

土木研究所資料

CSG の動的引張強度・破壊特性等に関する 実験的検討

平成 28 年 3 月

国立研究開発法人土木研究所
水工研究グループ水工構造物チーム

Copyright © (2015) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

※本書のカラー版は付属の CD に収録されています。

CSG の動的引張強度・破壊特性等に関する 実験的検討

水工研究グループ

水工構造物チーム

上 席 研 究 員	榎村康史
総 括 主 任 研 究 員	金銅将史
研 究 員	小堀俊秀
交 流 研 究 員	矢田一也
(元) 上 席 研 究 員 (現) 地質研究監	山口嘉一
(前) 上 席 研 究 員 (現) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部大規模河川構造物研究室 室長	佐々木 隆
(元) 研 究 員 (現) 国土交通省北海道開発局	切無沢 徹
(元) 交 流 研 究 員 (現) 大成建設 (株)	小林雅幸
(前) 交 流 研 究 員 (現) 大成建設 (株)	太田兵庫

要 旨 :

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。

本資料は、CSG の引張強度や引張軟化特性を明らかにすることを目的として、CSG 供試体を用いて実施した急速載荷や繰返し載荷での試験を含む引張強度試験や破壊エネルギー試験を中心に関連して実施した一連の CSG 供試体での室内試験結果を取りまとめたものである。

キーワード : CSG、引張強度、破壊エネルギー、引張軟化特性、急速載荷、繰返し載荷

目次

1. はじめに.....	1
2. 試験項目と試験の概要.....	3
2.1 圧縮強度試験.....	5
2.2 引張強度試験.....	5
2.3 破壊エネルギー試験.....	5
2.4 せん断試験.....	5
3. 材料.....	7
3.1 セメント.....	7
3.2 水.....	7
3.3 CSG 材.....	7
3.3.1 母材.....	7
3.3.2 物理試験.....	7
3.3.3 粒度調整.....	10
4. 配合.....	13
4.1 配合の決定方法.....	13
4.2 配合試験.....	14
4.2.1 評価項目.....	14
4.2.2 試験方法.....	14
4.2.3 試験結果.....	15
4.3 配合の決定.....	23
5. 供試体作製.....	25
5.1 概要.....	25
5.2 圧縮強度試験用供試体.....	26
5.2.1 円柱供試体.....	26
5.2.2 角柱供試体.....	26
5.3 引張強度試験用供試体.....	28
5.4 破壊エネルギー試験用供試体.....	29
5.5 せん断試験用供試体.....	31
6. 試験方法.....	33
6.1 圧縮強度試験.....	33
6.2 引張強度試験.....	33
6.2.1 概要.....	33
6.2.2 単調載荷試験.....	34
6.2.3 繰返し引張試験.....	36
6.3 破壊エネルギー試験.....	39
6.4 せん断試験.....	41
7. 試験結果および考察.....	43
7.1 圧縮強度試験.....	43

7.1.1 試験結果	43
7.1.2 考察	44
7.2 引張強度試験	46
7.2.1 試験結果	46
7.2.2 単調載荷試験結果の考察	54
7.2.3 繰返し引張試験結果の考察	60
7.3 破壊エネルギー試験	74
7.3.1 試験結果	74
7.3.2 試験結果の考察	81
7.4 せん断試験	96
7.4.1 試験結果	96
7.4.2 せん断試験結果の考察	97
8. まとめ	101
謝辞	101
参考文献	102

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でセメント・水と混合して製造する CSG¹⁾ (Cemented Sand and Gravel) を主な堤体材料として用いる新形式のダムである台形 CSG ダムの建設・計画事例が増えつつある。一方、大規模地震に対する各種土木構造物への社会的関心の高まりを受け、ダムにおいても想定される最大級の地震動を考慮し、必要に応じその損傷過程まで考慮する耐震性能照査²⁾の試行が始まっている。台形 CSG ダムの断面設計方法³⁾はすでに確立しているが、新形式のダムであるため、最大級の地震動に対して想定すべき損傷形態や損傷過程の推定に必要な CSG の物性（強度特性や破壊特性）については必ずしも明らかでなく、これらを解明した上で合理的な耐震性能照査法を確立する必要がある。

CSG に関する既往研究を概観すると、CSG の強度特性や破壊特性については、安田ら³⁾の報告があり、割裂引張試験により得た CSG の引張強度と圧縮強度との間に比例関係が認められること、破壊エネルギー試験の結果から CSG の破壊エネルギーと圧縮強度（および引張強度）に相関が認められること、CSG の引張軟化モデルが 2 直線モデルで表現できると考えられることなど CSG の基本的な強度特性や破壊特性についての実験結果が報告されている。

本資料は、このような状況を踏まえ、CSG の強度特性や破壊特性のうち、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や引張軟化特性をその載荷速度や繰返し載荷による影響を含めて明らかにすることを目的として、平成 23～27 年度に実施した結果を関連する強度結果とともに取りまとめたものである。

2. 試験項目と試験の概要

本検討において実施した各種強度試験等の試験項目と実施年度の一覧を表-2.1、実施フローを図-2.1に示す。

通常の荷速度での静的荷を基本とした各種試験のほか、引張強度については直接引張試験および割裂引張試験により急速荷条件での試験を実施した。

また、破壊エネルギー試験についても、試験速度を増加させた急速荷での試験を実施した。

さらに、繰返し荷がCSGの引張強度や引張軟化特性に及ぼす影響について把握するため、事前に一定の繰返し荷を行った上で破壊させる試験や最大100回（一部200回）まで繰返し荷を行う引張疲労試験を実施した。

表-2.1 試験項目一覧

試験項目		H23	H24	H25	H26	H27	凡例
CSGの物理試験（粒度・微粒分量・密度・吸水率）		○	○	○	○	○	※ H23年度は配合試験を行わず、実ダ ムと同一の配合とした。 ○ 実施 ◎ 急速荷での試験も実施。 (強度試験および破壊エネルギー試験で の(*)は繰返し荷も実施。H27年度の(**) は最大100回（一部200回）の繰返し荷 （引張疲労試験）を実施。)
配合試験		※	○	○	○	○	
強度試験	圧縮強度	一軸圧縮試験	○	○	○	○	
	引張強度	直接引張試験	◎	◎	◎*		
		割裂引張試験	○	◎	◎*	◎*	
	せん断強度	簡易一面せん断試験	○	○			
破壊エネルギー試験		◎	◎	◎*	◎	◎	

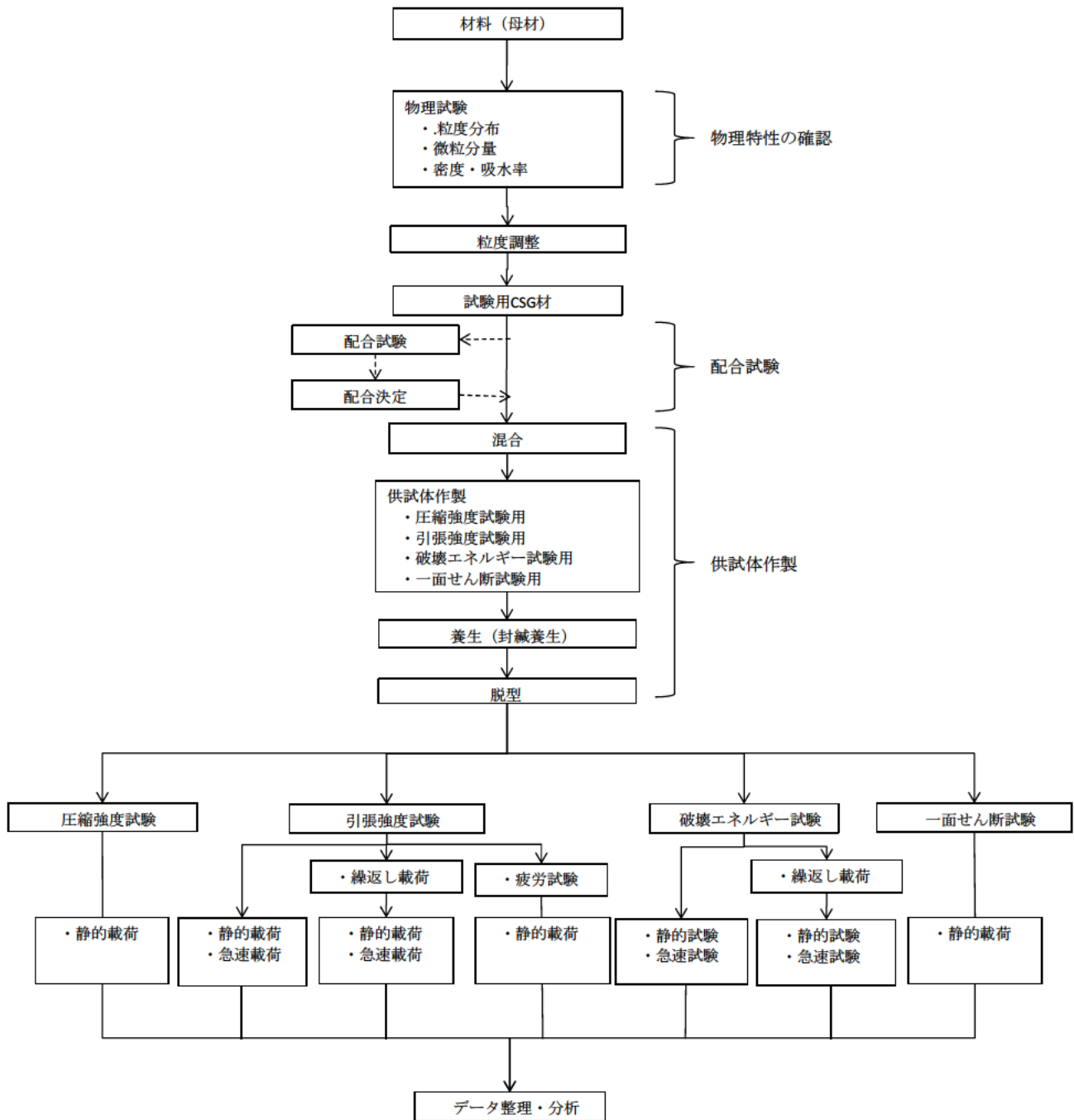


図- 2.1 実施フロー

2.1 圧縮強度試験

各年度（平成 23～27 年度）において、引張強度試験や破壊エネルギー試験に用いる CSG の基本物性（圧縮強度、弾性係数等）を把握することを目的として、円柱供試体による圧縮強度試験（一軸圧縮試験）を実施した。なお、平成 24 年度においては、引張強度試験（直接引張試験）において一部角柱供試体を用いた試験を行ったことから同様の角柱供試体を用いた圧縮強度試験も合わせて行った。

2.2 引張強度試験

引張強度試験は直接引張試験と割裂引張試験により実施し、地震時における動的載荷条件での強度特性についても確認するため、通常の載荷速度（静的載荷）での試験のほか、平成 24～26 年度においては、大規模地震時において想定される応力増加速度を考慮した急速載荷での試験（急速載荷）を実施した。

これら引張強度試験は基本的に円柱供試体を用いて実施したが、平成 23 年度の直接引張試験において、供試体作製時の締固め境界面が破断面となる例が多くみられたことから、締固め方向と載荷方向を相違させることが出来る角柱供試体での試験も合わせて行った。

また、平成 25～26 年度においては、繰返し載荷による影響を調べるため、引張破壊させるための載荷前に一定の応力振幅で事前に引張荷重の繰返し載荷を行うケース（事前繰返し試験）も実施した。さらに、平成 27 年度は繰返し載荷による引張強度への影響を定量的に把握するため、最大 100 回（一部 200 回）までの繰返し回数での引張疲労試験も行った。

2.3 破壊エネルギー試験

CSG の引張軟化特性を把握するため、切欠きを設けた単純梁供試体での 3 点曲げ試験（破壊エネルギー試験）を実施した。なお、引張強度試験と同様、引張軟化特性についても載荷速度の違いによる影響を把握するため、通常の試験速度での試験（静的試験）のほか、試験速度を増加させた試験（急速試験）も実施した。

なお、平成 25 年度は繰返し載荷による影響を調べるため、一定の荷重振幅で事前に曲げ荷重の繰返し載荷を行うケース（事前繰返し試験）も実施した。

2.4 せん断試験

大規模地震時における CSG の破壊形態として、組合せ応力下での破壊に対する検討が必要となる可能性があることから、CSG のせん断強度特性把握するための簡易一面せん断試験を実施した。

3. 材料

3.1 セメント

供試体用 CSG の製造には普通ポルトランドセメントを用いた。

3.2 水

水は水道水を用いた。

3.3 CSG 材

3.3.1 母材

供試体の作製に用いた CSG 材は、実際の台形 CSG ダムの堤体材料として用いられた母材から粒径 80mm 以上を除去した試料をもとに作製した。各年度別に各強度試験に使用した CSG 材を図- 3.1 に示す。

平成 23 年から平成 25 年度は、K ダムの砂岩粘板岩互層が主体の母材を使用した。なお、図- 3.1 中「I 材」、「II 材」は K ダムでの母材の材質（硬さや風化の程度）に応じた採取区分を示しており、I 材の方が II 材より硬く風化の程度が低い。平成 26 年度と平成 27 年度には S ダムで母材として用いられた河床砂礫を使用した。砂礫の最大粒径は 200~300mm 程度で、礫種は安山岩、凝灰岩、砂岩、流紋岩よりなる。

使用母材	H23	H24	H25	H26	H27	凡例
Kダム I 材	● → ○	● → ○				● 供試体作製 ○ 強度試験および破壊エネルギー試験
Kダム II 材	● → ○	● → ○	● → ○			
Sダム 河床砂礫				● → ○	● → ○	

* 各試験は材齢 91 日後で実施。ただし H23 に作製した K ダム II 材（ケース K-IIA）のみ材齢 300 日後で試験を実施。

図- 3.1 強度試験に使用した CSG 材と試験年度

3.3.2 物理試験

供試体の作製にあたっては、実際のダムに用いられたものに近い CSG となるように、母材から粒径 80mm 以上を除去したうえで粒度調整を行うこととし、そのために必要な CSG 材の分級およびふるい分け試験（JIS A 1102）を行った。あわせて微粒分量試験（JIS A 1103）、密度試験（JIS A 1110）および吸水率試験（JIS A 1109）を実施した。表- 3.1 に実施した CSG 材の物理試験を示す。

K ダム I 材、II 材および S ダムの試験結果（粒径 80mm 以上を除去したもの）の密度と吸水率の試験結果をそれぞれ表- 3.2~表- 3.3、微粒分量試験の結果を表- 3.5 に示す。

表- 3.2 および表- 3.3 から試験で使用した K ダムの CSG 材は I 材、II 材ともに実ダムの実施記録に概ね近いものとなったが、5mm 以下の粒径では密度がやや大きく、吸水率が小さい結果となった。また、表- 3.5 より、K ダム I 材の微粒分量がやや大きくなっている。

なお、S ダムの母材は密度、吸水率、微粒分量ともに実施記録と概ね近い値であった。

表- 3.1 材料物理試験一覧表

試験項目	目的	準拠規準
ふるい分け試験	粒度調整のための粒度領域の把握	JIS A 1102
微粒分量試験	微粒分量の把握	JIS A 1103
密度測定	CSG の基本物性である密度の確認	JIS A 1109
吸水率測定	配合試験での単位水量範囲の検討	JIS A 1110

表- 3.2 密度・吸水率試験結果表 (K ダム I 材)

粒径	H23 年度			H24 年度			(参考) K ダム実施		
	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
80~ 40mm	2.54	2.48	2.19	2.52	2.46	2.44	2.48~ 2.61	-	1.96~ 4.30
40~ 20mm	2.53	2.46	2.73	2.52	2.45	2.62	2.49~ 2.60	-	2.19~ 4.22
20~ 10mm	2.53	2.46	2.91	2.52	2.45	2.78	2.49~ 2.61	-	2.06~ 4.33
10~ 5mm	2.52	2.44	3.38	2.52	2.44	3.25	2.47~ 2.60	-	2.38~ 5.41
5mm 以下	2.56	2.48	3.16	2.57	2.49	3.01	2.35~ 2.50	-	4.17~ 7.53

表- 3.3 密度・吸水率試験結果表 (K ダム II 材)

粒径	H23 年度			H25 年度			(参考) K ダム実施		
	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
80~ 40mm	2.46	2.37	4.09	2.48	2.38	3.87	2.47~ 2.54	-	3.50~ 6.31
40~ 20mm	2.48	2.38	4.25	2.48	2.38	4.03	2.47~ 2.51	-	3.87~ 6.12
20~ 10mm	2.48	2.38	4.45	2.48	2.37	4.41	2.46~ 2.51	-	4.06~ 6.00
10~ 5mm	2.49	2.37	4.96	2.48	2.37	4.61	2.44~ 2.50	-	4.52~ 6.37
5mm 以下	2.53	2.43	4.33	2.54	2.44	4.05	2.34~ 2.42	-	7.50 ~6.13

表- 3.4 密度・吸水率試験結果表 (S ダム河床砂礫)

粒径	H26年度			H27年度			(参考) S ダム実施		
	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
80~ 40mm	2.46	2.39	3.24	2.46	2.37	3.66	2.45~ 2.52	-	2.15~ 3.69
40~ 20mm	2.46	2.37	3.87	2.45	2.35	4.39	2.43~ 2.51	-	3.23~ 4.92
20~ 10mm	2.46	2.36	4.38	2.44	2.32	5.1	2.40~ 2.50	-	3.80~ 6.11
10~ 5mm	2.44	2.32	5.16	2.46	2.34	5.27	2.40~ 2.49	-	4.46~ 6.11
5mm 以下	2.42	2.27	6.54	2.41	2.27	6.19	2.36~ 2.47	-	4.90 ~8.64

表- 3.5 微粒分量試験結果 (粒径 5 mm以下)

試料名	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度	H27年度	(参考) 各ダム実施
K ダム I 材	34.1%	33.7%				9.0~10.8%
K ダム II 材	28.5%		30.8%			20.0~34.0%
S ダム (河床砂礫)				7.6%	7.2%	3.2~10.2%

3.3.3 粒度調整

各試料は概ね実ダムでの施工における粒度範囲内となるように粒度調整を行った。ただし、使用したKダムのCSG材の粒度はI材・II材ともに、実ダムよりも若干細粒側であったため、平成24年度のI材および25年度のII材については、実施工の粒度分布に比べ、若干細粒側となった。粒度調整を行って得られた各年度の供試体作製用CSG材の粒度分布を図-3.2～図-3.4に示す。

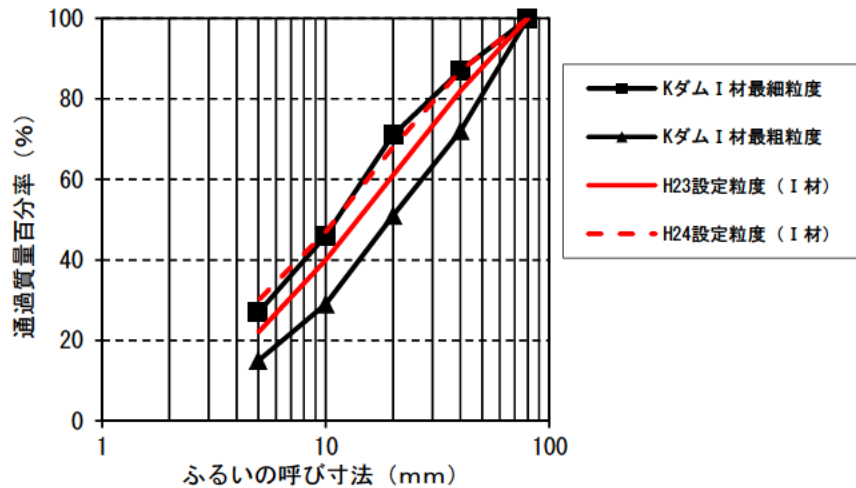


図- 3.2 試験に用いたCSG材 (KダムI材) の粒度分布

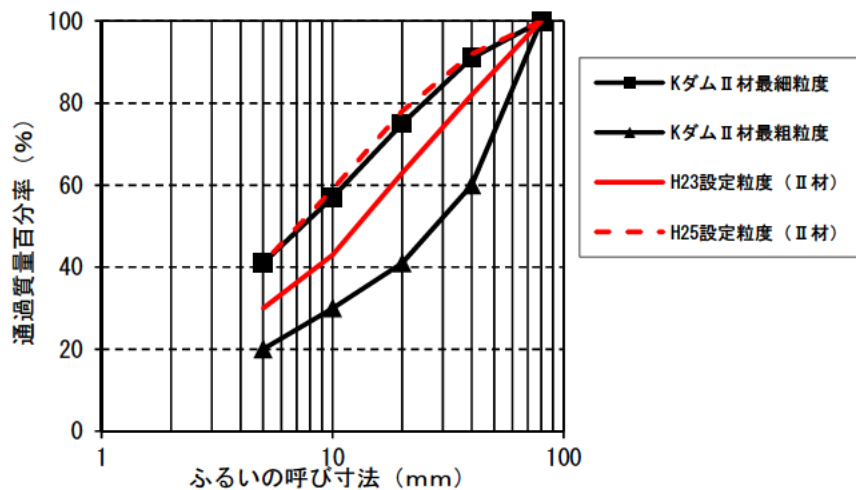


図- 3.3 試験に用いたCSG材 (KダムII材) の粒度分布

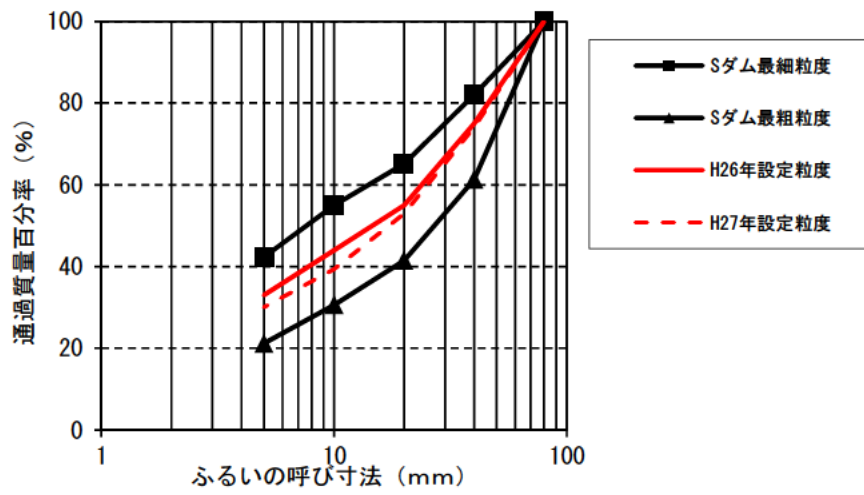


図- 3.4 試験に用いた CSG 材 (S ダム河床砂礫) の粒度分布

4. 配合

4.1 配合の決定方法

配合の選定に際して、初年度である平成 23 年度は、実ダム (K ダム) での施工に用いられた母材を実施工での粒度領域範囲内に調整して使用することから、改めて配合試験は行わず、実施工での配合条件と単位セメント量および単位水量を同一とした上で、40mm 網ふるいで粒径 40mm 以上を除去した材料を CSG 材として供試体を作製した。表- 4.1、表- 4.2 に平成 23 年度に作製した供試体配合を示す。表- 4.1、表- 4.2 中の K- I A は K ダム I 材を母材とする内部配合 CSG、K- I B は同富配合 CSG、K- II A は K ダム II 材を母材とする内部配合 CSG に相当する配合である。しかし、このように作製した供試体は、ややポーラスな外観であり (写真- 4.1)、硬化後に測定した密度比 (空隙率をゼロと仮定して計算される密度に対する実測密度の比率) もやや小さいものとなった。このことを踏まえ、平成 24 年度以降は、コンシステンシーおよび材料分離に対する抵抗性を確認して配合を決定する目的で配合試験を行って配合を決定した。

表- 4.1 平成 23 年度 K ダム I 材配合

(単位 : kg/m³)

配合 No	C*	W*	CSG 材				
			80-40mm	40-20mm	20-10mm	10-5mm	5mm 未満
K- I A	80	85	427	451	451	408	521
K- I B	120	85	421	445	445	402	513

※ K ダムでの配合と同一の単位セメント量と単位水量。

表- 4.2 平成 23 年度 K ダム II 材配合

(単位 : kg/m³)

配合 No	C*	W*	CSG 材				
			80-40mm	40-20mm	20-10mm	10-5mm	5mm 未満
K- II A	80	110	388	388	409	323	646

※ K ダムでの配合と同一の単位セメント量と単位水量。



(a) K- I A

(b) K- I B

(c) K- II A

写真- 4.1 供試体外観

4.2 配合試験

4.2.1 評価項目

室内試験用供試体に用いる CSG として、実施工で用いられた CSG に近い物性となる配合とするため、平成 24 年度から 27 年度においては配合試験を行った。配合試験での評価項目および試験方法等の概要を表-4.3 に示す。

表- 4.3 配合試験での評価項目および試験方法等の概要

対象試料	評価項目	試験方法および目標値等
フレッシュ CSG	コンシステンシー	・ 標準 VC 試験 (JSCE-F507-1999) で VC 値 20~60 秒
	締固め度 (密度比 [*])	・ $\phi 150\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ 円筒型容器を用いて振動タンパで締固め密度比 95%以上
	供試体外観等	・ $\phi 150\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ 円筒型容器を用いて振動タンパで締め固め、脱型して外観評価 ³⁾ での評価点 (表- 4.4) が 4 以上 ・ ミキサ内の状況を観察し CSG の混合が十分でミキサ内壁や羽に CSG が付着していないかを確認
硬化 CSG	一軸圧縮強度	・ 一軸圧縮強度試験での 7 日強度で比較する

* 密度比：空隙率をゼロと仮定して計算される密度に対する実測密度の比率。

4.2.2 試験方法

(1) CSG 材の混合

配合試験に用いた CSG 材は、粒径 5mm 以上は表乾状態に、粒径 5mm 未満は表面水率 2~3%程度に調整した。

CSG の混合は、容量 150 リットルの傾胴形ミキサを使用し、①CSG 材 (粒径 5mm 以上)、②CSG 材 (粒径 5mm 未満の半分)、③セメント、④CSG 材 (粒径 5mm 未満の半分) の順に投入し、1 分間混合した後、水を投入して、さらに 2 分間混合した。

ミキサから排出した CSG は 40mm 網ふるいでウェットスクリーニングを行い、粒径 40mm 以上を除去した後、練り板上で 1 往復の切り返しを行い試料を均一にした。

(2) 密度の測定

$\phi 150\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ の円筒型軽量型枠に試料を 3 層 (ないし 4 層) に分けて詰め、各層突き棒で 15 回突いた後、振動タンパを用いて 30 秒締め固めた。その後、質量および型枠上端から試料表面までの深さを測定し、密度および密度比を求めた。なお、密度比はウェットスクリーニングにより粒径 40mm 以上の CSG 材を除去したことを考慮した後の各単位量に基づき、空気量に相当する空隙をゼロと仮定して計算される密度に対する実測密度の比率として求めた。

(3) 標準 VC 試験

JSCE F 507-2007 「RCD 用コンクリートのコンシステンシー試験方法」による標準 VC 試験により VC 値を求めた。なお、目標とする VC 値は、RCD コンクリートを対象とした標準 VC 試験において、管理基準値を 20 ± 10 秒⁴⁾としている場合が多いこと、また 50 秒程度までが施工限界とされていること³⁾を考慮して、20~60 秒とした。

(4) 供試体外観評価およびミキサ内の状況確認

φ150mm×H300mm の円筒型鋼製型枠に試料を 3 層（ないし 4 層）に分けて詰め、各層突き棒で 15 回突いた後、振動タンパを用いて 30 秒締め固めた。作製した供試体を脱型して、その外観（肌面）を観察し、表- 4.4 に示す供試体の外観評価基準³⁾により評価した。また、ミキサ内の状況を観察し CSG の混合が十分で、排出後にミキサ内壁や羽に CSG が付着していないかを確認した。

表- 4.4 供試体の外観評価基準³⁾

区分	供試体の外観	評価点
良 (A)	表面が緻密である	5
ほぼ良 (B)	表面がややポーラスな部分、砂分が表れている部分がある	4
やや不良 (C)	表面がポーラスな部分、モルタル分がはげ落ちている部分がある	3
不良 (D)	モルタルが粗骨材のまわりにゆきわたらず、豆板状の部分がある	2
極めて不良 (E)	粗骨材がばらばらで CSG としての外観を呈していない部分がある	1

(5) 圧縮強度の確認

密度比を測定した各配合供試体は、供試体上面にキャッピングを行い、水分の散逸を防ぐため供試体上面にラップを被せビニールテープを二重に巻いて 20℃恒温室で封緘養生した後、材齢 7 日において一軸圧縮強度試験を実施し圧縮強度を確認した。試験本数は各配合 3 本（計 9 本）とした。

4.2.3 試験結果

(1) 平成 24 年度

平成 24 年度は平成 23 年度と同じ K ダムで使用された母材のうち I 材を使用し供試体を作製した。単位セメント量は実施工と同一の 80kg/m³とした上で、単位水量を決定するために配合試験を行った。配合試験の実施ケースを表- 4.5 に示す。単位水量の設定では、平成 23 年度に実施工と同一の単位セメント量および単位水量とした結果、供試体がややポーラスになったことを踏まえ、平成 23 年度の設定値（表- 4.1）より若干単位水量が多めの 3 ケース（110 kg/m³、120 kg/m³、130 kg/m³）とした。

配合試験の結果を表- 4.6 に示す。VC 値は、いずれも目標の範囲（20～60 秒）内に収まっている。また、供試体の外観評価基準に照らした供試体外観やフレッシュ性状では、単位水量 110kg/m³のケースでは、一部にポーラスな部分が存在し評価点が 4 点となっているが、ミキサ内の付着状況ならびに外観の仕上がりが実際に施工されている CSG に最も近いものとなった。また、材齢 7 日での圧縮強度は、単位水量 110kg/m³、120kg/m³、130kg/m³の順に 2.89N/mm²、2.52N/mm²、2.38N/mm²（各平均値）であった。

以上から、密度比は 95%を若干下回っているが、単位水量としては 110kg/m³を採用することとした。写真- 4.2～写真- 4.4 に各配合の供試体外観を示す。なお、これにより単位水量が K ダムの実施工での配合より 25kg/m³多くなった。本試験に用いた試料の微粒分含有量が K ダムの施工に用いられたものより多かった（表- 3.5）ためにペーストの粘性が高くなり、実施工と同等の密度（比）を有する CSG とするために必要となる単位水量が増加したことが一因として考えられる。

表- 4.5 平成 24 年度 配合試験用配合 (K ダム I 材)

(単位 : kg/m³)

配合 No.	C	W	CSG 材				
			80-40mm	40-20mm	20-10mm	10-5mm	5mm 未満
W110kg/m ³	80	110	268	392	392	392	620
W120kg/m ³	80	120	265	388	388	388	612
W130kg/m ³	80	130	261	383	383	383	604

表- 4.6 平成 24 年度 CSG の配合試験結果

配合 No.	VC 値 (秒)		密度比 (%)		外観評価		一軸圧縮強度 (ピーク強度) (N/mm ²)	判定	
	○	△	○	△	供試体 外観評価点	その他観察結果			
W110kg/m ³	43.9	○	94.2	△	4	○	・ 供試体表面の一部にポーラスな部分あり ・ ミキサ内壁面に CSG が若干付着	2.89	採用
W120kg/m ³	28.0	○	95.0	○	5	○	・ 供試体表面にポーラスな部分が無く緻密 ・ ミキサ内壁面に CSG が多く付着	2.52	
W130kg/m ³	22.1	○	97.1	○	4	○	・ 供試体作製用の型枠下部から、水分の漏れあり ・ ミキサから排出された時点で、水分が多い状況	2.38	

注) ○ : 表-4.3 の目標値を満足。
 △ : 表-4.3 の目標値をやや満足しない。
 × : 表-4.3 の目標値を満足しない。



写真- 4.2 配合試験 (H24) 供試体外観 : W110kg/m³



写真- 4.3 配合試験 (H24) 供試体外観 : W120kg/m³



写真- 4.4 配合試験 (H24) 供試体外観 : W130kg/m³

(2) 平成 25 年度

平成 25 年度は K ダムで使用された母材のうちⅡ材を使用し、単位セメント量は実施工と同一の 80kg/m^3 とした上で、単位水量を決定するために配合試験を行った。なお、使用した K ダムの CSG 材の粒度分布は、実ダムよりも若干細粒側であったため、やや細粒側の分布 (図- 3.3) となった。また、微粒分量は表- 3.5 に示すように、実施工での範囲内であるが、やや多めとなった。単位水量の設定に際しては、表- 4.7 に示すように 130kg/m^3 、 140kg/m^3 、 150kg/m^3 の 3 ケースとした。

配合試験の結果を表- 4.8 に示す。密度比および VC 値が目標の範囲にあり、外観評価基準に照らした供試体外観やフレッシュ性状も良好と判断された配合は、単位水量 140kg/m^3 のケースであった。写真- 4.5～写真- 4.7 にそれぞれ各配合の供試体外観を示す。

また、材齢 7 日での圧縮強度は、単位水量 130kg/m^3 、 140kg/m^3 、 150kg/m^3 の順に 1.87N/mm^2 、 1.90N/mm^2 、 1.70N/mm^2 (各平均値) であった。

これらの結果から、単位水量としては 140kg/m^3 を採用することとした。

表- 4.7 平成 25 年度 配合試験用配合 (K ダムⅡ材)

(単位 : kg/m^3)

配合 No.	C	W	CSG 材				
			80-40mm	40-20mm	20-10mm	10-5mm	5mm 未満
W130 kg/m^3	80	130	169	296	402	381	867
W140 kg/m^3	80	140	167	293	397	376	857
W150 kg/m^3	80	150	165	289	392	372	847

表- 4.8 平成 25 年度 CSG の配合試験結果

配合 No.	VC 値 (秒)	密度比 (%)	外観評価				一軸圧縮強度 (ピーク強度) (N/mm^2)	判定
			供試体 外観評価点		その他観察結果			
W130 kg/m^3	49.6	94.1	4	○	・ 供試体表面の一部にポーラスな部分あり ・ ミキサ内壁面に CSG が若干付着	1.87		
W140 kg/m^3	24.9	96.3	5	○	・ 供試体表面にポーラスな部分が無く緻密 ・ ミキサ内壁面に CSG が多く付着	1.90	採用	
W150 kg/m^3	14.8	96.7	5	○	・ 供試体表面にポーラスな部分が無く緻密 ・ ミキサ内壁面に CSG が多く付着	1.70		

注) ○ : 表-4.3 の目標値を満足。
△ : 表-4.3 の目標値をやや満足しない。
× : 表-4.3 の目標値を満足しない。



写真- 4.5 配合試験(H25) 供試体外観 : W130kg/m³



写真- 4.6 配合試験(H25) 供試体外観 : W140kg/m³



写真- 4.7 配合試験(H25) 供試体外観 : W150kg/m³

(3) 平成 26 年度

平成 26 年度は S ダムの母材として用いられる河床砂礫を使用し、単位セメント量は実施工での内部 CSG と同一の 80kg/m³とした上で、単位水量を決定するために配合試験を行った。単位水量の決定に際しては、S ダムでの配合試験結果を参考とし、表- 4.9 に示す通り 90 kg/m³、100 kg/m³、110kg/m³の 3 ケースとした。

配合試験の結果を表- 4.10 に示す。密度比および VC 値が目標の範囲にあり、供試体の外観評価基準に照らした供試体外観やフレッシュ性状も良好と判断された配合は、単位水量 100kg/m³であった。写真- 4.8～写真- 4.10 にそれぞれ、各配合の供試体外観を示す。

また、材齢 7 日での圧縮強度は、単位水量 90kg/m³、100kg/m³、110kg/m³の順に 2.64N/mm²、2.87N/mm²、2.37N/mm² (各平均値) であった。

これらの結果から、単位水量としては 100kg/m³を採用することとした。

表- 4.9 平成 26 年度 配合試験用配合 (S ダム)

(単位 : kg/m³)

配合 No.	C	W	CSG 材				
			80-40mm	40-20mm	20-10mm	10-5mm	5mm 未満
W 90kg/m ³	80	90	541	433	238	238	714
W100kg/m ³	80	100	535	428	235	235	706
W110kg/m ³	80	110	529	423	233	233	698

表- 4.10 平成 26 年度 CSG の配合試験結果

配合 No.	VC 値 (秒)		密度比 (%)		外観評価		一軸圧縮強度 (ピーク強度) (N/mm ²)	判定	
	○	△	○	△	供試体外観評価点	その他観察結果			
W 90kg/m ³	52.7	○	93.4	×	4	○	・ 供試体表面の一部にポーラスな部分あり ・ ミキサ内壁面、羽、ドラム周りに CSG が付着なし	2.64	
W100kg/m ³	33.7	○	98.2	○	5	○	・ 供試体表面にポーラスな部分が無く緻密 ・ ミキサ内壁面、羽、ドラム周りに CSG が付着なし	2.87	採用
W110kg/m ³	17.8	×	99.3	○	4	○	・ 供試体表面にポーラスな部分が無く緻密 ・ ミキサ内壁面に CSG が多く付着	2.37	

注) ○ : 表-4.3 の目標値を満足。
△ : 表-4.3 の目標値をやや満足しない。
× : 表-4.3 の目標値を満足しない。



写真- 4.8 配合試験 (H26) 供試体外観 : W90kg/m³



写真- 4.9 配合試験 (H26) 供試体外観 : W100kg/m³



写真- 4.10 配合試験 (H26) 供試体外観 : W110kg/m³

(4) 平成 27 年度

平成 27 年度は平成 26 年度に引き続き、S ダムの母材として用いられる河床砂礫を使用し、昨年度に決定した配合を変更する必要がないか確認するため、単位セメント量 80kg/m³、単位水量 100kg/m³ での配合確認試験を行った。確認試験の配合を表- 4.11 に示す。

配合確認試験の結果を表- 4.12 に示す。密度比および VC 値が目標の範囲にあり、供試体の外観評価基準に照らした供試体外観やフレッシュ性状も良好と判断された。写真- 4.11 に供試体外観を示す。

また、材齢 7 日での圧縮強度は 3.70N/mm² (平均値) であった。

これらの結果から、前年度と同様に、単位水量は 100kg/m³ で変更しないこととした。

表- 4.11 平成 27 年度 配合確認試験用配合 (S ダム)

(単位 : kg/m³)

配合 No.	C	W	CSG 材				
			80-40mm	40-20mm	20-10mm	10-5mm	5mm 未満
W 100kg/m ³	80	100	534	427	235	235	704

表- 4.12 平成 27 年度 CSG の配合確認試験結果

配合 No.	VC 値 (秒)	密度比 (%)	外観評価				一軸圧縮強度 (ピーク強度) (N/mm ²)	判定
			供試体 外観評価点		その他観察結果			
W100kg/m ³	25.4 ○	98.6 ○	5	○	・ 供試体表面にポーラスな部分が無く緻密 ・ ミキサ内壁面、羽、ドラム周りに CSG が付着 なし	3.70	採用	

注) ○ : 表-4.3 の目標値を満足。
△ : 表-4.3 の目標値をやや満足しない。
× : 表-4.3 の目標値を満足しない。



写真- 4.11 配合試験 (H27) 供試体外観 : W100kg/m³

4.3 配合の決定

実施工での配合（平成 23 年度）および配合試験（平成 24～27 年度）により決定した各年度の強度試験および破壊エネルギー試験用供試体の作製に用いた CSG の配合の一覧を表- 4.13 に示す。

表- 4.13 各年度の CSG 配合一覧

(単位 : kg/m³)

ケース名 (母材・配合)	年度	母材	単位 セメント量 C	単位水量 W	CSG 材				
					80-40 mm	40-20 mm	20-10 mm	10-5 mm	5mm 未満
K-I A	H23	K ダム (I 材)	80	85	427	451	451	408	521
K-I B	H23	K ダム (I 材)	120	85	421	445	445	402	513
K-I C	H24	K ダム (I 材)	80	110	268	392	392	392	620
K-II A	H23 [※]	K ダム (II 材)	80	110	388	388	409	323	646
K-II B	H25	K ダム (II 材)	80	140	167	293	397	376	857
S-A ^{※※}	H26	S ダム (河床砂礫)	80	100	535	428	235	235	706
S-A' ^{※※}	H27	S ダム (河床砂礫)	80	100	534	427	235	235	704

※ H23 に供試体を作製し、H24 に強度試験および破壊エネルギー試験を実施（図- 3.1 参照）。

※※ S-A と S-A' は基本的に同一配合であるが、供試体作製年度が異なる。

5. 供試体作製

5.1 概要

各種試験用の CSG 供試体は、4.2.2 に述べた配合試験と同様の方法で、所定の配合に必要な材料（セメント・水・CSG 材）を傾胴型ミキサで混合した後、ウェットスクリーニングにより粒径 40 mm 以上を除去した CSG（円筒型軽量型枠に 3 層に分けて締固め）により作製した。

作製した供試体の用途別の形状および数量の一覧を表-5.1 に示す。また、次節以降に各試験用供試体の作製方法を示す。

表- 5.1 作製した供試体の用途別の形状および数量一覧

用途 (試験内容)	载荷速度条件	供試体形状 (単位 : mm)	供試体数量 (本) *						
			K-I A	K-I B	K-I C	K-II A	K-II B	S-A	S-A'
圧縮強度試験	静的	円柱(ϕ 150×H300)	5	5	3	2	5	6	6
		角柱(\square 150×L240)			2				
直接引張試験	静的	円柱(ϕ 150×H240)	15	15	5	1	12(6)		
		角柱(\square 150×L240)			6				
	急速	円柱(ϕ 150×H240)			9	4	11(6)		
		角柱(\square 150×L240)			9				
割裂引張試験	静的	円柱(ϕ 150×H240)	5	5	6	1	12(6)	15(12)	33(27)
	急速	円柱(ϕ 150×H240)			9	3	18(12)	26(21)	
破壊エネルギー試験	静的	切欠きはり (\square 150×L530)	3	3	3		4(2)	3	2
	急速	切欠きはり (\square 150×L530)	3	8	3		8(4)	8	8
簡易一面せん断試験	静的	円柱(ϕ 200×H200)	9	9	6				

* ()は繰返し载荷試験に用いた数量。

5.2 圧縮強度試験用供試体

5.2.1 円柱供試体

円柱供試体の作製には、 $\phi 150\text{mm} \times H300\text{mm}$ の円筒型軽量型枠（ブリキ製）（写真- 5.1）を用いた。同型枠に CSG を 3 層に分けて詰め、各層突き棒で 15 回突き固めた後、振動タンパを用いて 30 秒締め固めた。各層間の締め固め後は、突き棒で平滑面をかき乱して次層との馴染みを良くした。その後、質量および型枠上端から CSG 表面までの深さを測定し、供試体の密度を求めた。

養生は水分が散逸することを防止するため供試体上面にラッピングし、ビニールテープで二重に巻いて、所定の材齢まで 20°C 恒温室内にて封緘養生を行った。

試験の 7 日程度前に供試体上面をキャッピング、その後脱型し、供試体側面中央部にひずみゲージ（ゲージ長 120mm 計 2 枚）を図- 5.1 に示す位置（表裏）に貼付した。



写真- 5.1 圧縮強度試験用供試体の作製に用いた軽量型枠

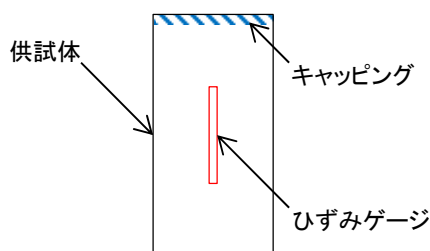


図- 5.1 圧縮試験用供試体（円柱供試体）
（ひずみゲージは表・裏貼付）

5.2.2 角柱供試体

平成 24 年度の試験において、円柱供試体を用いた直接引張試験において、後述（7.2.3(2)）するように、供試体作製時の締め固め面と見られる面で破断が生じるケースが比較的多く見られた。この原因として、締め固め面が載荷方向と直交するために締め固め面での付着状況が試験結果に影響している可能性が考えられた。このため、載荷方向を締め固め面と平行な方向とすることが可能で締め固め面の付着状況の影響を受けにくい形状の供試体として角柱供試体もあわせて作製することとし、うち一部を圧縮強度試験に用いた。

角柱供試体の作製には、破壊エネルギー試験用供試体の作製に用いる脱着可能な鋼製型枠（□150mm×L530mm）を用いて、端部に木製キャンバーを設置して供試体長さがL=300mmとなるよう調節して用いた（写真-5.2）。締固め方向が載荷軸方向と平行になるように、型枠を長手（横）方向に置き、ウェットスクリーニングしたCSGを材料分離が生じないよう2層に分けて投入し、各層において突き棒で45回突き固めた後、振動タンパにより40秒締固めを行った（写真-5.3）。この際、締固め境界面が平滑とならないよう、つき棒や金属ヘラを使用して平滑な面を凹凸にし、上下層との馴染みを良くした。

養生は水分が散逸することを防止するため供試体上面にラッピングし、ビニールテープで二重に巻いて、所定の材齢まで恒温室（20℃）にて封緘養生を行った。

試験の3日程度前に供試体上面をキャッピング、その後脱型し、図-5.2に示す位置にひずみゲージ（ゲージ長120mm×4枚、ゲージ長90mm×4枚、計8枚）を貼付した。

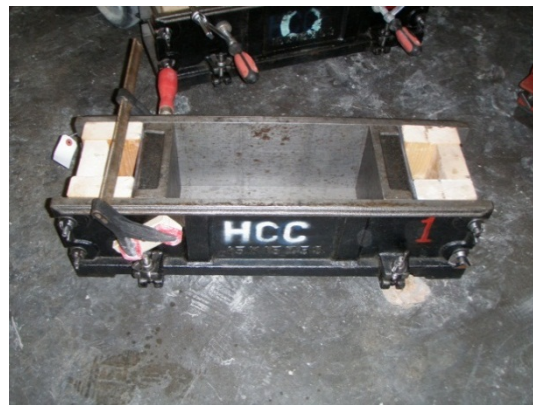


写真- 5.2 角柱供試体作製に用いた鋼製型枠



写真- 5.3 角柱供試体の作製

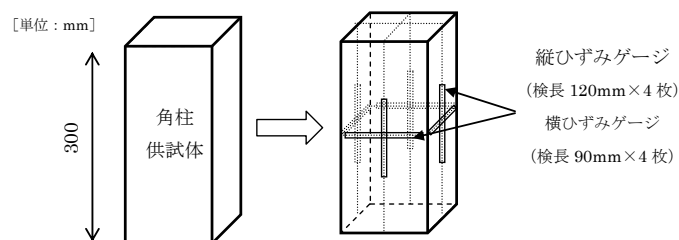


図- 5.2 圧縮試験用供試体（角柱供試体）

5.3 引張強度試験用供試体

引張強度試験（直接引張試験及び割裂引張試験）に用いる供試体は円柱供試体を基本としたが、直接引張試験については、5.2.2 に述べた理由により角柱供試体もあわせて作製した。各供試体の作製手順は、その養生までは圧縮強度試験用供試体の場合と基本的に同様であるが、引張強度試験用供試体については、試験材齢の約7日前に図-5.3 に示す以下の処置を行った。

直接引張試験用の供試体については、引張载荷に必要な帽子型治具を接着剤で両端部に固定することから、接着面の不陸を除去するため両端30mmを切除してL=240mmとなるようにした上で治具と供試体を接着剤で固定し、ひずみゲージを貼付した。

割裂引張試験用の円柱供試体については、本来は端部切除の必要はないが、必要に応じ直接引張試験に用いることも可能なよう、同様に両端30mmを切除し、L=240mmとなるようにした。また、切断した両端面の中央に载荷方向に直交する方向にひずみゲージ（ゲージ長60mm、計2枚）を貼付した。

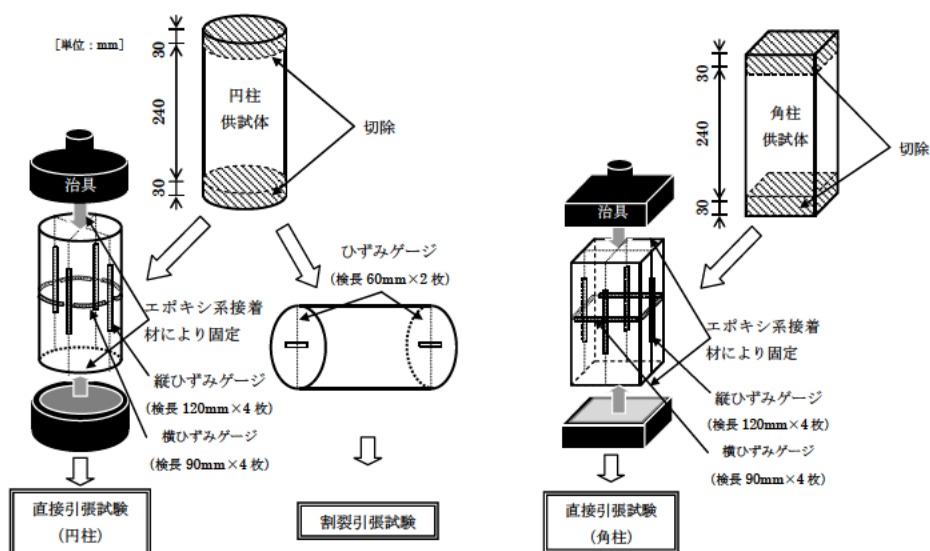


図- 5.3 引張試験用供試体の作製

5.4 破壊エネルギー試験用供試体

破壊エネルギー試験用の切欠き梁供試体の作製には、 $150\text{mm} \times 550\text{mm}$ の鋼製型枠（写真- 5.4）を用いた。なお、供試体中央に切欠き（深さ 45mm、厚さ 5mm）を入れるため、同形状の鋼板を予め型枠中央部に設置した。切欠き用鋼板の設置に際しては、脱型時にスムーズに取り外せるよう、鋼板の周囲に厚さ 0.2mm のプラスチックシートを貼り、グリスを薄く塗布した。

CSG は 2 層に分けて詰め、各層突き棒で 80 回突いた後、大小 2 種類の加圧板を付けた振動タンパにより 1 層 120 秒間締め固めた（写真- 5.5）。

1 層目の締め固め後は、突き棒で平滑面をかき乱して次層との馴染みを良くした。

養生は、円柱供試体と同様に水分が散逸することを防止するため供試体上面にラッピングし、ビニールテープで二重に巻いて、所定の材齢まで恒温室（ 20°C ）にて封緘養生を行った（写真- 5.6）。

試験 7 日程度前に脱型し、急速試験に用いる供試体については、サンプリング速度を大きくできる渦電流式変位計を設置するため、供試体を一部（幅 40mm×深さ 10mm）削って渦電流式変位計を設置した（写真- 5.7）。



写真- 5.4 破壊エネルギー試験用供試体作製に用いた鋼製型枠



写真- 5.5 破壊エネルギー試験用供試体の作製



写真- 5.6 破壊エネルギー試験用供試体の養生状況

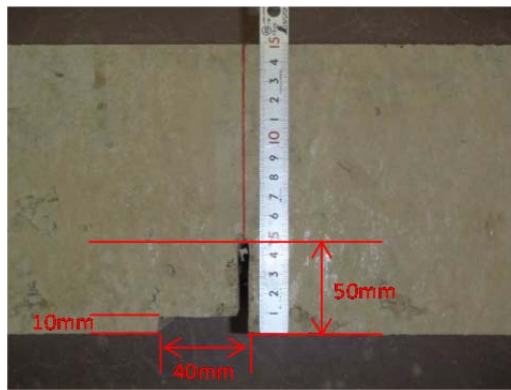


写真- 5.7 破壊エネルギー試験用供試体（切欠き部）

5.5 せん断試験用供試体

簡易一面せん断試験用供試体の作製には、脱着可能な鋼製型枠（φ200mm×H200mm）（写真-5.8）を用いた。ウェットスクリーニングしたCSGを材料分離が生じないよう3層に分けて投入し、各層において突き棒で15回突き固めた後、振動タンパにより30秒締固めを行った（写真-5.9）。供試体のせん断面と締固め境界面は一致しないため、ここでは締固め境界面は平滑のままとした。

養生は水分が散逸することを防止するため供試体上面にラッピングし、ビニールテープで二重に巻いて、所定の材齢まで恒温室（20℃）にて封緘養生を行った。

試験の7日程度前に供試体上面をキャッピングし、脱型した。その後試験日まで恒温室（20℃）で保管した。



写真- 5.8 簡易一面せん断試験用供試体型枠



写真- 5.9 簡易一面せん断試験用供試体の作製

6. 試験方法

6.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、静的載荷条件（通常の載荷速度）での一軸圧縮試験により実施した。試験方法は「台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料」¹⁾に準じて行い、圧縮強度（ピーク強度及び弾性領域強度*）のほか、弾性係数を測定した。なお、弾性係数の測定に必要となるひずみの計測は、コンクリートに比べ変形性が大きい CSG では供試体側面中央部にひずみゲージを貼付して行う方法では安定した結果を得るのが難しいため、変位計（ダイヤルゲージ）で全体変形量を計測する方法で行った。なお、一部配合（ケース K-I C、K-II B、S-A）の供試体においては、比較のため、変位計（ダイヤルゲージ）による計測と同時に供試体側面中央部に貼付したひずみゲージでの計測も行った。

* 弾性領域強度：弾性領域の最大応力で、台形 CSG ダムの設計で用いられる「CSG の強度」¹⁾。

6.2 引張強度試験

6.2.1 概要

引張強度試験は、直接引張試験と割裂引張試験により実施した。それぞれの試験は、単調載荷（静的載荷・急速載荷）のみで破壊させる方法のほか、事前繰返し載荷の後、単調載荷（静的載荷・急速載荷）により破壊させる方法で行った。実施した引張強度試験の一覧を表- 6.1 に示す。

表- 6.1 引張強度試験実施一覧

ケース名 (母材・配合)	直接引張試験				割裂引張試験			
	単調載荷		事前繰返し有		単調載荷		事前繰返し有	
	静的載荷	急速載荷	静的載荷	急速載荷	静的載荷	急速載荷	静的載荷	急速載荷
K-I A	○	○			○			
K-I B	○	○			○			
K-I C	○*	○*			○	○		
K-II A	○	○			○	○		
K-II B	○	○	○	○	○	○	○	○
S-A					○	○	○	○
S-A'					○		○	

* 円柱供試体のほか、角柱供試体での試験も合わせて実施。

6.2.2 単調荷試験

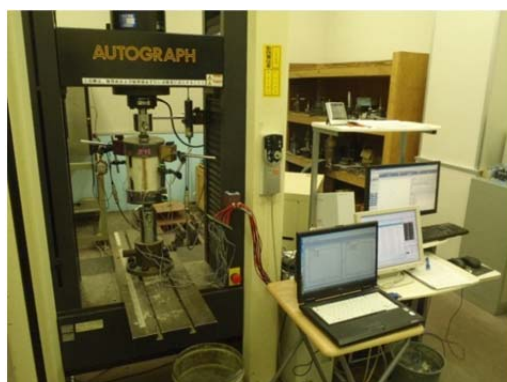
直接引張試験は、偏心の影響を軽減するためユニバーサルジョイントを介して供試体の両端に接着した鋼製治具に軸方向引張荷重を加える方法で実施した。

割裂引張試験は、荷速度や荷パターンを除き、JIS A 1113（コンクリートの割裂引張強度試験方法）に準じた方法で行った。

荷速度は、JIS A 1113 に規定されている静的荷条件（応力増加速度 $0.06\text{N/mm}^2/\text{s}$ 前後）から大規模地震を想定した台形 CSG ダムの地震応答解析の結果⁵⁾を参考に、応力増加速度 $100\text{N/mm}^2/\text{s}$ オーダーとなる急速荷条件までの範囲で設定した。静的荷条件での試験は一般的である万能試験機（写真- 6.1）を使用し、急速荷条件ではサーボ制御式急速荷試験装置（写真- 6.2、防衛大学校所有）を使用した。

なお、応力増加速度は荷中必ずしも一定とならず、特に荷初期は加速域となる。このため、図- 6.1 に示すように、応力の時刻歴で応力増加が概ね直線的となるピーク応力の $1/3$ の応力となる点とピーク応力点を結ぶ直線の勾配を応力増加速度として算出した。ひずみ速度も同様の考え方のもと、図- 6.1 に示すように算出した。

以下では、静的荷条件である応力増加速度が $1\text{N/mm}^2/\text{s}$ 未満を「静的」、急速荷条件のうち、 $1\sim 100\text{N/mm}^2/\text{s}$ 未満の範囲を「中速」、 $100\text{N/mm}^2/\text{s}$ 以上の場合を「高速」と表記する。



(a) 直接引張試験



(b) 割裂引張試験

写真- 6.1 引張試験（静的荷：万能試験機）

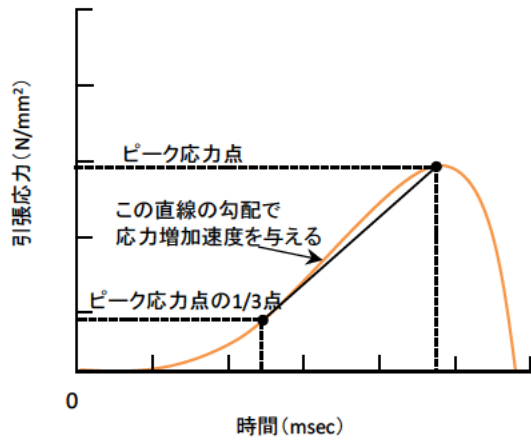


(a) 直接引張試験

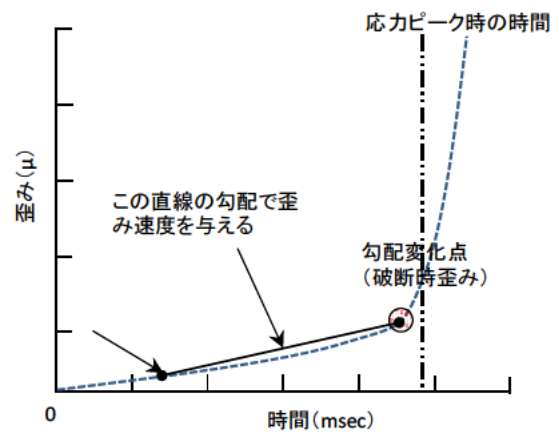


(b) 割裂引張試験

写真- 6.2 引張試験（急速荷：サーボ制御式急速荷試験装置[防衛大学校所有]）



(a) 応力増加速度算出



(b) ひずみ速度算出

図- 6.1 応力増加速度およびひずみ速度算出方法

6.2.3 繰返し引張試験

(1) 繰返し载荷方法

繰返し载荷による応力履歴がCSGの引張強度に及ぼす影響を把握するため、単調载荷での载荷試験前に繰返し引張荷重を载荷する方法で繰返し引張試験を実施した。事前の繰返し载荷は、静的（単調）载荷時の引張強度（最大応力）の平均値 \bar{f}_t に対し、最小応力比 $S_{min}=0.1$ 、最大応力比 $S_{max}=0.5\sim 0.9$ の範囲で、直接引張または割裂引張により所定回数まで繰返し载荷する方法で実施した。なお、試験装置の制約上、実地震時と同様の急速载荷での繰返しが難しいことから、事前繰返し载荷時の载荷速度は静的载荷（応力増加速度 $0.06\text{N/mm}^2/\text{s}$ ）とした。

事前繰返し载荷によって供試体が所定の繰返し回数に達する前に破壊した場合は、破壊時までの繰返し载荷回数と破壊荷重を記録し、破壊しなかった供試体は、その後所定の载荷速度（静的・急速）での単調载荷を行って引張破壊させ、破壊荷重を記録した（図-6.2(a)）。

なお、事前の繰返し载荷回数は、平成25年度及び26年度の試験では6.2.3(2)に示す実地震動による応力履歴の推定も踏まえ10回を基本とした。

平成27年度においては、繰返し载荷による引張強度への影響を定量的に把握するため、最大100回（一部200回）までの繰返し回数での引張疲労試験もあわせて行い、所定の上限回数（100回または200回）までの事前繰返し载荷でも破壊しなかったものは、その後静的载荷速度での単調载荷を行って引張破壊させた（図-6.2(b)）。

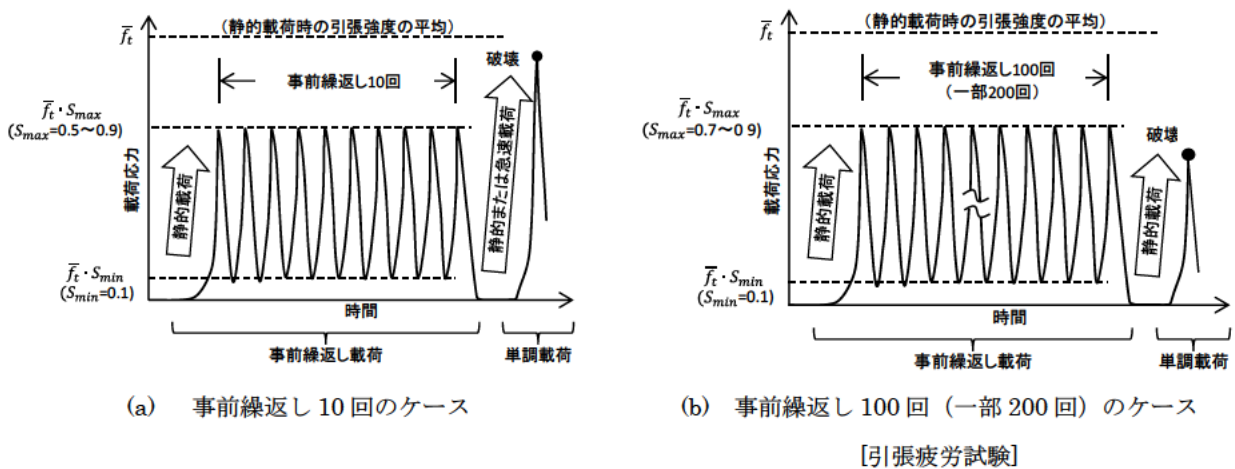


図- 6.2 繰返し引張試験方法（概念図）

(2) 繰返し応力振幅および載荷回数の設定

6.2.3(1)に述べた繰返し引張試験における応力振幅や繰返し回数の設定に際しては、台形 CSG ダム (H=50m) の地震応答解析 (線形動的解析) により堤体内 CSG に発生する最大主応力の時刻歴を推定し、その結果を参考とした。

解析に用いた地震波形 (ダム基礎岩盤相当の位置で観測された加速度時刻歴波形) を表-6.2 に示す。ただし、内陸型地震での地震波形はその周波数応答特性の違いによる影響を小さくするため、大規模地震に対するダム耐震性能照査指針 (案)²⁾ に示される内陸型地震を対象とした照査用下限加速度応答スペクトルに適合するよう振幅調整を行った波形 (最大水平加速度約 300gal) とした。また、海溝型地震の波形は加速度レベルが小さく、そのままでは最大主応力が正 (引張側) となるピーク数が少なかったことから、高柴波は最大加速度 302gal (2 倍)、浦河波は同 308gal (3 倍)、三春波は同 390gal (2 倍) に振幅を引き伸ばした波形を入力地震動とした。

表-6.2 解析に用いた地震波

観測発生年月日	地震名	地震タイプ	観測ダム名	最大水平加速度 (gal)	応力調整
1995.01.17	兵庫県南部	内陸型	一庫	-182.13	※
2000.10.06	鳥取県西部	内陸型	賀祥	-528.49	※
2003.09.26	2003 年十勝沖地震	海溝型	浦河	102.66	×3 倍
2007.03.25	能登半島	内陸型	八ヶ川	166.78	※
2008.06.14	岩手・宮城内陸地震	内陸型	栗駒	276.00	※
2011.03.11	東北地方太平洋沖	海溝型	三春	194.80	×2 倍
2011.03.11	東北地方太平洋沖	海溝型	高柴	151.03	×2 倍
2011.04.11	福島県浜通りの地震	内陸型	高柴	265.40	※

※ 内陸型地震での観測波形は下限加速度応答スペクトル (最大加速度約 300gal) に適合するよう振幅調整した。

線形動的解析結果の一例 (最大主応力 σ_1 の全時刻最大値の分布) を図-6.3 に示す。内部 CSG において地震時の最大主応力 σ_1 が集中する箇所は複数箇所あるが、ここでは図-6.3 の㊸ (内部 CSG 上流端部) の箇所に着目し応力時刻歴を抽出した。その結果を図-6.4 に示す。

σ_1 の最大値は、時刻 10.01s における 0.11N/mm^2 であるが、その前後の時刻でも引張側 (+側) の応力のピーク値が発生している。そこで、地震時における最大主応力 σ_1 の時刻歴から常時 (非地震時) の値を差し引いた値の最大値に対する最大値以外の各ピーク値の比として求めた応力振幅比式(6.1) と、その値を超過するピーク値の個数の関係を整理した結果を図-6.5 に示す。

$$S(t) = \sigma_1(t) / \sigma_{1\max} \quad (6.1)$$

ここに、

$S(t)$: 時刻(t)での応力振幅比、

$\sigma_{1(t)}$: 時刻(t)での最大主応力[N/mm²]、

$\sigma_{1\max}$: 最大主応力 $\sigma_{1(t)}$ の最大値[N/mm²]。

図-6.5より同一応力振幅比に対するピーク値の超過回数は内陸型地震より海溝型地震の波形で多くなっているが、その回数は応力振幅比50%で10回程度以内であり、応力振幅比の増加に伴い少なくなる。

この結果を踏まえ、繰返し载荷の条件は、静的载荷時の引張強度 f_t に対する最大応力比 S_{max} が0.5~0.9の範囲で行うこととし、繰返し回数は10回を基本とした。

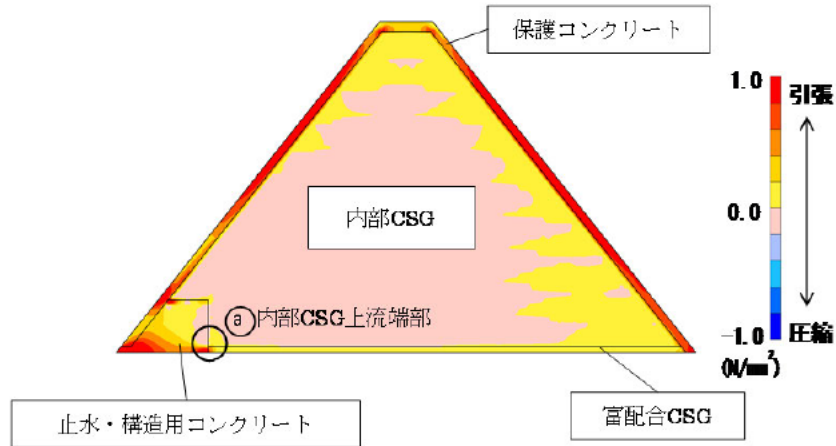


図- 6.3 最大主応力 σ_1 (全時刻最大) の分布の一例

(堤高 50m、入力地震動：賀祥ダム観測波を原種波形とする下限加速度応答スペクトル適合波)

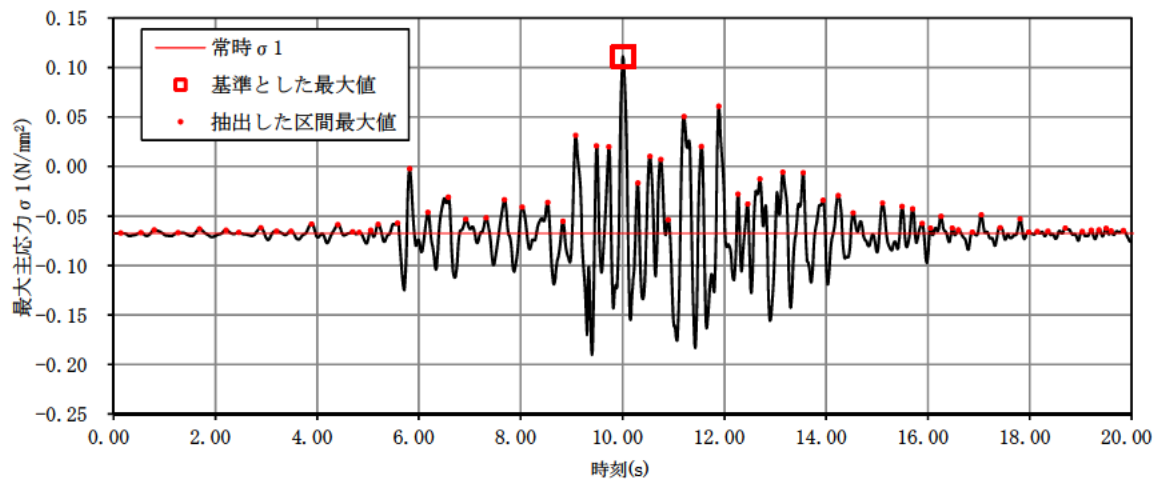
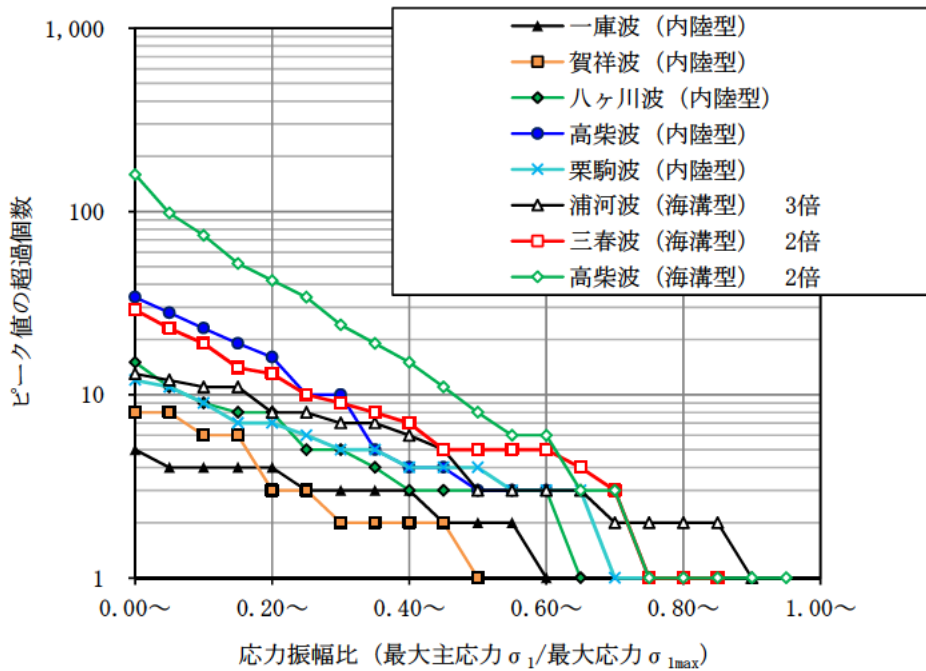


図-6.4 堤体内 CSG の最大主応力 σ_1 時刻歴の一例

(図-6.3のa部、入力地震動は図-6.3に同じ)



注)各波形のうち「内陸型」は下限加速度応答スペクトルに適合するよう、同「海溝型」は付記した振幅倍率となるよう振幅調整したもの。

図- 6.5 堤体内 CSG での応力振幅比 σ_1/σ_{1max} とピーク値の超過個数 (図-6.3㉔部)

6.3 破壊エネルギー試験

破壊エネルギー試験は、静的載荷での引張試験に使用した万能試験機(写真・6.1)を使用し、JCI-S-001-2003(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⁶⁾、以下「JCI 基準」という。)と同様の方法で行った。なお、JCI 基準では載荷速度をひび割れ肩口開口変位 (CMOD) 速度で規定しているが、本試験ではクロスヘッド変位を制御することで所定の CMOD 速度となるようにした。

載荷速度は、JCI 基準での規定速度 (CMOD 速度 0.1mm/min 以下) での静的載荷のほか、その 100 倍 (CMOD 速度 10mm/min) および試験機の実力のほぼ最大の 1000 倍 (同 100mm/min) の急速載荷により実施した。

なお、平成 25 年度においては、破壊エネルギーの繰返し載荷による影響を把握するため、事前に繰返し載荷を行った後に破壊させるケースも実施した。繰返し載荷条件は、あらかじめ実施した規定速度での試験における破壊時の平均荷重に対する載荷荷重の比 (荷重振幅比) の最大値を 0.7、同最小値を 0.1 とし、繰返し回数は 10 回とした。

破壊エネルギー試験の一覧を表・6.3 に示す。

載荷方法の概要を図・6.6 に示す。供試体中央に荷重を載荷しながら、下面中央部に設けた切欠き両側を挟んで供試体に接着したクリップゲージ (急速載荷ケースは渦電流式変位計) を用いて破断時まで CMOD を測定した。

表- 6.3 破壊エネルギー試験の一覧

ケース名 (母材・配合)	供試体数量(本)			
	CMOD 速度(mm/min)			
	0.1	1	10	100
K-I A	3		3	
K-I B	3		4	4
K-I C	3		2	1
K-II A				
K-II B	4(2)	1	3(2)	4(2)
S-A	3		3	5
S-A'	2		2	6

※ ()は繰返し載荷試験に用いた数量。

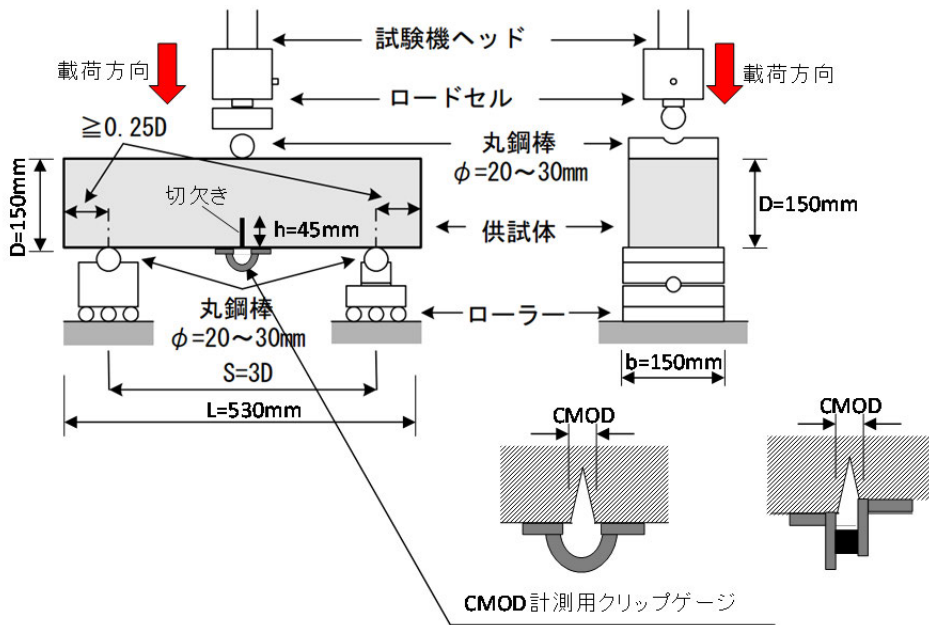


図- 6.6 破壊エネルギーの試験方法

6.4 せん断試験

CSG の破壊形態の一つとして、組合せ応力下でのせん断破壊が考えられる。そこで、CSG のせん断破壊特性を把握するため、K-I A、K-I BおよびK-I Cの供試体を用いて簡易一面せん断試験を実施した。

簡易一面せん断試験の方法は、土木研究所資料第 2829 号「コンクリートのせん断強度についての実験的考察（その1）」⁷⁾の方法によった（図-6.7 参照）。試験条件を表-6.4 に示す。载荷における傾斜角は3ケースとし、1ケースの傾斜角に対して3回の試験を実施した。試験の実施状況を写真-6.3 に示す。

表- 6.4 簡易一面せん断試験条件

ケース名（母材・配合）	傾斜角	試験回数
K-I A	25° 30° 35°	各 3 回
K-I B	25° 30° 35°	各 3 回
K-I C	20° 30° 40°	各 2 回

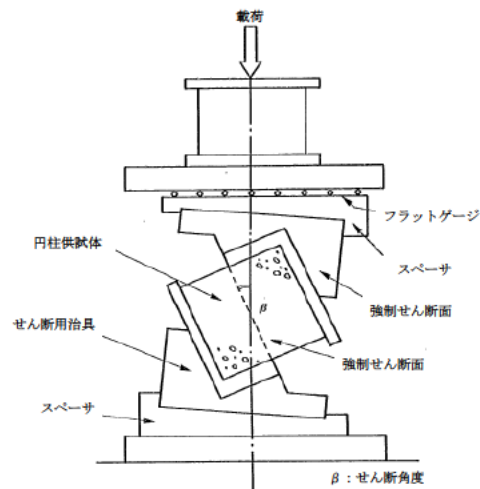


図- 6.7 簡易一面せん断試験装置概略図



写真- 6.3 簡易一面せん断試験状況（左）と破壊後の供試体（右）

7. 試験結果および考察

7.1 圧縮強度試験

7.1.1 試験結果

圧縮強度試験で得られた圧縮強度及び弾性係数（ピーク強度及び弾性領域強度*）の一覧を供試体密度の測定結果とともに表- 7.1 に示す。なお、弾性係数は、応力-ひずみ曲線（ひずみは変位計によるもの）における載荷初期および弾性領域強度以降のピーク応力点までの非線形域を除いた直線と見なせる区間の勾配として求めた値である。

* 弾性領域強度：一軸圧縮試験における弾性領域での最大応力で、台形 CSG ダムの設計に用いられる「CSG の強度」¹⁾。

表- 7.1 圧縮強度試験結果一覧

ケース名 (母材・配合)	供試体 形状	供試体密度(g/cm ³)		供試体密度比(%)		ピーク強度(N/mm ²)		弾性領域強度(N/mm ²)		弾性係数(N/mm ²)	
		各値	平均	各値	平均	各値	平均	各値	平均	各値	平均
K-I A	円柱	2.08	2.08	86.7	86.9	3.88	3.55	1.70	1.4	1,750	1,674
	円柱	2.09		86.9		3.19		1.30		1,670	
	円柱	2.11		87.8		4.02		1.50		1,760	
	円柱	2.09		87.3		3.64		1.40		1,730	
	円柱	2.06		86.0		3.02		1.20		1,460	
K-I B	円柱	2.07	2.05	85.8	85.3	5.04	4.69	2.90	2.86	2,070	2,046
	円柱	2.06		85.7		3.98		3.00		1,920	
	円柱	2.05		84.9		4.07		2.30		1,780	
	円柱	2.07		85.9		5.87		3.60		2,430	
	円柱	2.03		84.1		4.47		2.50		2,030	
K-I C	円柱	2.11	2.16	89.5	91.7	5.24	5.88	3.50	3.92	2,310	2,319
	円柱	2.22		94.1		5.73		4.00		2,429	
	円柱	2.16		91.6		6.68		4.25		2,218	
	角柱	2.16	2.16	91.6	91.6	4.74	4.74	3.25	3.25	1,994	1,994
K-II A	円柱	2.02	2.02	87.0	86.9	3.11	2.92	2.22	2.15	1,226	1,408
	円柱	2.02		86.8		2.72		2.08		1,590	
K-II B	円柱	2.20	2.13	95.5	92.5	3.51	3.31	1.46	2.00	1,056	1,230
	円柱	2.20		95.9		3.83		1.59		1,275	
	円柱	2.09		91.0		3.19		2.33		1,299	
	円柱	2.06		89.6		3.09		2.21		1,343	
	円柱	2.08		90.6		2.94		2.40		1,178	
S-A	円柱	2.22	2.21	97.2	97.0	10.28	9.98	5.70	6.02	7,646	6,853
	円柱	2.22		97.3		11.16		7.31		6,722	
	円柱	2.22		97.4		9.65		5.36		6,471	
	円柱	2.19		96.1		9.42		5.89		6,251	
	円柱	2.19		96.1		9.04		5.63		6,226	
	円柱	2.23		97.6		10.33		6.23		7,800	
S-A'	円柱	2.24	2.23	98.4	97.98	9.96	9.76	6.20	6.15	4,429	4,791
	円柱	2.22		97.5		10.24		6.00		4,615	
	円柱	2.23		98.0		10.13		5.90		5,619	
	円柱	2.23		98.2		9.73		6.70		4,621	
	円柱	2.23		97.9		8.88		5.40		4,500	
	円柱	2.23		97.9		9.62		6.70		4,963	

7.1.2 考察

(1) 密度比との対応

円柱供試体での一軸圧縮試験で得られた圧縮強度と密度比の測定結果の対比を図-7.1に示す。ポーラスな外観となったケース K-I A および K-I B は、ケース K-I C に比べ、密度比、圧縮強度ともに小さいことから、各配合の密度比は圧縮強度とよく対応している。

また、母材の相違による影響も認められ、S ダムの河床砂礫を使用した供試体は、強度・密度とも K ダムの母材を使用した CSG よりも大きい。

(2) 応力～ひずみ曲線

円柱供試体での一軸圧縮試験で得られた応力～ひずみ曲線及び圧縮強度の測定結果の例を図-7.2、図-7.3に示す。同図中には、変位計から求めたひずみ値を用いて得られた各配合供試体の応力～ひずみ曲線を示しているが、比較のため、ケース K-IC、K-II B および S-A については供試体中央部に貼付したひずみゲージでの計測結果を用いて描いた応力～ひずみ曲線も示している。両者を比較すると、K ダムの母材を使用した CSG では、同一圧縮応力時のひずみはひずみゲージで計測した値より変位計から求めた値の方が大きくなっていることから、供試体端部付近にひずみが集中しやすいことがわかる。しかし、S ダムの河床砂礫を使用した CSG では、同一圧縮応力時のひずみは若干、変位計から求めた値の方が大きくなっているが、優位な差は見られなかった。

(3) 圧縮強度と弾性係数の関係

円柱供試体での一軸圧縮試験で得られた CSG の弾性係数と圧縮強度（ピーク強度）の関係を図-7.4に示す。同図中には、本検討での試験結果の一部（ケース K-I A、K-I B、K-I C および K-II A での試験データ）をもとにした既往分析で得られた関係式⁹⁾も示している。

$$E_c = \{0.18 + (f'_c - 4.0) / 37\} \times 10000 \quad (7.1)$$

ここに、

E_c : 変位計を用いた一軸圧縮試験で得られる弾性係数[N/mm²]

f'_c : 圧縮強度（一軸圧縮試験でのピーク強度）[N/mm²]

図-7.4より CSG の弾性係数は、式(7.1)に示すように、一般のコンクリートの場合と同様、圧縮強度の増加に伴いほぼ直線的に増加することがわかる。なお、S ダムの母材を用いた CSG では、K ダム母材を用いた関係式(7.1)より上方に位置していることが確認できるがその理由としては母材の材質の相違などが考えられる。

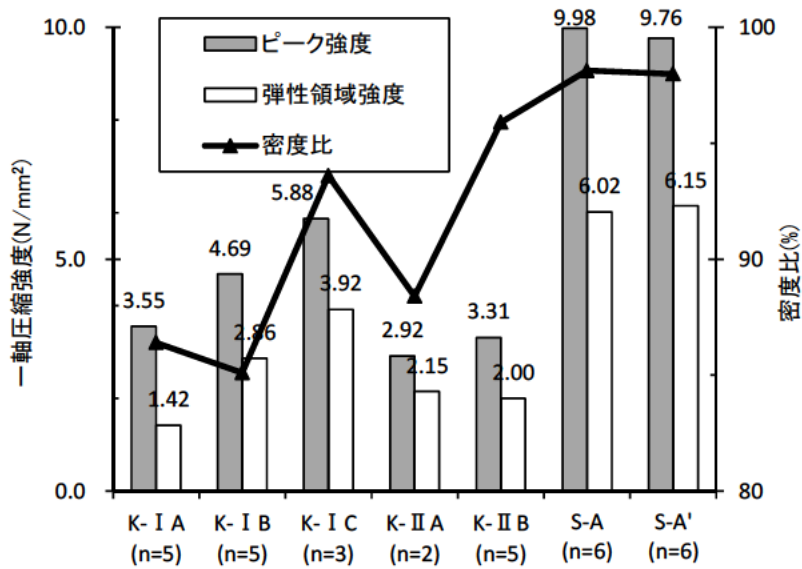


図- 7.1 圧縮強度と密度比の試験結果 (n: 供試体数)

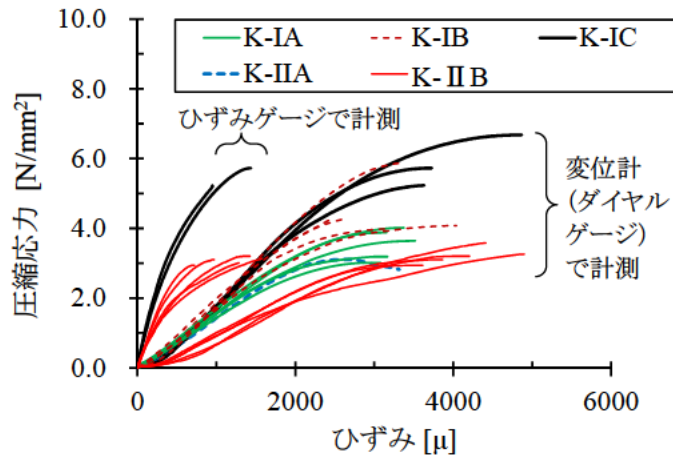


図- 7.2 CSG 供試体の応力～ひずみ曲線の例 (K ダム I 材・II 材)

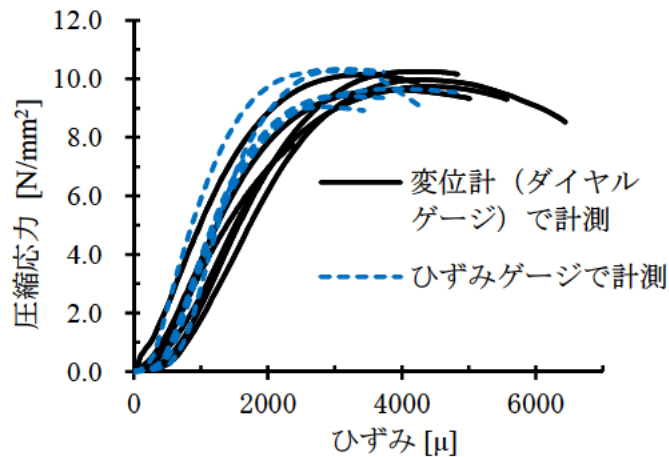


図- 7.3 CSG 供試体の応力～ひずみ曲線の例 (S ダム河床砂礫)

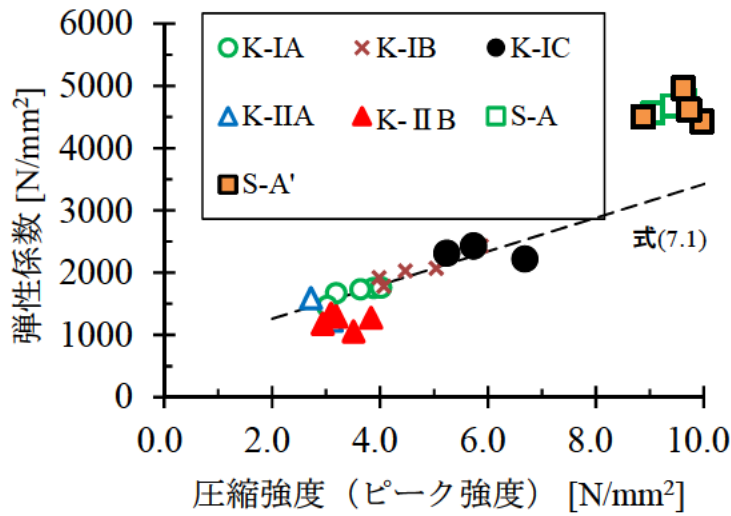


図- 7.4 CSG の圧縮強度（ピーク強度）と弾性係数

7.2 引張強度試験

7.2.1 試験結果

直接引張試験および割裂引張試験での全試験結果をそれぞれ表- 7.2 および表- 7.3 に示す。

なお、直接引張試験での引張強度は、最大荷重を公称断面積で除して求めた。割裂引張試験での引張強度は、JIS A 1113 と同様、円盤に集中荷重が作用した場合の載荷面中心付近の水平（引張）応力の弾性理論解である次式により算出した。

$$f_t = \frac{2P_{cr}}{\pi dL} \quad (7.2)$$

ここに、

f_t : 割裂引張試験での引張強度[N/mm²],

P_{cr} : 最大荷重[N],

d : 供試体の直径[mm],

L : 供試体長さ[mm]。

応力増加速度及びひずみ速度は、図- 6.1 に示した方法で求めた。

表- 7.2 および表- 7.3 に示す荷重速度の区分は、以下に示すように規定した。

「静的」：応力増加速度<1N/mm²/s、

「中速」：1N/mm²/s ≤ 応力増加速度<100N/mm²/s、

「高速」：応力増加速度 ≥ 100N/mm²/s。

表- 7.2(1) 直接引張試験結果一覧

実施 年度	ケース名 (母材・配合)	載荷 パターン	供試体 密度比 (%)	最大荷重 (kN)	引張強度		載荷速度**		区分
					各値 (N/mm ²)	強度比*	応力増加速度 (N/mm ² /s)	ひずみ速度 (1/s)	
H23	K- I A [円柱]	単調載荷	86.3	3.4	0.19	1.05	0.001	2.00E-06	静的
			84.3	2.6	0.14	0.78	0.002	4.00E+00	
			86.7	4.0	0.23	1.28	0.003	6.00E-06	
			85.6	2.7	0.15	0.83	0.002	6.00E-06	
			84.7	3.3	0.19	1.05	0.003	7.00E-06	
			86.6	3.3	0.19	1.05	0.029	1.40E-05	
			86.0	3.3	0.19	1.05	0.116	4.50E-05	
			87.4	3.3	0.19	1.04	0.116	1.10E-04	
			86.1	3.4	0.19	1.07	0.144	1.20E-05	
			85.9	3.8	0.21	1.19	0.202	4.50E-05	
			88.3	4.0	0.23	1.27	0.318	7.30E-05	
			89.1	4.5	0.26	1.43	0.375	4.30E-05	
			84.1	2.2	0.12	0.69	0.520	7.10E-05	
			86.3	2.0	0.12	0.64	0.607	1.40E-04	
	86.6	1.8	0.10	0.58	0.635	3.10E-05			
	K- I B [円柱]	単調載荷	86.5	5.1	0.29	1.16	0.002	2.00E-06	静的
			84.7	6.1	0.35	1.40	0.002	5.00E-06	
			84.3	4.8	0.27	1.08	0.002	2.00E-06	
			87.9	5.5	0.31	1.24	0.002	1.00E-06	
			86.9	4.3	0.24	0.96	0.004	7.00E-06	
			85.3	3.8	0.21	0.85	0.144	8.50E-05	
			83.6	3.8	0.21	0.85	0.173	1.20E-05	
			83.4	3.8	0.22	0.87	0.202	3.60E-05	
			84.1	4.1	0.23	0.93	0.202	2.60E-05	
			87.6	4.6	0.26	1.05	0.289	1.20E-04	
			84.3	3.3	0.19	0.75	0.289	2.80E-04	
83.7			1.9	0.11	0.44	0.433	3.10E-05		
84.6	4.8	0.27	1.08	0.491	1.60E-04				
85.0	5.1	0.29	1.14	0.578	5.00E-05				
88.6	5.4	0.30	1.20	0.664	1.40E-04				

* 「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的載荷での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

** 載荷速度（応力増加速度、ひずみ速度）の「—」は計測できなかったもの。

表- 7.2(2) 直接引張試験結果一覧

実施年度	ケース名 (母材・配合)	载荷パターン	供試体 密度比 (%)	最大荷重 (kN)	強度 (N/mm ²)		载荷速度**		
					各値	強度比*	応力増加速度 (N/mm ² /s)	ひずみ速度 (1/s)	区分
H24	K-I C [円柱]	単調载荷	93.2	7.2	0.41	1.10	0.002	7.20E-07	静的
			96.1	4.4	0.25	0.67	0.002	1.80E-07	
			95.3	7.6	0.43	1.15	0.002	7.80E-07	
			92.3	7.2	0.41	1.10	0.002	7.80E-07	
			93.6	6.5	0.37	0.99	0.002	1.40E-06	
			93.2	12.0	0.68	1.82	15.000	2.60E-03	中速
			93.3	11.5	0.65	1.74	15.000	2.90E-03	
			94.9	7.8	0.44	1.18	18.000	5.20E-03	
			92.5	14.0	0.79	2.11	41.000	6.60E-03	
			93.9	10.6	0.60	1.60	45.000	5.20E-03	
			90.7	9.9	0.56	1.50	139.000	2.20E-02	高速
			94.6	17.0	0.96	2.57	144.000	1.90E-02	
			94.9	14.8	0.84	2.25	149.000	2.20E-02	
			95.7	10.6	0.60	1.60	176.000	2.30E-02	
			93.4	8.1	0.36	0.91	0.001	1.70E-07	
	95.2	8.1	0.36	0.91	0.002	1.90E-07			
	93.9	7.7	0.34	0.86	0.001	1.40E-07			
	95.5	8.8	0.39	0.99	0.002	2.70E-07			
	95.7	7.3	0.33	0.84	0.001	1.30E-07			
	92.2	10.4	0.59	1.50	0.004	3.40E-07	中速		
	95.7	14.2	0.81	2.04	1.000	1.00E-04			
	96.0	14.2	0.81	2.04	1.000	1.10E-04			
	96.1	15.1	0.85	2.16	17.000	1.60E-03			
	94.5	15.5	0.88	2.23	17.000	1.60E-03			
	94.9	18.9	1.07	2.71	133.000	6.00E-03			
	95.2	14.3	0.81	2.04	—	—			
	95.8	16.6	0.94	2.37	—	—			
	94.0	14.2	0.81	2.04	—	—			
	90.5	15.4	0.87	2.21	—	—			
	K-II A [円柱]	単調载荷	89.4	3.7	0.21	1.00	0.003	1.90E-06	静的
89.3			7.1	0.40	1.90	19.000	1.20E-02	中速	
88.5			5.3	0.30	1.43	14.000	5.40E-03		
87.7			11.5	0.65	3.10	397.000	3.10E-01	高速	
89.0			8.7	0.49	2.33	294.000	3.80E-01		

* 「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的载荷での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

** 载荷速度（応力増加速度、ひずみ速度）の「—」は計測できなかったもの。

表- 7.2(3) 直接引張試験結果一覧

実施 年度	ケース名 (母材・配合)	載荷 パターン	供試体 密度比 (%)	最大荷重 (kN)	強度 (N/mm ²)		載荷速度**		
					各値	強度比*	応力増加速度 (N/mm ² /s)	ひずみ速度 (1/s)	区分
H25	K-II B [円柱]	単調載荷	95.3	5.9	0.34	0.95	0.037	2.60E-05	静的
			95.5	5.8	0.33	0.92	0.036	2.10E-05	
			96.0	6.1	0.34	0.97	0.036	2.77E-05	
			95.4	7.4	0.42	1.17	0.038	2.92E-05	
			95.2	6.2	0.35	0.98	0.039	2.95E-05	
			94.6	6.3	0.36	1.01	0.036	2.81E-05	
			96.0	8.3	0.47	1.32	31.000	5.50E-04	中速
			95.4	10.2	0.58	1.63	164.000	4.93E-03	高速
			96.2	10.7	0.60	1.70	160.000	4.80E-03	
			96.0	9.6	0.54	1.52	110.000	6.12E-03	
		95.9	9.5	0.54	1.51	141.000	5.04E-03		
		事前繰返 し載荷 $S_{min}=0.1$ $S_{max}=0.7$ 10回	96.4	5.8	0.33	0.93	0.037	2.87E-05	静的
			96.9	6.2	0.35	0.98	0.043	3.84E-05	
			95.4	7.2	0.41	1.14	0.042	3.86E-05	
			96.3	6.3	0.36	1.01	0.039	3.59E-05	
			96.1	7.3	0.41	1.16	0.042	1.51E-05	
			96.3	7.3	0.41	1.16	0.042	3.88E-05	
			96.1	7.8	0.44	1.24	31.000	4.53E-04	中速
			96.1	7.8	0.44	1.25	32.000	6.56E-04	高速
			95.6	8.7	0.49	1.39	206.000	4.88E-03	
96.0	8.1		0.46	1.29	211.000	5.95E-03			
96.0	8.4	0.48	1.34	212.000	7.69E-03				
			96.0	9.6	0.55	1.54	167.000	6.68E-03	

*「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的載荷での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

** 載荷速度（応力増加速度、ひずみ速度）の「—」は計測できなかったもの。

表- 7.3(1) 割裂引張試験結果一覧

実施 年度	ケース名 (母材・配合)	載荷 パターン	供試体 密度比 (%)	最大荷重 (kN)	強度 (N/mm ²)		載荷速度		
					各値	強度比*	応力増加速度 (N/mm ² /s)	ひずみ速度 (1/s)	区分
H23	K-I A [円柱]	単調載荷	86.5	33.5	0.60	1.09	0.020	8.90E-05	静的
			86.2	32.5	0.58	1.06	0.022	3.30E-05	
			86.2	31.0	0.55	1.01	0.022	1.70E-05	
			87.0	28.3	0.50	0.92	0.021	1.70E-05	
			85.6	28.8	0.51	0.93	0.051	7.70E-05	
	K-I B [円柱]		84.6	34.3	0.61	0.96	0.014	2.10E-05	静的
			86.0	32.0	0.56	0.88	0.014	5.40E-05	
			83.4	46.2	0.81	1.28	0.011	3.70E-05	
			82.7	40.2	0.71	1.12	0.007	1.40E-05	
			83.1	27.3	0.48	0.76	0.010	6.40E-05	
H24	K-I C [円柱]	96.1	46.1	0.81	1.06	0.010	1.30E-06	静的	
		93.6	44.3	0.78	1.02	0.010	2.91E-05		
		91.8	44.5	0.79	1.03	0.010	1.71E-05		
		93.5	44.6	0.79	1.03	0.010	2.83E-05		
		93.0	46.4	0.82	1.07	0.020	1.90E-05		
		90.1	34.3	0.61	0.79	0.010	1.15E-05		
		92.6	39.9	0.71	0.92	5.000	5.10E-03	中速	
		94.9	56.4	1.00	1.30	6.000	4.85E-03		
		93.7	53.1	0.94	1.22	6.000	3.61E-03		
		95.4	53.6	0.95	1.24	67.000	4.38E-02		
		92.3	57.0	1.01	1.31	75.000	5.30E-02		
		94.9	59.4	1.05	1.37	123.000	7.34E-02		
	K-II A [円柱]	93.2	65.9	1.17	1.52	154.000	8.92E-02	高速	
		95.0	67.8	1.20	1.56	226.000	1.21E-01		
		96.2	85.2	1.51	1.96	572.000	3.32E-01		
		88.4	26.9	0.48	1.00	0.008	2.44E-05	静的	
		88.0	43.2	0.76	1.59	19.300	2.06E-02	中速	
		89.3	49.7	0.88	1.83	39.500	3.04E-02	中速	
	88.5	69.3	1.23	2.55	305.000	2.16E-01	高速		

*「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的載荷での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

表- 7.3(2) 割裂引張試験結果一覧

実施 年度	ケース名 (母材・配合)	載荷 パターン	供試体 密度比 (%)	最大荷重 (kN)	強度 (N/mm ²)		載荷速度		
					各値	強度比*	応力増加速度 (N/mm ² /s)	ひずみ速度 (1/s)	区分
H25	K-II B [円柱]	単調載荷	95.3	31.0	0.55	0.97	0.057	1.65E-05	静的
			96.6	33.9	0.60	1.05	0.053	3.39E-05	
			96.6	32.3	0.57	1.01	0.052	1.37E-04	
			96.2	29.5	0.52	0.92	0.055	9.33E-05	
			95.6	34.6	0.61	1.08	0.056	3.64E-05	
			95.9	31.5	0.56	0.98	0.053	1.39E-04	
			95.8	40.0	0.71	1.25	94.830	2.12E-03	中速
			96.2	39.9	0.71	1.24	84.011	1.41E-03	
			96.1	50.6	0.89	1.57	236.142	4.39E-03	高速
			95.3	46.1	0.81	1.43	244.730	4.64E-03	
			96.2	52.5	0.93	1.63	268.319	4.23E-03	
			96.5	41.9	0.74	1.31	120.290	3.45E-03	
		95.5	32.7	0.58	1.02	0.044	5.34E-05	静的	
		96.0	31.6	0.56	0.99	0.044	1.01E-04		
		96.2	34.7	0.61	1.08	0.047	6.08E-05		
		95.8	39.8	0.70	1.24	93.654	1.48E-03	中速	
		95.7	42.9	0.76	1.33	83.492	9.58E+04		
		96.6	41.6	0.74	1.30	54.822	1.23E-03	高速	
		95.8	58.9	1.04	1.84	386.667	6.87E-03		
		96.1	49.0	0.87	1.54	255.398	6.23E-03		
		96.0	32.3	0.58	1.02	136.454	4.37E-03		
		95.9	32.5	0.57	1.01	0.043	2.59E-04	静的	
		96.6	32.4	0.58	1.02	0.048	4.14E-05		
		96.0	33.5	0.60	1.05	0.048	4.81E-05	中速	
96.1	38.7	0.69	1.21	83.631	3.59E-03				
96.3	33.6	0.60	1.06	70.989	1.44E-03	高速			
95.8	38.7	0.69	1.21	210.229	2.79E-03				
94.9	47.4	0.84	1.48	254.636	5.09E-03				
95.7	54.1	0.96	1.69	343.763	5.78E-03				
94.7	33.6	0.60	1.06	129.613	5.06E-03				

*「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的載荷での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

表- 7.3(3) 割裂引張試験結果一覧

実施 年度	ケース名 (母材・配合)	載荷 パターン	供試体 密度比 (%)	最大荷重 (kN)	強度 (N/mm ²)		載荷速度		
					各値	強度比*	応力増加速度 (N/mm ² /s)	ひずみ速度 (1/s)	区分
H26	S-A [円柱]	単調載荷	98.7	61.6	1.10	1.00	0.065	4.34E-05	静的
			98.9	62.0	1.10	1.00	0.064	1.43E-05	
			98.6	62.7	1.11	1.01	0.064	4.07E-05	
			97.8	80.7	1.43	1.30	26.047	1.39E-02	中速
			97.1	76.5	1.35	1.22	221.580	8.94E-02	高速
			97.7	87.3	1.54	1.40	223.140	1.05E-01	
			97.5	90.5	1.60	1.45	249.800	1.07E-01	
			98.0	105.3	1.86	1.69	288.490	1.22E-01	
		事前繰返 し載荷 $S_{min}=0.1$ $S_{max}=0.5$ 10回	98.0	58.8	1.04	0.94	0.060	6.44E-05	静的
			98.2	71.7	1.27	1.15	0.062	1.62E-05	
			97.8	69.5	1.22	1.11	0.063	4.04E-05	
			98.6	88.7	1.56	1.41	24.570	9.23E-03	中速
			98.4	96.6	1.70	1.54	27.290	1.35E-02	高速
			98.5	66.7	1.18	1.07	163.130	7.44E-02	
			97.9	87.9	1.56	1.41	435.510	2.44E-01	
			98.8	109.6	1.94	1.76	294.410	1.10E-01	
		事前繰返 し載荷 $S_{min}=0.1$ $S_{max}=0.7$ 10回	97.4	59.5	1.05	0.95	0.061	7.72E-05	静的
			98.2	65.0	1.15	1.04	0.063	2.45E-05	
			97.7	61.5	1.08	0.98	0.064	3.19E-05	
			98.8	95.8	1.70	1.54	29.274	9.86E-03	中速
			98.5	82.7	1.46	1.32	27.620	1.25E-02	高速
			98.6	114.0	2.02	1.83	266.780	9.75E-02	
			98.2	119.6	2.11	1.91	295.636	2.97E-02	
			97.9	108.3	1.92	1.74	717.312	2.78E-01	
		事前繰返 し載荷 $S_{min}=0.1$ $S_{max}=0.8$ 10回	98.0	71.9	1.27	1.15	0.064	9.08E-06	静的
			98.7	74.5	1.33	1.21	0.064	8.07E-06	
			98.7	77.8	1.39	1.26	0.063	1.08E-05	
			97.0	64.3	1.14	1.03	2.376	1.56E-04	中速
			98.2	72.6	1.28	1.16	24.162	1.23E-02	
			97.5	89.3	1.58	1.43	29.600	1.31E-02	
			98.2	95.2	1.68	1.52	273.132	1.17E-01	
			97.7	102.1	1.80	1.63	280.345	1.62E-01	高速

*「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的載荷での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

表- 7.3(4) 割裂引張試験結果一覧

実施 年度	ケース名 (母材・配合)	荷 載 パ タ ー ン	供 試 体 密 度 比 (%)	最 大 荷 重 (kN)	強 度 (N/mm ²)		荷 載 速 度					
					各 値	強 度 比 [*]	応 力 増 加 速 度 (N/mm ² /s)	ひ ず み 速 度 (1/s)	区 分			
H26	S-A [円柱]	事前繰返 し荷 $S_{min}=0.1$ $S_{max}=0.9$ 10回	98.6	68.7	1.22	1.11	0.066	1.55E-05	静的			
			98.3	76.3	1.35	1.22	0.064	1.10E-05				
			98.8	76.2	1.34	1.21	0.066	1.80E-06				
						98.0	63.0	1.11	1.01	2.979	4.54E-03	中速
						98.2	82.5	1.46	1.32	3.316	2.02E-03	
						97.3	95.2	1.68	1.52	28.714	7.74E-03	
						98.0	94.9	1.68	1.52	32.872	8.28E-03	
						98.1	96.0	1.70	1.54	279.664	1.11E-01	高速
						98.2	99.9	1.76	1.60	300.168	1.26E-01	

* 「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的荷重での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

7.2.2 単調載荷試験結果の考察

(1) 圧縮強度との関係

表 7.2 および表 7-3 に示した引張強度試験結果のうち、単調載荷での試験データについて、静的載荷（急速載荷や事前繰り返し載荷を行っていないもの）で得られた引張強度（直接引張強度・割裂引張強度）と同一ケース（母材・配合）の供試体で得られた圧縮強度（ピーク強度・弾性領域強度）の平均値の関係を図-7.5 に示す。なお、図-7.5 (a)には引張強度と圧縮強度の関係を線形関係とした場合の両者の比を、図-7.5 (b)にはコンクリートの引張強度と圧縮強度の関係として一般に用いられる次式において、係数 k の値を種々変化させた場合の関係も付記している。

$$f_t = k(f_c')^{2/3} \quad (7.3)$$

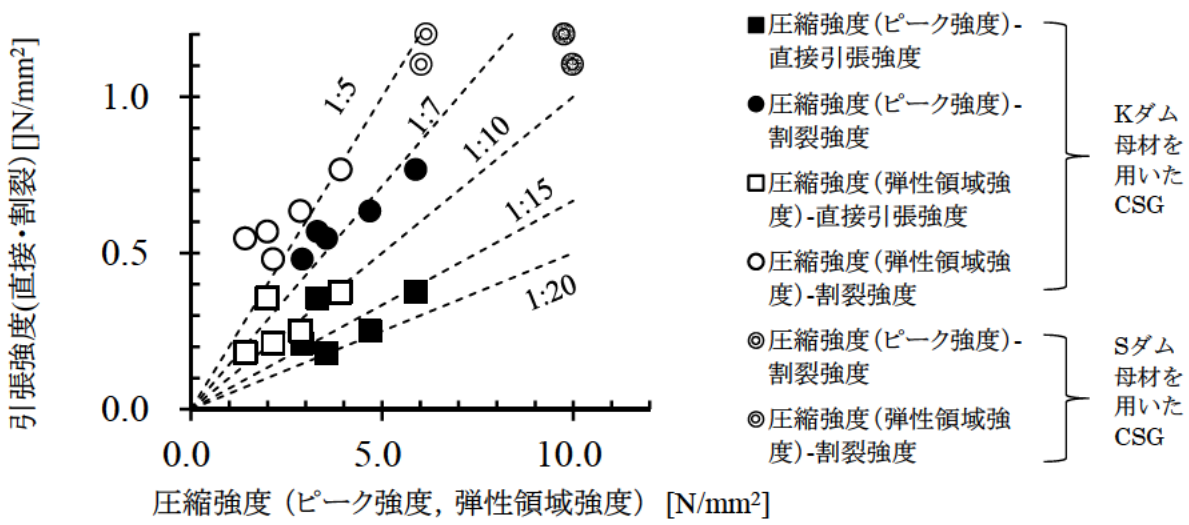
ここに、 f_t ：引張強度[N/mm²]、 f_c' ：圧縮強度[N/mm²]、 k ：係数である。

式(7.3)における k の値は、一般のコンクリートでは、試験を行わない場合には $k=0.23$ としてよい⁸⁾とされている。また CSG 同様、ダム の 堤 体 材 料 として 用 い ら れ る コ ン ク リ ー ト (ダ ム コ ン ク リ ー ト) を 対 象 と し た 研 究⁹⁾では、 $k=0.323$ (N/mm² 単位への換算値、原著論文 (psi 単位) では $k=1.7$) との報告がある。

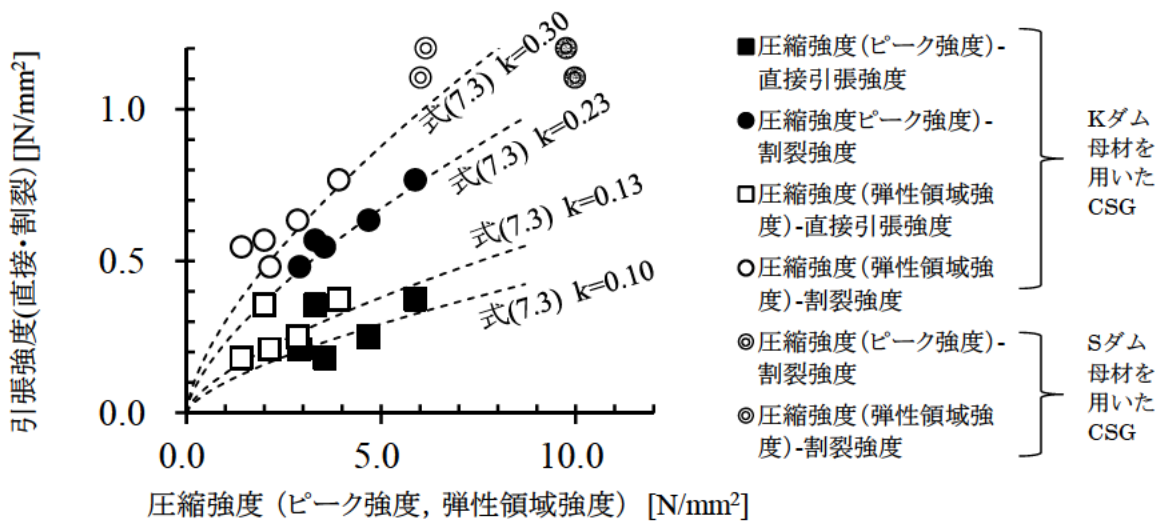
図-7.5 より、CSG の引張強度はコンクリートと同様に、圧縮強度の増加にしたがって大きくなることが明らかである。

また、図-7.5 (a)に示すように、K ダムの母材を用いたケースの場合、圧縮強度（ピーク強度）に対する引張強度の比は、直接引張強度は 1/10～1/20、割裂引張強度は 1/7 程度であり、弾性領域強度に対しては、直接引張強度は 1/10、割裂引張強度は 1/5 程度である。なお、S ダムの母材を用いたケースの場合、圧縮強度（ピーク強度）と弾性領域強度に対する割裂引張強度との比は、それぞれ 1/10 程度と 1/5 程度である。

一方、式(7.3)を適用した場合には、図-7.5 (b)に示すように、K ダムの母材を用いたケースでは、圧縮強度（ピーク強度）との関係については、直接引張強度は $k=0.10$ 、割裂引張強度は $k=0.23$ （一般のコンクリートと同等）程度とすれば比較的よく再現でき、弾性領域強度との関係については、直接引張強度は $k=0.13$ 、割裂引張強度は $k=0.30$ 程度となる。なお、S ダムの母材を用いたケースの場合には、圧縮強度（ピーク強度）と弾性領域強度に対する割裂引張強度との比は、それぞれ $k=0.23$ と $k=0.30$ 程度となる。



(a) 線形関係 (圧縮強度と引張強度の比) による整理



(b) べき関数の関係式による整理

図- 7.5 CSGの引張強度と圧縮強度の関係 (円柱供試体・静的載荷)

(2) 載荷速度による影響

単調載荷での直接引張強度試験で得られた応力～ひずみ関係の一例（ケース K-I C・K-II B 供試体での直接引張試験の結果）を図-7.6 に示す。引張応力の増加に伴いひずみはほぼ線形的に増加し、その後非線形領域に達して破壊しているが、載荷速度の増加に伴い、ケース K-I C（図-7.6(a)）では、この線形領域が広がり、ピーク強度も増加しており、ケース K-II B（図-7.6(b)）では、非線形領域が広がり、ピーク強度が増加している。この理由は、母材および配合の違いによるものと考えられる。

そこで、載荷速度*の違いによる引張強度への影響について、各ケース（母材・配合）供試体の単調載荷での直接引張試験および割裂引張試験で得られた引張強度（各ケースにおける載荷速度の区分別の平均値）を比較したものを図-7.7 および図-7.8 に示す。

図-7.7、図-7.8 より、いずれの試験方法においても各ケースとも載荷速度が大きいほど強度が増加していることがわかる。

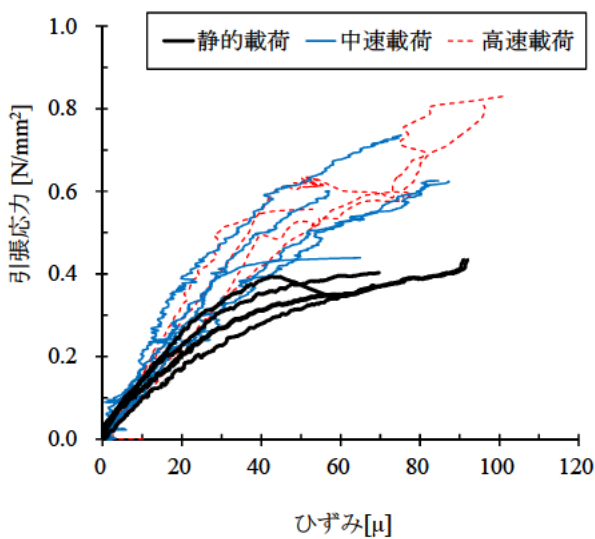
なお、各配合とも直接引張試験より割裂引張試験で得られた引張強度の方が大きくなっている。この理由として、割裂引張試験では破壊面が固定されることや、載荷中に載荷板付近で変形が生じ、接触面積が増加して供試体の拘束が生じた可能性も考えられるが、円柱供試体での直接引張試験では締固め境界面にあたる位置（供試体高さ方向のほぼ 1/3 または 2/3 の位置）付近で破断したケースが多かったことや、角柱供試体での試験も実施したケース（K-I C）では円柱供試体より引張強度が大きかったことから、円柱供試体での直接引張試験では締固め境界面が弱面になり、この弱面で規定される引張強度が得られた可能性が高い。

* 載荷速度の区分は以下の通り。

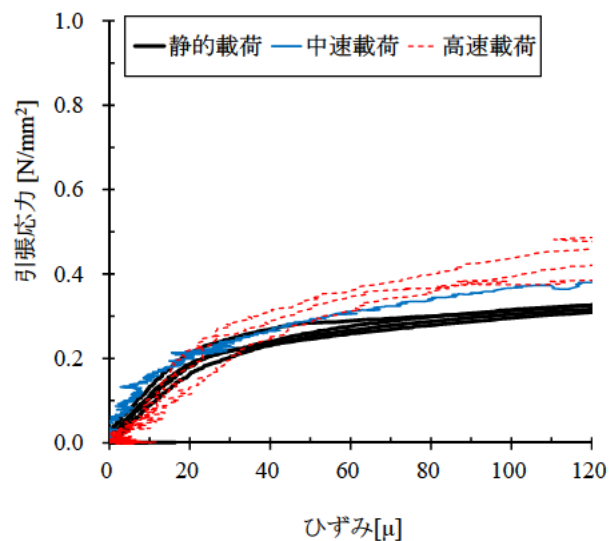
「静的載荷」：応力増加速度 $<1\text{N/mm}^2/\text{s}$ 、

「中速」： $1\text{N/mm}^2/\text{s} \leq$ 応力増加速度 $<100\text{N/mm}^2/\text{s}$ 、

「高速」：応力増加速度 $\geq 100\text{N/mm}^2/\text{s}$ 。



(a) K-I C 円柱供試体



(b) K-II B 円柱供試体

図-7.6 CSG 供試体の応力 - ひずみ曲線（直接引張試験）

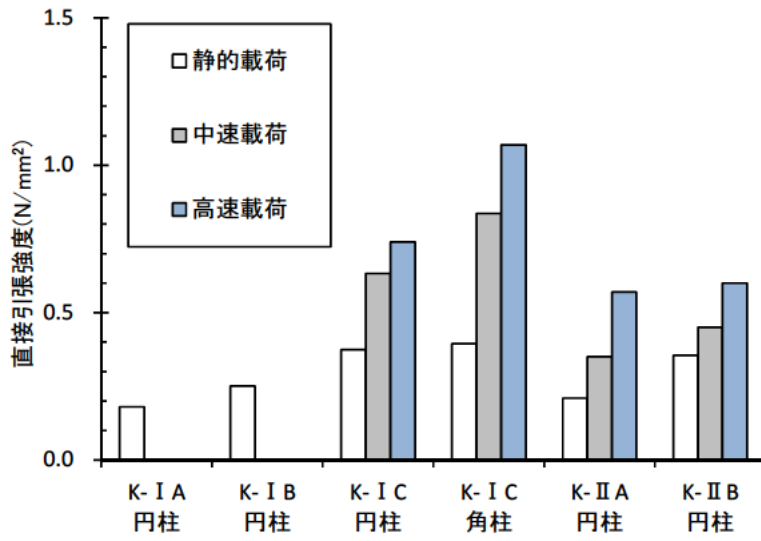


図- 7.7 直接引張強度（载荷速度区分別の比較）

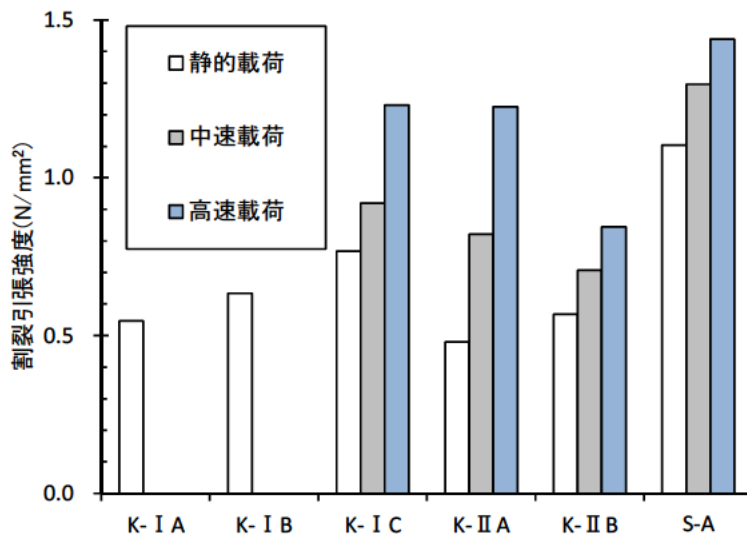


図- 7.8 割裂引張強度（载荷速度区分別の比較）

載荷速度の増加に伴う引張強度への影響をより定量的に評価するため、単調載荷での試験結果を対象に載荷速度（応力増加速度）と引張強度の関係を整理したものを図-7.9に示す。なお、2つの試験方法（直接引張試験、割裂引張試験）の結果を示している同図では、引張強度を両試験方法による静的載荷での全試験値の平均値で基準化した「引張強度増加率」で示している。

図-7.8には、本検討での試験結果の一部（K-I A、K-I B、K-I C および K-II A の供試体での単調載荷試験データ）をもとにした既往分析⁵⁾で得られた次の関係式（回帰式）も示しているが、この関係式で示されるように、載荷速度が増加すると引張強度が増加する傾向が認められる。

$$\frac{f_{td}}{f_{ts}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}_s}\right)^{0.0192} & : \dot{\sigma} \leq 10[N/mm^2/s] \\ 0.0253 \left(\frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}_s}\right)^{0.169} & : \dot{\sigma} > 10[N/mm^2/s] \end{cases} \quad (7.4)$$

ここに、

$\dot{\sigma}$: 応力増加速度[1/s]、

$\dot{\sigma}_s$: 静的載荷での応力増加速度[$1.0 \times 10^{-3} N/mm^2/s$]、

f_{td} : 応力増加速度 $\dot{\sigma}$ で載荷した時の引張強度[N/mm²]、

f_{ts} : 静的載荷での引張強度[N/mm²]。

なお、静的強度に対する増加率で表した引張強度の載荷速度に対する増加傾向は、今回の試験条件の範囲では試験方法（直接引張・割裂引張）や母材・配合が異なる各試験ケース間での明確な違いはみられない。

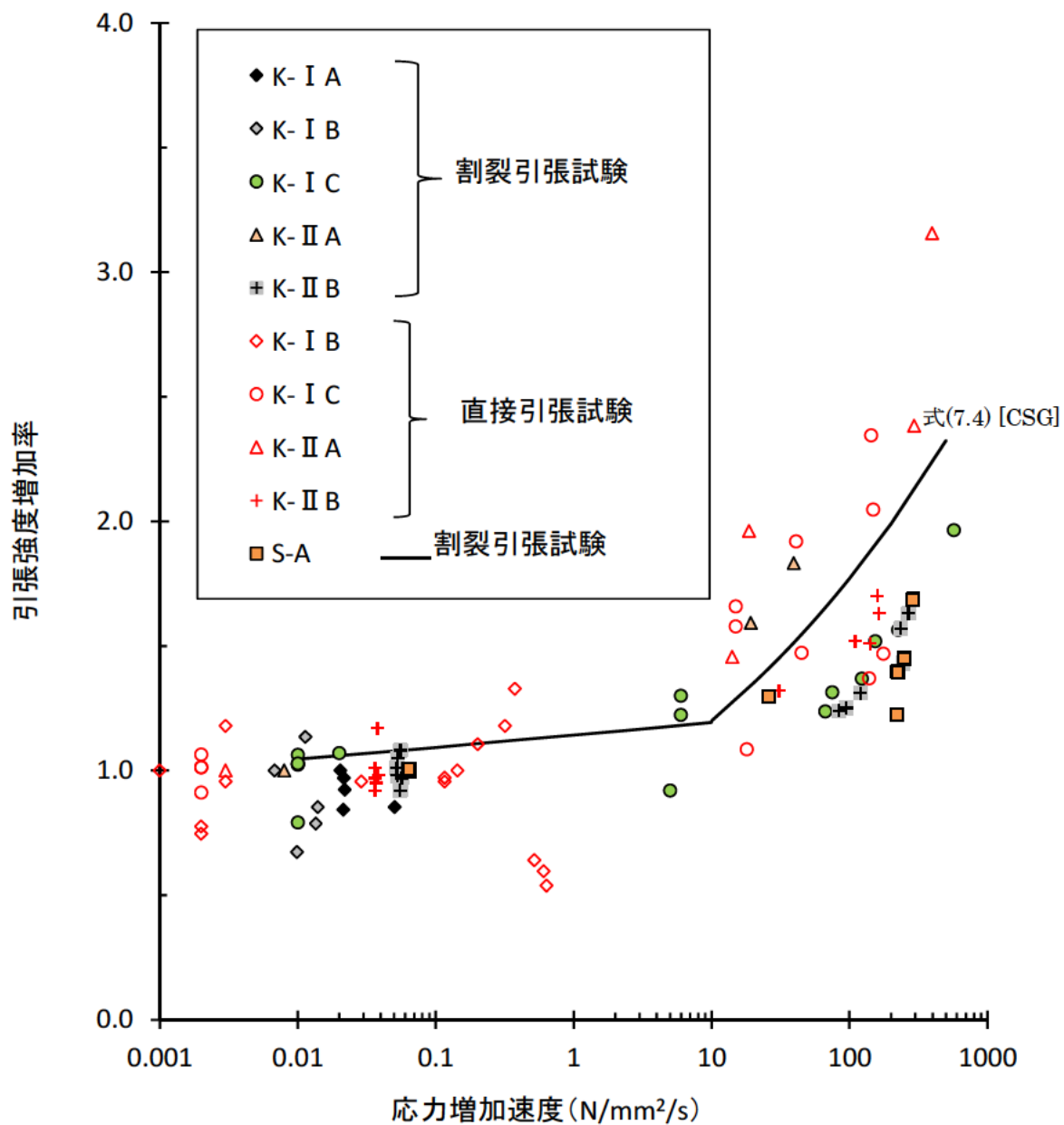


図- 7.9 応力増加速度と引張強度の関係

7.2.3 繰返し引張試験結果の考察

(1) 応力～ひずみ関係

繰返し引張試験結果のうち、静的載荷時における繰返し回数を 10 回とした試験で得られた応力～ひずみ曲線を図- 7.10 に示す。なお、図中の曲線は図- 5.3 に示したように割裂引張試験用供試体の両端面に貼付した計 2 枚のひずみゲージで得られたひずみの平均値とその時の荷重値をもとに次式で算出した応力の関係をプロットしている。

$$\sigma_{(t)} = \frac{2P_{(t)}}{\pi dL} \quad (7.5)$$

ここに、

$\sigma_{(t)}$: 時刻(t)での割裂引張試験での引張応力[N/mm²],

$P_{(t)}$: 時刻(t)での荷重[N],

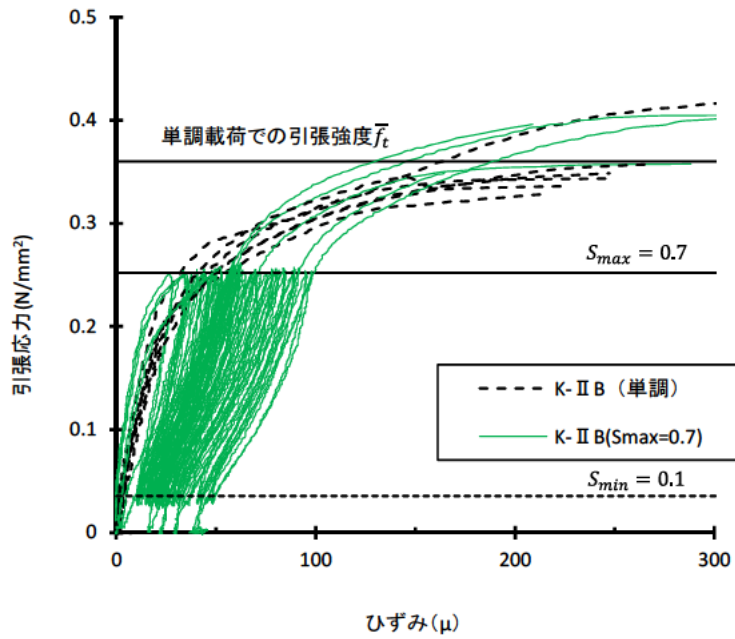
d : 供試体の直径[mm],

L : 供試体長さ[mm]。

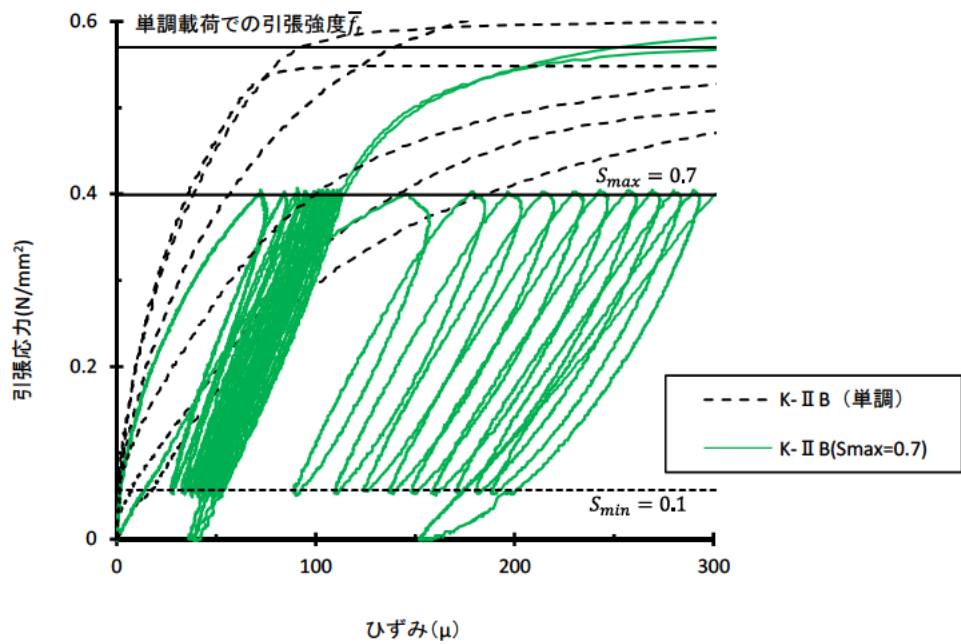
図- 7.10 より、各ケースとも繰返し載荷に伴い残留ひずみが生じ、以降徐々にひずみの蓄積が生じているが、各回の繰返し載荷に伴って生じる残留ひずみの大きさは、1 回目の載荷・除荷時のものが 2 回目以降に比べ大きい傾向がみられる。この原因としては、図- 7.11 に一例を示すように 1 回目の載荷における両端面のひずみゲージの値が相違する例が少なくないことから、1 回目の載荷・除荷時には載荷板と供試体上面が均等に接触せずやや一方に偏った載荷状態となっていた可能性が考えられる。この場合、供試体の若干の変形によるなじみによって、2 回目以降の載荷・除荷時にはほぼ供試体上面に均等に載荷される状態となったものと考えられる。

そこで、上述したような影響を取り除くため 1 回目の載荷・除荷後の残留ひずみをひずみの計測値から差し引く補正を行った応力～ひずみ曲線を図- 7.12 に示す。図- 7.12 によると事前繰返し載荷中の応力～ひずみ履歴は塑性領域に至ったと思われる一部供試体（図- 7.12 (a)の 1 本（直接引張）および同(b)の 1 本（割裂引張））を除き、多くの供試体では概ね一定の傾きを保って、10 回目までの繰返し載荷での残留ひずみ（ひずみゲージ 2 本の平均）は大きくても 15 μ 程度であった。なお、残留ひずみがこれより大きくなった 2 本の供試体のうち直接引張のもの（図- 7.12 (a)）の 1 本は打継面が弱面となってひずみが大きくなった可能性が考えられる。また、割裂引張での供試体（図- 7.12 (b)）の 1 本は両端面の一方のみ残留ひずみがかなり大きくなっており（図- 7.11(a)）、載荷板からの荷重の偏りが大きかったことが原因として考えられる。

また、当初の予想では、繰返し載荷での最大応力比 S_{max} が大きくなるほど残留ひずみが大きくなり、同一応力レベルにおける応力～ひずみ曲線の勾配は小さくなることを想定したが、同一材料（母材・配合）の供試体での割裂引張試験で S_{max} を種々変化させたケース S-A（図- 7.12(c)～(f)）を比較しても、必ずしもそのようになっていない。この理由としては、繰返し載荷での最大応力比 S_{max} が大きくなると供試体の載荷板との接触部が変形して接触面積が増加し、以降の繰返し載荷中の応力振幅が実際には荷重値から求める応力値よりもやや小さくなったことで、 $S_{max}=0.9$ や 0.8 のケースにおいても S_{max} がこれより小さいケースと同様にほぼ弾性範囲内の繰返し載荷となっていたことなどが考えられる。

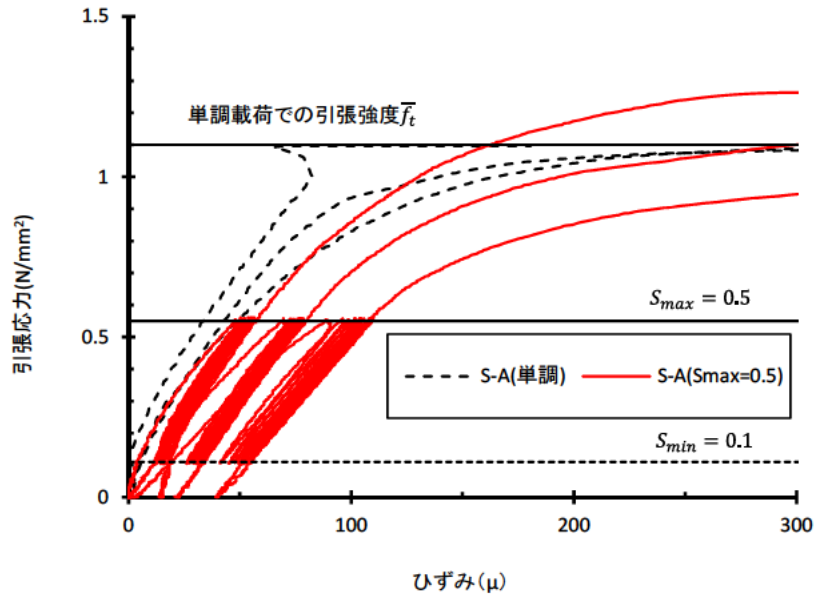


(a) K-II B [直接引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.7$ ($n=6$)

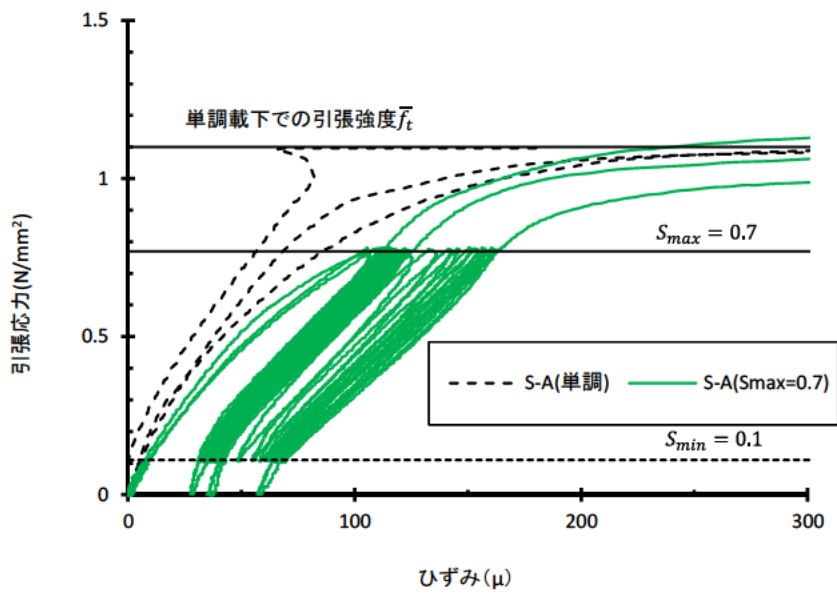


(b) K-II B [割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.7$ ($n=3$)

図- 7.10(1) 応力-ひずみ曲線 (事前繰返し 10 回、 n : 供試体本数)

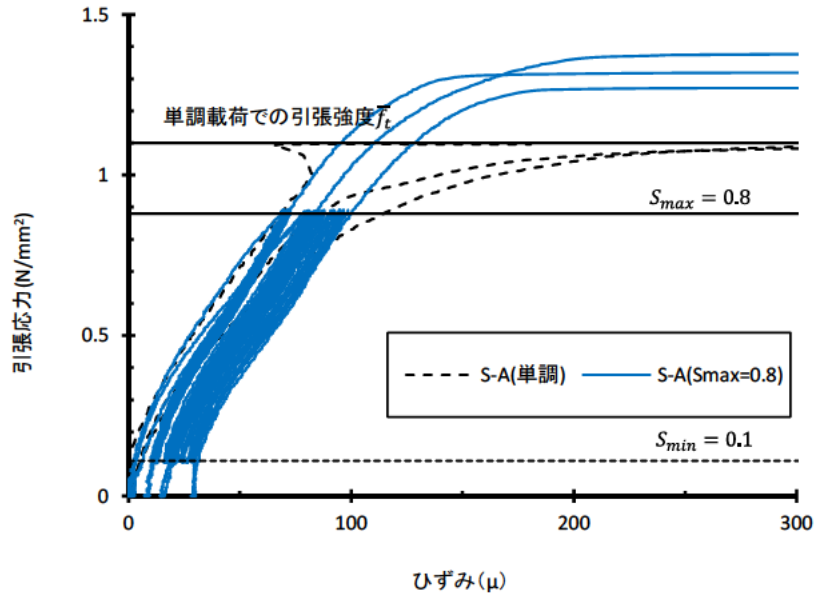


(c) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.5$ ($n=3$)

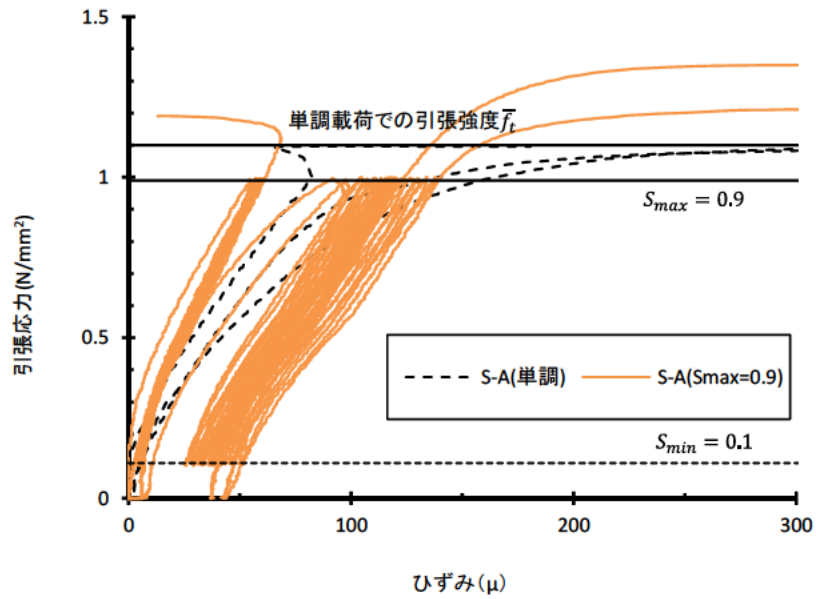


(d) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.7$ ($n=3$)

図- 7.10(2) 応力-ひずみ曲線 (事前繰返し 10 回、 n : 供試体本数)

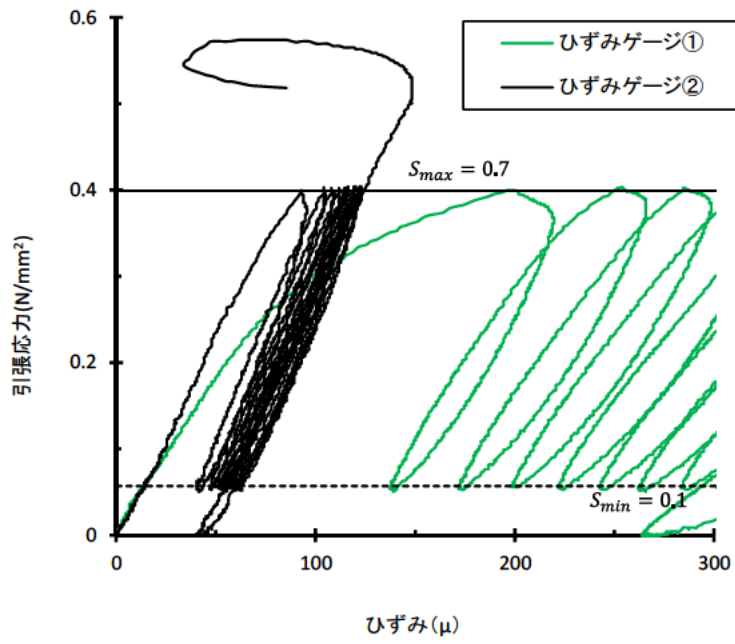


(e) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.8$ ($n=3$)

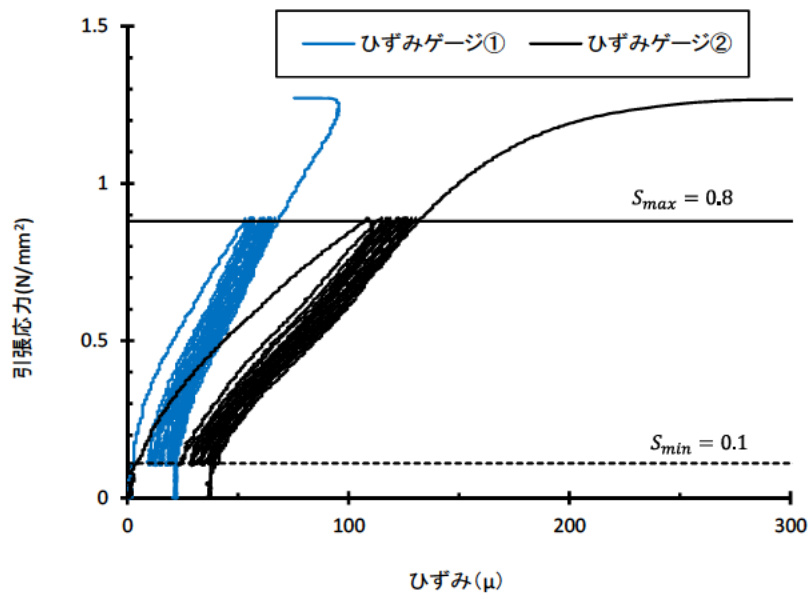


(f) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.9$ ($n=3$)

図- 7.10(3) 応力 - ひずみ曲線 (事前繰返し 10 回、 n : 供試体数)

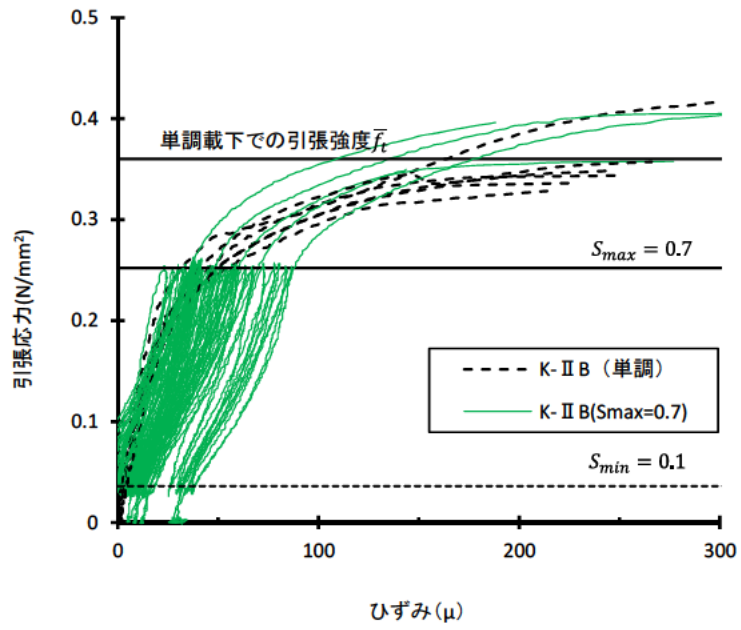


(a) K-II B[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.7$

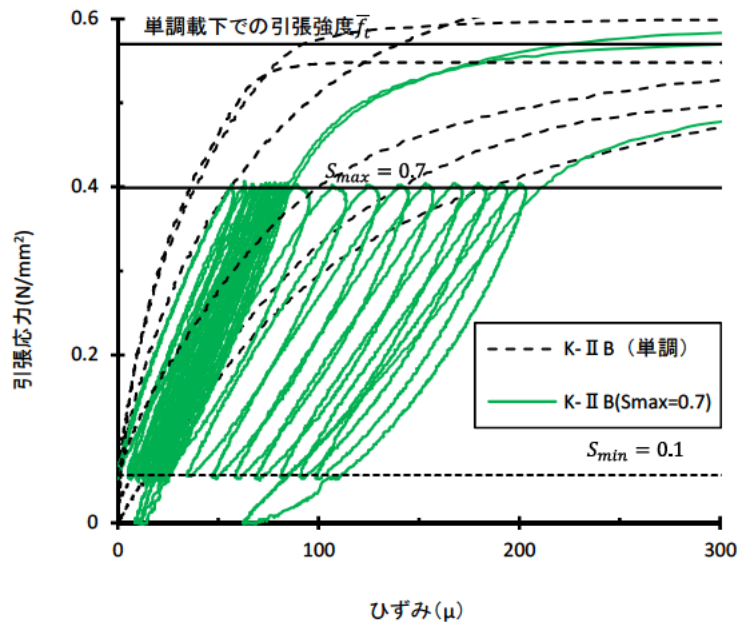


(b) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.8$

図- 7.11 応力-ひずみ曲線の一例 (ひずみゲージ表・裏の各値)

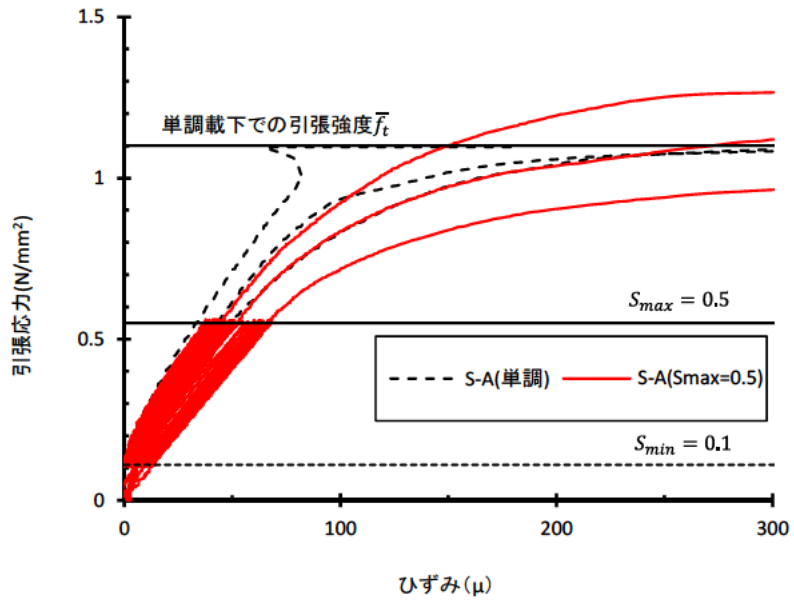


(a) K-II B[直接引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.7$ (n=6)

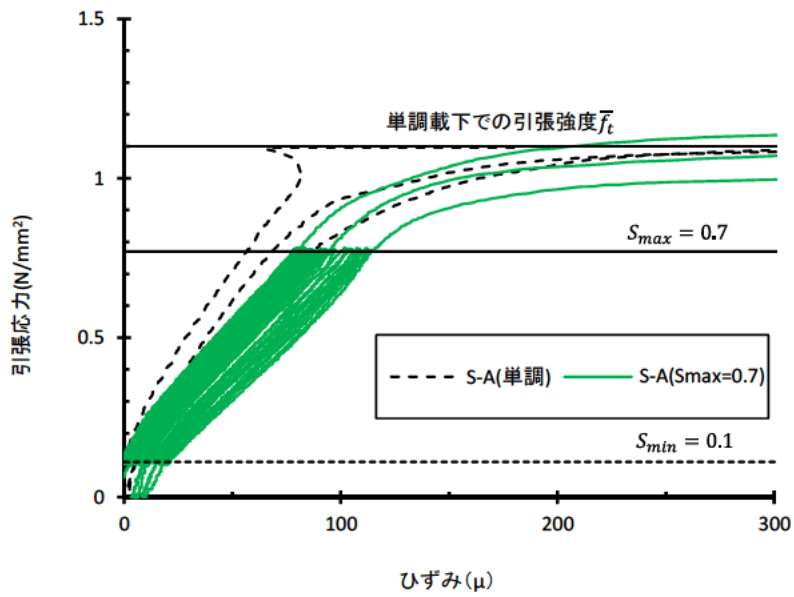


(b) K-II B[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.7$ (n=3)

図- 7.12(1) 補正処理を行った応力-ひずみ曲線 (事前繰返し 10 回、n: 供試体数)

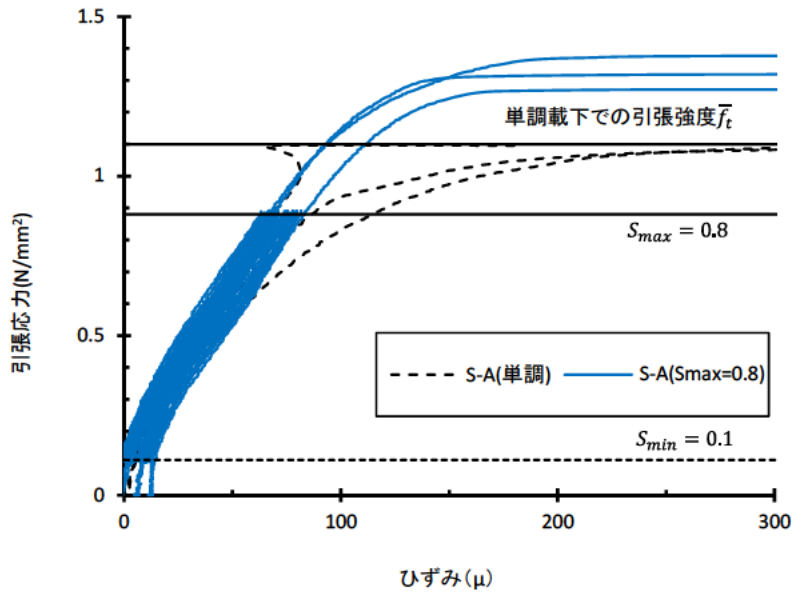


(c) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.5$ ($n=3$)

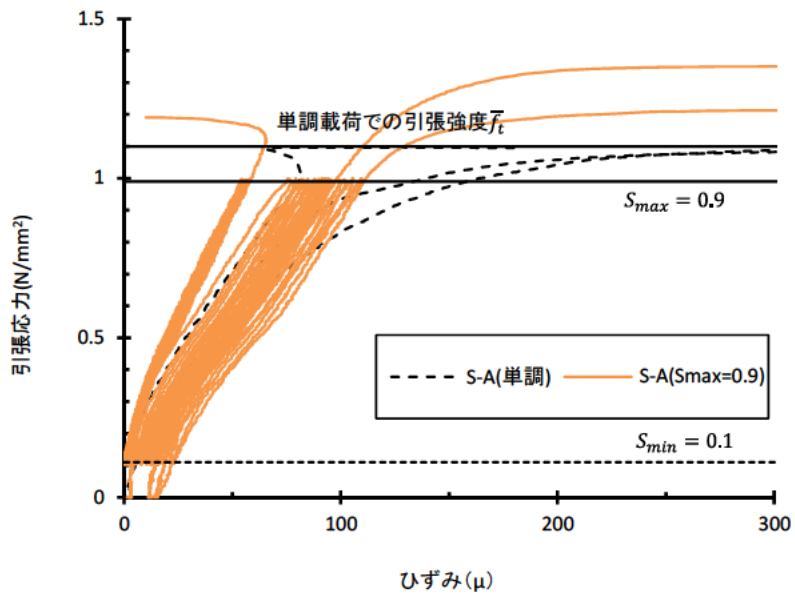


(d) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.7$ ($n=3$)

図- 7.12(2) 補正処理を行った応力-ひずみ曲線 (事前繰返し 10 回、 n : 供試体数)



(e) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.8$ ($n=3$)



(f) S-A[割裂引張] 最大応力比 $S_{max} = 0.9$ ($n=3$)

図- 7.12(3) 補正処理を行った応力-ひずみ曲線 (事前繰返し 10 回、 n : 供試体数)

(2) 繰返し载荷による引張強度への影響

事前繰返し载荷での試験を行った各ケース（母材・配合）について、繰返し载荷後の引張試験（直接引張試験及び割裂引張試験）で得られた引張強度と载荷速度（応力増加速度）との関係を図- 7.13 に示す。また、载荷速度の区分（低速、中速、高速）の別に最大応力比 S_{max} と引張強度の関係を整理したものを図- 7.14 に示す。

これらの図より、事前に繰返し载荷を行った場合も含め、引張強度は载荷速度が速くなると全般に増加する傾向にある。また、繰返し载荷による影響については、図- 7.12 中の直接引張試験での結果（ケース K-II B）に着目すると、ややその影響が認められる。すなわち、载荷速度が増加した場合に単調载荷より事前繰返し载荷を行った場合の方が静的強度に対する引張強度の増加率が小さくなっている。しかし、それ以外の試験結果（割裂引張によるもの）では繰返し载荷による影響は明らかでない。この理由として、供試体のばらつきのほか、ここでの試験条件（事前繰返し回数 10 回）の範囲内では、7.2.3(1) で述べた割裂引張での繰返し载荷中に生じる可能性のある供試体の変形による影響が小さくなかったことなどが考えられる。

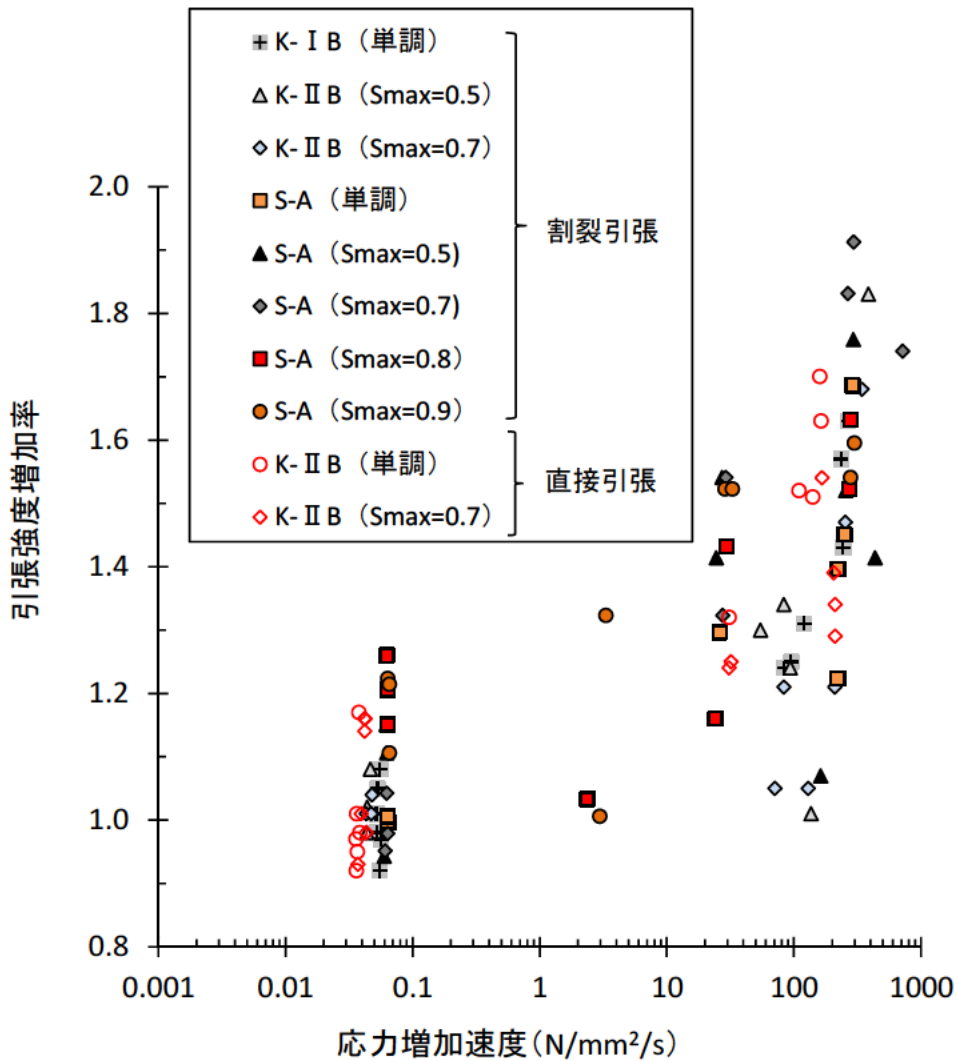


図- 7.13 応力増加速度と引張強度の関係（事前繰返し载荷 10 回）

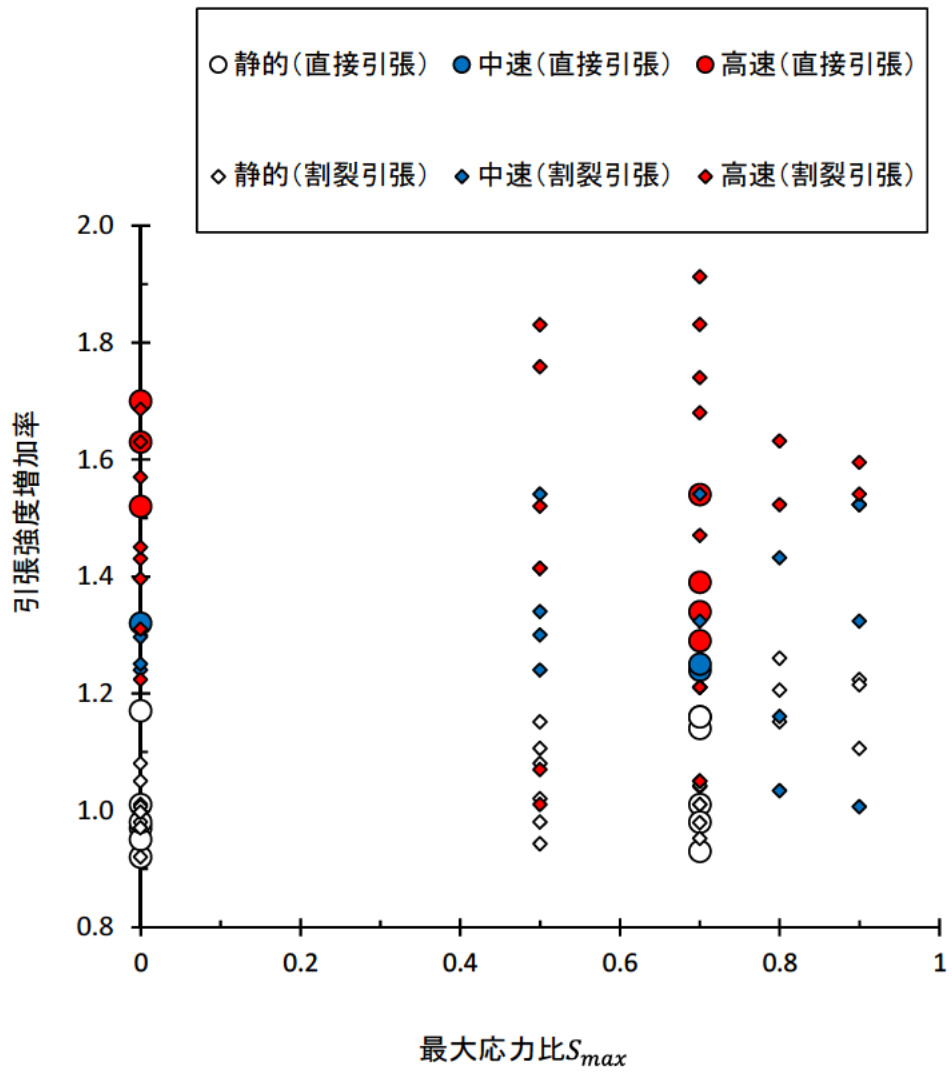


図- 7.14 最大応力比と引張強度の関係 (最少応力比 $S_{min}=0.1$ 、事前繰返し载荷 10 回)

(3) 引張疲労強度

引張疲労試験を実施するに先立ち、単調荷重での割裂引張試験を実施した結果を表-7.4に示し、割裂引張による繰返し回数を最大100回（一部200回）までとして実施した引張疲労試験の結果を表-7.5に示す。同表中の N_r は最大応力比 S_{max} が同一条件（最小応力比 S_{min} は全ケース同一）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、繰返し荷重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¹⁰⁾に基づく疲労寿命 N_r での生存確率^{11)、12)、13)}（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。なお、所定の上限回数（100回または200回）までの事前繰返し荷重でも破壊しなかったものは、「(上限回数)→」と記載し、その後静的荷重速度での単調荷重を行って引張破壊させた。

なお、 $p(N_r)$ の算出は、浜田ら¹¹⁾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(7.6)、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(7.7)により算出した。

$$p(N_r) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad (7.6)$$

$$p(N_r) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad (7.7)$$

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]、

$p(N_r)$ ：疲労寿命 N_r での生存確率の期待値。

表-7.4 割裂引張試験一覧（平成27年度）

実施年度	ケース名 (母材・配合)	荷重パターン	供試体密度比 (%)	最大荷重 (kN)	強度 (N/mm ²)		荷重速度		区分
					各値	強度比*	応力増加速度 (N/mm ² /s)	ひずみ速度 (1/s)	
H27	S-A' [円柱]	単調	98.2	64.4	1.14	0.95	0.052	7.58E-04	静的
			98.2	71.5	1.27	1.06	0.052	7.09E-04	
			98.2	72.2	1.27	1.06	0.060	4.72E-04	
			98.2	71.8	1.26	1.05	0.063	4.99E-05	
			97.7	63.4	1.12	0.93	0.060	5.04E-04	
			98.4	63.8	1.13	0.94	0.058	4.31E-04	

*「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的荷重での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

表- 7.5 引張疲労強度試験結果

実施年度	ケース名 (母材・配合)	最大応力比* S_{max}	順位 r	疲労寿命 Nr	生存確率の期待値 $p(Nr)$	上限回数後の単調荷での 引張強度(N/mm ²)			
						各値	強度比**		
H27	S-A' [円柱]	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%				
H26	S-A [円柱]		10	68	28.6%				
			11	100→				1.03	0.93
			12	100→				1.32	1.20
H27	S-A' [円柱]	0.75	1	83	80.0%				
			2	119	60.0%				
		0.7	3	200→				1.13	0.94
			1	100→				1.10	0.92
			1	100→				1.21	1.01
			1	100→				1.23	1.03
			1	100→				1.24	1.03
			1	100→				1.08	0.90
			1	100→				1.10	0.92

* 最小応力比 S_{min} はすべて0.1。

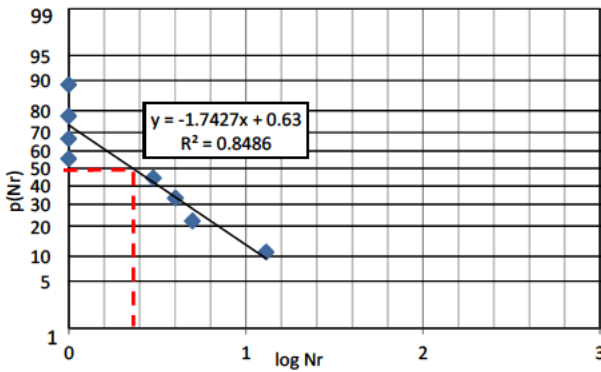
** 「強度比」は同一ケース（母材・配合）の単調・静的荷での引張強度（試験値の平均値）に対する比。

$p(N_r)$ と N_r の関係を正規確率紙上にプロットしたものを図-7.15に示す。同図中には、最小二乗法による近似直線も示している。

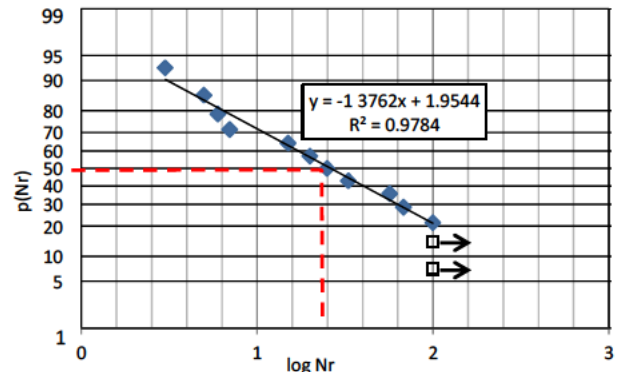
また、図-7.15の各図中に示した上記の近似直線をもとに、最大応力比 S_{max} ごとの疲労寿命 N_r の平均値 $\overline{N_r}$ を生存確率の期待値 $p(N_r)$ が50%になる回数として算出し、 S_{max} との関係をプロットしたものが図-7.16である。同図中には、最小二乗法により原点($S_{max}=1, \log \overline{N_r}=0$)を通る直線として求めた曲線(CSGのS-N曲線)も示している。比較のため、一般のコンクリート及び軽量骨材を用いたコンクリートのS-N曲線^{14) 15)}もあわせて示している。ただし、これらは主に繰返し回数が多い試験結果(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-7.16によれば、今回の試験に用いたCSGの引張繰返し荷重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。

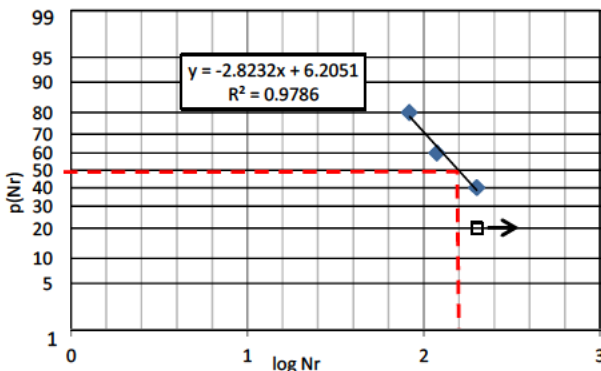
このような繰返し荷重による影響は、実際に考慮する地震動の特性や推定される応力履歴を踏まえて検討する必要があると考えられるが、6.2.3(2)で検討した既往観測地震動に基づく応力履歴(応力振幅と繰返し回数の関係)の試算例(図-6.5)のほか、台形CSGの設計では引張応力に対しても一定の強度安全率が考慮されることや、地震時のような急速荷重条件では7.2.2(2)に示したように引張強度の増加が見込まれることなども考慮すると、繰返し荷重による影響が特に耐震性の面で問題となるケースは少ないと考えられる。



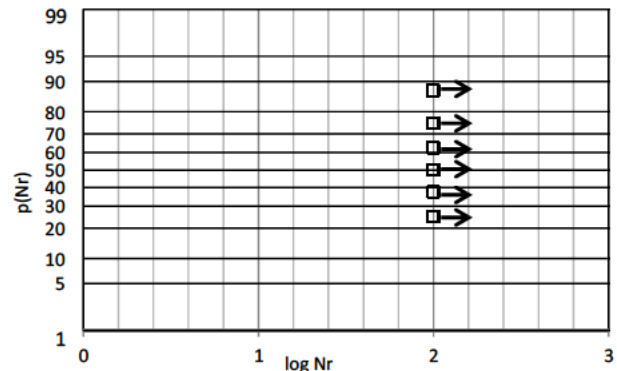
(a) 最大応力比 $S_{max} = 0.9$



(b) 最大応力比 $S_{max} = 0.8$

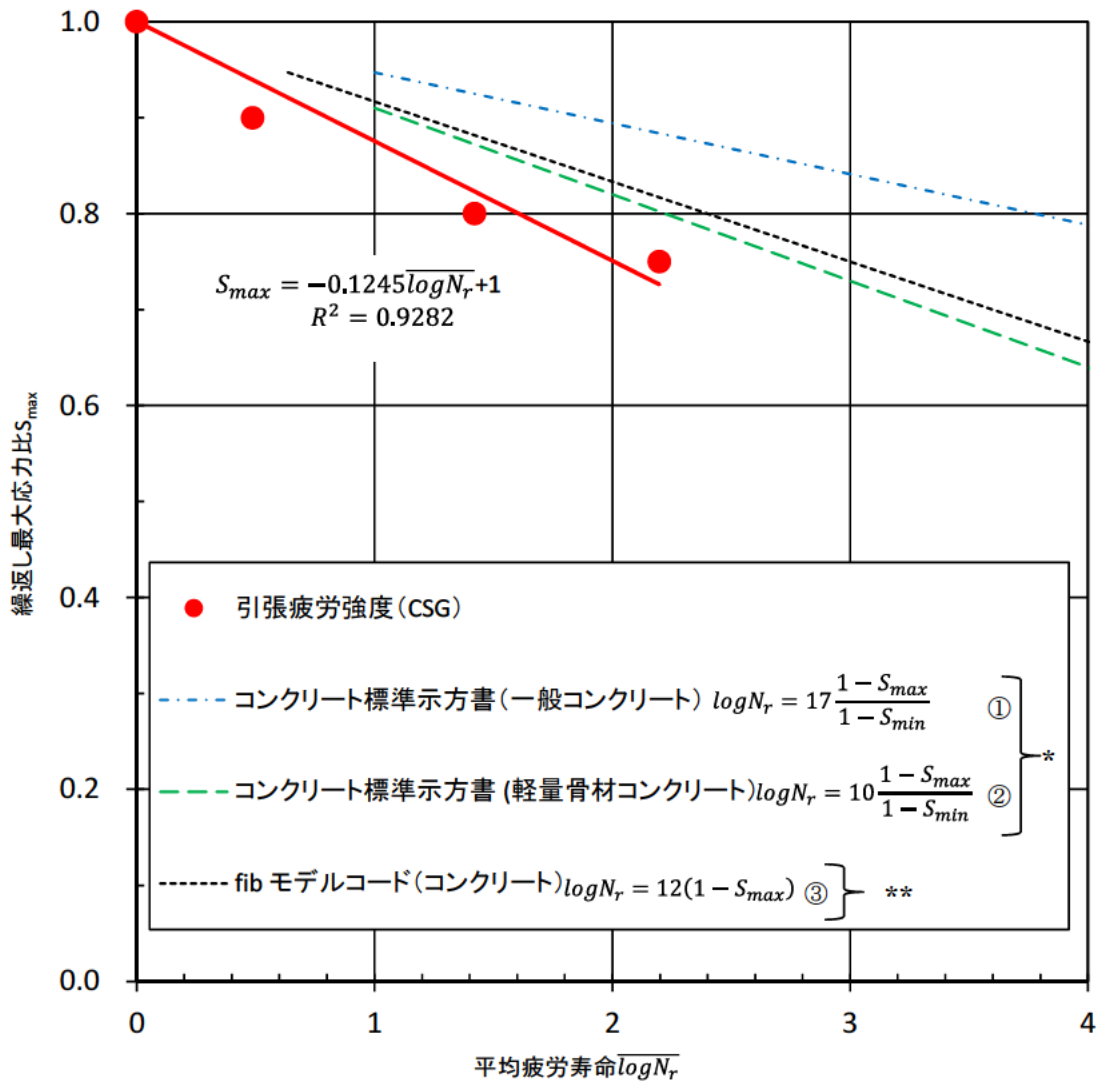


(c) 最大応力比 $S_{max} = 0.75$



(d) 最大応力比 $S_{max} = 0.7$

図-7.15 CSG供試体の引張疲労寿命と生存確率の関係(最小主応力比 $S_{min}=0.1$)



* コンクリート標準示方書¹⁴⁾に記載されている式①は、一般のコンクリートの設計疲労強度の式のベースになった既往実験結果に基づく平均的な関係式。式②は式①での係数(=17)を軽量骨材コンクリートに対する設計疲労強度式での係数(=10)とした式。

** fibモデルコード¹⁵⁾の式は、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。

図- 7.16 引張繰返し载荷での最大応力比 S_{max} と平均疲労寿命 $\overline{\log N_r}$ の関係

7.3 破壊エネルギー試験

7.3.1 試験結果

破壊エネルギー試験結果（試験で得られた荷重-CMOD 曲線から求めた破壊エネルギー）の一覧を表-7.6、試験で得られた荷重-CMOD 曲線を図-7.17 および図-7.18 にそれぞれ示す。

なお、表-7.6 中の破壊エネルギーの値は、試験で得られた荷重-CMOD 曲線をもとに次式⁶⁾により求めた。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \times 1000 \quad (7.8)$$

ここに、

G_F : 破壊エネルギー[N/m]、

W_0 : 供試体破断までの荷重-CMOD 曲線化の面積[N・mm]、

W_1 : 供試体破断までに供試体の自重および載荷器具がなす仕事[N・mm]、

A_{lig} : リガメント面積[mm²]。

なお、 W_1 は次式で求められる。

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_C \quad (7.9)$$

ここに、

m_1 : 供試体の質量[kg]、

S : 載荷スパン[mm]、

L : 供試体全長[mm]、

m_2 : 試験機に取り付けておらず、破断するまでに供試体に載っている治具の質量[kg]、

g : 重力加速度[m/s²]、

$CMOD_C$: 破断時における CMOD[mm]。

また、荷重-CMOD 曲線は、図-7.17 では母材・配合が異なる全ケースの基準速度での静的試験で得られたもの、図-7.18 では母材・配合が異なるケース別に試験速度（CMOD 速度）が異なるケースの荷重-CMOD 曲線を重ねて示している。ただし、これらの図では、試験前（脱型時）に切欠き周辺にひび割れが見られたり、試験後の破断面観察において破断面に大きな骨材が確認され試験値が著しく過大と考えられた供試体（表-7.6 の**を付したもの）のデータは表示していない。このため、ケース K-I A のみ急速試験は 10mm/min のケースのみとなった。

表- 7.6(1) 破壊エネルギー試験結果一覧

ケース名 (母材・配合)	供試体名	CMOD 速度 (mm/min)	破断時 最大荷重 (kN)	最大荷重時 CMOD(mm)	破壊エネルギー G _F (N/m)	破壊エネルギー G _F 増加率*	荷重パターン
K-I A	HC1-2	0.1	1.82	0.106	133.000	1.000	単調荷重
	HC1-4	0.1	1.93	0.109	137.000	1.030	
	HC1-5	0.1	1.77	0.088	129.000	0.970	
	HC1-3	10	1.46	0.182	190.000	1.429	
	HC1-6	10	1.96	0.104	102.000	0.767	
	HC1-9	10	3.72	0.102	239.000	1.797	
K-I B	HC2-1	0.1	2.81	0.097	172.000	1.000	
	HC2-2**	0.1	2.69	0.105	258.000	—	
	HC2-3	0.1	3.06	0.103	172.000	1.000	
	HC2-4	10	2.56	0.120	176.000	1.023	
	HC2-5	10	2.77	0.102	230.000	1.337	
	HC2-6	10	2.61	0.125	160.000	0.930	
	HC2-12	10	3.51	0.089	254.000	1.477	
	HC2-7	100	3.14	0.269	195.000	1.134	
	HC2-8***	100	2.82	0.284	169.000	0.983	
	HC2-10	100	2.22	0.294	194.000	1.128	
	HC2-11***	100	3.28	0.252	268.000	1.558	
K-I C	HC-1	0.1	2.30	0.044	115.000	1.095	
	HC-2	0.1	2.48	0.033	121.000	1.152	
	HC-3	0.1	2.60	0.042	79.000	0.752	
	HC-5	10	3.17	0.063	134.000	1.276	
	HC-6	10	3.29	0.056	145.000	1.381	
	HC-4	100	3.61	0.193	167.000	1.590	
K-II B	1	0.1	2.65	0.044	118.000	1.149	
	2	0.1	2.78	0.032	91.000	0.886	
	3	1	2.62	0.065	99.000	0.964	
	4	10	3.24	0.045	155.000	1.510	
	5***	100	2.55	0.067	98.000	0.955	
	6***	100	3.26	0.336	188.000	1.831	

* 「破壊エネルギー増加率」は同一ケース（母材・配合）の基準速度での静的試験での平均値に対する比率。

** 試験後の破断面観察において、破断面に大きな骨材が確認され、試験値が著しく過大と考えられ、結果から除外した。

***荷重-CMOD 曲線が滑らかでなく、逆解析による引張軟化曲線の推定が出来なかった供試体。

表- 7.6(2) 破壊エネルギー試験結果一覧

ケース名 (母材・配合)	供試体名	CMOD 速度 (mm/min)	破断時 最大荷重 (kN)	最大荷重時 CMOD(mm)	破壊エネルギー G _F (N/m)	破壊エネルギー G _F 増加率*	荷重パターン
K-II B	7	0.1	2.60	0.097	106.000	1.032	事前繰返し荷重 $S_{min}=0.1$ $S_{max}=0.7$ 10回
	8	0.1	2.60	0.104	108.000	1.052	
	9	10	3.19	0.047	115.000	1.120	
	10	10	2.98	0.045	117.000	1.140	
	11	100	3.83	0.217	248.000	2.416	
	12	100	2.51	0.271	133.000	1.295	
S-A	1	0.1	3.27	0.053	55.83	1.007	単調荷重
	2	0.1	3.38	0.047	65.99	1.191	
	3	0.1	3.14	0.036	44.44	0.802	
	4	10	4.18	0.050	87.37	1.576	
	5	10	4.52	0.043	104.70	1.889	
	6	10	3.74	0.045	103.58	1.869	
	7	100	1.85	0.086	80.11	1.446	
	8	100	1.29	0.160	75.00	1.353	
	9	100	3.52	0.034	120.26	2.170	
	10	100	1.03	0.104	80.31	1.449	
	11	100	3.91	0.069	133.02	2.400	
S-A'	1'	0.1	4.08	0.056	113.59	1.188	単調荷重
	6'	0.1	4.52	0.050	77.57	0.812	
	2'	10	3.33	0.068	91.56	0.958	
	7'	10	5.53	0.072	132.61	1.387	
	3'	100	4.46	0.082	161.97	1.695	
	4'	100	1.57	0.136	55.35	0.579	
	5'	100	4.84	0.056	98.69	1.033	
	8'	100	4.27	0.064	135.93	1.422	
	9'***	100	0.38	0.475	32.59	0.341	
	10'***	100	1.00	0.182	48.15	0.504	

* 「破壊エネルギー増加率」は同一ケース（母材・配合）の基準速度での静的試験での平均値に対する比率

** 試験後の破断面観察において、破断面に大きな骨材が確認され、試験値が著しく過大と考えられ、結果から除外した。

***荷重-CMOD 曲線が滑らかでなく、逆解析による引張軟化曲線の推定が出来なかった供試体。

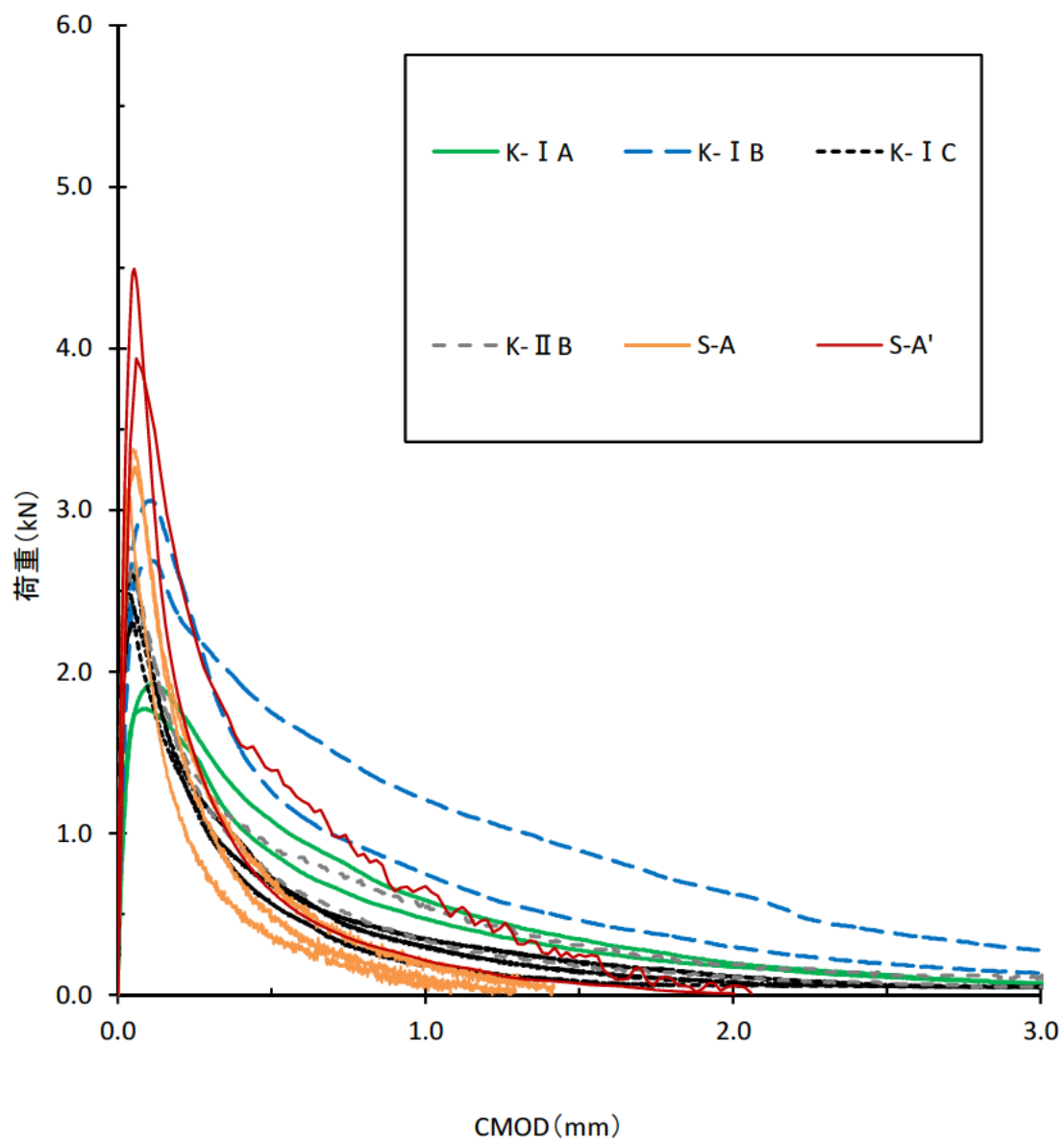
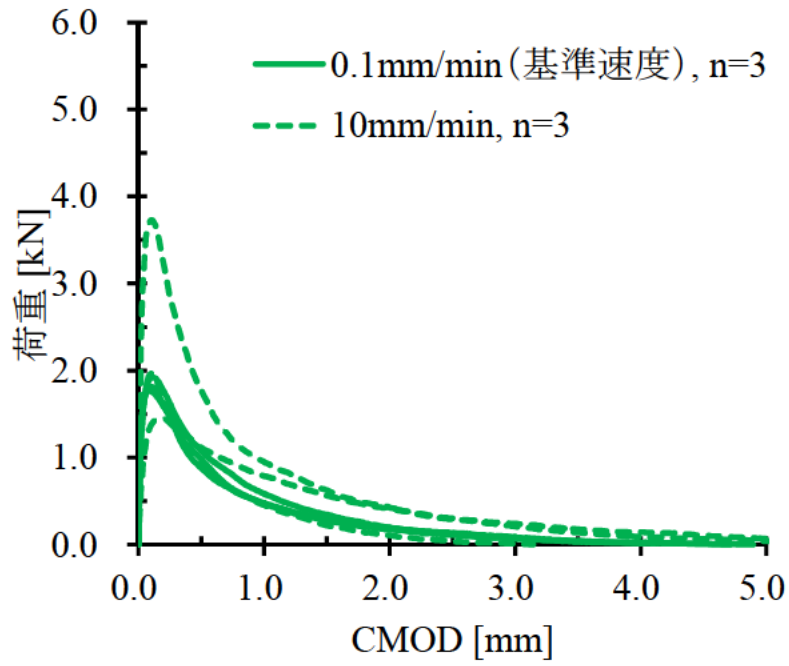
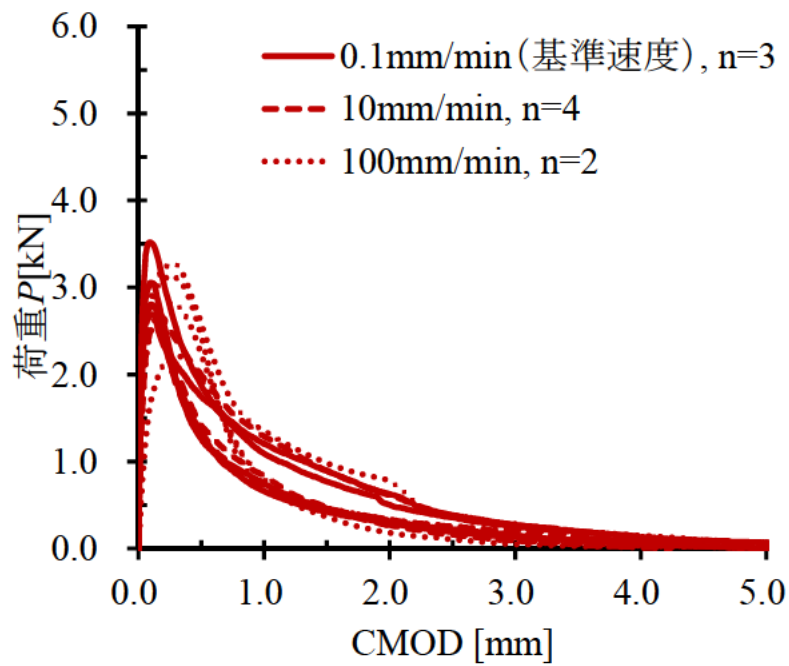


圖- 7.17 荷重-CMOD 曲線 (基準速度)

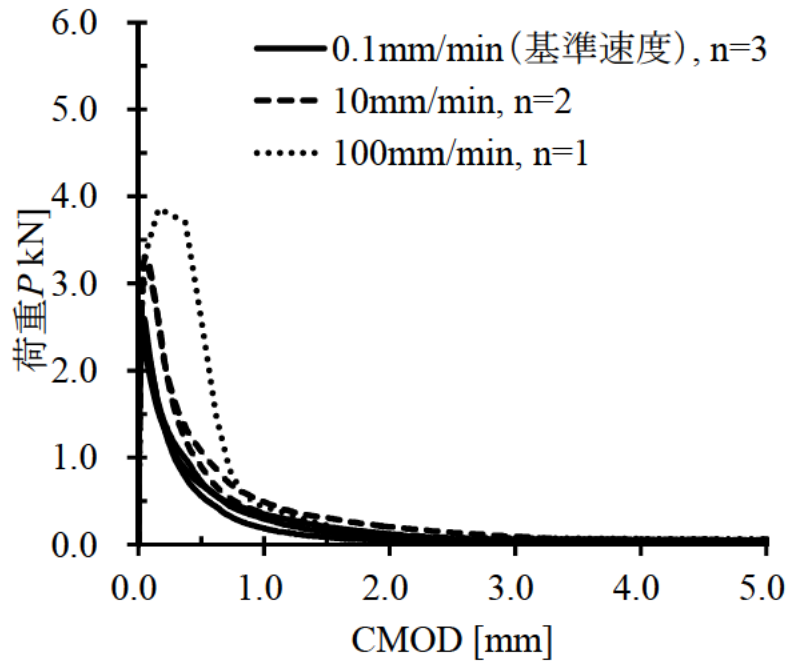


(a) ケース K-1A

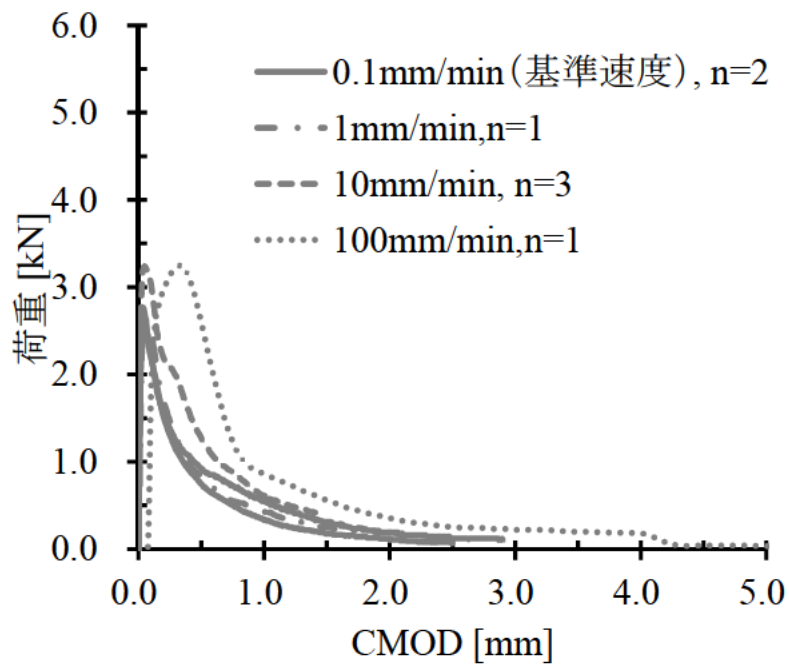


(b) ケース K-1B

図- 7.18(1) 荷重-CMOD 曲線 (n: 供試体数)

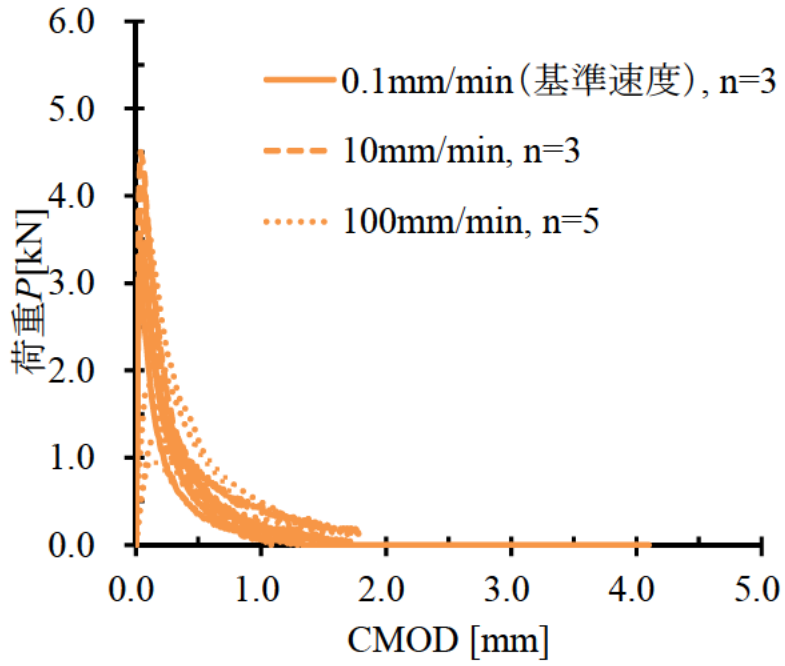


(c) ケース K-IC

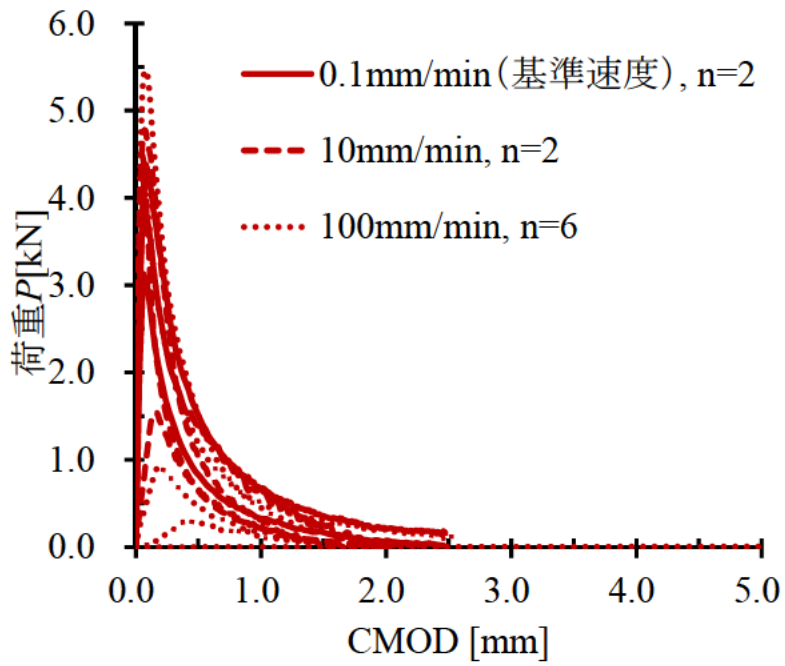


(d) ケース K-IIB

図- 7.18(2) 荷重-CMOD 曲線 (n : 供試体数)



(e) ケース S-A



(f) ケース S-A'

図- 7.18(3) 荷重-CMOD 曲線 (n : 供試体数)

7.3.2 試験結果の考察

(1) 荷重-CMOD 関係

図- 7.17 より、最大荷重は単位セメント量、密度比ともに小さい K-I A が最も小さく、引張強度が小さいことに対応しているものと考えられる。なお、同じダムで使用された母材を用いた中では、単位セメント量が多い K-IB や密度比が大きい K-IC での最大荷重はこれより大きい。ただし、最大荷重後の荷重低下は、K-IB では緩やかであるが、K-IC では急激に低下している。母材が異なるケース S-A および S-A' の傾向は比較的 K-IC と類似しており、最大荷重はさらに大きくなっている。このように、最大荷重は各材料の引張強度を反映し、最大荷重後の荷重低下は、破壊形態に対応すると考えられる。K-IC や S-A、S-A' では、他のケースに比べ脆性的な破壊が生じたと考えられる。

また、図- 7.18 より、試験速度が大きくなるほど最大荷重や最大荷重時の CMOD が増加しているケースが多いが、そのような傾向でない試験結果もある。

(2) 破壊エネルギー

表- 7.6 に示した CMOD 速度と破壊エネルギーの関係を図- 7.19 に示す。同図において、破壊エネルギーは基準速度での静的試験での平均値に対する比率（破壊エネルギー増加率）により示している。

図- 7.19 より、全般的には試験速度（CMOD 速度）が増加すると破壊エネルギーが大きくなる傾向が認められる。ただし、試験速度が大きくなるとばらつきが大きくなり、一部試験速度が大きくても静的試験に比べ破壊エネルギーの増加がほとんど見られないデータもある。

試験速度（載荷速度）が破壊エネルギーに及ぼす影響については、一般のコンクリートを対象とした藤掛らの研究¹⁶⁾があり、試験速度の増大とともに破壊エネルギーが増加することや、粗骨材とモルタルとの界面での付着破壊でなく粗骨材自身が破断するケースが多く見られるようになることが報告されている。CSG においても、載荷速度の増加に伴い破壊エネルギーが増加する傾向があることは、このような破壊形態の変化が関係している可能性が考えられる。K ダムで使用された母材を使用したケース K-I C では、試験速度が大きくなると概ね破壊エネルギーも増加し、試験後の破断面が平滑になる傾向がみられた（写真- 7.1）。

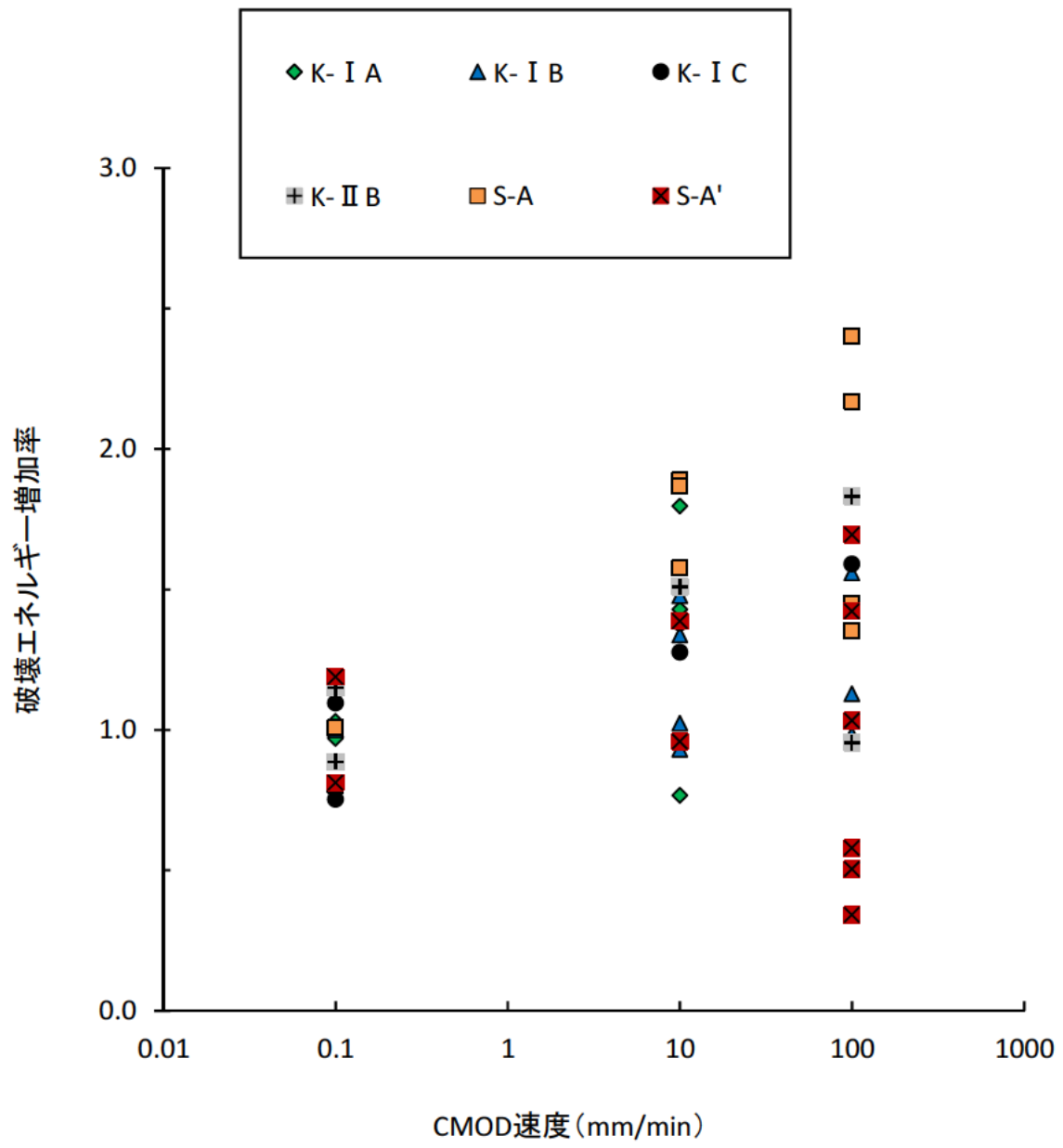
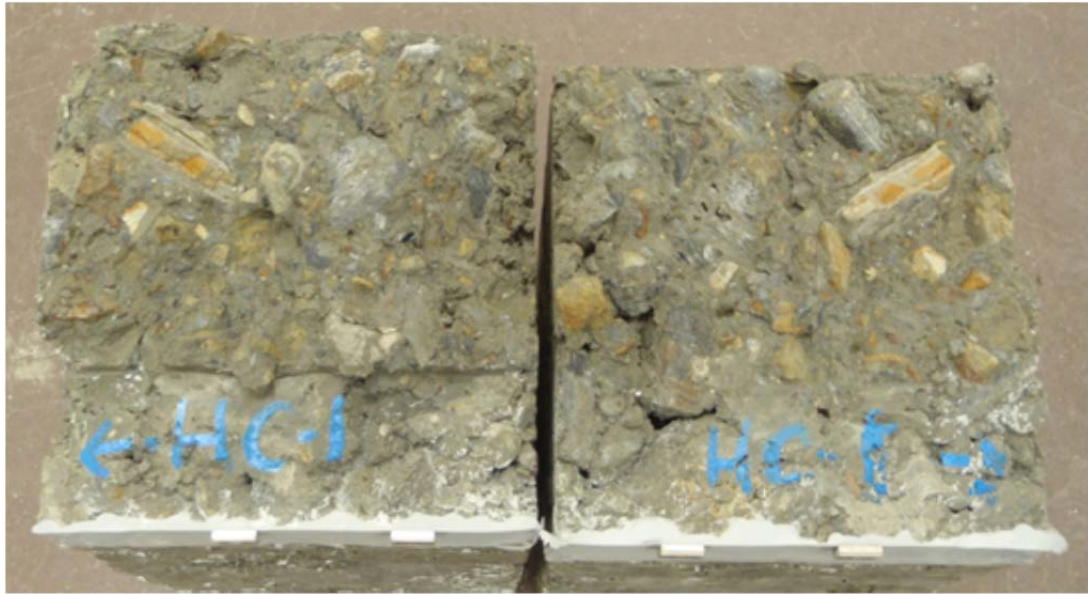
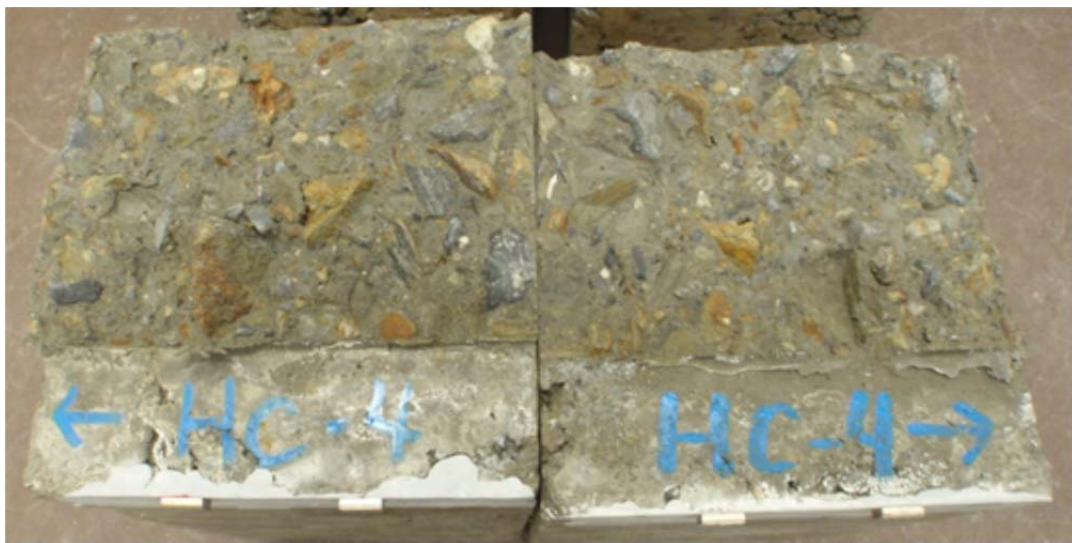


図- 7.19 CMOD 速度と破壊エネルギーの関係



(a) ケース K- I C (CMOD 速度 0.1mm/min: 基準速度)



(b) ケース K- I C (CMOD 速度 100mm/min)

写真- 7.1 破壊エネルギー試験後の供試体破断面 (ケース K- I C)

しかし、前述のとおり、試験速度（荷重速度）を増加させても破壊エネルギーが増加しない供試体も見られた。このため、該当する供試体が複数あったケース（S ダムで使用された母材を用いたケース S-A、S-A'）を対象に、その原因について、供試体の破断面の観察及び荷重中の荷重の増加速度に着目して検討した。

供試体の破断面の観察では、各供試体の破断面を目視により①骨材の破断（破断部）、②粗骨材とモルタルの界面の破断（剥がれ部）、③モルタル部分の破断（モルタル部）に区分した。破断面全体に対するこれら3つの領域の面積割合を整理した結果を図- 7.20 に示す。同図のとおり、破断面における3つの領域の面積割合が荷重速度によって明らかに変化するような傾向はみられない。

また、特に急速試験時の破壊エネルギーにばらつきが大きかったケース S-A'の供試体 (CMOD 速度 100mm/min での試験に用いたもの: 表- 7.6 中の供試体 No.3',4',5',8',9',10') を対象に、载荷中の荷重変化を確認した。図- 7.21 にその結果を示す。図中の凡例には、ほぼ直線的に荷重が増加している時間帯における単位時間当たりの荷重増加速度を付記している。図- 7.21 より、同ケースの供試体の一部に、他の供試体に比べ大幅に荷重増加速度が小さいもの (No.9',10') があることがわかる。

そこで、図- 7.19 に示した全データのうち、各ケース別にデータを抽出したもの図- 7.22 に示す。図- 7.22(f) のケース S-A'において、No.9', 10'の供試体のデータに着目すると、試験速度が大きいにも関わらず、特に破壊エネルギーが小さいデータに対応していることがわかる。このことから、該当する供試体では、破壊が生じる前から曲げ変形が大きく生じたものと考えられる。供試体の破断面付近における骨材 (CSG 材)、の入り方やその材質 (強度) は、供試体ごとに異なっていることが十分考えられ、その影響が試験結果に影響したものと考えられる。

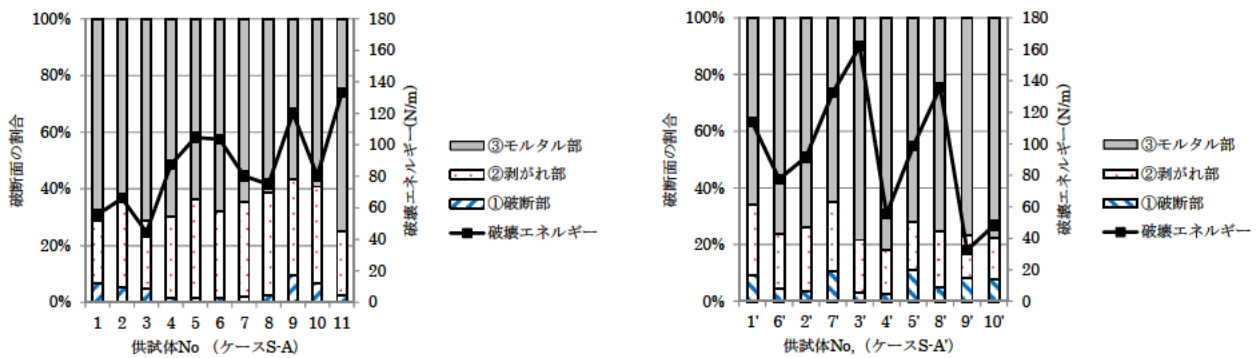


図- 7.20 供試体破断面の観察結果 (ケース S-A および S-A')

※ 図中の供試体 No.は表- 7.6 の供試体番号。

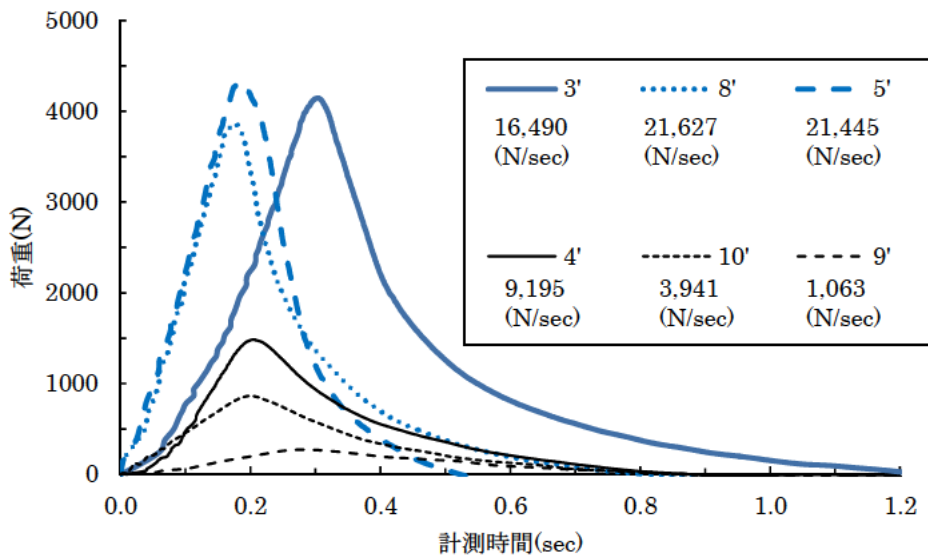
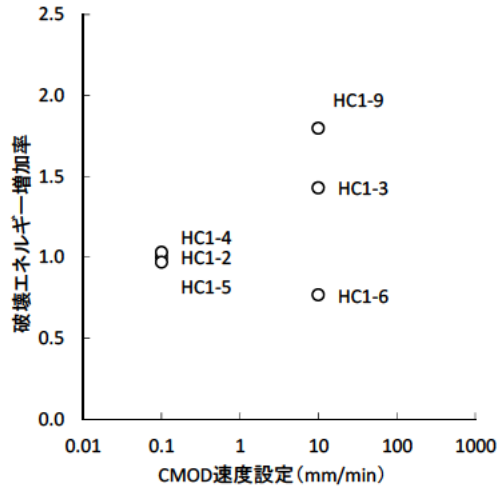
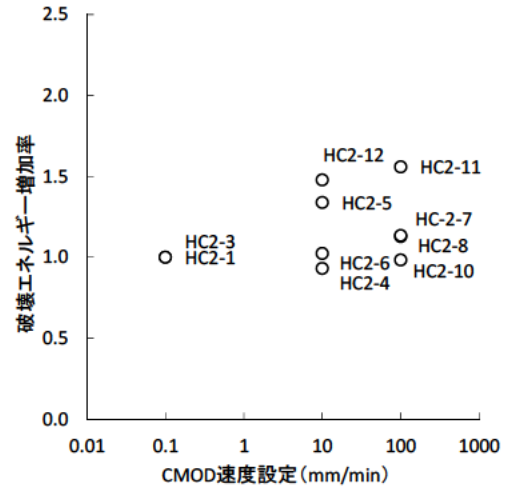


図- 7.21 荷重-計測時間の関係 (急速試験ケース S-A')

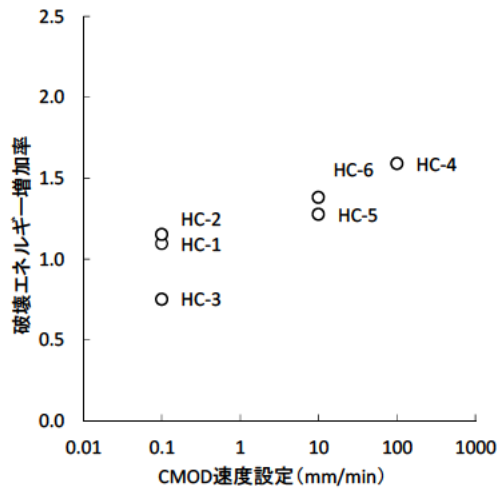
※ 図中の数字は表- 7.6 の供試体番号。



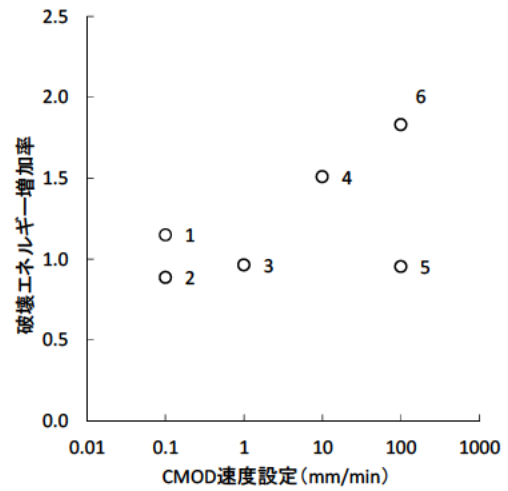
(a) ケース K-II A



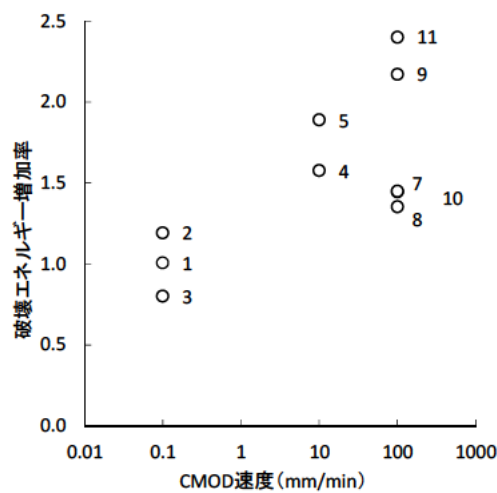
(b) ケース K-I B



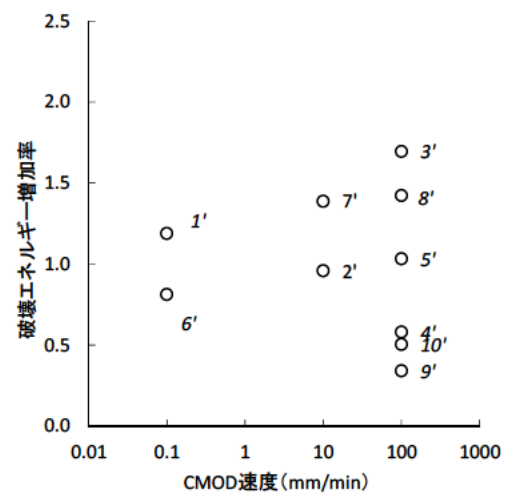
(c) ケース K-I C



(d) ケース K-II B



(e) ケース S-A



(f) ケース S-A'

図- 7.22 CMOD 速度と破壊エネルギーの関係

※ 個々のプロットに付けた数字は表- 7.6 の供試体番号。

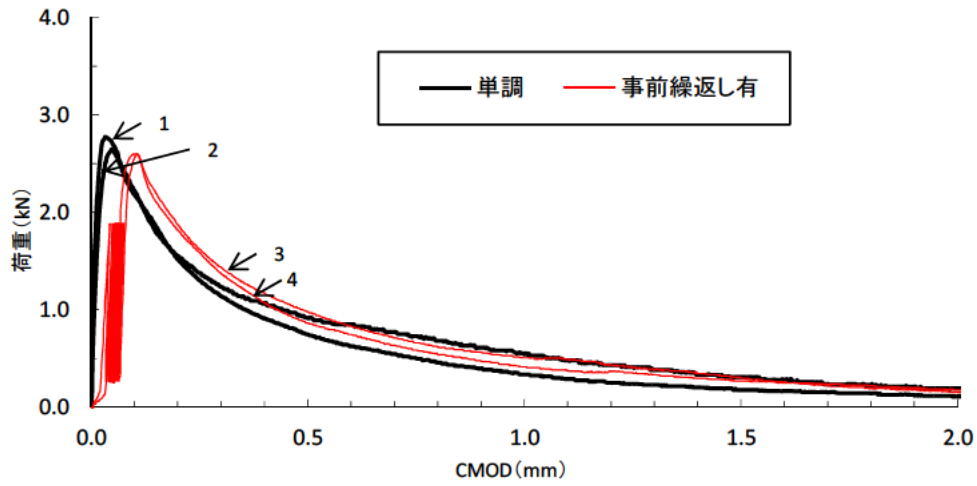
(3) 繰返し载荷による影響

繰返し载荷による破壊エネルギーへの影響を把握するために、一部の母材・配合ケース（K-II B）を対象に、単調载荷での破壊させる試験に加え、事前繰返し载荷を行った後に各種試験速度（CMOD 速度）で破壊させる試験も実施した。なお、事前繰返し载荷は、同一試験速度での単調载荷による破壊時の最大荷重に対する荷重比が最大荷重比 0.7、同最小荷重比 0.1 の範囲で行い、その際の試験速度（CMOD 速度）は全て基準速度、繰返し回数は 10 回とした。

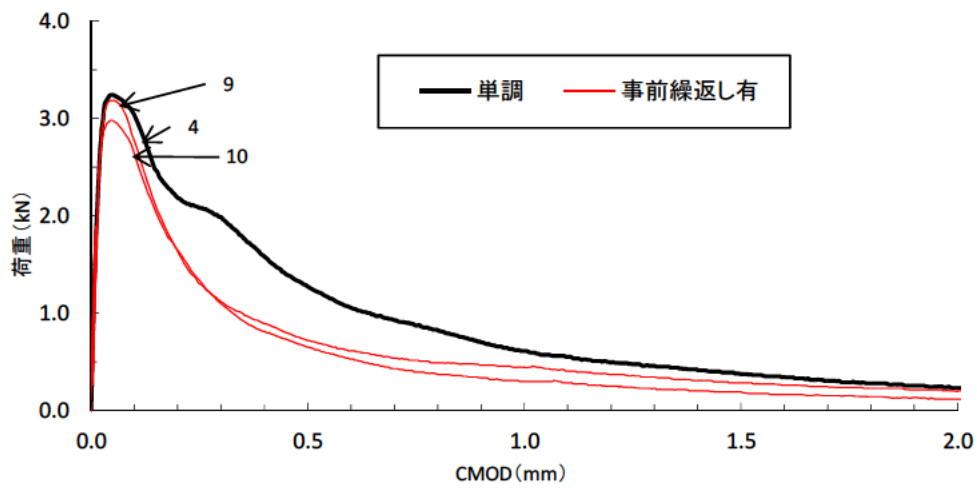
試験で得られた荷重-CMOD 曲線を図-7.23 及び同図の荷重-CMOD 曲線をもとに求めた破壊エネルギーと試験速度（CMOD 速度）の関係を図-7.24 に示す。図-7.21 より、全般に破壊時の試験速度（载荷速度）の増加に伴って最大荷重や最大荷重時の CMOD が増加し、破壊エネルギーも大きくなる傾向は 7.3.2(2)での考察と同様であるが、同一試験条件での事前繰返しの有無による違いは明らかでない。

なお、図-7.21 において、試験速度が最大（100mm/min）にもかかわらず破壊エネルギーが小さい供試体がある。そのうち破壊エネルギーが最小のもの（No.5）に着目し、その荷重-CMOD 曲線（図-7.20）を見ると、同一試験速度の他の供試体より小さな CMOD から階段状に荷重低下して破壊（破断）に至っており、破断面付近の骨材（CSG）の破壊やペースト部分からの剥離が断続的に生じた可能性が考えられる。

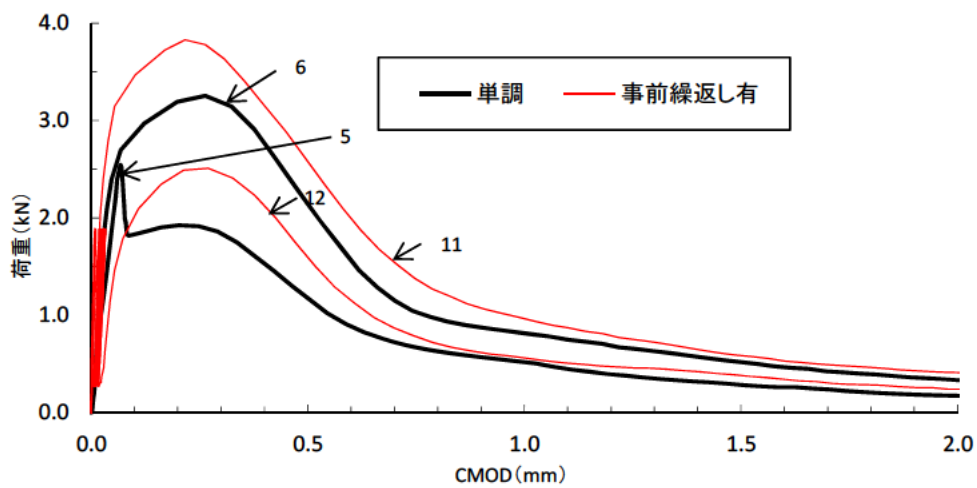
このように、本試験の結果は個々の供試体の破断面付近の状態による影響を少なからず受けているものと考えられる。このことが、限られた試験数では繰返し载荷による破壊エネルギーへの影響を確認するのが難しいことの一因となっている可能性がある。



(a) CMOD 速度 0.1mm/min



(b) CMOD 速度 10mm/min



(c) CMOD 速度 100mm/min

図- 7.23 荷重-CMOD 曲線 (ケース K-II B、事前繰返し載荷有・無)

※ 個々のプロットに付けた数字は表-7.6の供試体番号。

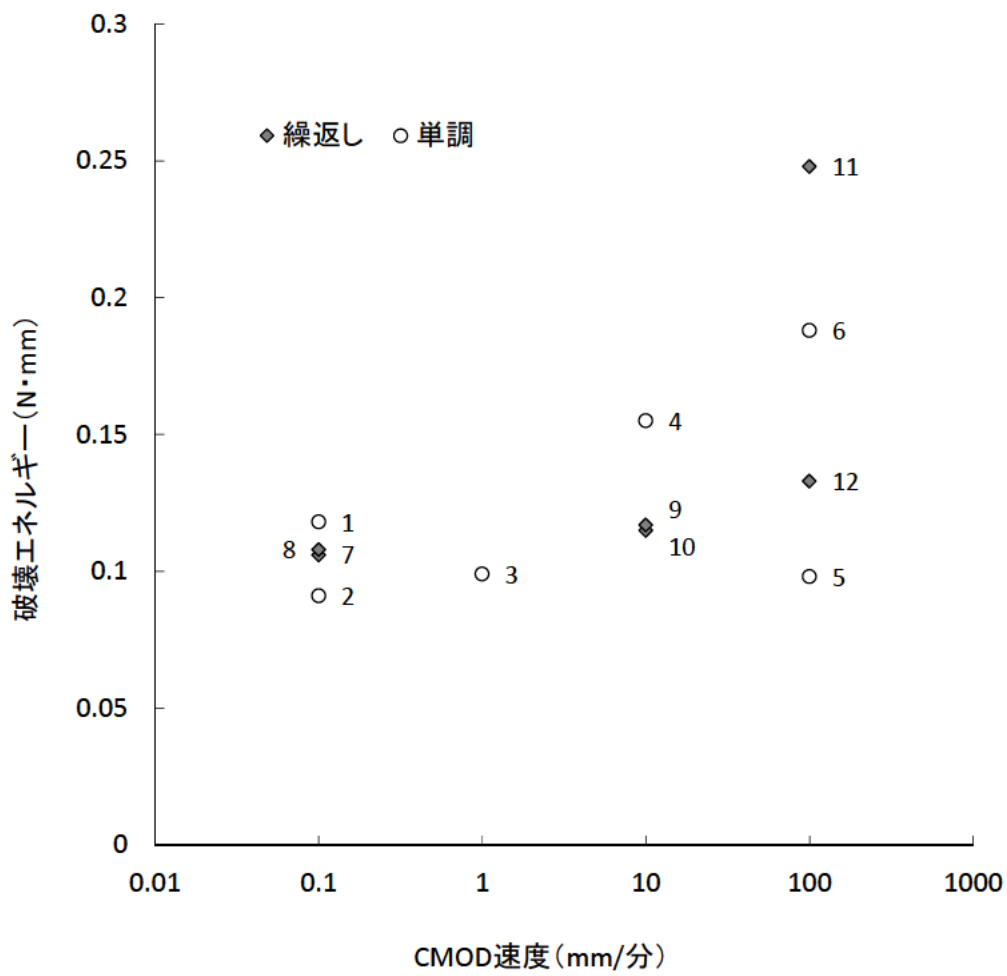


図- 7.24 破壊エネルギーと CMOD 速度の関係
(ケース K-II B、事前繰返し载荷有・無)

※ 個々のプロットに付けた数字は表-7.6の供試体番号。

(4) 引張軟化曲線の推定

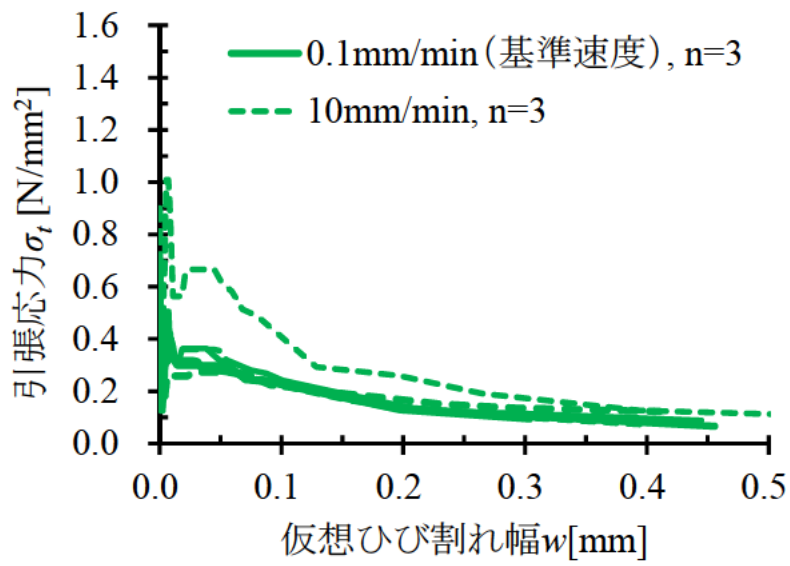
破壊エネルギー試験で得られた荷重-CMOD 曲線をもとに、多直線近似解析法^{17)・18)}を用いた逆解析により、試験に用いた CSG の引張軟化曲線（引張応力と仮想ひび割れ幅の関係）を推定した。この解析では、日本コンクリート工学協会による公開プログラム¹⁹⁾を用いた。各供試体について得られた引張軟化曲線を図-7.25 に示す。

推定された引張軟化曲線の形状は、①軟化開始 → ②直後の急激な応力低下 → ③ひび割れ領域幅が拡大しつつさらに応力低下 → ④破断 という引張破壊の過程を示している。このうち②についてはほとんどひび割れ領域幅が拡大しない状態での応力低下であり、一般のコンクリートには見られないものであるが、ダムコンクリートを対象とした堀井ら²⁰⁾の研究で報告されている引張軟化曲線には同様の傾向が見られる。単位ペースト量が少なく、粗骨材最大粒径が大きいダムコンクリートや CSG では、一般のコンクリートよりもペーストと骨材（CSG 材）の界面やペースト内から破壊が生じやすいことが一因として考えられる。

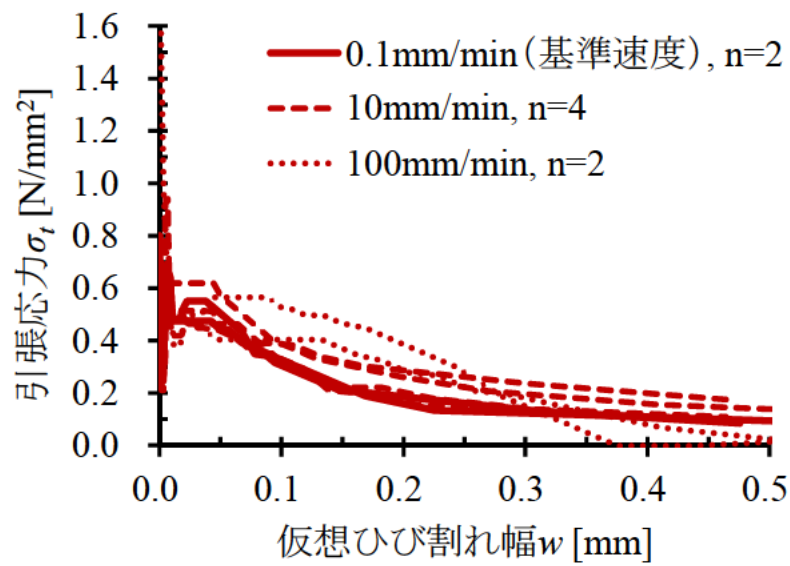
載荷速度（試験速度）が引張軟化曲線の形状に与える影響については、一般のコンクリートを対象とした藤掛ら²¹⁾の研究がある。直接引張試験による同研究では、載荷速度の増加に伴う引張強度の増加が破壊エネルギーの増加をもたらす一方、最大応力以降の応力低下勾配が急になる（脆性化する）傾向があることや、このことが粗骨材を貫通するひび割れが生じやすくなることに関係している可能性を指摘している。

そこで、図-7.25 に示す CSG の引張軟化曲線のうち、まず K ダムの母材を用いたケースの推定結果（図-7.25(a)~(d)）を見ると、前述②の特徴が見られるものの、載荷速度（試験速度）による軟化曲線全体の形状への影響については藤掛ら²¹⁾の報告と類似の傾向が認められる。ただし、急速試験で載荷速度を最大（CMOD 速度 100mm/min）とした場合の結果では軟化曲線の形状がやや大きく変化し、ひび割れ幅が増加してもある程度応力が維持される傾向が認められる。ひび割れが骨材（CSG 材）やペースト中の強度の大きな部分を貫通しやすくなることでこのような変化が生じた可能性が考えられる。

なお、S ダムの母材を用いたケース（図-7.25(e)~(f)）では、前述の破壊エネルギーが他に比べ明らかに小さい供試体での推定結果を除くと、K ダムの母材を用いたケースと同様に、前述②の特徴が見られるが、載荷速度（試験速度）による引張軟化曲線全体の形状への影響は明確に確認できなかった。河床砂礫を母材とした S ダムの材料（CSG 材）は、K ダムの母材に比べ比較的強度が大きく、載荷速度を増加させた場合でも、ひび割れが骨材（CSG 材）を貫通しにくい可能性があったことが一因として考えられる。これは、7.3.2(2)にて前述した供試体破断面観察においても、載荷速度の違いによる破断面の3つの領域（①骨材の破断部、②粗骨材とモルタルの界面の破断部、③モルタル部分の破断部）の割合の変化がなかったことも同じ理由によるものと考えられる。

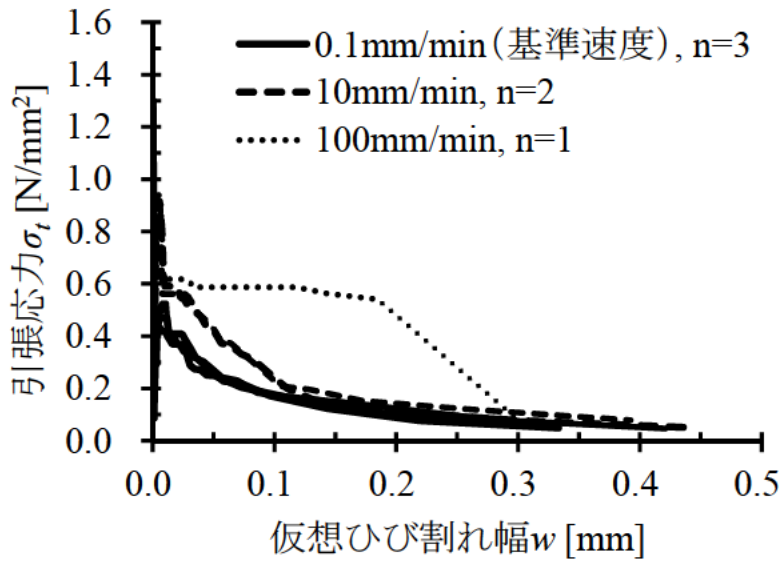


(a) ケース K-1A

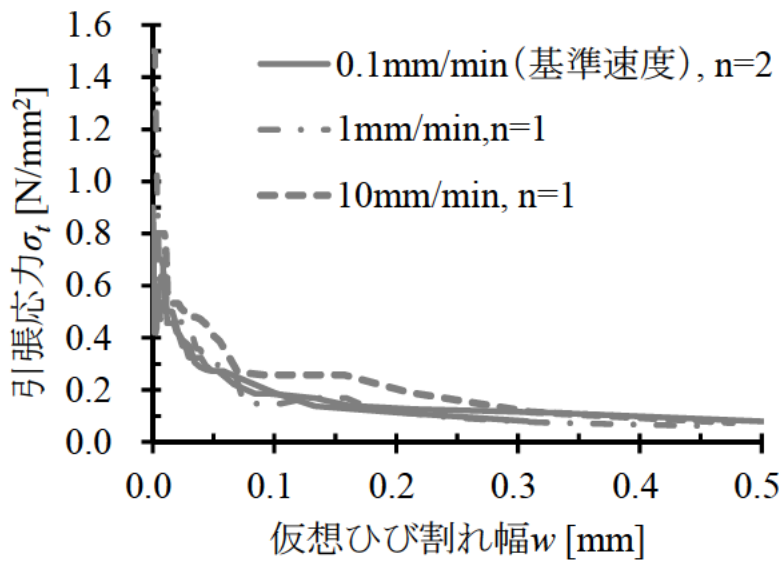


(b) ケース K-1B

図- 7.25(1) 多直線近似解析法による逆解析で推定した CSG の引張軟化曲線 (n: 供試体数)

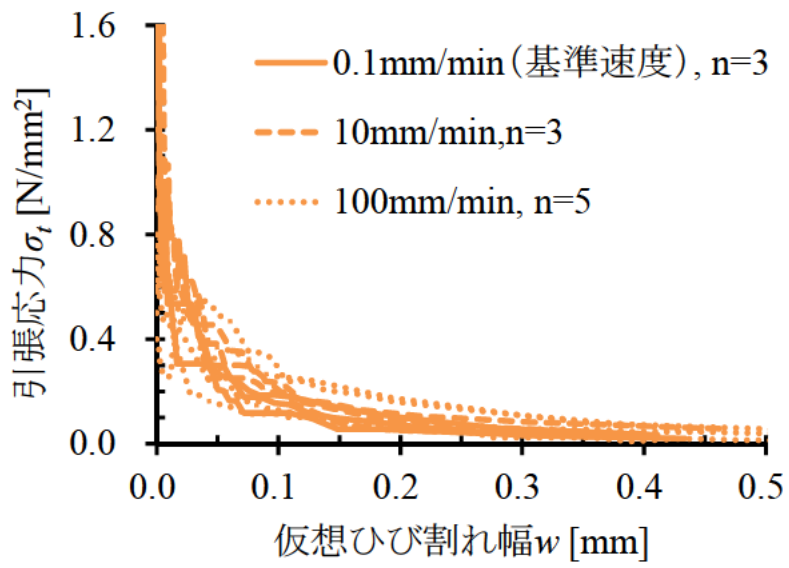


(c) ケース K- I C

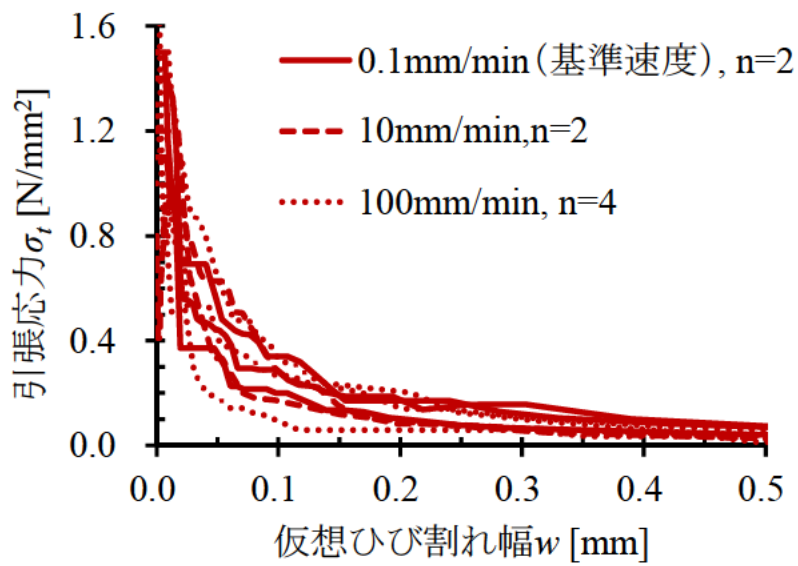


(d) ケース K- II B

図- 7. 25(2) 多直線近似解析法による逆解析で推定した CSG の引張軟化曲線 (n: 供試体数)



(e) ケース S-A



(f) ケース S-A'

図- 7.25(3) 多直線近似解析法による逆解析で推定した CSG の引張軟化曲線 (n: 供試体数)

(5) 引張軟化モデル

大規模地震に対する耐震性能照査など、CSGの引張軟化による損傷過程を数値解析により再現（推定）する必要がある場合、対象とするCSGの物性値（引張強度や破壊エネルギー）に応じた引張軟化特性が考慮できるよう、引張軟化曲線の形状をモデル化しておくのが便利である。

そこで、基準速度での破壊エネルギー試験結果から推定した各ケース（母材・配合）の引張軟化曲線（図-7.25）を、引張応力を引張強度、仮想ひび割れ幅を破壊エネルギー／引張強度でそれぞれ無次元化したものを図-7.26に示す。同図中には、本試験における一部ケース（K-I A、K-I BおよびK-I C）の試験結果に基づく既往分析⁵⁾による式(7.10)のCSGの引張軟化モデルのほか、式(7.11)の土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾に示される一般のコンクリートでの2直線型モデルも示している。

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{1}{15} \left(10 - 7 \frac{w}{w_1} \right) f_t & ; w \leq w_1 \\ \frac{1}{35} \left(8 - \frac{w}{w_1} \right) f_t & ; w_1 < w \leq w_{cr} \end{cases} \quad (7.10)$$

ここに、

σ_t : 引張応力[N/mm²],

w_1 : 引張軟化曲線の折れ点における仮想ひび割れ幅 (=0.5 G_f/f_t) [mm],

w_{cr} : 限界仮想ひび割れ幅（引張応力が0となるひび割れ幅 (=4.0 G_f/f_t)) [mm]。

$$\sigma_t = \begin{cases} \left(1 - 0.75 \frac{w}{w_1} \right) f_t & ; w \leq w_1 \\ \frac{5}{17} \left(1 - \frac{w}{w_1} \right) f_t & ; w_1 < w \leq w_{cr} \end{cases} \quad (7.11)$$

ここに、

σ_t : 引張応力[N/mm²],

w_1 : 引張軟化曲線の折れ点における仮想ひび割れ幅 (=0.75 G_f/f_t) [mm],

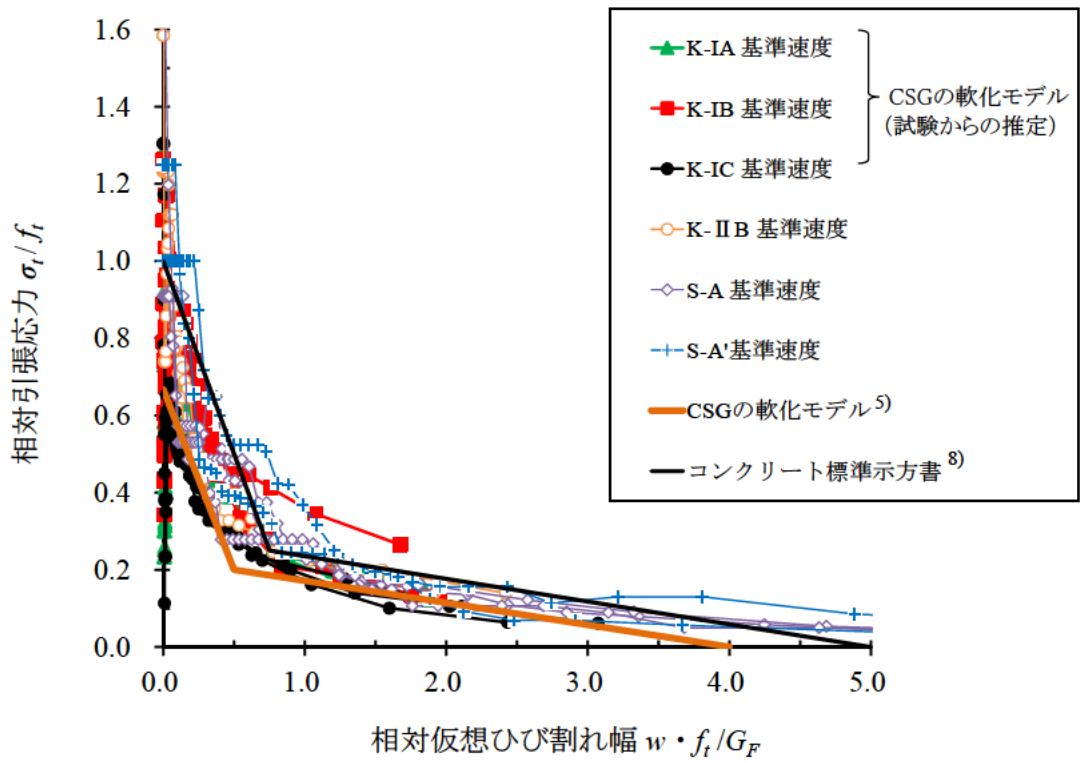
w_{cr} : 限界仮想ひび割れ幅（引張応力が0となるひび割れ幅 (=5.0 G_f/f_t)) [mm]。

なお、モデル化の検討対象を基準速度での試験で得られた引張軟化曲線としたのは、7.3.2(2)及び(3)で触れたように、これまでの試験結果では、載荷速度（試験速度）の影響や繰返し載荷による影響を個々の供試体のばらつきによる影響と定量的に分離して評価するのが難しいためである。

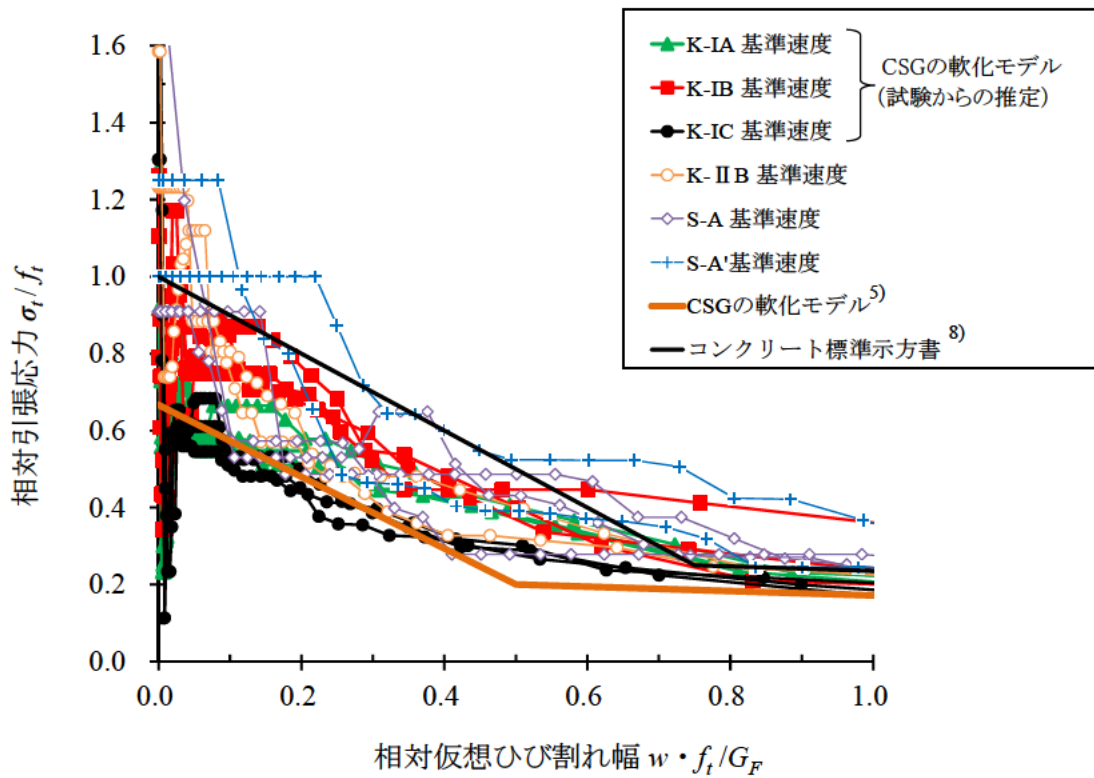
図-7.26より、CSGの引張軟化特性は、軟化開始直後にやや急激な応力低下が生じる特徴を加味した既往分析でのモデル（CSGの引張軟化モデル）を用いれば、基本的に安全側に考慮できるものと考えられる。

ただし、一部の試験ケース（K-I B、S-AおよびS-A'）で得られた引張軟化曲線（無次元化したもの）は、

このモデルよりやや上方に位置し、軟化開始直後を除けばむしろコンクリートのモデルに近い。CSGの引張軟化特性は、このように母材（CSG材）や配合の影響を受けて変化するものと考えられる。そのため、耐震性能照査での数値解析において損傷過程を推定するためにCSGの引張軟化特性を設定する場合、式(7.10)のモデルを用いることも考えられるが、必要に応じ、実際に使用するCSGでの試験結果に基づいて設定することも考えられる。



(a) 引張軟化曲線全体表示



(b) 引張軟化曲線詳細表示

図- 7.26 無次元化した CSG の引張軟化曲線

7.4 せん断試験

7.4.1 試験結果

簡易一面せん断試験結果の一覧を表-7.7に示す。

表-7.7 簡易一面せん断試験結果一覧

ケース名 (母材・配合)	傾斜角 $\alpha(^{\circ})$	最大荷重 $F(\text{kN})$	せん断応力 $\tau_p(\text{N}/\text{mm}^2)$	垂直応力 $\sigma_p(\text{N}/\text{mm}^2)$
K-IA	25	65.0	1.875	0.874
		68.0	1.962	0.915
		89.5	2.582	1.204
	30	164	4.521	2.610
		113	3.115	1.798
		135	3.721	2.149
	35	128	3.338	2.337
		117	3.051	2.136
		212	5.528	3.871
K-IB	25	64.0	1.846	0.861
		70.5	2.034	0.948
		103	2.971	1.386
	30	76.0	2.095	1.210
		76.0	2.095	1.210
		102	2.812	1.623
	35	111	2.894	2.027
		172	4.485	3.140
		110	2.868	2.008
K-IC	20	68	2.019	0.735
		68	2.034	0.740
	30	118	3.253	1.878
		108	2.977	1.719
	40	247	6.023	5.054
		211	5.145	4.317

7.4.2 せん断試験結果の考察

簡易一面せん断試験で得られたせん断破壊時の垂直応力、せん断応力を図- 7.27 にプロットして示す。なお、破壊時の垂直応力 σ_p とせん断応力 τ_p は、破壊時の荷重 P からそれぞれ次式により求めた。

$$\sigma_p = \frac{P}{A} \sin \alpha \quad (7.12)$$

$$\tau_p = \frac{P}{A} \cos \alpha \quad (7.13)$$

ここに、

P : 破壊荷重[N]、

A : せん断面積[mm²]、

α : せん断破壊面の傾斜角[°]。

図- 7.27 より、せん断破壊時の垂直応力とせん断応力はほぼ直線関係にあることがわかる。このため、同図中には、次式で表される Coulomb の破壊規準に相当する回帰直線（各ケース（母材・配合）のデータについて最小自乗近似により求めたもの）も示している。

$$\tau_p = \tau_0 + \sigma_p \tan \phi \quad (7.14)$$

ここに、

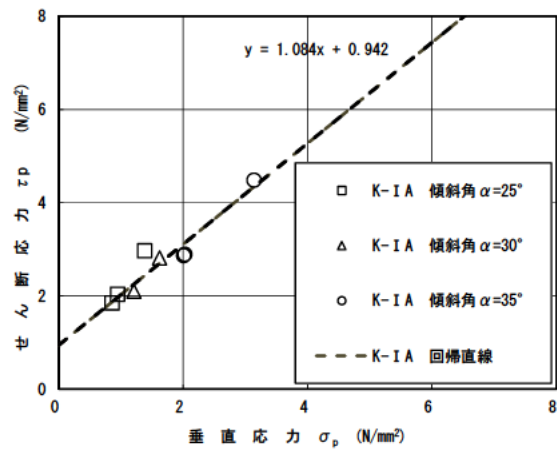
τ_0 : 純せん断強度[N/mm²]、

ϕ : 内部摩擦角[deg]。

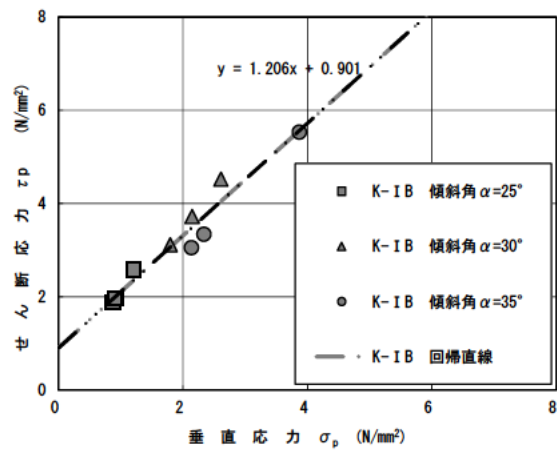
なお、このようにして得られた各ケース（母材・配合）の純せん断強度 τ_0 と内部摩擦角 ϕ の値を表- 7.8 に示す。

表- 7.8 純せん断強度および内部摩擦角

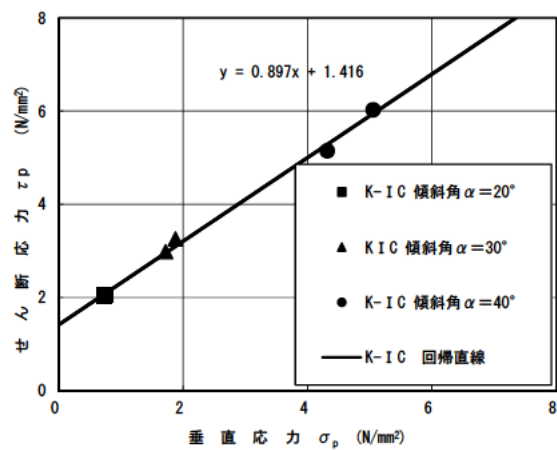
ケース名（母材・配合）	純せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
K-1A	0.942	47
K-1B	0.901	50
K-1C	1.416	42



(a) ケース K- I A



(b) ケース K- I B

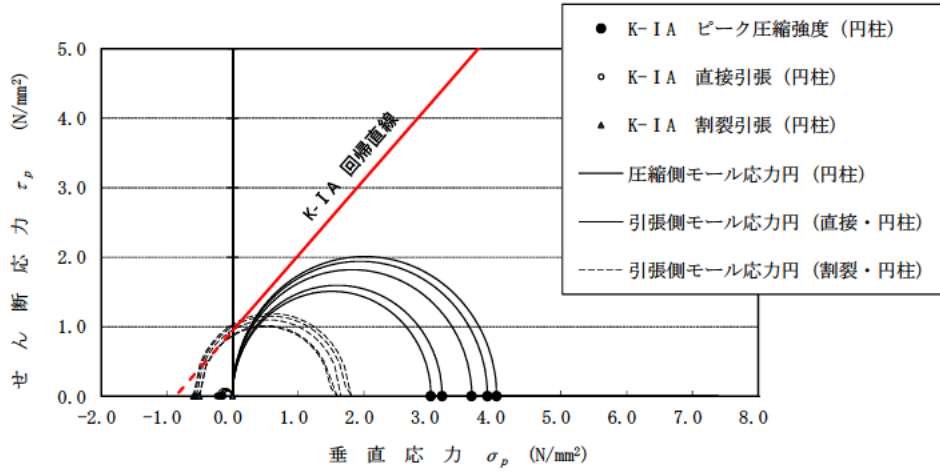


(c) ケース K- I C

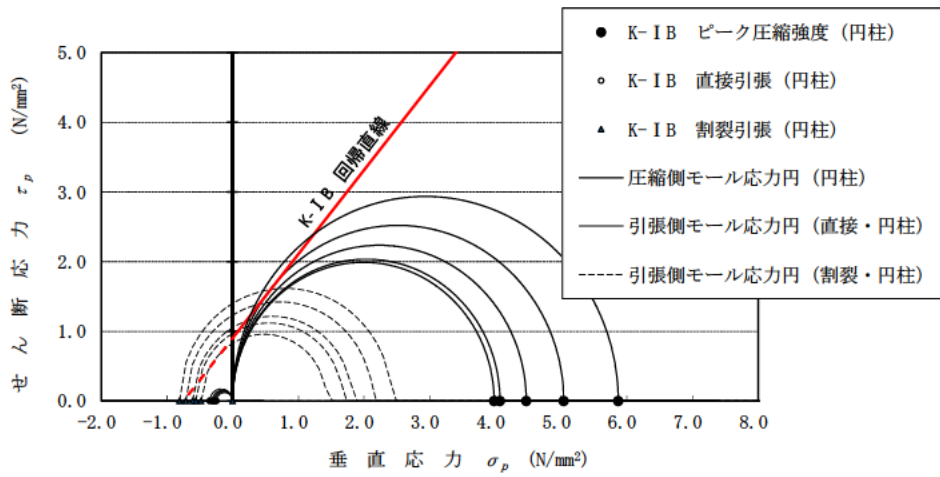
図- 7.27 簡易一面せん断試験結果 (破壊時の垂直応力とせん断応力)

また、簡易一面せん断試験の結果と先に述べた圧縮強度試験や引張度試験の結果の対応を、簡易一面せん断試験に用いた CSG と母材・配合が同一の 3 ケース (K-I A、K-I B、K-I C) について図- 7.28 に示す。同図中の直線は、一面せん断試験結果に基づく回帰直線である。また、半円は圧縮強度試験で得られた一軸圧縮強度 (側圧ゼロ) や引張強度試験で得られた引張強度に基づいて推定される破壊時の応力状態 (Mohr の応力円) である。なお、引張強度に基づく応力円は、直接引張試験については側圧ゼロとして、割裂引張試験については、弾性理論解に基づき、破壊時における鉛直方向の主応力 (圧縮応力) と水平方向の主応力 (引張応力) の大きさの比を 3 : 1 と仮定して描いている。

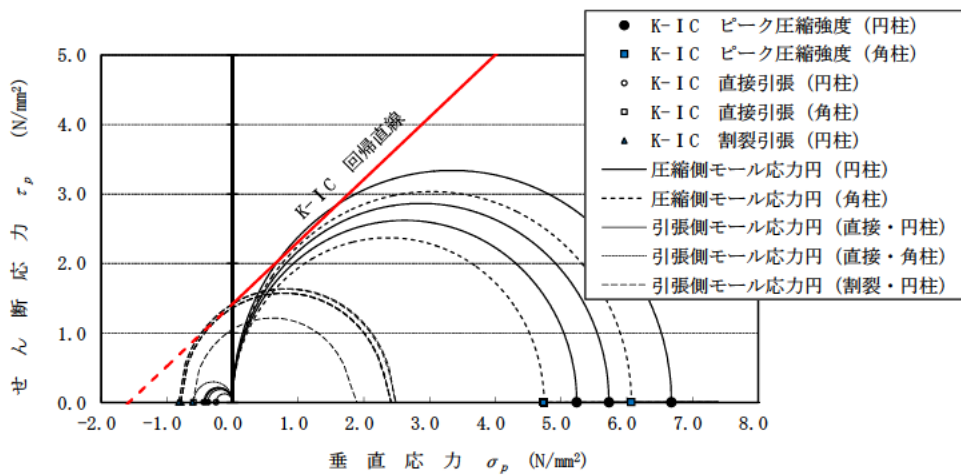
図- 7.28 より、簡易一面せん断試験に基づく回帰直線は一部のケース (K-I B) を除き、一軸圧縮強度および割裂引張強度試験結果から推定される破壊時の応力円を概ね包絡するものとなっている。なお、直接引張強度試験結果による応力円は各ケースともに回帰直線を引張側に延長した直線より下方にあり、接していない。これは 7.2.2 (2) で述べたように供試体作製時の締固め境界面が弱面になった可能性が考えられる。



(a) ケース K-IA



(b) ケース K-IB



(c) ケース K-IC

図- 7.28 Mohr の応力円と破壊基準線

8. まとめ

CSG の強度特性や破壊特性のうち、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や引張軟化特性を中心に、その載荷速度や繰返し載荷による影響を含めて CSG 供試体での室内試験により検討した。

本検討により以下のことが明らかになった。

- ・ 直接引張試験および割裂引張試験により求めた CSG の引張強度は、コンクリートの場合と同様に、載荷速度が増加すると大きくなる傾向が認められた。なお、静的強度に対する増加率で表した引張強度の載荷速度に対する増加傾向は、試験方法（直接引張・割裂引張）や母材・配合が異なる各試験ケース間での明確な違いは認められなかった。
- ・ 事前に繰返し引張載荷（単調載荷での静的強度に対する最大応力比 0.5~0.9、同最小応力比 0.1 での繰返し回数 10 回）を行った後に引張破壊させた時の引張強度は、直接引張試験では載荷速度が増加した場合の強度増加が単調載荷のみで破壊させた場合よりも小さくなった。割裂引張試験での同様の比較では明確な違いは認められなかった。
- ・ 引張疲労試験（単調載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。
- ・ 破壊エネルギー試験（切欠き梁の 3 点曲げ試験）から求めた CSG の破壊エネルギーは、全般的には試験速度が増加すると大きくなる傾向が認められたがばらつきも大きくなった。なお、事前繰返し載荷（基準速度での破壊時最大荷重に対する最大荷重比 0.7、同最小荷重比 0.1 での繰返し回数 10 回）による破壊エネルギーへの明らかな影響は認められなかった。
- ・ 破壊エネルギー試験で得られた荷重-CMOD 曲線より推定した CSG の引張軟化曲線から CSG の引張軟化特性として一般のコンクリートに比べ、軟化開始直後にやや急激な応力低下が生じる特徴が認められた。また、試験速度を増加させたときの引張軟化曲線への影響は引張強度の増加とともに、最大応力以降の応力低下勾配が急になる傾向や、さらに軟化曲線の形状がやや大きく変化して、ひび割れ幅が増加してもある程度応力が維持されるケースがあった。しかし CSG 材として使用した母材が異なる別のケースでは試験速度による引張軟化曲線の形状への影響は明確に確認できなかった。
- ・ 簡易一面せん断試験結果から Coulomb の破壊規準に相当するものとして求めた回帰直線は、一部のケースを除き、一軸圧縮強度および割裂引張強度試験結果から推定される破壊時の応力円を概ね包絡するものとなった。

謝辞

最後に、本研究の実施にあたってはダム建設事業関係者各位から試験用材料の提供において協力を得た。また、急速載荷試験の実施にあたっては、同試験が可能な試験装置を所有する防衛大学校（建設環境工学科）の協力を得た。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人ダム技術センター：台形 CSG ダム設計・施工・品質管理技術資料、2012.6.
- 2) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説、2005.3.
- 3) 安田成夫、服部 敦、佐藤耕治、古本浩一：CSG に関する試験的検討、国土技術政策総合研究所資料、第 330 号、2006.6.
- 4) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書[ダムコンクリート編]、pp.32-33、2013.10.
- 5) 金銅将史、佐々木隆、別府万寿博：CSG の引張強度・軟化特性とその載荷速度依存性、土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）Vol.70、No.2、pp.232-251、2014.6.
- 6) 日本コンクリート工学会：JCI 基準「切欠きはり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) 及び同付属書、2003.
- 7) 永山 功、渡辺和夫、小林政登：コンクリートのせん断強度についての実験的考察（その 1）、土木研究所資料、第 2829 号、1990.3.
- 8) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]、pp.37-43、2013.
- 9) Jerome, M.R.: Tensile Strength of Concrete, *ACI Journal*, Vol.81, No.2, pp.158-165, 1984.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 阪田憲次、木山英郎、西林新蔵：統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究、土木学会論文報告集、第 198 号、pp.107-114、1972.2.
- 13) 松下博通、徳光善治：生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究、土木学会論文報告集、第 284 号、pp.127-138、1979.4.
- 14) 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.
- 15) fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete (*fib*): Model Code 2010, Final draft, Volume 1, *fib* Bulletins No.65, 2012.
- 16) 藤掛一典、山根茂樹、大野友則、水野 淳、鈴木 篤：急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響、土木学会論文集、No.592、V-39、pp.83-95、1998.5
- 17) 橋高義典、上村克郎、中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析、日本建築学会構造系論文集、第 453 号、pp.15-25、1993.
- 18) 栗原哲彦、安藤貴宏、国枝 稔、内田裕市、六郷恵哲：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状、土木学会論文集、No.532、V-30、pp.119-129、1996.
- 19) 日本コンクリート工学協会コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会：多直線近似法による引張軟化曲線の推定マニュアル、2001.
- 20) 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、No. 286、pp. 113-119、2000.
- 21) 藤掛一典、上林勝敏、大野友則、江守克彦：ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張軟化特性の定式化、土木学会論文集、No. 669/V-50、pp. 125-134、2001.

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4320 March 2016

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは
国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754

