

CSG の繰返し引張強度に関する検討

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 ○矢田一也, 金銅将史, 小堀俊秀, 榎村康史

1. はじめに

ダム事業において, 経済性や環境配慮の面から, ダムサイト近傍で得られる砂礫などの礫質材料を簡易な設備を用いてセメント・水と混合して製造する CSG(Cemented Sand and Gravel)を主な堤体材料とする台形 CSG ダムの建設・計画事例が増えつつある。

一方, 大規模地震に対して, 必要に応じその損傷過程まで考慮する耐震性能照査の試行が始まっている。

本報では, CSG の特に大規模地震時の挙動推定に必要と考えられる引張強度に対して, その繰返し载荷による影響を定量的に把握することを目的とし, 最大 100 回 (一部 200 回) までの繰返し回数での繰返し引張試験を行い検討した結果を報告する。

2. 試験方法

試験項目と試験に用いた供試体形状を表-1 に示す。供試体の作製には, 実際の台形 CSG ダム (S ダム) で母材として用いられた河床砂礫を CSG 材として使用した。CSG の配合と強度試験の結果を表-2 に示す。

繰返し引張試験は割裂引張試験 (JIS A 1113) と同様の载荷方法で行い, 所定の上限回数 (100 回, 一部 200 回) まで载荷・除荷を繰返して破壊させ, 破壊時までの繰返し回数を記録した (図-1)。繰返し载荷での応力振幅は, 静的 (単調) 载荷時の引張強度 (最大応力) の平均値 $\bar{f}_t (= 1.20)$ に対し, 最小応力比 $S_{min} = 0.1$, 最大応力比 $S_{max} = 0.7 \sim 0.9$ の範囲とした。上限回数までの繰返し载荷で破壊しなかったものは, その後単調载荷を行って破壊させ, 破壊時の最大荷重を記録した。载荷速度は全て $0.06 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ (静的载荷) とした。

3. 試験結果

繰返し引張試験の結果を表-3 に示す, 同表中の N_r は最大応力比 S_{max} が同一条件で試験を行った供試体のうち, r 番目に破壊した供試体の疲労寿命であり, 繰返し载荷途中に破壊したときまでの繰返し回数である。 $p(N_r)$ は順序統計量の理論¹⁾に基づく疲労寿命 N_r での生存確率²⁾ (疲労寿命 N_r で破壊が生じていない確率) の期

表-1 試験項目と供試体形状

試験項目	供試体形状
引張試験*	$\phi 150 \text{ mm} \times \text{H}240 \text{ mm}$
圧縮試験**	$\phi 150 \text{ mm} \times \text{H}300 \text{ mm}$

* 繰返し引張試験のほか繰返し载荷を行わない単調载荷試験も実施。

** CSG の基本物性値の把握のため一軸圧縮試験を実施。

表-2 CSG の配合と強度試験結果

最大粒径 G_{max}^* (mm)	単位量 (kg/m^3)			強度** (N/mm^2)	
	C	W	CSG 材	圧縮強度	引張強度***
80	80	100	2135	9.76	1.20

* 供試体作製時には最大粒径 40mm となるようウェットスクリーニング。

** 各強度試験の結果は 6 本の供試体の平均値。

*** 引張強度は単調载荷での割裂引張試験の結果。

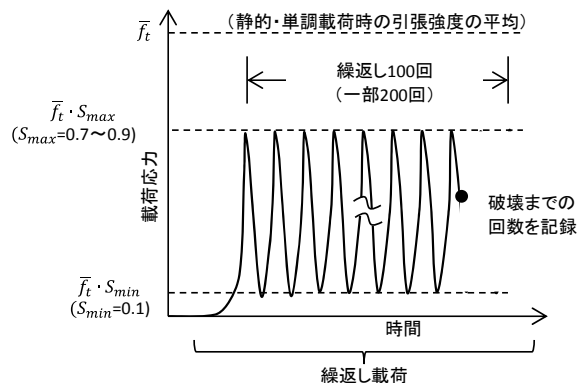


図-1 繰返し引張試験方法 (概念図)

待値である。所定の上限回数 (100 回または 200 回) までの繰返し载荷でも破壊しなかったものは, 「(上限回数) →」と記載し, その後静的载荷での単調载荷を行って得られた引張強度を右欄に示している。

なお, $p(N_r)$ の算出は, 浜田ら²⁾の方法によった。すなわち, 最大応力比が同一のものごとに, 試験供試体が全て破壊した場合は式(1), 繰返し回数が所定の上限回数に達しても破壊しない供試体がある場合は, 式(2)により算出した。

$$p(N_r) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (1)$$

$$p(N_r) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad (2)$$

ここに, n : 同一条件で試験された供試体総数[個], r : 総数 n 個の試験供試体のうち疲労寿命の小さい方から数えた順番, N_r : 疲労寿命[回], $p(N_r)$: 疲労寿

キーワード CSG, 引張強度, 繰返し载荷, 引張疲労強度

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 国立研究開発法人土木研究所 研究企画課 TEL029-879-6751

表-3 繰返し引張試験（引張疲労試験）結果

最大 応力比 S_{max}	順位 r	疲労寿命 N_r	生存確率の 期待値 $p(N_r)$	上限回数後の 引張強度 (N/mm ²)
0.9	1	1	88.9%	
	2	1	77.8%	
	3	1	66.7%	
	4	1	55.6%	
	5	3	44.4%	
	6	4	33.3%	
	7	5	22.2%	
	8	13	11.1%	
0.8	1	3	92.9%	
	2	5	85.7%	
	3	6	78.6%	
	4	7	71.4%	
	5	15	64.3%	
	6	20	57.1%	
	7	25	50.0%	
	8	33	42.9%	
	9	57	35.7%	
	10	68	28.6%	
	11	100→		1.03
	12	100→		1.32
0.75	1	83	80.0%	
	2	119	60.0%	
	3	200→		1.13
0.7	1	100→		1.10
	1	100→		1.21
	1	100→		1.23
	1	100→		1.24
	1	100→		1.08
	1	100→		1.10

* 最少応力比 S_{min} はすべて 0.1

命 N_r での生存確率の期待値である。

最大応力比 S_{max} ごとの疲労寿命 N_r の平均値 $\overline{N_r}$ を生存確率の期待値 $p(N_r)$ が 50% になる回数として算出し、 S_{max} との関係プロットしたものが図-2 である。同図中には、最小二乗法により原点 ($S_{max}=1, \log \overline{N_r}=0$) を通る直線として求めた曲線 (CSG の $S-N$ 曲線) も示している。比較のため、一般のコンクリート及び軽量骨材を用いたコンクリートの $S-N$ 曲線^{3), 4)} もあわせて示している。ただし、これらは主に繰返し回数が多い試験結果 (1,000 回～数百万回の圧縮疲労試験による結果) から算定されたものであり、最小応力比 S_{min} の条件が本試験 ($S_{min}=0.1$) と同一ではない。

図-2 によれば、今回の試験に用いた CSG の引張繰返し载荷に伴う引張強度の低下は、コンクリートよりもやや大きく、最小応力比 S_{min} を引張強度の 10% とする同一応力振幅での引張繰返し回数 10 回での疲労強度は、静的引張強度に対して 88% 程度、同 100 回に対しては 75% 程度になると予想される。

このような繰返し载荷による影響は、実際に考慮する地震動の特性や推定される応力履歴を踏まえて検

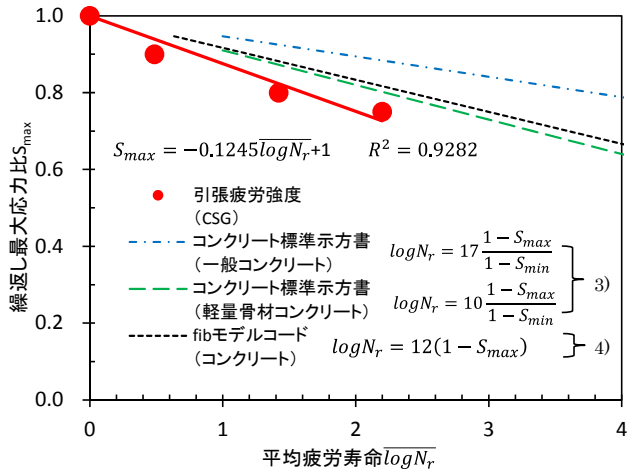


図-2 繰返し最大応力比と平均疲労寿命の関係

討する必要があると考えられるが、既往観測地震動に基づく応力履歴（応力振幅と繰返し回数の関係）の試算例⁵⁾では、応力振幅 50% で 10 回程度以内の繰返し回数となっている。これに加え、地震時のような急速载荷条件では引張強度の増加が見込まれること⁵⁾や、台形 CSG の設計では引張応力も考慮した一定の強度安全率が考慮されることなど、繰返し载荷による影響が特に耐震性の面で問題となるケースは少ないと考えられる。

4. まとめ

CSG の繰返し引張試験を行った結果、単調载荷での静的強度に対する最大応力比 0.7～0.9、同最小応力比 0.1 での繰返し回数 100 回（一部 200 回）により求めた CSG の引張強度の低下率は、コンクリートよりもやや大きい結果が得られた。

参考文献

- 1) コンクリート構造物の耐久性シリーズ「疲労」: 技報堂出版, pp.37-55, 1987.9.
- 2) 浜田純夫, 中川建治, 成岡昌夫: 疲労試験における途中打ち切りデータの処理に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 189 号, pp.99-105, 1971.5.
- 3) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.213-214, 2013.
- 4) fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete (fib): Model Code 2010, Final draft, Volume 1, fib Bulletins No.65, 2012.
- 5) 榎村康史, 金銅将史, 小堀俊秀, 矢田一也: CSG の動的引張強度・破壊特性等に関する実験的検討, 土木研究所資料, 第 4320 号, 2016.3.