

ダムコンクリートの疲労引張強度に関する実験的検討

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 ○藤田 将司, 金銅 将史, 繁田 淳吾, 榎村 康史

1. 目的

大規模地震に対する土木構造物の耐震性について社会的関心が高まる中, ダムでは, 必要に応じてその損傷過程まで考慮して大規模地震に対する耐震性能を照査する取り組みが進められている. コンクリートダムの同照査では, 必要に応じ地震動の作用による堤体コンクリートの引張破壊の発生・進展過程を推定することも必要となる.

本稿では, このようなコンクリートダムの大規模地震時の挙動推定に必要と考えられるダムコンクリートの引張強度に対する繰返し载荷による影響について, 最大 100 回までの繰返し引張試験を行って検討した結果を報告する.

2. 試験方法

試験項目・試験数量と供試体形状を表-1, ダムコンクリートを想定した供試体コンクリートの配合を表-2 に示す. 同表中の配合は, 重力式コンクリートダムでの一般的なダムコンクリートの配合 (A 配合は外部コンクリート, B 配合はRCD用コンクリート) をもとにウェットスクリーニングにより粗骨材最大寸法 $G_{max}=40mm$ とした場合を想定した配合である. 試験内容は表-1 に示すとおり, 割裂引張による繰返し引張試験 (疲労試験) を単調载荷での割裂引張試験 (JIS A 1113) 及び圧縮強度試験 (JIS A 1108) とともに実施した. 疲労試験の载荷方法は図-1 に示すとおりであり, 所定の上限回数 (100 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載した. 繰返し载荷での応力振幅は, 単調载荷時の引張強度の平均値 \bar{f}_t に対し, 最小応力比 S_{min} を 0.1, 同最大応力比 S_{max} を 0.8~0.9 の範囲とした. なお, 载荷速度は全て 0.06N/mm² (静的载荷) とした. 各試験は材齢 91~113 日で行った.

表-1 試験内容と強度試験結果

試験項目	試験数量 (本)		平均強度 (N/mm ²)		供試体形状	
	A配合	B配合	A配合	B配合		
一軸圧縮	3	3	52.1	30.2	φ 150mm×H300mm	
割裂引張	単調载荷		6	6	φ 150mm×H200~240mm (H300mmの両端30~50mmを切除)	
	疲労試験 (繰返し载荷)	$S_{min}=0.1, S_{max}=0.8$	6	6		—
		$S_{min}=0.1, S_{max}=0.9$	18	18		—

表-2 供試体コンクリートの配合

配合区分	スランプの範囲 (cm)	標準VCの範囲 (秒)	単 位 量 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	細骨材 s	粗 骨 材 S		
						80~40mm	40~20mm	20~5mm
A	3±1	—	139	282	782	—	564	564
B	—	20±10	112	158	879	—	635	634

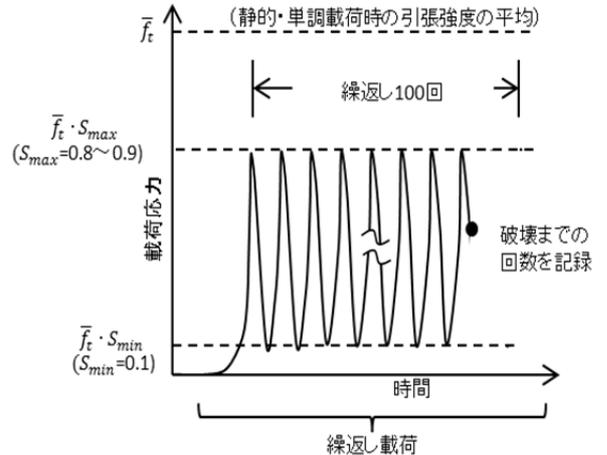


図-1 繰返し引張試験 (疲労試験) の概念図

3. 試験結果

疲労試験の結果を表-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, 繰返し载荷途中で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) の期待値である. 所定の上限回数 (100 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) →」と記載している. なお, $p(N_r)$ の算出は, 浜田ら²⁾の方法によった. 今回の試験結果は, 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ったため, 式(1)により算出した.

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

ここに, N_r : 疲労寿命[回], $p(N_r)$: 疲労寿命 N_r での生存確率の期待値, 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である.

キーワード ダムコンクリート, 疲労, 引張強度, 累積損傷度, 耐震性能照査

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

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} との関係を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($S_{max}=1, \log N=0$)を通る直線として求めた曲線($S-N$ 曲線)⁴⁾も示している。比較のため、一般のコンクリートを用いたコンクリートの $S-N$ 曲線⁴⁾もあわせて示している。これらは繰返し回数が100回程度以上の圧縮試験から算出されたものであるが、今回得られたダムコンクリートの $S-N$ 曲線はこれらに近い結果となった。

4. 実地震動作用時の引張強度への影響

繰返し载荷による影響は実際にダムに作用する地震動の特性やそれによる応力履歴をもとに評価する必要があると考えられるが、ここでは、既往観測波形を用いた動的解析によるモデルダム(堤高90mの重力式コンクリートダム)堤踵部での応力履歴の推定例³⁾のうち最も継続時間の長い波形(2011年東北地方太平洋沖地震での福島県内ダムでの観測波形)での最大主応力 σ_1 の履歴をもとに、Miner則⁶⁾を仮定して次式の累積損傷度を計算することで引張強度への影響を検討した。

$$D = \sum_i n_i / N_i \quad (2)$$

ここに、 D :累積損傷度、 N_i :繰返し最大応力比 S_{max} である場合に疲労破壊するまでに要する繰返し回数(疲労寿命)、 n_i : S_{max} で実際に载荷された回数である。なお、地震波形は応力値が最大となるとき累積損傷度が1.0に達するよう振幅調整している。本検討で考慮した応力履歴と累積損傷度の計算結果を図-3に示す。同図より、累積損傷度の増加が生じるのは概ね引張強度の90%以上の応力発生時であることがわかる。また、残存引張強度(その時点までの応力履歴から求まる累積損傷度があと1回の载荷で丁度1.0に達する応力として式(2)により逆算した値)は破壊時(最大応力時)においても97.8%と高く、強度低下は小さいと推定される。

5. まとめ

疲労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0.8~0.9、同最小応力比0.1での繰返し回数100回により求めたダムコンクリートの引張強度の低下率が得られた。なお、この関係からモデルダムで推計した結果、累積損傷度による強度低下への影響は大きくないと考えられる。

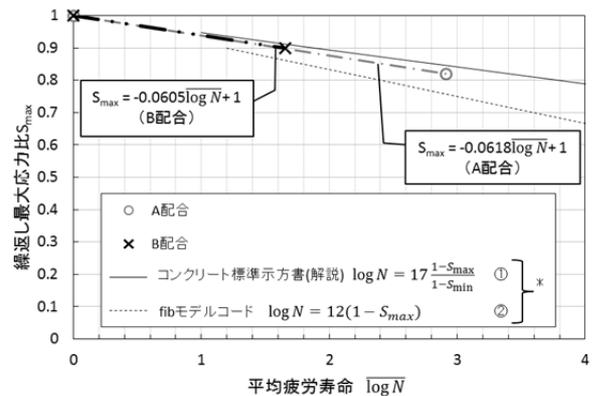
参考文献

- 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) 榎村康史,金銅将史,藤田将司,繁田淳吾 他:ダムコンクリートの動的引張強度・破壊特性に関する実験的検討,土木研究所資料,第4326号,2016.3.
- 4) 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.
- 5) fédération internationale du béton (fib):Model Code 2010, Final draft, Volume 1, fib Bulletins No.65,2012.
- 6) Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue, Journal of Applied Mechanics, Proc.of ASME, pp.A1-159~164, 1945.

表-3 繰返し引張試験(疲労試験)結果

A配合				B配合			
最大応力比	順位	疲労寿命	生存確率の期待値	最大応力比	順位	疲労寿命	生存確率の期待値
S_{max}	r	N_r	$p(N_r)$	S_{max}	r	N_r	$p(N_r)$
0.82 [*]	1	1	95.0%	0.9	1	1	95.0%
	2	11	90.0%		2	1	90.0%
	3	19	85.0%		3	3	85.0%
	4	25	80.0%		4	5	80.0%
	5	37	75.0%		5	27	75.0%
6~18	100	→			7	33	65.0%
					8	33	60.0%
					9	46	55.0%
					10	49	50.0%
					11	51	45.0%
					12	57	40.0%
					13	63	35.0%
					14	89	30.0%
					14	100	25.0%
					15~18	100	→
0.8	1~6	100	→	0.8	1~6	100	→

*繰返し载荷途中での载荷板と供試体の接触面積の増加に伴う引張応力低下の可能性が考えられたため、設定値(最大応力比)を補正した値³⁾.



×コンクリート標準示方書(解説)⁴⁾にある関係式①は、同示方書での設計疲労強度の設定式のベースになった既往実験結果に基づく応力比と疲労寿命の関係式、fibモデルコード⁵⁾の式②は、引張強度のばらつきを見込んだ特性値に対する応力比と疲労寿命の関係式である。

図-2 引張繰返し载荷($S_{min} = 0.1$)での繰返し最大応力比と平均疲労寿命の関係

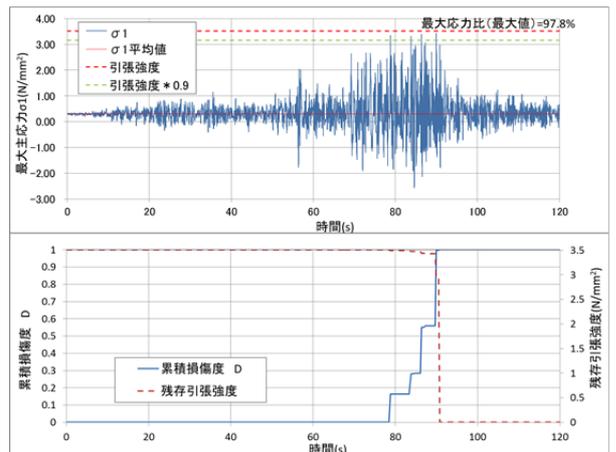


図-3 モデルダム堤踵部の最大主応力の履歴(上)と累積損傷度・残存引張強度(下)