・藤岡 セメント技術年報 1977, pp.447-481
 2. 鈴木・藤岡・中塚 セメント技術年報 1978, pp.436-439
 3. 鈴木・中塚・出口 日本建築学会近畿支部研究報告集 5・1978, pp.21-24
 4. 鈴木・中塚 日本建築学会大会学術講演梗概集 9・1978, pp.1791-1792
 5. 鈴木・中塚・出口 同上 9・1979, pp.1331-1332
 6. S. POPOVIC'S Cement and Concrete Research Vol. 8 1978
 7. 藤田 土木学会論文集 第 188 号 9・1966, pp.29-59
 8. 六軍 セメント技術年報 1976, pp.362-365

表-2 終局性能のばらつき

	$V_{f'c}$	V_{ϵ_0}	V_t	V_s	$V_{\phi yd}$	$V_{\phi Mu d}$	$V_{\phi Ku d}$	$V_{\phi Fu d}$	V_{cy}	V_{CMu}	V_{CKu}	V_{CFu}
I	5	0	0	0	1.3	5.1	5.1	5.3	.37	.47	.53	.72
II	0	8	0	0	1.4	8.1	8.1	8.1	-	-	-	-
III	0	0	20	0	-	5.0	10	17	-	.13	.06	.41
IV	5	8	20	0	1.9	11	14	20	.54	.49	.53	.84
V	0	0	0	6	6.6	6.3	6.3	6.5	6.1	5.6	5.6	5.3

(unit %)

表-3 β の値

	$\beta_{\phi y}$	$\beta_{\phi Mu}$	$\beta_{\phi Ku}$	$\beta_{\phi Fu}$	β_{cy}	β_{CMu}	β_{CKu}	β_{CFu}
I	1 σ	2.0	1.6	1.5	1.3	-1.4	1.1	1.0
II	1.64 σ	1.8	2.3	2.1	1.8	-2.8	1.7	1.8
III	3 σ	1.5	3.7	3.3	2.7	-4.2	3.3	3.4