

## 8 . C S Gの破壊エネルギーに関する検討

### ( 1 ) 検討目的と検討方法

コンクリートにおける破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊特性は、粗骨材の種類や物性、粒度分布および粒径などに影響を受けることが既に知られている。ダムコンクリートの分野でもそれらを考慮した研究成果が既に報告されている。しかし、CSGではコンクリートと違った特性を有するので、既往の文献などの試験結果から破壊特性を推定することは難しい。このことは、CSGの特徴として強度特性は小さいが使用される粗骨材の最大粒径が80mm程度と大きいことや、静弾性係数が一般的なコンクリートと比較すると小さな値になることなどから判断できる。

本研究では、CSGの破壊エネルギーの計測を、プレーンコンクリートでの(社)日本コンクリート工学協会「JCI-S-001-2003」(以下、破壊エネルギー試験)の計測方法に準拠し実施した。これは、ひび割れを誘発させる位置に切欠きをつけた供試体に3点曲げ载荷を実施し、荷重-ひび割れ肩口開口変位(以下、荷重-CMOD)を計測する試験である。試験より得られた荷重-CMOD曲線から、多直線近似解析法により引張軟化曲線の特定を実施した。また、得られた引張軟化曲線を構成関数が簡易な二直線型にする定式方法を検討し、CSGにこの試験方法を採用した場合の諸問題について検討した。

### ( 2 ) 破壊エネルギー

#### 1) 破壊エネルギー

コンクリートの場合、圧縮強度と粗骨材の最大寸法の影響を考慮した破壊エネルギーの推定式が示方書構造型能照査編 P27～P28 に式 8.1 のように記載されている。また、同式で求めた粗骨材の最大寸法が 40mm、80mm の破壊エネルギーと圧縮強度の関係を図 8.1 に示す。

$$G_f = 10(d_{\max})^{\frac{1}{3}} \cdot f'_{ck}{}^{\frac{1}{3}} \div 1000 \text{ (N/mm)} \quad \dots \dots \dots \text{ 式 8.1}$$

ここで、 $G_f$  : 破壊エネルギー (N/mm)

$d_{\max}$  : 粗骨材の最大寸法 (mm)

$f'_{ck}$  : 圧縮強度の特性値 (設計基準強度) (N/mm<sup>2</sup>)

仮にコンクリートで粗骨材の最大寸法が 40mm で圧縮強度が 4.0(N/mm<sup>2</sup>)程度であれば、図 8.1 の関係では破壊エネルギーは 0.055(N/mm)程度となる。しかし、破壊エネルギーの特性は普通コンクリートとダムコンクリートに相違があるといった報告がある。そこでは、破壊エネルギーは粗骨材の最大寸法に対して強い依存性があり、粗骨材の形状にも影響されるとしている。CSGの場合、粗骨材の最大寸法はコンクリートダムと同程度で

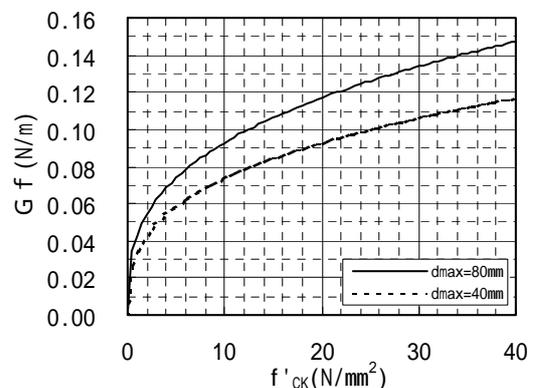


図 8.1 破壊エネルギーと圧縮強度 ( )

あるが、骨材の品質はコンクリートの場合と比べて低品質なものも採用される。また、CSGの強度特性はコンクリートと比較して極度に低く、また弾性係数にも違いがある。これらの事より、CSGの破壊特性については十分な検討が必要であると判断される。

2) 引張軟化曲線

コンクリートの破壊現象は、完全に開口しているひび割れの先端に存在する破壊進行領域の挙動に大きく関係しているとされている。この破壊領域では軟化現象が生じており、コンクリートの破壊現象は非線形性を示すとされている。この非線形破壊挙動をモデル化するために、図8.2に示す仮想ひび割れモデルが提案されている。このモデルは、コンクリートの破壊進展領域を、1本の仮想ひび割れに結合応力が作用する力学モデルに置換えたものである。結合応力は仮想ひび割れ幅(開口変位)に応じて変化するものとして、この関係を図8.3に示す引張軟化曲線としている。この引張軟化曲線の推定方法は、破壊エネルギー試験で得られた荷重-CMOD曲線よりこの仮想ひび割れモデルに基づいた考え方で逆解析を行い推定する「多直線近似解析法」が提案されている。また、これらのひび割れの考え方や特性値はコンクリート構造物の数値解析に取り入れられ、コンクリートダム分野でも想定地震での地震動解析などで行われる非線形解析に多く利用されている。

また、引張軟化曲線の形状に対する評価方法として様々な評価方法が提案されている。本研究では、CSGの引張軟化曲線を二直線型引張軟化曲線で扱う場合の検討を実施した。この方法は構成関数が簡易で数値解析でも扱いやすい特徴を持つ。また、示方書構造性能照査編でもこの形式で図8.4の評価方法が記載されている。ここでは、コンクリートの破壊エネルギー $G_f$ と

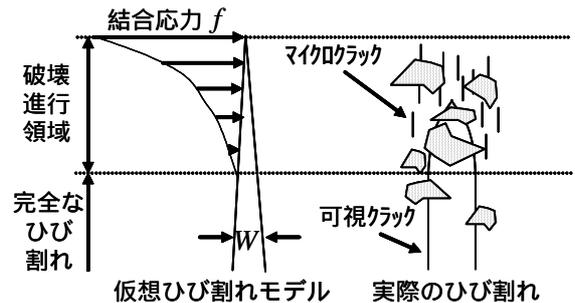


図 8.2 仮想ひび割れモデル ( )

限界仮想ひび割れ幅 $W_c$ 、初期結合応力 $f_t$ の関係は式8.2に示すものとしている。

$$W_c = 5.0 \times \frac{G_f}{f_t} \quad \dots \dots \dots \text{式 8.2}$$

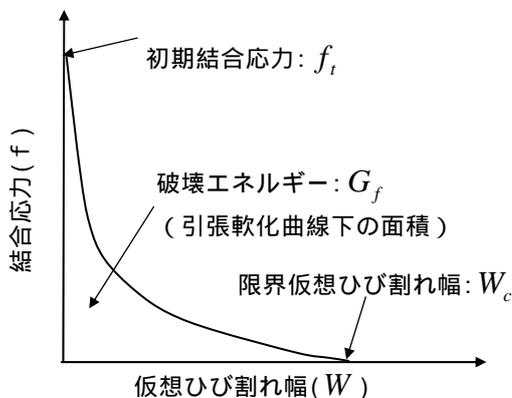


図 8.3 引張軟化曲線 ( )

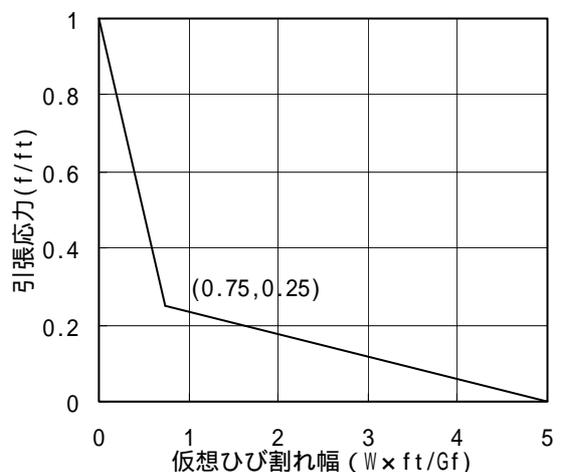


図 8.4 二直線型引張軟化曲線(示方書)

(3) 試験方法

1) 使用材料

使用材料および物性について表 8.1 に示す。母材 A：千枚岩（大保ダム母材）母材 B：安山岩（静岡県芝川町）母材 C：河床砂礫（美和ダム上流砂防ダム）以上の3種類を使用する。

搬入した母材は試験場のふるい分け設備にて分級を行い各分級ごとに保管した。CSGの基本配合に用いる母材粒度分布を表 8.2、表 8.3、図 8.5～図 8.7 に示す。特徴としては、掘削ズリであるCSG材 A、B の5mm 以下における0.15mm 以下の微粒分量は標準粒度範囲を外れており A 材 25%、母材 B 36% と微粒分が非常に多く河床砂礫である母材 C は 11% 含む母材であることがあげられる。表、図にある標準粒度上限、下限は示方書ダム編で規定している粒度分布の範囲であり、参考に記載した。

表 8.1 使用材料及び物性値 ( , )

CSG材の種類	分級区分		表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	実積率 (%)
A 材：千枚岩（大保ダム）	G1	80～40mm	2.67	1.97	1.2 (1.3)	59.2
	G2	40～20mm	2.63	2.94	1.6 (2.0)	58.3
	G3	20～10mm	2.63	2.78	2.0 (2.4)	57.4
	G4	10～5mm	2.60	3.27	3.1 (3.3)	61.6
	S	5～0mm	2.72	0.70	25.7 (27.7)	62.9
B 材：安山岩（静岡県芝川町）	G1	80～40mm	2.72	1.24	-	59.2
	G2	40～20mm	2.66	3.24	-	60.9
	G3	20～10mm	2.55	5.53	-	60.8
	G4	10～5mm	2.44	6.50	-	61.1
	S	5～0mm	2.53	5.03	36.5 (38.9)	66.8
C 材：河床砂礫（美和ダム）	G1	80～40mm	2.69	0.56	-	60.6
	G2	40～20mm	2.69	0.78	-	60.7
	G3	20～10mm	2.68	0.91	-	61.0
	G4	10～5mm	2.67	1.29	-	61.1
	S	5～0mm	2.63	1.65	8.0 (13.6)	72.7
規格（基準）値	J I S		2.50以上	3.00以下	-	-
	標準示方書		2.50以上	-	粗骨材：1% 細骨材：3% - 5%	-

注1 CSG材AにおけるCSG材5mm以下の密度、吸水率試験はJIS A 1134（軽量細骨材の密度吸水率試験方法）

注2 微粒分量の上段はJIS A 1103(0.075mm), 下段の( )は0.15mmの値を示す。

注3 赤字は規格（基準）値に満たない値である。

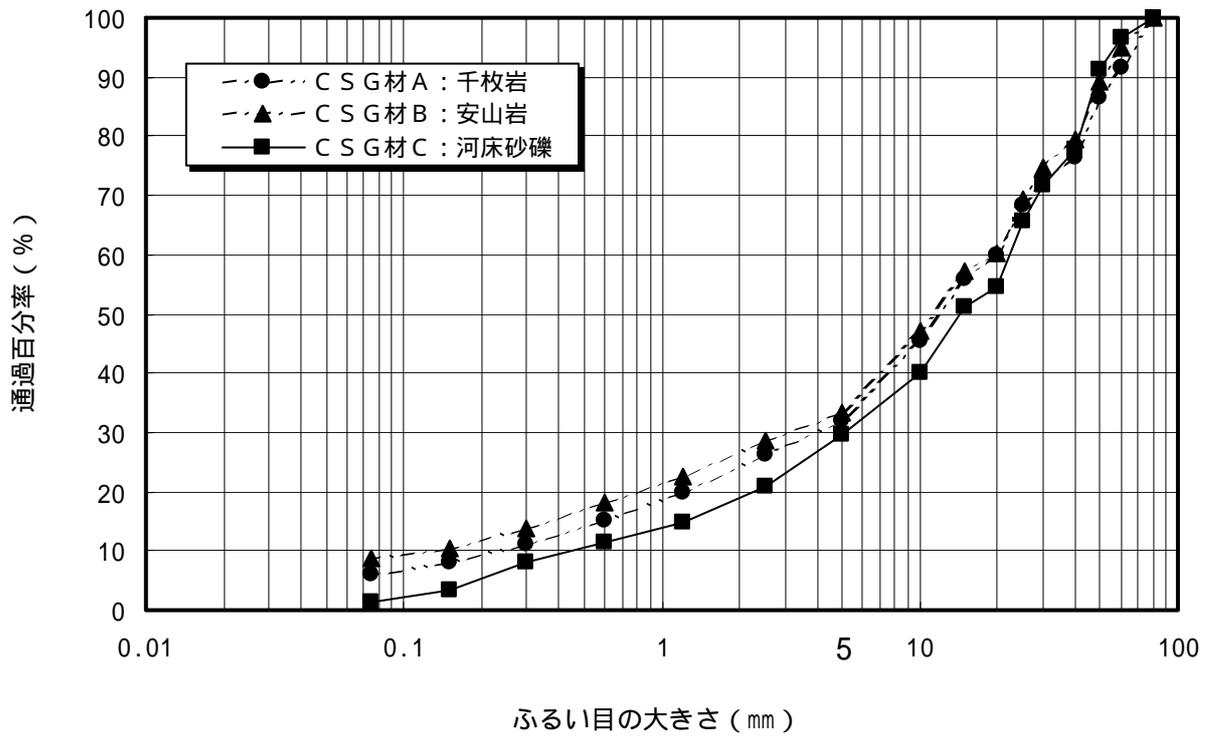


図 8.5 CSG材粒度分布 ( , )

表 8.2 CSG材の粒度(母材(5mm以下))

ふるい目	0.15以下	0.15~0.3	0.3~0.6	0.6~1.2	1.2~2.5	2.5~5.0
標準粒度上限	15	20	30	30	25	20
CSG材 A	24.7	9.3	12.9	14.2	20	18.4
CSG材 B	27.3	10.6	13.3	14.1	18.9	15.0
CSG材 C	11.3	16.4	11.3	11.1	21.6	27.6
標準粒度下限	2	12	15	10	10	5

表 8.3 CSG材の粒度(母材(5mm以上))

ふるい目	5~10	10~20	20~40	40~80
標準粒度上限	15	25	40	40
CSG材 A	16.8	20.1	26.7	36.4
CSG材 B	19.3	20.4	28.7	31.7
CSG材 C	12.0	22.6	33.0	32.4
標準粒度下限	10	15	20	20

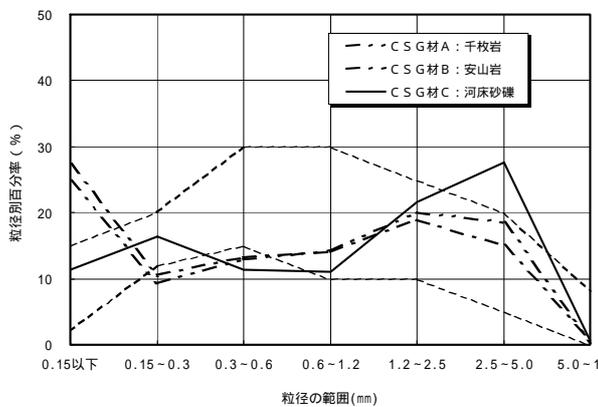


図 8.6 CSG材の粒度(母材(5mm以下))

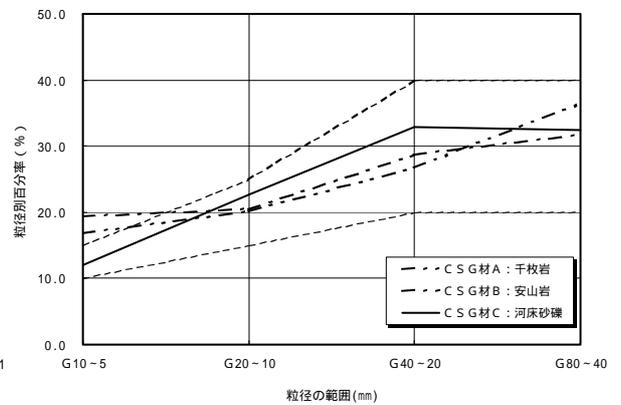


図 8.7 CSG材の粒度(母材(5mm以上))

2) C S G 基本配合

今回の試験で使用する母材に対し、母材の最大粗骨材寸法 80mm、単位セメント量 60、80、140kg/m<sup>3</sup>、標準 V C 値 20 秒を満足するように予備試験を実施し、C S G の基本配合を表 8.4 のように決定した。

また、この配合での C S G の強度特性を表 8.5 に示す。粗骨材の最大寸法をウエットスクリーニングより 40mm とした場合の標準供試体(封緘養生: 150mm×H300mm)での試験結果である。なお、引張強度については、引張割裂試験 (JIS A 1113) より求めている。

表 8.4 C S G の配合 ( , )

C S G 材	G max (mm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
					W 水	C セメント	S 5mm 以下	80 ~ 5mm				
								G1 80 ~ 40	G2 40 ~ 20	G3 20 ~ 10	G4 10 ~ 5	
A	80	0	160.0	31.5	128	80	726	557	408	307	257	
	"	"	100.0	"	140	140	700	537	393	296	248	
B	"	"	246.7	34.4	148	60	725	452	409	290	275	
	"	"	187.5	"	150	80	718	447	405	287	273	
	"	"	112.9	"	158	140	694	433	391	278	264	
C	"	"	141.7	29.7	85	60	701	548	557	383	203	
	"	"	103.8	"	83	80	697	545	554	381	202	
	"	"	53.6	"	75	140	689	538	548	376	200	

表 8.5 C S G の強度特性 ( , )

C S G 材種類	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	標準供試体			引張強度 圧縮強度	弾性領域 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ピーク強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
			材齢 7 日	材齢 28 日					
A	80	128	2.94	3.98	0.61	1/6.5	2.10	4.02	1910
	140	140	5.01	7.59	1.06	1/7.2	4.37	7.59	3037
B	60	148	2.36	2.88	0.43	1/6.8	1.49	2.88	1467
	80	150	2.96	3.75	0.55	1/6.8	2.14	3.75	2189
	140	158	4.90	7.72	1.20	1/6.5	5.14	7.72	4651
C	60	85	4.61	6.71	0.94	1/7.1	4.17	6.71	4380
	80	83	8.11	11.41	1.39	1/8.2	7.69	11.41	9981
	140	75	24.40	31.53	2.81	1/11.2	23.23	31.53	16481

### 3) 破壊エネルギー試験

#### (1) 供試体形状

破壊エネルギー試験用供試体の寸法を図 8.8 に示す。粗骨材の最大寸法（ウエットスクリーニングより  $d_{max} = 40\text{mm}$ ）と既製の鋼製型枠の寸法を考慮し、 $B150 \times H150 \times L530\text{mm}$  の角柱供試体とした。なお、切欠きは写真 8.1 のように鋼製型枠を細工し、厚さ 3mm の鋼板を取付けることで対応している。

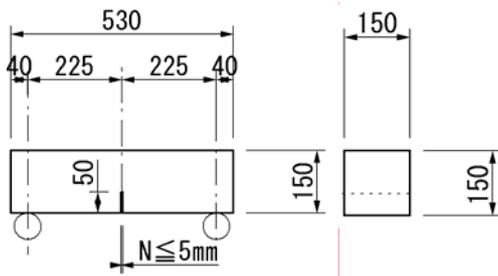


図 8.8 破壊エネルギー試験供試体寸法



写真 8.1 破壊エネルギー試験型枠

#### (2) 供試体の作製

供試体の打設は、CSGを1層75mmの2層打設とした。締固めには写真 8.2 のような切欠きのある転圧プレート(200mm×140mm)を装着した振動タンパ(振動数 3000cpm、起振力 140kgf)を使用し、図 8.9 に示す方法で供試体を作製した。下層の転圧は1層を3ゾーンに分け1ゾーンあたり 10 秒の転圧で4サイクル実施する。下層転圧完了後、上層とのなじみを良くするため表面を粗面処理した。上層の転圧は下層と同様の方法で3サイクル実施し、仕上げとして1ゾーン 10 秒を目安に天端を平滑した。転圧完了後、金ごてで天端を仕上げ、数時間の養生の後に切欠き部の鋼板を引き抜いた。打設完了時の供試体を写真 8.3 に示す。なお、この手法で作製された供試体は密度比で 98%以上の値を示した。また、供試体の養生方法は写真 8.4 に示すとおり、恒温(20 )・恒湿(75%)の養生室で封緘養生を実施した。

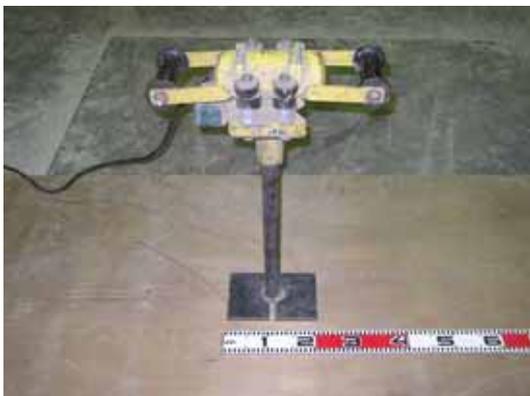
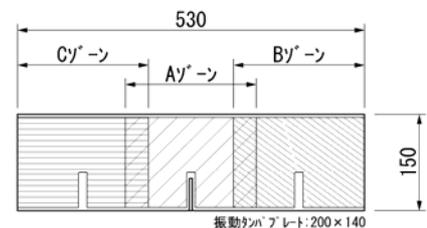


写真 8.2 振動タンパ



工程	内容
下層打設	Cy'-ゾーン:10s → Ay'-ゾーン:10s → By'-ゾーン:10s ↑ 4サイクル
目荒らし	粗面処理
上層打設	Cy'-ゾーン:10s → Ay'-ゾーン:10s → By'-ゾーン:10s ↑ 3サイクル+仕上げ1サイクル
天端仕上げ	金ごて仕上げ

図 8.9 供試体作製方法 ( )



写真 8.3 破壊エネルギー試験供試体



写真 8.4 封緘養生状況

### (3) 試験装置

CSGの荷重 - CMOD曲線を計測するため、表 8.6 に示す仕様の試験機器を使用した。コンピュータ計測制御式万能試験機に、図 8.10 および写真 8.5 に示す 3 点曲げ試験装置を装着して供試体に载荷した。荷重、CMODの計測はCSGの強度特性を考慮し、動ひずみレコーダーで行った。CMODの計測位置は写真 8.6 のように供試体の下端部 2 箇所で行い、計測値の平均値を採用した。

表 8.6 使用試験機器の仕様

名称	仕様
コンピュータ計測制御式万能試験機	AG-25TD: 島津製作所製 負荷方式: 定速ひずみ方式 ひょう量: 0.01N ~ 250kN /min
動ひずみレコーダー	DC-104R: (株)東京測器研究所製 サンプリグ速度: 最速50 $\mu$ sec/ch ch数最大: 4ch
クリップ型変位計	RA-5: (株)東京測器研究所製 容量: 5mm (2mm ~ 7mm) 定格出力: 約1.5mV/V (3000 $\times 10^{-6}$ ひずみ) 感度: 600 $\times 10^{-5}$ ひずみ/mm

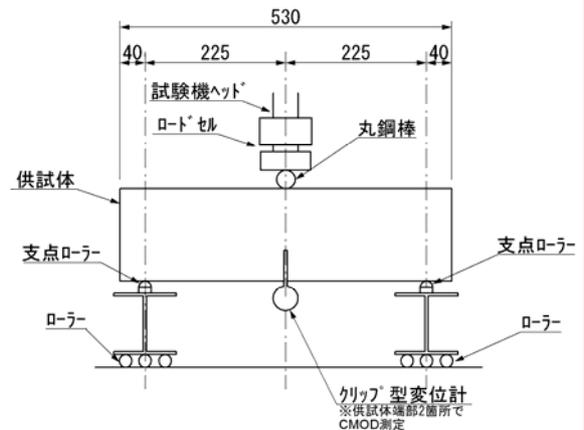


図 8.10 3点曲げ試験装置 ( )



写真 8.5 3点曲げ試験装置



写真 8.6 CMOD測定位置

(4) 試験ケース

破壊エネルギーのクラック進展速度による影響を把握するため載荷速度に着目し、表 8.7 に示す 2 ケースを設定した。CSG 材 A 単位セメント量 80kg/m<sup>3</sup>の配合において 2 ケース実施した。

表 8.7 試験ケース ( , )

ケース NO	配合名	載荷速度 (mm/min)	測定間隔 (s)	供試体本数 (本)
1	CSG 材 A C80	0.1	1.0	4
2	CSG 材 A C80	1.0	0.1	4

測定間隔は、破壊までの時間と引張軟化曲線の推定時における測定数を考慮し決定している。

CSG 材 A 単位セメント量 80kg/m<sup>3</sup>の試験結果より、ケース 1 のCMOD速度の平均値は全体で 0.15mm/min以内であった。また、ケース 2 のCMOD速度は開始から最大荷重の区間で 0.15mm/min以内であった。試験方法で規定している今回の供試体寸法でのCMOD速度は、0.075~0.15mm/minである。そのため残りの配合においては、ケース 1 の載荷速度 0.1(mm/min)を採用し実施した。

(5) 破壊エネルギーの算出

図 8.11 のように破壊エネルギー試験で得られた荷重 - CMOD 曲線から、式 8.3 及び式 8.4 より破壊エネルギーを算出した。

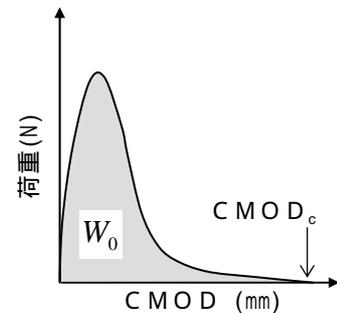


図 8.11 荷重 - CMOD 曲線

$$G_f = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad \dots \dots \dots \text{式 8.3}$$

$$W_1 = 0.75 \left( \frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_c \quad \dots \text{式 8.4}$$

ここで、 $G_f$  : 破壊エネルギー (N/mm)

$W_0$  : 供試体が破断するまでの荷重 - CMOD 曲線下の面積 (N・mm)

$W_1$  : 供試体の自重および載荷治具がなす仕事 (N・mm)

$A_{lig}$  : リガメントの面積 (mm<sup>2</sup>)

$m_1$  : 供試体の質量 (kg)

$S$  : 載荷スパン (mm)

$L$  : 供試体の全長 (mm)

$m_2$  : 試験機に取付けられておらず、破断するまで供試体に載っている治具の質量 (kg)

$g$  : 重力加速度 (9.807m/s<sup>2</sup>)

$CMOD_c$  : 破断時の CMOD (mm)

(6) 引張軟化曲線の推定

引張軟化曲線は、仮想ひび割れモデルのひび割れ進行領域での結合応力と仮想ひび割れ幅の関係を示すもので、初期結合応力と引張軟化曲線の形状で表現される。

本試験では、(社)日本コンクリート工学会のホームページからアクセス可能であった「引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロード版(FEM FT法)」を解析プログラムとして多直線近似解析法で

推定した。解析結果より得られる荷重 - CMOD曲線と実験値での荷重 - CMOD曲線の許容誤差は2%に設定した。今回解析に使用した解析モデルを図8.12に示す。

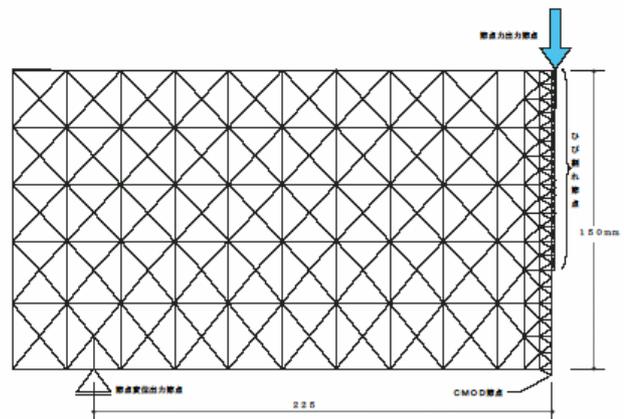


図 8.12 解析モデル ( , )

(7) 二直線型引張軟化曲線の特定

多直線近似解析にて推定した引張軟化曲線より、構成関数が簡易な二直線型引張軟化曲線の特定を実施した。二直線型引張軟化曲線について概略図を図8.13に示す。今回採用した特定方法はまず、引張軟化曲線の仮想ひび割れ幅が0.005mm以下のデータを削除した。この区間は結合応力が安定しない区間であり、仮想ひび割れ幅が非常に微細なことを考慮した。

引張軟化曲線における0.1N/mm<sup>2</sup>以下の結合応力と仮想ひび割れ幅を繰り返し予測し、P - D曲線へ回帰させることにより、結合応力が0.1N/mm<sup>2</sup>以下の極小領域における解析値の不足を補った。

その後、解析から得られた引張軟化曲線の区間で、その下の面積と二直線下の面積との差が最小になるようにブレイクポイントを繰り返し移動し、最小二乗法の回帰より二直線を特定した。なお、本研究では破壊エネルギーの記号について、混乱を避けるために実験値によるものを $G_f$ 、二直線下の面積により算出したものを $G_f'$ とした。

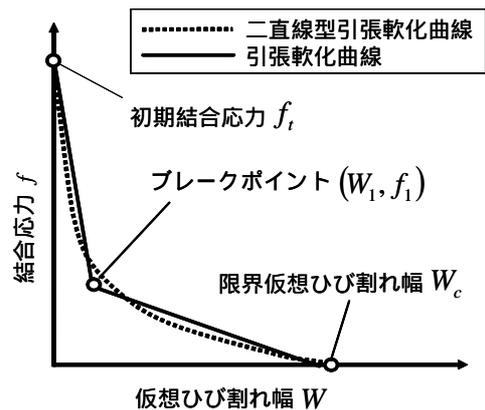


図 8.13 二直線型引張軟化曲線

( 4 ) 試験結果

表 8.8 に破壊エネルギー試験結果を示す。

表 8.8 壊エネルギー試験結果 ( , )

C S G 材の種類	試験ケース	載荷速度 (mm/min)	計測間隔 (s)	最大荷重時			供試体破断時		C M O D 速度			破壊エネルギー		
				計測時刻 (sec)	最大荷重 (N)	CMOD (mm)	計測時刻 (sec)	CMODc (mm)	試験開始 ~ 最大荷重 (mm/min)	最大荷重 ~ 破断時 (mm/min)	全体 (mm/min)	Gf (N/mm)	W0 (N・mm)	W1 (N・mm)
A (C = 80kg/m <sup>3</sup> )	A80-	1.0	0.1	19.0	3063	0.042	126	2.778	0.133	1.534	1.323	0.0965	1237	549
A (C = 80kg/m <sup>3</sup> )	A80-	0.1	1.0	447.4	2667	0.047	1703.2	3.962	0.006	0.187	0.140	0.1279	1536	781
A (C = 140kg/m <sup>3</sup> )	A140	0.1	1.0	579.5	4411	0.051	1620.2	3.641	0.005	0.207	0.135	0.1431	1933	722
B (C = 60kg/m <sup>3</sup> )	B60	0.1	1.0	369.9	1297	0.032	921.5	2.922	0.005	0.314	0.190	0.0601	486	553
B (C = 80kg/m <sup>3</sup> )	B80	0.1	1.0	572.8	2115	0.045	1027.5	3.494	0.005	0.455	0.204	0.0779	715	661
B (C = 140kg/m <sup>3</sup> )	B140	0.1	1.0	635.6	3513	0.046	1304.3	2.929	0.004	0.259	0.135	0.1058	1432	557
C (C = 60kg/m <sup>3</sup> )	C60	0.1	1.0	628.6	3950	0.024	1523.0	4.465	0.002	0.298	0.176	0.1482	1804	929
C (C = 80kg/m <sup>3</sup> )	C80	0.1	1.0	720.4	5558	0.028	2044.5	5.607	0.002	0.253	0.165	0.1948	2478	1,171
C (C = 140kg/m <sup>3</sup> )	C140	0.1	1.0	944.8	9718	0.055	1983.5	5.300	0.003	0.303	0.160	0.3004	4743	1,105

1 ) C M O D と荷重の関係

(1) C M O D と荷重の関係

各材料におけるセメント量毎の平均荷重 - C M O D 曲線 ( 載荷速度 0.1 ( mm/min ) ) を図 8.14 ~ 図 8.16 に示す。なお、計測開始から最大荷重までの C M O D の計測値に振動が見られたのでスムージング処理を実施した。その方法は、動ひずみレコーダーにより記録された値を [n-2] ~ [n] ~ [n+2] の 5 点で平均値を求め、さらに Microsoft Excel の Match 関数を用いて検査値 ( C M O D ) が 0.001mm 間隔となるように間引きを行った。

- ・ C M O D と荷重の関係は、試験開始時より荷重が増大し、C M O D の増大は微小であり、最大荷重の 1/3 ~ 1/2 まで荷重と C M O D の関係はほぼ直線で弾性的な挙動であった。最大荷重近傍になると徐々に C M O D は増大して緩やかな曲線を描いている。最大荷重時は、クロスヘッドが等速 0.1mm/min で下降しているにも関わらず荷重は一時的に停止したかのように一定に保ち、その後荷重は減少し C M O D は急激に増大した。供試体 C 80 及び C 140 は最大荷重後の軟化部分で変位が加速して若干曲線が膨らむ形状となった。C M O D 0.5mm 以降は、C M O D が先行する挙動に変化し、供試体の破断まで緩やかな荷重の減少が続いた。

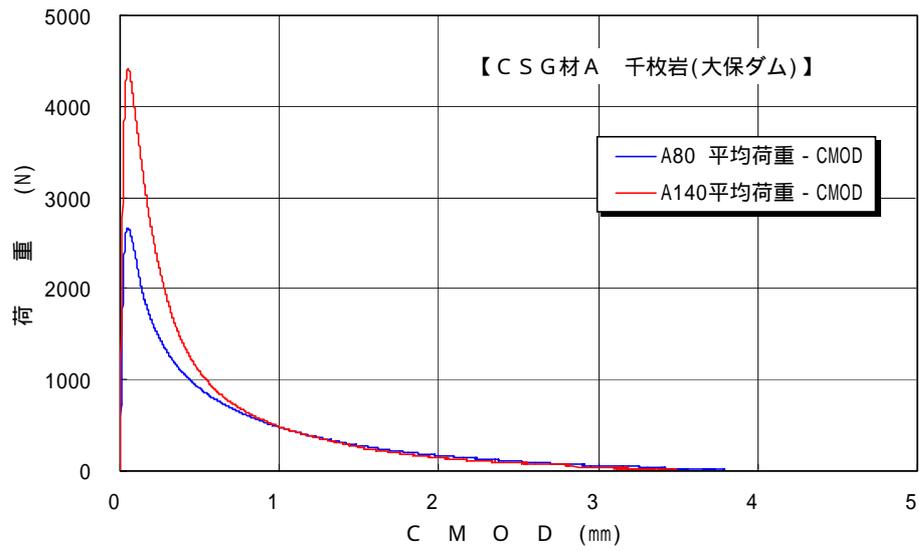


図 8.14 CSG材A 平均荷重 - CMOD曲線 ( , )

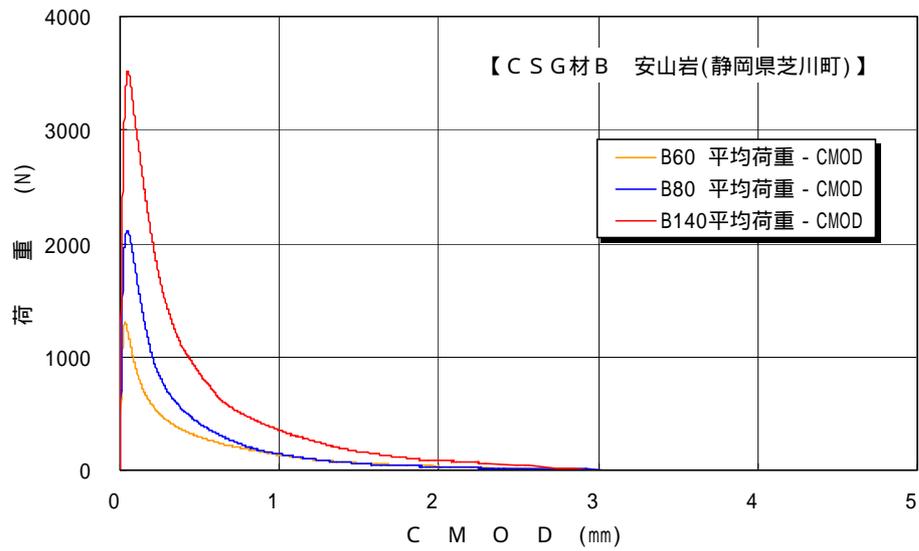


図 8.15 CSG材B 平均荷重 - CMOD曲線 ( )

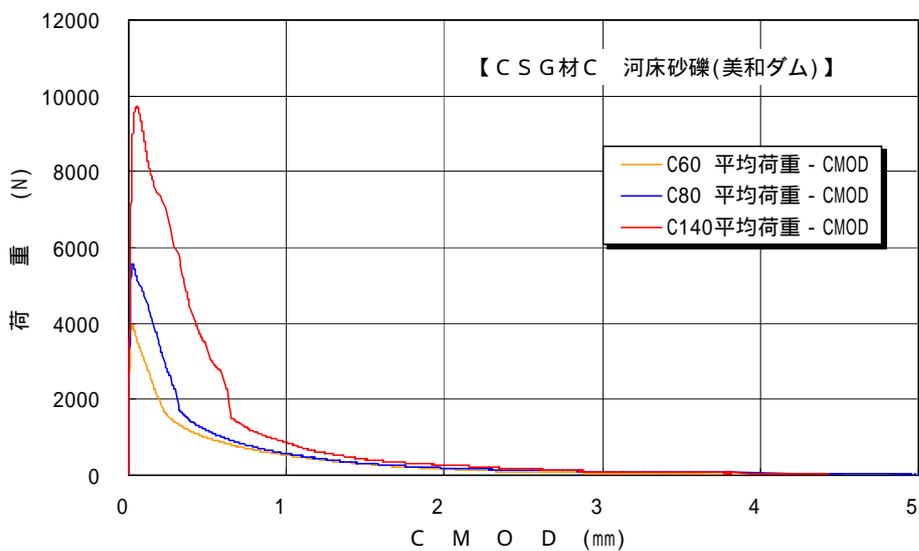


図 8.16 CSG材C 平均荷重 - CMOD曲線 ( )

## (2) 最大荷重

破壊エネルギー試験における圧縮強度と最大荷重の関係を図 8.17 に示す。

本試験に用いたCSG材A、B及びCの配合は、単位セメント量を60、80及び140kg/m<sup>3</sup>と変動させており、コンシステンシー試験によってVC値20秒となる単位水量を決定している。CSG材における圧縮強度で比較すると各材料により差異はあるものの、圧縮強度が大きいほど最大荷重は大きくなり、圧縮強度と最大荷重の相関関係が見られた。CSG材間で比較すると、CSG材B A Cの順で大きくなる関係にあった。

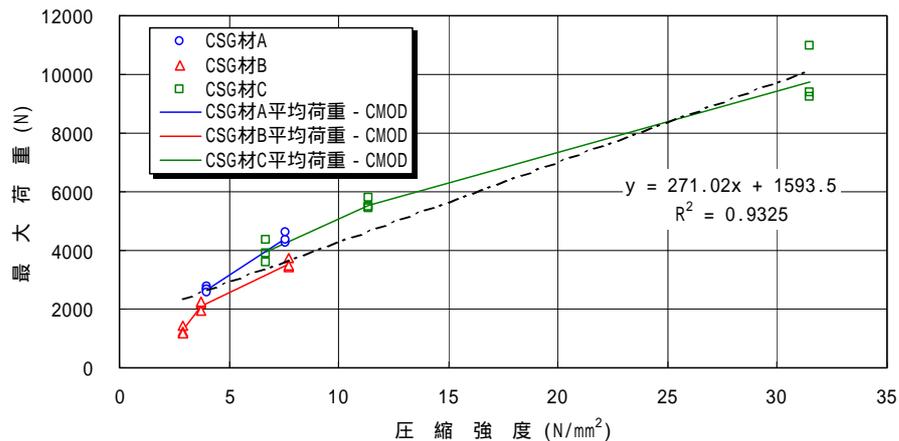


図 8.17 最大荷重と圧縮強度 ( , )

## (3) 破断時CMOD<sub>c</sub>

破壊エネルギー試験における圧縮強度とCMOD<sub>c</sub>の関係を図 8.18 に示す。

同一CSG材による相違は認められなかった、またCSG材間で比較するとCSG材B A Cの順で大きくなる関係にあった。

試験結果における破断時は、荷重が0Nになった時点を目指すものであり、実際には荷重が0N近くになっても供試体が自立し崩落までCMODは増加し続けた。これはリガメント部におけるセメントペースト及び細骨材や粗骨材の噛み合わせによるものと考えられる。

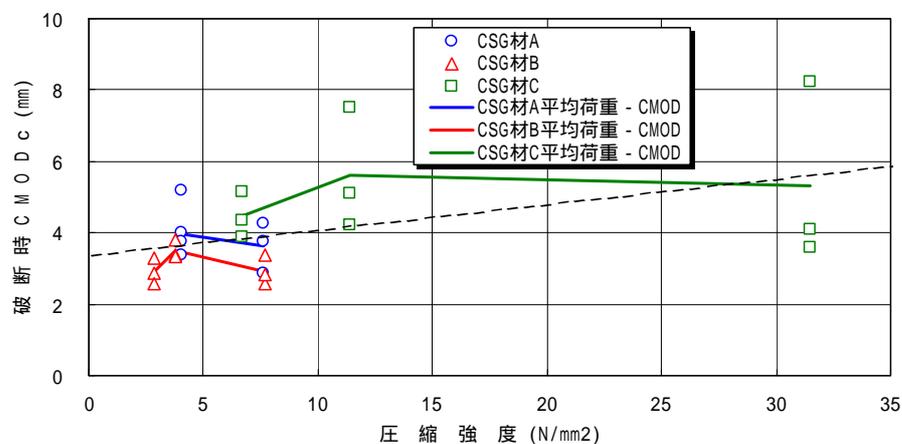


図 8.18 破断時CMOD<sub>c</sub>と圧縮強度 ( , )

## 2) 供試体の破壊状況

試験開始より最大荷重まで、微小のCMODは発生しているものの、リガメント部側面には目視で確認できるひび割れは認められなかった。最大荷重直後に目視で確認できる僅かなひび割れが発生し、徐々に供試体上面に到達して破断に至った。

リガメント部の破断面を観察したところ、CSG材Aは無数の破断している骨材が分布していた。CSG材BはCSG材の微粒分及びセメントペーストが付着した骨材が分布していた。CSG材Cは骨材の破断は少数認められ、破断の生じていない骨材の表面はきれいに露出していた。

## 3) CMOD速度

破壊エネルギー試験における経過時間とCMODの関係を図8.19に示す。

- ・ CSG材A単位セメント量  $80\text{kg/m}^3$ の試験結果より、ケース1(A80)のCMOD速度の平均値は全体で  $0.15\text{mm/min}$ 以内であった。また、ケース2(A80-)のCMOD速度は開始から最大荷重の区間で  $0.15\text{mm/min}$ 以内であった。
- ・ 試験方法で規定している今回の供試体寸法でのCMOD速度は、 $0.075\sim 0.15\text{mm/min}$ である。そのため残りの配合においては、ケース1の載荷速度  $0.1(\text{mm/min})$ を採用し実施した。
- ・ 試験開始から破断までとして試験全体のCMOD速度を考慮すると、CSG材Aは  $0.126\sim 0.159\text{mm/min}$ 、CSG材Bは  $0.129\sim 0.280\text{mm/min}$ 、CSG材Cは  $0.137\sim 0.195\text{mm/min}$ であり、各配合の平均速度は規準のCMOD速度よりも若干速いケースもあるが、各供試体の速度は規準速度の上限以下に多く分布していることが確認された。

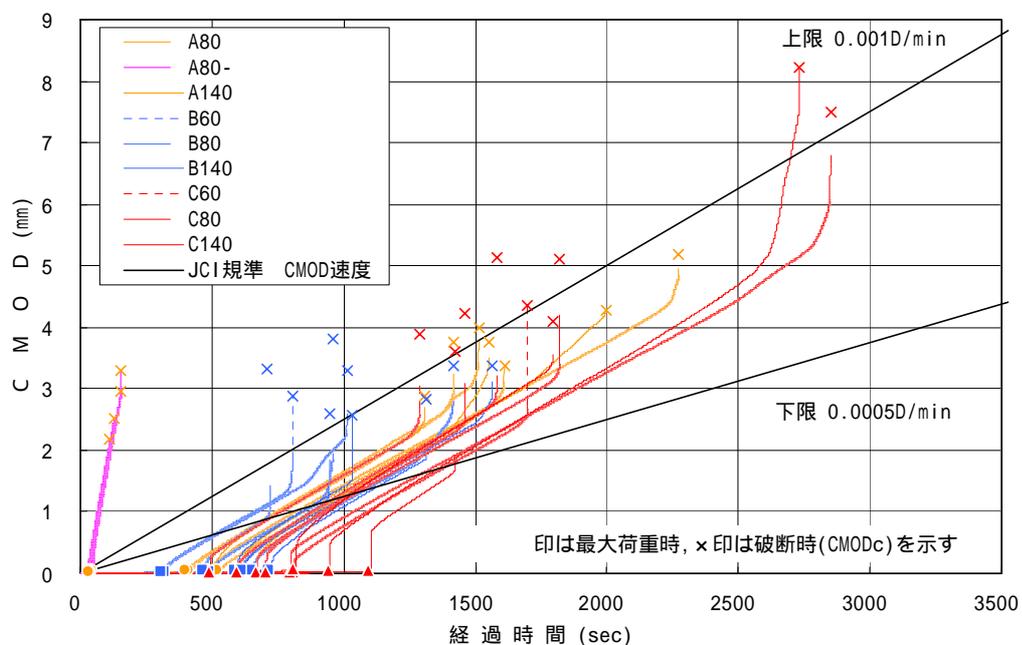


図 8.19 経過時間とCMOD ( , )

#### 4) 破壊エネルギー

##### (1) 破壊エネルギー

破壊エネルギー試験結果を図 8.20 に示す。

- ・ C S G 材 A 単位セメント量  $80\text{kg}/\text{m}^3$  の載荷速度を変化させた試験結果は、ケース 1 (A80-) の破壊エネルギーの平均値は  $0.128\text{N}/\text{mm}$  で、ケース 2 (A80-) の平均値 ( $0.096\text{N}/\text{mm}$ ) より大きい。
- ・ 試験により得られた破壊エネルギーは、供試体 A 80 は  $0.128\text{N}/\text{mm}$ 、A 140 は  $0.143\text{N}/\text{mm}$ 、B 60 は  $0.060\text{N}/\text{mm}$ 、B 80 は  $0.080\text{N}/\text{mm}$ 、B 140 は  $0.106\text{N}/\text{mm}$ 、C 60 は  $0.148\text{N}/\text{mm}$ 、C 80 は  $0.195\text{N}/\text{mm}$ 、C 140 は  $0.300\text{N}/\text{mm}$  であった。
- ・ 自重及び治具がなす仕事量  $W_1$  は、全 C S G 材の平均荷重 - C M O D 曲線において  $553.2 \sim 1170.7\text{N}\cdot\text{mm}$  に分布していることと、破断時の C M O D<sub>c</sub> が寄与することから、C S G 材間及び単位セメント量による相違は認められなかった。
- ・ B 60 の荷重 - C M O D 面積  $W_0$  は、最大荷重が小さかったことから自重及び治具のなす仕事量  $W_1$  を下回った。

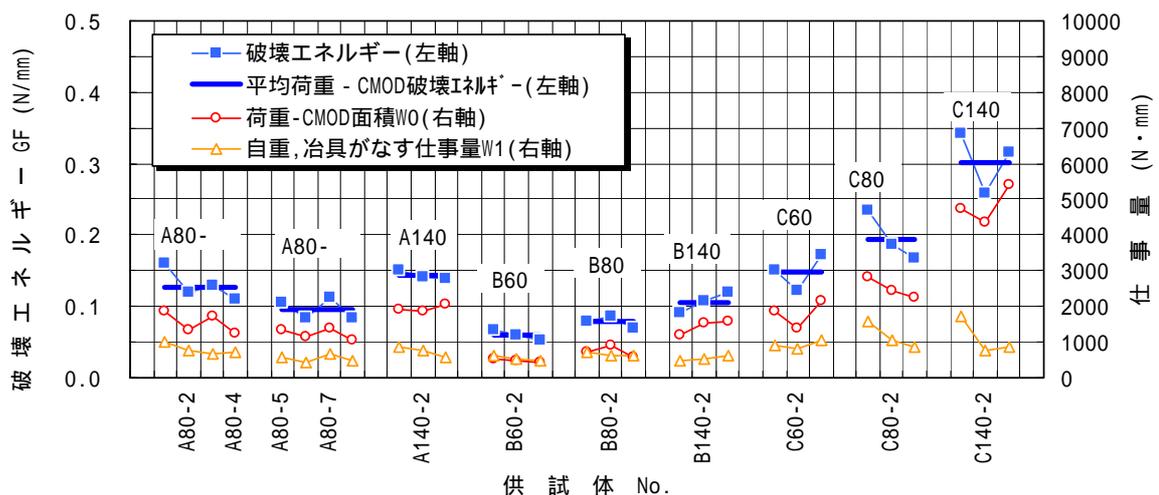


図 8.20 破壊エネルギー試験結果 ( , )

##### (2) 圧縮強度と破壊エネルギー

圧縮強度と破壊エネルギーの関係を図 8.21 に示し、試験値・破壊エネルギーと計算値・破壊エネルギーの関係を図 8.22 に示す。

- ・ 圧縮強度による破壊エネルギーの影響は、C S G 材 A、B 及び C を問わず、圧縮強度が大きいほど破壊エネルギーは大きくなった。
- ・ 圧縮強度の比較的近い C S G 材 A と C S G 材 B を比較すると C S G 材 B の方が小さい。これは C S G 材の骨材の分布 ( 供試体差ではなく配合上の粗骨材が占める割合 )、強度及び粒形の違いによるものであると考えられる。
- ・ 本試験より得られた破壊エネルギーと計算により導かれた破壊エネルギーは計算値/試験値 =  $1.24 \sim 2.78$  の関係となった。C S G 材は普通コンクリートとは締固め方法、C S G 材の配合が通常のコンクリートと異なることが影響しているものと思われる。

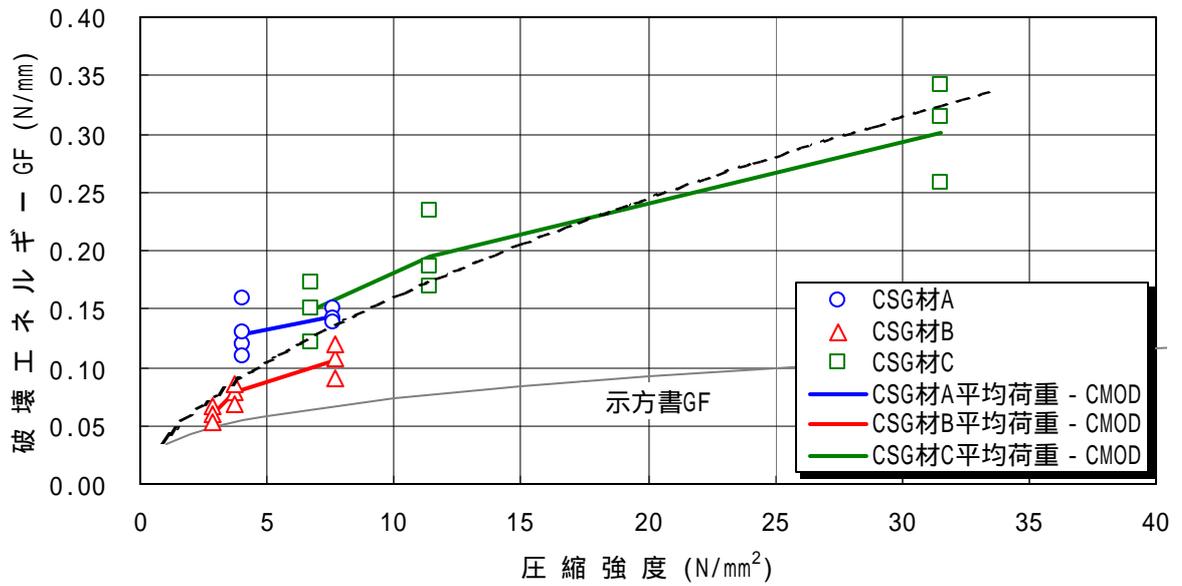


図 8.21 圧縮強度と破壊エネルギーの関係 ( , )

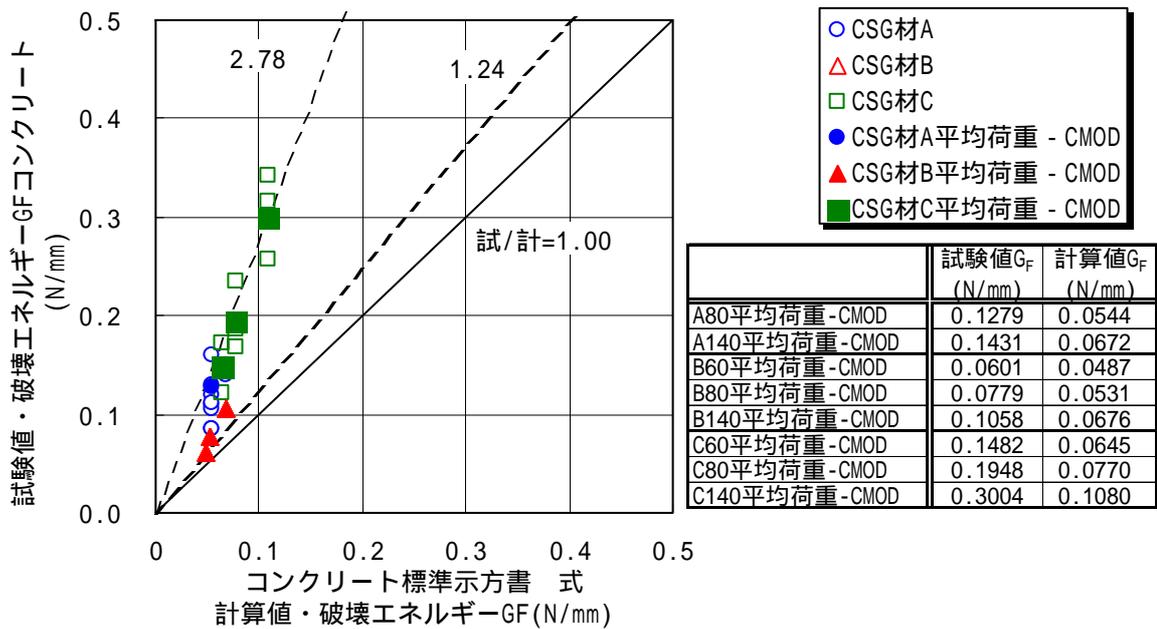


図 8.22 試験値破壊エネルギーと計算値破壊エネルギーの関係 ( , )

(3) 引張強度と破壊エネルギー

引張強度と破壊エネルギーの関係を図 8.23 に示す。

引張強度と破壊エネルギーの関係は、圧縮強度の試験結果と同様に、引張強度が大きくなると破壊エネルギーは増大する傾向であった。

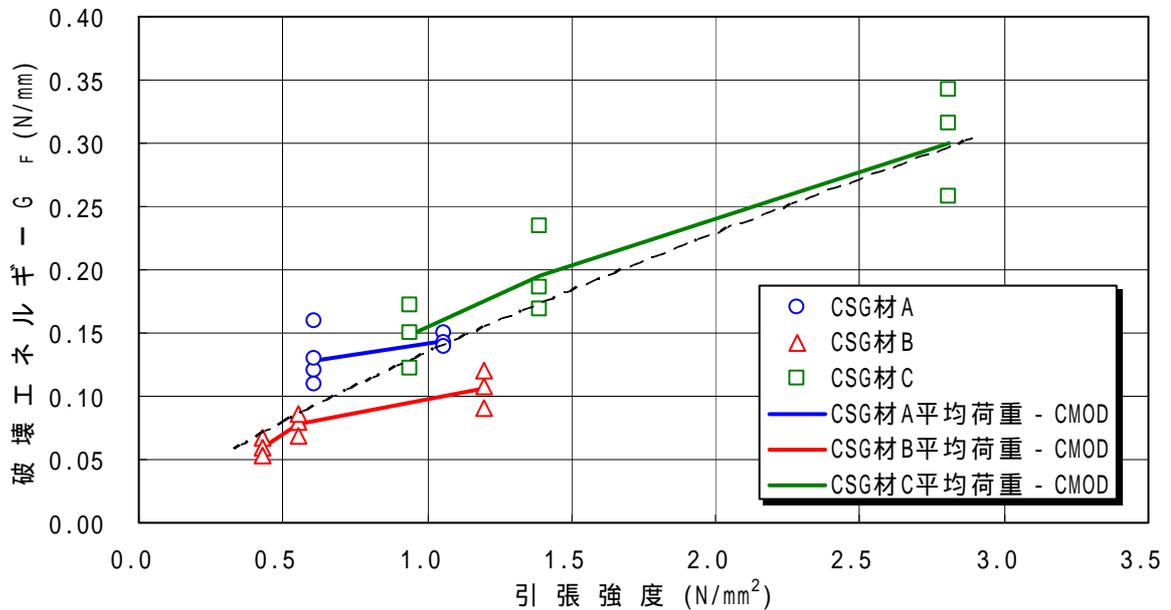


図 8.23 引張強度と破壊エネルギー ( , )

(4) 静弾性係数と破壊エネルギー

静弾性係数と破壊エネルギーの関係を図 8.24 に示す。

静弾性係数と破壊エネルギーの関係は、圧縮強度の試験結果と同様に、静弾性係数が大きくなると破壊エネルギーは増大する傾向であった。

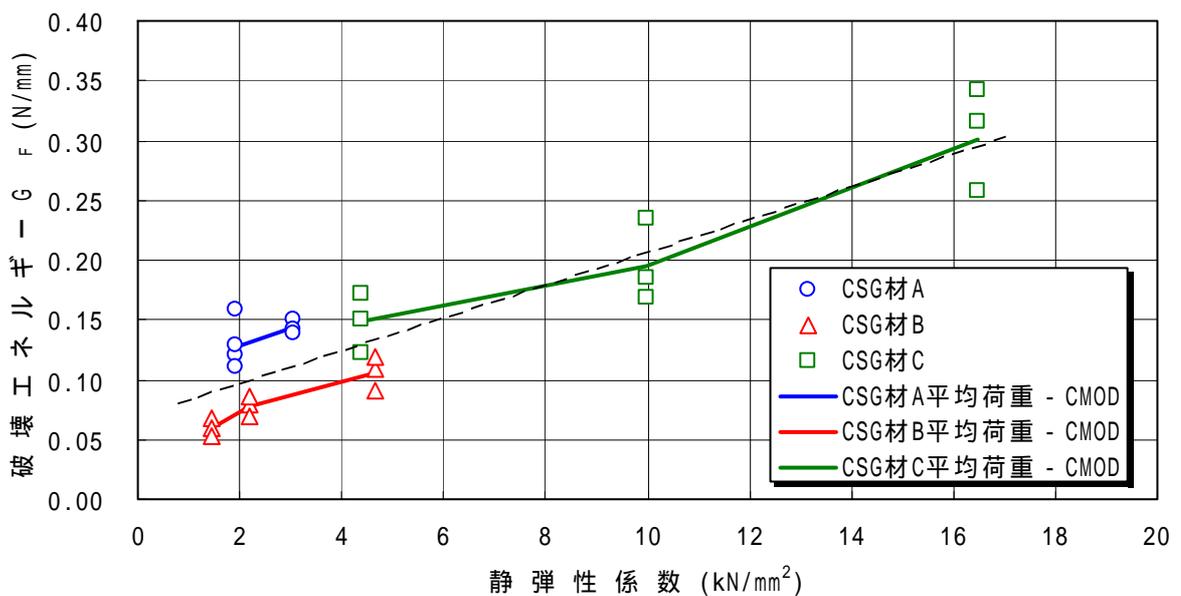


図 8.24 静弾性係数と破壊エネルギー ( , )

( 5 ) 引張軟化曲線の推定

破壊エネルギー試験より得られたCMOD及び荷重の関係より、完全に開口しているひび割れ先端の破壊挙動をモデル化し、仮想開口ひび割れ幅と結合応力との関係を推定する。

解析結果を表 8.9 に示す。引張軟化曲線と回帰により推定した二直線引張軟化曲線との関係を図 8.25 及び図 8.26 に示す。解析による P - D 曲線、平均荷重 - CMOD 曲線との関係を図 8.25 及び図 8.26 に示す。

1 ) 引張軟化曲線及び P - D 曲線

本解析より得られた引張軟化曲線は、仮想ひび割れ 0 ~ 0.01mm 時に割裂引張強度に近い値で維持し、その後は徐々にひび割れ開口に伴って結合応力が減衰している。

引張軟化曲線を同一CSG材別に比較したところ、単位セメント量が多いほうが初期結合応力、仮想ひび割れ発生後の結合応力ともに単位セメント量の小さい引張軟化曲線を包絡していた。

逆解析より得られた引張軟化曲線を用いて順解析し、算出された P - D 曲線は試験結果とほぼ一致しており、その最大荷重の誤差は平均荷重 - CMOD 曲線で最大 2% であり、ほぼ一致していると思われる。CMOD が 0.3 ~ 0.5mm を超えたあたりから若干下方に推定する傾向にあった。

表 8.9 解析結果 ( , )

CSG材の種類	供試体 No.	破壊エネルギー試験結果		解析結果								
		最大荷重 (N)	最大荷重時CMOD (mm)	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) [ym. for]	初期結合応力 (N/mm <sup>2</sup> ) [ft. for]	最大結合応力 (N/mm <sup>2</sup> ) [soft. for]	最大荷重 (N) [pd. for]			最大荷重時CMOD (mm) [pd. for]		
							解析値	試験結果との誤差	誤差 (%)	解析値	試験結果との誤差	誤差 (%)
A (C=80kg/m <sup>3</sup> )	平均荷重-CMOD曲線	2667	0.047	8308.3	2.000	2.000	2690.32	23.32	1	0.04489	-0.00211	4
A (C=140kg/m <sup>3</sup> )	平均荷重-CMOD曲線	4411	0.051	21795.5	0.700	1.125	4491.56	80.56	2	0.05081	-0.00019	0
B (C=60kg/m <sup>3</sup> )	平均荷重-CMOD曲線	1297	0.032	7798.7	0.600	0.600	1322.60	25.60	2	0.03144	-0.00056	2
B (C=80kg/m <sup>3</sup> )	平均荷重-CMOD曲線	2115	0.045	8242.9	1.000	1.000	2155.82	40.82	2	0.04417	-0.00083	2
B (C=140kg/m <sup>3</sup> )	平均荷重-CMOD曲線	3513	0.049	17806.3	1.200	1.200	3544.40	31.40	1	0.04757	-0.00143	3
C (C=60kg/m <sup>3</sup> )	平均荷重-CMOD曲線	3950	0.024	59261.0	1.600	1.600	3978.78	28.78	1	0.02263	-0.00137	6
C (C=80kg/m <sup>3</sup> )	平均荷重-CMOD曲線	5558	0.028	68619.2	1.900	1.900	5597.31	39.31	1	0.02607	-0.00193	7
C (C=140kg/m <sup>3</sup> )	平均荷重-CMOD曲線	9930	0.055	75582.8	3.000	3.000	10000.98	70.98	1	0.05790	0.00290	5

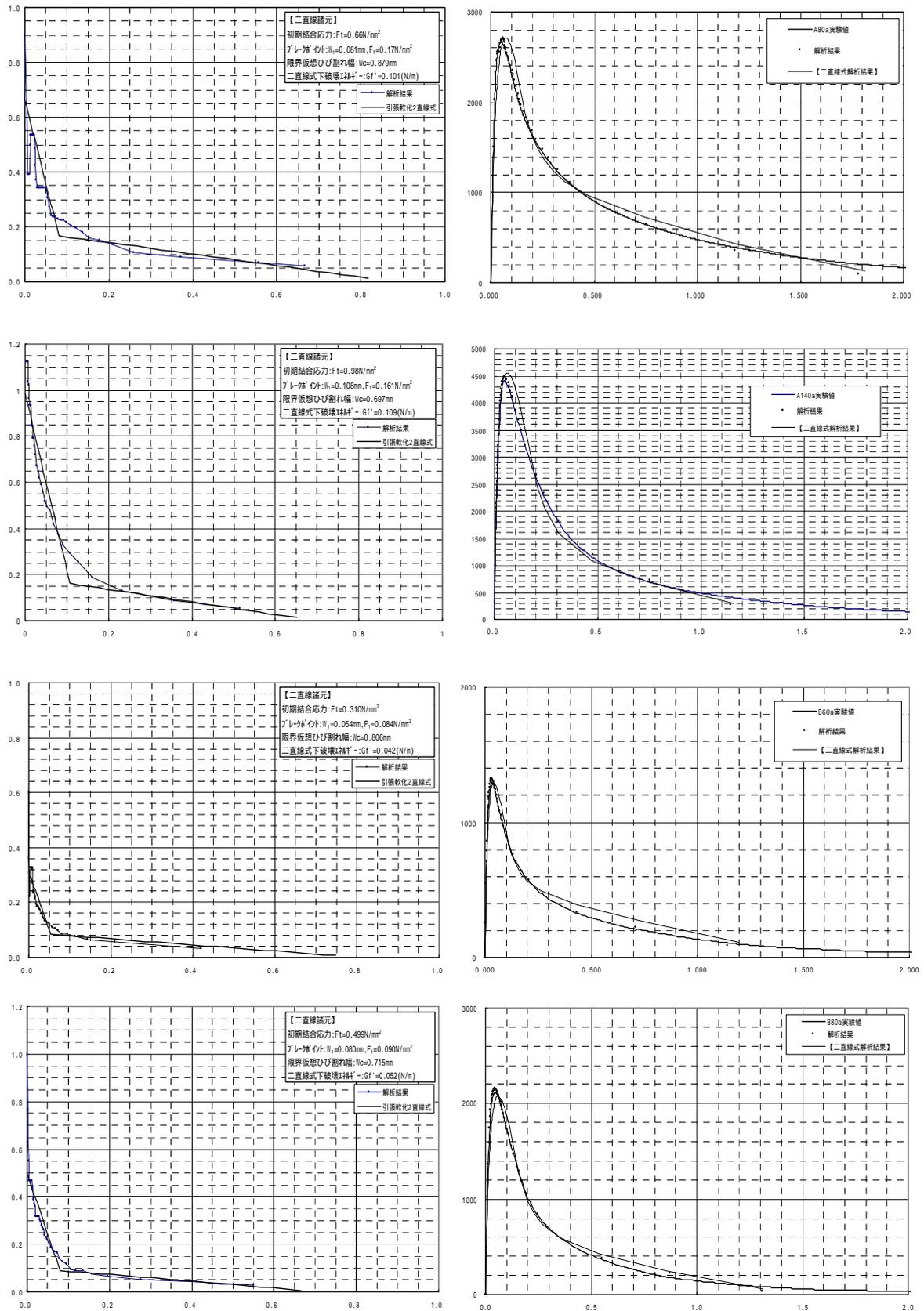


図 8.25 引張軟化曲線と荷重(平均) - CMOD曲線 ( , )

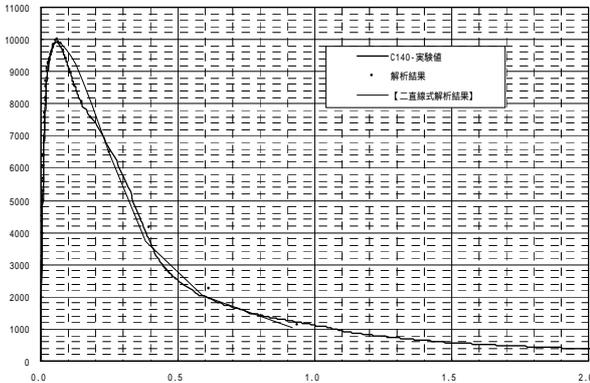
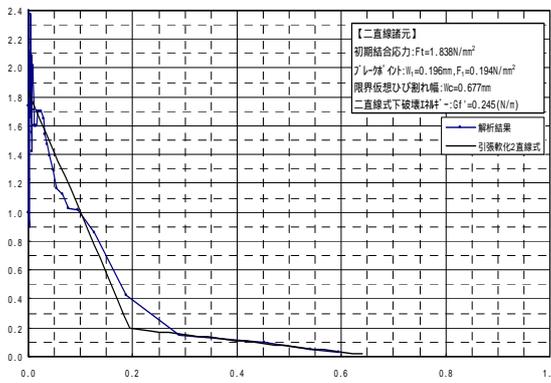
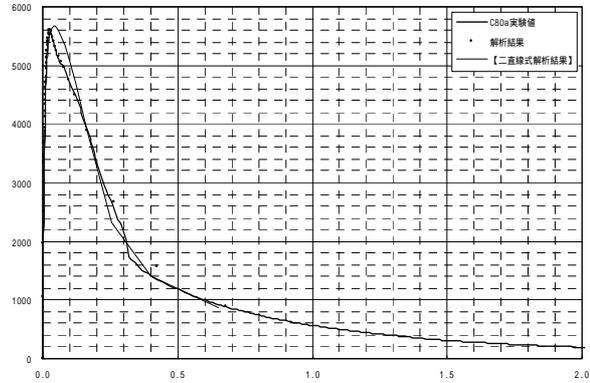
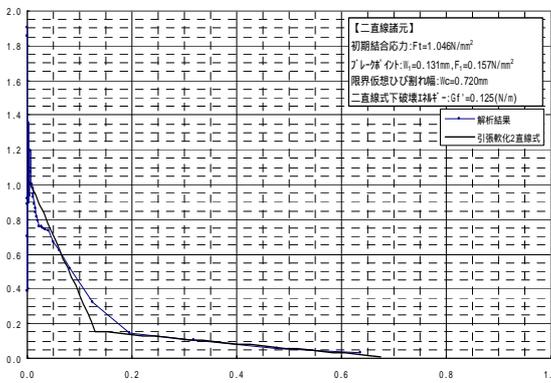
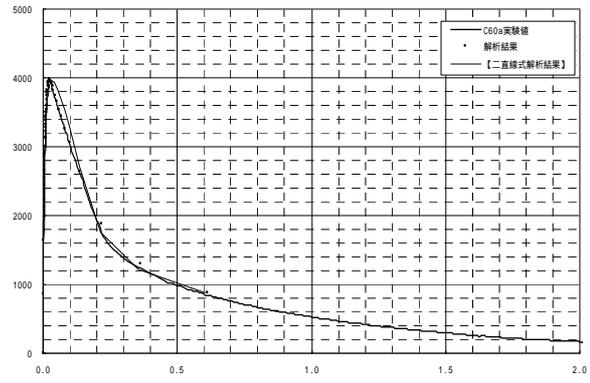
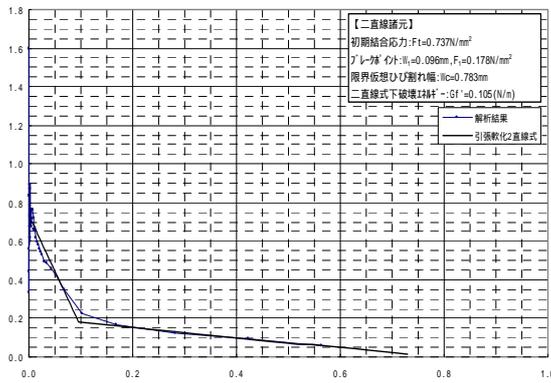
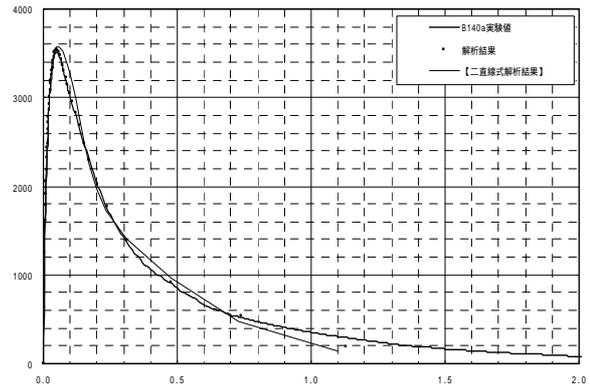
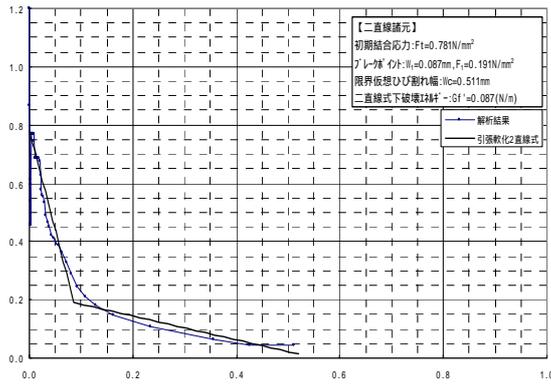


図 8.26 引張軟化曲線と荷重 (平均) - CMOD 曲線 ( , )

## 2) 二直線型引張軟化曲線

引張軟化曲線より特定した二直線型引張軟化曲線の特定値を表 8.10 にしめす。解析結果について以下の傾向が見られた。

- ・ 二直線型引張軟化曲線より特定した初期結合応力は、引張割裂試験で得た引張強度の 65% ~ 95% となった。特に A 配合においては 90% 以上となりほぼ同値となった。
- ・ ブレークポイントの特定値は、圧縮強度が大きいほどひび割れ幅が大きくなる傾向が認められた。しかし、限界仮想ひび割れ幅については、圧縮強度が大きいほどひび割れ幅が小さくなる傾向が認められた。
- ・ 引張軟化曲線の形状は、一般的なコンクリートで得られるものと同じであった。
- ・ 二直線型引張軟化曲線より得た破壊エネルギー ( $G_f'$ ) は実験値で得られた破壊エネルギー ( $G_f$ ) より小さく、 $G_f' = 0.73 G_f$  の関係であった。
- ・ 荷重 - C M O D 曲線について C M O D が 0.5mm 以上の区間から判断すると、二直線型引張軟化曲線より解析された C M O D<sub>c</sub> は実験値より小さな値となる。その他の区間は解析値と実験値に大きな違いは見られない。

表 8.10 二直線型引張軟化曲線の特性値 ( , )

C S G 材の種類	供試体 NO.	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2 直線式					破壊エネルギー		
			初期結合応力 (N/mm <sup>2</sup> )	初期結合応力 / 引張強度	ブレークポイント W1 (mm)	ブレークポイント F <sub>1</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	限界仮想ひび割れ幅 : Wc (mm)	2 直線型 G <sub>f</sub> (N/mm)	実験値 G <sub>f</sub> (N/mm)	G <sub>f</sub> ' / G <sub>f</sub>
A (C=80kg/m <sup>3</sup> )	A80-Average	0.610	0.546	0.90	0.0807	0.1677	0.879	0.0991	0.1279	0.77
A (C=140kg/m <sup>3</sup> )	A140-Average	1.060	1.002	0.95	0.1064	0.1893	0.634	0.1134	0.1431	0.79
B (C=60kg/m <sup>3</sup> )	B60-Average	0.430	0.313	0.73	0.0537	0.0843	0.806	0.0423	0.0601	0.70
B (C=80kg/m <sup>3</sup> )	B80-Average	0.550	0.461	0.84	0.0848	0.0890	0.715	0.0514	0.0779	0.66
B (C=140kg/m <sup>3</sup> )	B140-Average	1.200	0.781	0.65	0.0846	0.2052	0.556	0.0869	0.1058	0.82
C (C=60kg/m <sup>3</sup> )	C60-Average	0.940	0.737	0.78	0.0957	0.1784	0.783	0.1051	0.1482	0.71
C (C=80kg/m <sup>3</sup> )	C80-Average	1.390	1.046	0.75	0.1306	0.1567	0.720	0.1247	0.1948	0.64
C (C=140kg/m <sup>3</sup> )	C140-Average	2.810	1.838	0.65	0.1956	0.1939	0.677	0.2453	0.3004	0.82

### 3) 修正二直線型引張軟化曲線

回帰により特定した二直線型引張軟化曲線では、結合応力が  $0.1\text{N/mm}^2$  以下の解析値の不足より限界仮想ひび割れ幅 ( $W_c$ ) を小さく特定する傾向が見られた。この問題を解消するためには、ブレイクポイント以降の直線の定式方法を変える必要がある。構成関数が増えるが、もう一つブレイクポイントを特定し三直線を特定するのが確実な方法といえる。また、他の二直線型の特定方法として、ブレイクポイントの特定までは前述の方法とし、限界仮想ひび割れ幅だけを移動させることで実験値による破壊エネルギー ( $G_f$ ) に強引に合致させる方法が考えられる。この場合ブレイクポイント以降は回帰によらないので、これにより解析された荷重 - C M O D 曲線は実験値と合わない。しかし、C S G の特徴である限界仮想ひび割れ幅の伸びを表現でき、引張軟化曲線での破壊エネルギーが確実に実験値と同値になる利点も含む。なお、本研究ではこの方法より求めた二直線型引張軟化曲線を修正二直線型引張軟化曲線と表現し、この場合の限界仮想ひび割れ幅を修正限界仮想ひび割れ幅 ( $W'_c$ ) とした。表 8.11 に修正二直線型引張軟化曲線の特定値を示す。また、その特定値について図 8.27 のような関係を得た。図より判断すると、今回の条件での C S G は、コンクリート標準示方書での二直線型引張軟化曲線の推定方法で説明のできる結果となった。このことは、荷重 - C M O D 曲線を計測し破壊エネルギーを計算すれば、この条件での引張軟化曲線の特定ができることを意味する。

表 8.11 修正二直線型引張軟化応力の特定値 ( , )

ケース NO	荷重速度 (mm/min)	計測間隔 (s)	限界仮想ひび割れ幅 $W_c$ (mm)	修正限界仮想ひび割れ幅 $W'_c$ (mm)	破壊エネルギー (実験値) $G_f$ (N/mm)	$f_t \times W'_c / G_f$
A80-	0.1	1.0	0.621	0.955	0.122	4.76
A80-	1.0	0.1	0.517	0.810	0.096	5.12

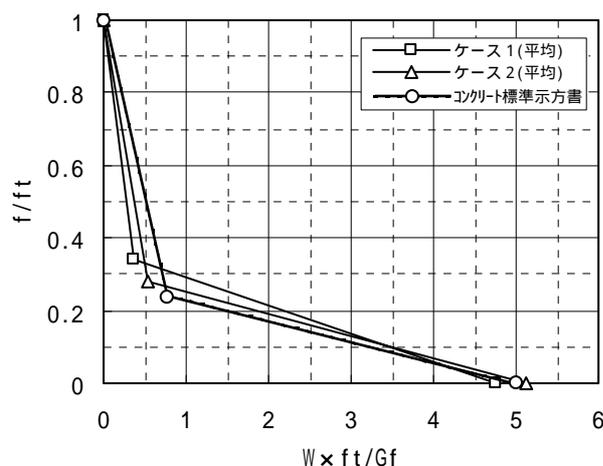


図 8.27 修正二直線型引張軟化応力の特定値 ( , )

## (6) 考察

本研究では、CSG供試体について破壊エネルギー試験を実施し得られた荷重 - CMODの関係より引張軟化曲線を多直線近似解析により求めている。また、引張軟化曲線から二直線型引張軟化曲線を最小二乗法より回帰直線として特定し、それについて評価を実施している。

破壊エネルギー試験について結論をまとめると以下のとおりである。

- ・ 今回の条件ではCSGで破壊エネルギー試験を実施し、荷重 - CMOD曲線を計測することができた。
- ・ 載荷速度の影響は、速い場合は最大荷重を大きくし、遅い場合はCMOD<sub>c</sub>を大きくした。また、荷重 - CMOD曲線全体のばらつき具合にも違いが見られる。
- ・ 最大荷重時でのCMODは微小であるがCMOD<sub>c</sub>の計測値に伸びが大きい。CSGは弾性領域後に高い靱性を有している事がわかった。
- ・ 圧縮強度による破壊エネルギーの影響は、CSG材A、B及びCを問わず、圧縮強度が大きいほど破壊エネルギーは大きくなった。
- ・ 圧縮強度の比較的近いCSG材AとCSG材Bを比較するとCSG材Bの方が小さい。これはCSG材の骨材の分布（供試体差ではなく配合上の粗骨材が占める割合）、強度及び粒形の違いによるものであると考えられる。
- ・ 本試験より得られた破壊エネルギーと計算により導かれた破壊エネルギーは、試験値が計算値より1.2~2.8倍となっていた。
- ・ 今回の検討では、CSGの強度特性から判断される破壊エネルギーよりも実験では大きな値を示した。CSGは破壊に至るまでの塑性領域に粘りが期待できる。この特性を数値解析に反映させる場合、引張軟化曲線の定式化にこの範囲をカバーすれば良いことになる。今回は構成関数が簡易である二直線型について検討したが、引張軟化曲線については以下のことが解った。
- ・ 初期結合応力( $f_t$ )は載荷速度を変えた、両ケースとも0.6N/mm<sup>2</sup>程度CSGの引張応力度とほぼ同値となった。
- ・ 引張軟化曲線を同一CSG材別に比較したところ、単位セメント量が大きいほうが初期結合応力、仮想ひび割れ発生後の結合応力ともに単位セメント量の小さい引張軟化曲線を包絡していた。
- ・ 解析より得られたヤング係数と試験により得られた静弾性係数を比較したところ、解析値は実際の静弾性係数を過大評価していることが確認された。
- ・ 解析より得られた初期結合応力と試験により得られた割裂引張強度を比較したところ、解析値/試験値=0.66~2.46の関係であり、解析値は実際の引張強度の傾向は概ね把握できているものの、ばらつきが大きかったと考えられる。
- ・ 限界仮想ひび割れ幅( $W_c$ )の特定は、解析値の不足により過小に評価する傾向となった。このことにより、二直線型引張軟化曲線により求めた破壊エネルギー( $G_f'$ )を小さくしている。
- ・ 今後の課題

CSGの強度特性はコンクリートより特段に低い。よって、コンクリートの感覚では無視し

てしまうような、結合応力の極めて小さい所の特徴でも引張軟化曲線の特定で扱う必要がある。このことは、CSGでの破壊特性を捉える上で極めて重要なことで、これからの課題であると考えた。また、引張軟化曲線の定式方法は、実際に行う数値解析などに求める精度や反映させるべきCSGの特性を考慮し選択すればよいと考えた。

本試験におけるCSGの破壊エネルギー特性の検討は、CSG材最大寸法40mmで実施したものである。

実施工に用いられるCSG材の最大寸法は一般的に80mmであり、実施工の品質管理においてCSGの強度管理は締固め密度管理を行う為、フルサイズの締固め密度と強度の関係を把握している。

このような背景から、CSG材最大寸法80mmのフルサイズの破壊エネルギー試験についても把握しておく必要があり、標準示方書[構造性能照査編]第3章に述べられているように、材料の圧縮強度特性と粗骨材の最大寸法が大きく寄与すると考えられていることから、今後フルサイズにおける試験を行う必要があると考えられる。

台形CSGダムでは設計の合理化を目標としており、有限要素法による地震動解析などを積極的に取り入れている。CSGの破壊特性の把握はそのような背景からも重要な分野であると言える。