

CSG の引張破壊特性に関する検討

独立行政法人土木研究所 正会員 ○切無沢徹、金銅将史、小島裕之、山口嘉一

1. はじめに

新たな型式のダムとして、現地発生材を基本的に分級せず、簡易な施設でセメントと水を混合した CSG (Cemented Sand and Gravel) を堤体材料とした、台形 CSG ダムの建設が本格的に進んでいる。一方で、重要な大規模構造物であるダムは、大規模地震に対する耐震性能について、必要に応じて損傷形態をも考慮した上で確認することが求められている。そこで、本研究では、台形 CSG ダムの耐震性能照査に必要な CSG の引張破壊特性について、その引張強度試験、破壊エネルギー試験等により検討した結果を報告する。

2. 試験方法

実施した試験と供試体形状について表-1 に示す。直接引張試験及び破壊エネルギー試験では、後述する各種試験規準に基づく載荷速度（以下、静的載荷という）の他、大規模地震時の動的条件下における CSG の引張破壊特性を把握するため、静的載荷より載荷速度を速くした試験（以下、急速載荷という）を実施した。

直接引張試験は、鋼製の治具にエポキシ系接着剤で固定した供試体を万能試験機に設置し、軸方向に引張荷重を加える方法で実施した（写真-1 参照）。静的載荷の載荷速度は JIS A A1113「コンクリートの割裂引張試験」を参考に設定し、急速載荷では本試験で使用した試験機器により可能な範囲で急速に載荷した。

破壊エネルギー試験は、JCI-S-001-2003「切欠きはりを有いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」（以下、JCI 規準という）に準拠し、CMOD（ひび割れ肩口開口変位）速度は JCI 基準の 1 倍及び 100 倍のケースを実施した。

その他、参考として圧縮試験及び割裂引張試験を実施した。

供試体には A ダムで実際に使用された CSG 材（表-2 参照）を使用した。配合は表-3 に示す 2 通りとした。CSG1 は堤体内部の CSG、CSG2 は堤敷部等に用いられる富配合 CSG を想定している。CSG は混合した後、40mm のふるいでウェットスクリーニングを行い、ボッシュタンパにより締固めた。供試体は恒温室で封緘養生し、材齢 91 日程度で各種試験を実施した。

3. 試験結果

(1) 直接引張試験

直接引張試験の結果を表-4 に示す。表中には参考として圧縮及び割裂引張試験の結果も示す。各試験とも強度は最大荷重時の応力としている。なお、急速載荷の直接引張試験では使用した計測機器の性能上ピーク値が記録できず、実際の強度は表-4 に示す値より 1～2 割程度高い可能性がある。CSG1 の配合から単位セメント量を増やした CSG2 の静的載荷による直接引張強度は、CSG1 の 1.6 倍程度であり、圧縮強度や割裂引張強度に比べ、単位セメント量による強度の増進が大きい。また、直接引張試験で

キーワード CSG, 直接引張, 破壊エネルギー, 載荷速度

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 土木研究所水工研究グループ水工構造物チーム TEL 029-879-6781

表-1 実施試験・供試体形状

試験	形状
直接引張	φ 150mm×H300mm (両端部 30mm 切除)
割裂引張	
圧縮	φ 150mm×H300mm
破壊エネルギー	B150mm×H150m×L530mm

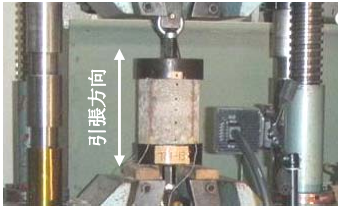


写真-1 直接引張試験状況

表-2 CSG 材物性値・質量百分率

粒径	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	質量百分率 (%)
80mm-40mm	2.54	2.48	2.19	19
40mm-20mm	2.53	2.46	2.73	20
20mm-10mm	2.53	2.46	2.91	20
10mm-5mm	2.52	2.44	3.38	18
5mm-	2.56	2.48	3.16	23

表-3 供試体配合

配合	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	CSG 材量 (kg/m ³)
CSG1	80	85	2258
CSG2	120	85	2226

表-4 直接引張試験結果

試験		試験 数量	配合	CSG1	CSG2
直接引張試験 (参考)	静的載荷	5	① 平均値 (N/mm ²)	0.18	0.29
			変動係数 (%)	17	12
	急速載荷	10	② 平均値 (N/mm ²)	0.18	0.23
			変動係数 (%)	17	12
	圧縮試験	5	③ 平均値 (N/mm ²)	3.55	4.69
	割裂引張試験	5	④ 平均値 (N/mm ²)	0.55	0.64
①/③				1/20	1/16
②/③				1/20	1/20
①/④				1/3.1	1/2.2

は割裂引張試験に比べて引張強度が 1/2～1/3 程度になった。この原因として、供試体作製時に 3 層に分けて締固めた打継面が軸方向の引張に対して相対的な弱部となったこと、軸方向の荷重負荷が均等とならず曲げ変形が生じやすいことなどの可能性が考えられる。

直接引張試験における載荷速度と引張強度の関係を図-1 に示す。載荷速度は荷重が最大となる直前の計測値から算出した。試験結果はばらつきが大きく、今回の試験条件下では載荷速度の違いによる強度への影響は明確ではない。なお、堤高 50m の台形 CSG ダムを想定した FEM モデルによる地震応答解析から推定される最大引張応力発生箇所付近の載荷速度は、最大水平加速度約 0.3g の地震波形入力時には 20～40N/mm²/sec 程度になると推定される。本試験の載荷速度は 1N/mm²/sec 未満であり、大規模地震を想定した CSG の引張破壊特性を把握するためには、更に速い載荷速度での試験の実施が必要である。

(2) 破壊エネルギー試験

破壊エネルギー試験で得られた各試験条件での CMOD-荷重曲線を図-2 に示す。CSG1 の CMOD 速度を JCI 標準の 100 倍とした試験では JCI 標準による試験に比べ最大荷重が大きくなっているが、これは同条件における 3 回の試験の内 1 回の最大荷重が特に大きくなっており、破断面における骨材の介在状態などによる供試体の個体差が原因であると推測される。CSG2 では載荷速度による CMOD-荷重曲線の変化は小さい。

CMOD-荷重曲線から算出した破壊エネルギーの値を表-5 に示す。同表中には、参考値としてコンクリート標準示方書¹⁾に示されている、またはダムコンクリートに関する既往研究²⁾により報告されている関係式より算出した値も示す。試験から得られた破壊エネルギーは参考値の 3 倍程度と大幅に大きくなっている。また、CMOD 速度が速くなることで破壊エネルギーの平均値はやや大きくなる結果となったが、その割合は各載荷速度条件におけるばらつきの範囲内であり、今回の試験条件の範囲では載荷速度による明確な影響は確認されなかった。

4. まとめ

実際に使用された A ダムの CSG 材を用いた CSG 供試体を作製し、載荷速度を変化させた直接引張試験、破壊エネルギー試験等を実施し、以下の結果を得た。

- CSG の直接引張強度は割裂引張強度の 1/2～1/3 程度となった。これは今回の直接引張試験では打継面が引張に対して相対的に弱部となったこと、軸方向への荷重負荷が均等とならなかったことなどが要因と考えられる。なお、本試験条件下では、載荷速度が引張強度へ与える影響は明確とならなかった。
- CSG の破壊エネルギーは、今回の試験条件では一般的なコンクリートやダムコンクリートの関係式を適用して得られる値より大きな値が得られた。

今後はより地震時における実際の載荷条件に近い状態での試験の実施などにより、地震時における CSG の引張破壊特性の解明をすすめたい。

参考文献

1) (社) 土木学会, 2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, pp42-43, 2008. 3
2) 堀井秀之, 内田善久, 柏柳正之, 木全宏之, 岡田武二, 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 N0. 286, pp. 113-119, 2000. 3

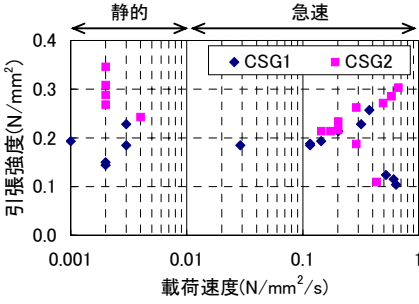


図-1 載荷速度と引張強度 (直接引張試験)

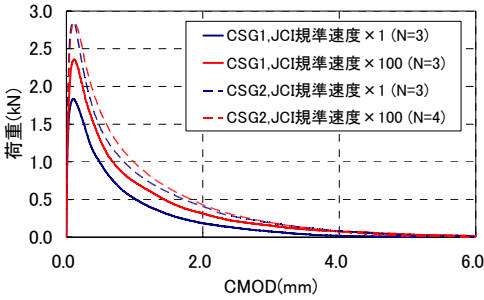


図-2 破壊エネルギー試験による CMOD-荷重曲線 (各配合・CMOD 速度条件での試験結果を平均した曲線)

表-5 CSG の破壊エネルギー

条件		試験値		参考値	
		CMOD 速度 (JCI 標準に対する倍率)		標準示 方書 ^{※1}	ダムコンクリートに 関する 既往研究 ^{※2}
		×1	×100		
破壊エネルギー (平均値: N/m) [] 内変動係数	CSG1	133 [2.5%]	177 [32%]	52	54
	CSG2	201 [20%]	205 [19%]	57	66

※1 $G_F = 10(d_{max})^{\frac{1}{3}} \cdot (f'_{ck})^{\frac{1}{3}}$, ※2 $G_F = (0.79d_{max} + 80) \times \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.7}$
ここで、 G_F : 破壊エネルギー(N/m), d_{max} : 粗骨材最大寸法(mm)
 f'_{ck} : 圧縮強度の特性値(N/mm²), f_{cm} : 圧縮強度(N/mm²)