

CSGの破壊エネルギーに関する検討

国土技術政策総合研究所 正会員 ○三澤 輝芳 佐藤 耕治 服部 敦 安田 成夫

1. はじめに

台形CSGダムは、台形状のダムとCSG(Cemented Sand and Gravel)工法の利点をあわせ持つ新形式のダムである。本検討では、台形CSGダムのレベル2地震動に対する地震動解析で、非線形解析とする場合に必要となるCSGの破壊特性を検討した。CSGの破壊エネルギーの計測を「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法(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ている。この試験より得られた荷重－ひび割れ肩口開口変位(以下CMOD)曲線より破壊エネルギーを算出し、引張軟化曲線を多直線近似解析により特定した。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場合の定式方法も検討した。

2. 試験方法

2. 1 使用材料とCSGの配合

母材は沖縄総合事務局で進められている大保ダム建設工事のうち、脇ダム原石山で採取された千枚岩とした。粒度分布を図1に示す。今回の試験で使用する母材に対し単位セメント量80kg/m³(普通ポルトランドセメント使用)、標準VC値20秒(RCD用コンクリートのコンシステンシー試験(JSCE-F 507-1999))を満足するように予備試験を実施しCSGの基本配合を表1のように決定した。

また、この配合でのCSGの強度特性を表2に示す。母材の最大粒径をウェットスクリーニングにより40mmとした場合の標準供試体(封緘養生:φ150×^H300mm)での試験結果である。なお、引張強度は引張割裂試験(JIS A 1113)より求めた。

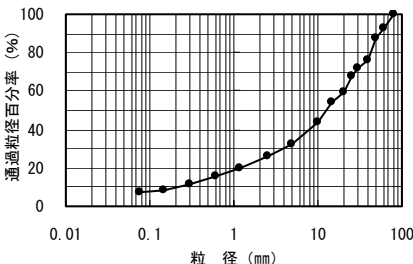


図1 母材の粒度分布

表1 CSG基本配合

配合名称	母材最大寸法(mm)	空気量(%)	W/C	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					
					水	セメント	母材0-5mm	母材80-40mm	母材40-20mm	母材20-10mm
CSG基本配合	80	0	160	32	128	80	726	557	408	307

表2 CSG強度特性

配合名称	圧縮強度試験結果				引張強度試験結果(引張割裂試験) σ ₂₈ (N/mm ²)
	σ ₇ ヒーク強度(N/mm ²)	弾性領域強度(N/mm ²)	σ ₂₈ ヒーク強度(N/mm ²)	静弾性係数(N/mm ²)	
CSG基本配合	2.94	2.10	4.02	1910	0.61

2. 2 破壊エネルギー試験

供試体寸法は母材を40mm以下にウェットスクリーニングし、φ150×^H150×^L530mmとした。供試体の締固め方法は、安定した品質の供試体を得るため切欠きのある転圧プレート(200×140mm)を装着した振動タンパ(振動数3000cpm,起振力140kgf)を使用し、図2のとおりに統一した。試験ケースは、クラック進展速度による影響を把握するため载荷速度に着目し、表3のように設定した。試験装置はコンピューター計測制御式万能試験機を使用し、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。

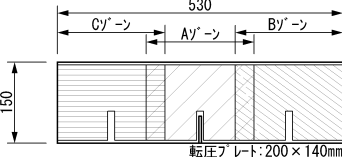


図2 供試体作製方法

2. 3 引張軟化曲線の特定方法

現在公開されている解析プログラム「引張軟化曲線多直線近似解析ダウンロード版(FEM-FT法)」を利用し引張軟化曲線を特定した。二直線型引張軟化曲線は、引張軟化曲線から最小二乗法により求めた。ブレイクポイントは、解析より得られた引張軟化曲線下の面積と、同じ区間の二直線下の面積との差が最小になる位置とした(図3)。なお、破壊エネルギーの記号を実験値によるものをG_f、二直線下の全面積によるものをG_f^{*}としている。

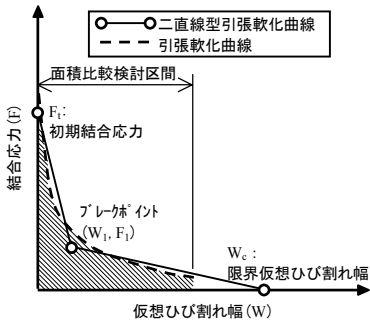


図3 二直線型引張軟化曲線

工程	内容
下層打設 仕上り:75mm	Cy'->:10s→Ay'->:10s→By'->:10s 4サイクル
目荒らし 粗面処理	
上層打設 仕上り:75mm	Cy'->:10s→Ay'->:10s→By'->: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

表3 試験ケース

ケースNO	配合名称	载荷速度(mm/min)	計測間隔(s)	供試体本数(本)
1	CSG基本配合	0.1	1.0	4
2	CSG基本配合	1.0	0.1	4

※養生方法:封緘養生
※試験材齢:28日

【キーワード】台形CSGダム、CSG、破壊エネルギー、引張軟化曲線、二直線型引張軟化曲線
【連絡先】〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地 河川研究部ダム研究室 Tel029-864-7189 Fax029-864-2688

3. 試験結果

破壊エネルギー試験結果を表4に、荷重-CMOD 曲線を図4に示す。最大荷重時でのCMODは両ケースとも0.04~0.05mmの範囲であった。また、すべての試験で不安定破壊がなく、供試体の破壊まで荷重およびCMODの測定が可能でCMODc(破断時のCMOD)の特定ができ、CSG供試体でも弾性領域後の靱性を確認することができた。載荷速度が遅いケース1はケース2よりもCMODcの計測値が大きく、破壊エネルギーの実験値(Gf)にも違いが認められた。

二直線型引張軟化曲線の特定値を表5に示す。

また、解析より求めた引張軟化曲線と回帰より特定した二直線型引張軟化曲線の一例を図5に、それらの引張軟化曲線から解析で得られた荷重-CMOD 曲線を図6に示す。二直線型引張軟化曲線より特定した初期結合応力(第一直線の切片)は両ケースとも $F_t=0.61\text{N/mm}^2$ で、引張割裂試験で得た引張強度と同値になった。限界仮想ひび割れ幅(W_c)は、結合応力が 0.1N/mm^2 以下の極小領域の解析値が不足し過小に評価する傾向となった。この影響により、二直線型引張軟化曲線より得た破壊エネルギー(G_f)は両ケースとも $G_f \approx 0.7G_f$ の関係となった。

4. 破壊エネルギー(G_f)による二直線の特定

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。他の二直線の特定方法として、ブレイクポイントの特定までは2.3の方法とし、限界仮想ひび割れ幅(W_c)だけを移動させ、二直線下の全面積による破壊エネルギー(G_f)を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-CMOD 曲線の実験値と合わない。しかし、限界仮想ひび割れ幅の伸びは表現できる。この手法による特性値は表6、図7のような関係となった。図7より判断すると、CSG 供試体の破壊特性値はコンクリート標準示方書[構造性能照査編]で示されている引張軟化曲線モデルで説明のできる結果となった。

5. 結論

今回の条件では、CSG 供試体で破壊エネルギー試験より荷重-CMOD 曲線を計測し、破壊エネルギーを求めることができた。また、供試体の不安定破壊は起こらずCMODcの特定が可能で弾性領域後の靱性を確認できた。

引張軟化曲線の二直線型などへの定式方法は様々に考えられる。CSG の場合定式化された引張軟化曲線が、数値解析に求める精度に必要な破壊特性を反映しているかを確認することが重要である。また、様々な母材の使用によるCSGの破壊特性の把握については今後の課題と考えた。

【参考文献】

- 1) JCI 規程「切欠きはりを有したコンクリートの破壊エネルギー試験方法」JCI-S-001-2003
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]：H14. 3
- 3) 堀井・内田・柏柳ほか：コンクリートダム耐力評価のための引張軟化特性の検討：電力土木 N0286, 2000. 3

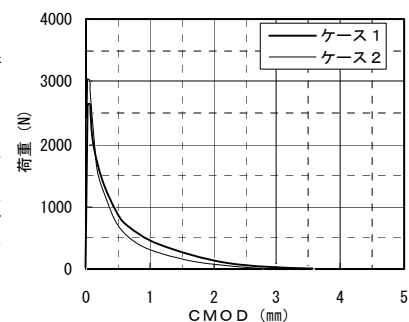


図4 荷重-CMOD曲線

表4 破壊エネルギー試験結果

ケースNO	載荷速度 (mm/min)	計測 間隔 (s)	最大荷重時			供試体破壊時		CMOD速度(mm/min)			破壊エネルギー (実験値) Gf (N/mm)
			計測 時刻 (s)	最大 荷重 (N)	CMOD (mm)	計測 時刻 (s)	CMODc (mm)	開始 ～ 最大荷重	最大荷重 ～ 破壊時刻	全体	
1	0.1	1.0	213.8	2669	0.047	1462.0	3.592	0.014	0.173	0.149	0.122
2	1.0	0.1	19.0	3063	0.042	126.0	2.778	0.136	1.539	1.321	0.097

表5 二直線型引張軟化曲線の特定値

ケースNO	載荷速度 (mm/min)	計測 間隔 (s)	初期結合応力 F_t (N/mm ²)	ブレイクポイント		限界仮想 ひび割れ幅 W_c (mm)	破壊エネルギー			
				W_1 (mm)	F_1 (N/mm ²)		二直線式 Gf (N/mm)	実験値 Gf (N/mm)	Gf/Gf	Gf/Gf
1	0.1	1.0	0.61	0.073	0.21	0.621	0.087	0.122	0.71	0.71
2	1.0	0.1	0.61	0.086	0.17	0.517	0.071	0.097	0.74	0.74

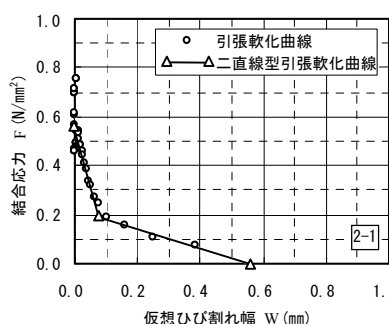


図5 引張軟化曲線

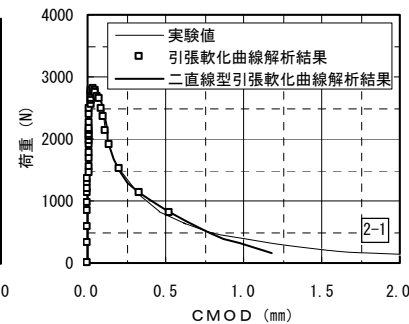


図6 荷重-CMOD曲線

表6 Gfによる二直線型引張軟化曲線の特性値

ケースNO	載荷速度 (mm/min)	計測 間隔 (s)	限界仮想 ひび割れ幅 W_c (mm)	Gfによる限界 仮想ひび割れ幅 W_c' (mm)	破壊エネルギー (実験値) Gf(N/mm)	$F_1 \times W_c' / G_f$
1	0.1	1.0	0.621	0.955	0.122	4.76
2	1.0	0.1	0.517	0.810	0.097	5.12

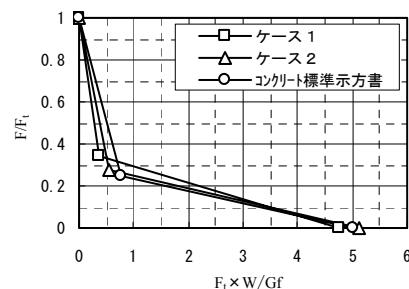


図7 Gfによる二直線型引張軟化曲線の特性値