

ISSN 0386 - 5878

土木研究所資料 第4326号

土木研究所資料

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

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。

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

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
	主	任	研	究	員	藤田将司		
	交	流	研	究	員	繁田淳吾		
	(元)	上	席	研	究	員	山口嘉一	
	(現)	地質研究監						
	(前)	上	席	研	究	員	佐々木隆	
	(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					
	(元)	研	究	員	切無沢徹			
	(現)	北海道開発局						
	(元)	交	流	研	究	員	小島裕之	
	(現)	(株)建設技術研究所						

要 旨 :

大規模地震に対するコンクリートダムの耐震性能をその損傷過程まで考慮して照査する上では、地震動の作用による引張破壊の発生・進展過程を推定することが必要となる。しかし、大規模地震時の動的繰返し載荷条件下でのダムコンクリートの引張強度や軟化特性については不明な点が多い。

本資料は、これらの点を明らかにすることを目指し、載荷速度や繰返し載荷による応力履歴がダムコンクリートの引張強度や軟化特性に及ぼす影響を調べるために実施した各種室内試験の結果を若干の考察とともにとりまとめたものである。

キーワード：ダムコンクリート、引張強度、破壊エネルギー、急速載荷、繰返し載荷、耐震性能照査

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

目次

1. はじめに.....	1
2. 試験項目と各試験の概要.....	3
3. 材料およびコンクリート配合	7
3.1 材料.....	7
3.2 配合試験.....	7
3.3 配合の決定	9
4. 供試体作製.....	11
5. 試験方法.....	13
5.1 圧縮強度試験	13
5.2 引張強度試験	13
5.2.1 概要	13
5.2.2 単調載荷試験.....	13
5.2.3 繰返し引張試験	16
5.3 破壊エネルギー試験.....	20
6. 試験結果および考察.....	21
6.1 圧縮強度試験	21
6.1.1 試験結果.....	21
6.2 引張強度試験	22
6.2.1 試験結果.....	22
6.2.2 単調載荷試験結果の考察	29
6.2.3 繰返し引張試験結果の考察	32
6.3 破壊エネルギー試験.....	40
6.3.1 試験結果.....	40
6.3.2 試験結果の考察	44
7. まとめ	51
謝辞.....	51
参考文献.....	53

1. はじめに

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耐震性能照査では、地震動の作用による堤体の引張破壊の発生・進展過程を推定することが必要となるが、大規模地震時の損傷形態を地震応答解析によりできるだけ精度良く推定するためには、動的繰返し載荷条件下でのダムコンクリートの引張強度特性や軟化特性を適切に考慮する必要がある。

動的載荷時のコンクリートの引張強度特性については、ダムコンクリートを対象とした既往研究²⁾を含め、急速載荷時には静的載荷時に比べ引張強度が増加することなど、これまでに一定の知見が得られているが、大規模地震時における動的繰返し載荷条件下での引張強度や軟化特性については不明な点が多い。

そこで載荷速度や繰返し載荷による応力履歴が引張強度や軟化特性に及ぼす影響を調べるため、ダムコンクリート（RCD用コンクリートおよび外部コンクリート）を想定した配合のコンクリート供試体を用い、主に以下の室内試験を実施した。

- ①引張強度試験 ： 載荷速度による影響の確認、繰返し載荷による影響の把握
- ②破壊エネルギー試験： 載荷速度による影響の確認、引張軟化特性の把握

次章以降にこれら試験の方法と結果を若干の考察を付して報告する。

2. 試験項目と各試験の概要

本検討で実施した各種室内試験の試験項目と実施年度の一覧を表ー 2.1、実施フローを図ー 2.1 に示す。

なお、試験用供試体の作製には、ダムコンクリートを想定し、A 配合（外部コンクリート相当）及び B 配合（RCD 用コンクリート相当）の 2 種類の配合のコンクリートを用いた。

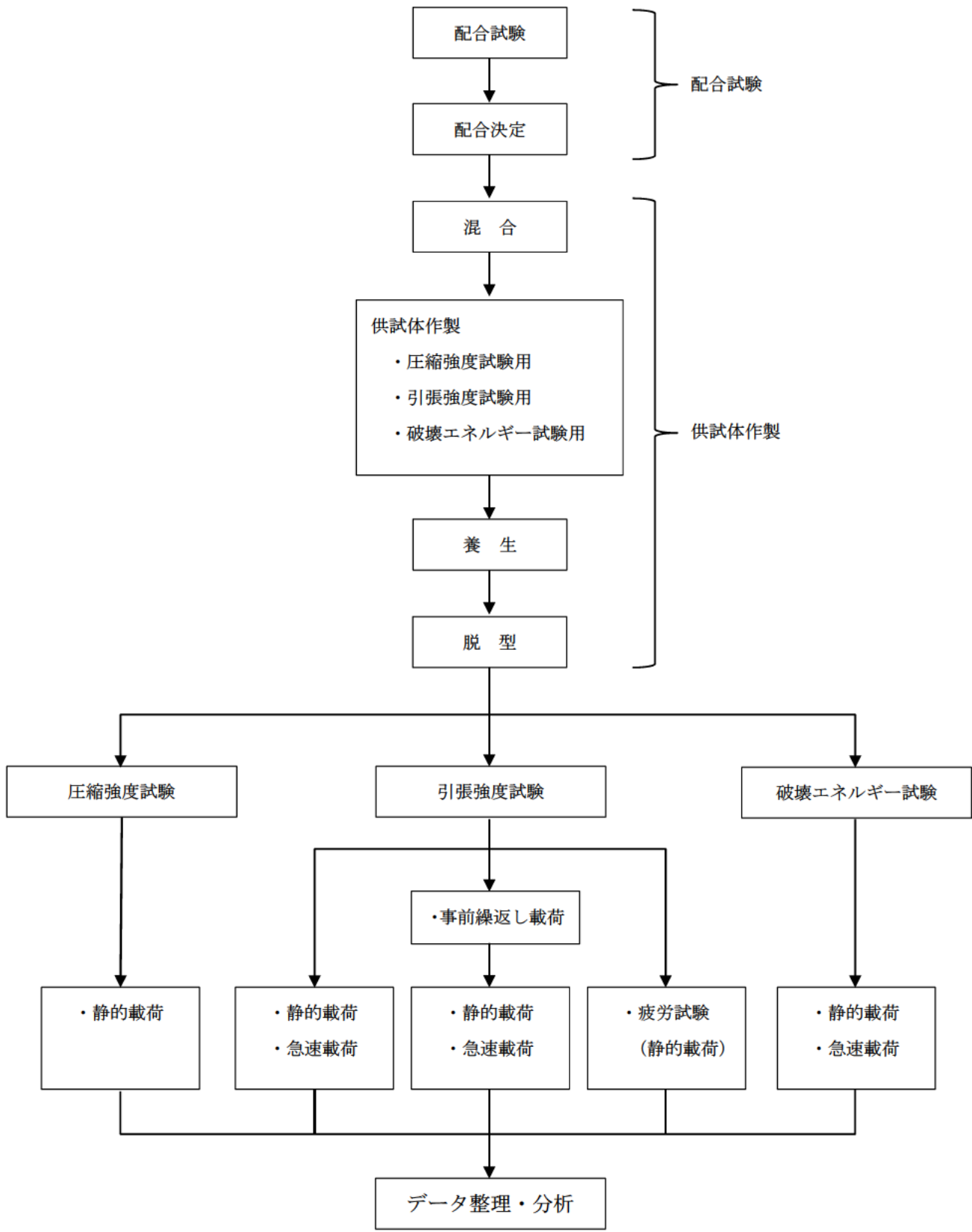
表ー 2.1 試験項目一覧

試験項目*		目的	配合**	荷重速度	供試体形状 (単位: mm)	実施年度***		
						H25	H26	H27
圧縮強度試験		基本特性としての 一軸圧縮強度の確認	A 配合	静的	円柱 (φ150×H300)	○	○	○
			B 配合			○	○	○
引張強度試験	割裂試験	引張強度特性 ([荷重速度及び 繰返し荷重に よる影響]の把握	A 配合	静的	円柱 (φ150×H240)	○*	○*	○*
				急速		○*	○*	—
			B 配合	静的		○*	○*	○*
				急速		○*	○*	—
	直接引張試験		A 配合	静的	円柱 (φ150×H240)	—	—	—
				急速		—	—	—
			B 配合	静的		○*	—	—
				急速		○*	—	—
破壊エネルギー試験		引張軟化特性 とその荷重速度 による影響 の把握	A 配合	静的	角柱 (□150×L530)	—	○	○
急速	—			○		○		
B 配合	静的		—	○		○		
	急速		—	○		○		

* 各種の試験に先立ち、コンクリートの配合を定めるための配合試験を実施。

** A 配合：外部コンクリート相当、B 配合：RCD コンクリート相当。

*** ※印は、事前繰返し荷重（H25 年度、H26 年度）および疲労試験（H27 年度）を行うケースもあわせて実施。



図－ 2.1 試験フロー

各試験の概要は以下のとおりである。

(1) 圧縮強度試験

各年度（平成 25～27 年度）において、引張強度試験等に用いるダムコンクリートの基本物性（圧縮強度、弾性係数等）を把握することを目的として、圧縮強度試験（一軸圧縮試験）を実施した。

(2) 引張強度試験

引張強度試験は、割裂試験および直接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（静的試験）での試験のほか、平成 25～26 年度においては、大規模地震時において想定される載荷速度を考慮した急速載荷での試験（急速試験）を実施した。

また、実際の大規模地震時は繰返し荷重を受けるため、平成 25～26 年度においては、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 回までの繰返し回数での引張疲労試験も実施した。

(3) 破壊エネルギー試験

ダムコンクリート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。破壊エネルギー試験は、JCI-S-001-2003「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」による方法を基本に、前述の引張強度試験と同様に載荷速度を変化させたケース（静的試験、急速試験）を実施した。

3. 材料およびコンクリート配合

3.1 材料

各試験に用いた供試体作製用コンクリートの材料は、セメントについては普通ポルトランドセメント、骨材は粗骨材が青梅産砂岩の砕石、細骨材は大井川水系の陸砂、水は水道水を用いた。

3.2 配合試験

各試験で用いる供試体作製用コンクリートの配合は、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（外部コンクリート及び RCD コンクリート）の配合を参考とし、ウェットスクリーニングによる場合の粗骨材最大寸法 $G_{max}=40mm$ を考慮した上で、配合試験を行って決定した。参考とした実ダムでの配合の例を表- 3.1、配合試験の内容を表- 3.2 に示す。

表- 3.1 参考とした実ダムでの配合の例

配合区分	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	標準 VC の範囲 (秒)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						混和剤 マスター ポポリス No. 8 (C×%)	備考
							水 W	セメント C	細骨材 s	粗 骨 材 S				
										80~ 40mm	40~ 20mm	20~ 5mm		
A配合	80	3±1	—	3.5±1	53.2	30.0	117	220	605	580	435	435	0.25	外部コンクリート相当
B配合	80	—	20±10	1.5±1	79.2	30.0	95	120	662	635	476	476	0.25	RCDコンクリート相当

表- 3.2 コンクリートの配合試験内容

試験項目	準拠規準	備考
スランブ試験	JIS A 1101	A 配合に対して実施
標準 VC 試験	JSCE-F 507-2007	B 配合に対して実施
空気量試験	JIS A 1128	A,B 配合に対して実施

なお、配合試験は以下により実施した。

(1) スランプ試験

スランプ試験は、A 配合を対象に JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験」に基づき実施した。

(2) 標準 VC 試験

標準 VC 試験は、B 配合を対象に表 3.3 に示す仕様の VC 試験機を用いて、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」に基づき実施した。

表 3.3 標準 VC 試験機仕様

モールド寸法	内径 24cm×内高 22cm (円筒型)
載荷質量	20kg
振動台振動数	3,000cpm
振動台全振幅	1mm

標準 VC 試験の試験手順は以下のとおりである。

- ① 内径φ240mm×高さ H200mm の円筒型容器に試料を 2 層に分けて投入し、突き棒で各層 25 回突く。
- ② 表面は金コテなどを用いて均し、容器の上端から 3cm 程度下がるように仕上げる。
- ③ 振動台に試料の入った容器を固定し、円盤を試料表面に設置する。
- ④ 振動を加え、ペースト分が上昇してくるまでの時間を測定する (VC 値 : 秒)。
- ⑤ 試験完了後の試料の単位容積質量を求める。深さの測定はデプスゲージを使用して、代表 4 箇所について行う。
- ⑥ 試験は各配合 2 回実施し、その平均値を試験結果とする。

(3) 空気量試験

空気量試験は、A 配合・B 配合を対象に JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法」に基づき実施した。

3.3 配合の決定

各年度の供試体用コンクリートの配合は、A 配合についてはスランプ試験によりダム用有スランプコンクリートとして一般的な所要のスランプ値 ($3\pm 1\text{cm}$)、B 配合については標準 VC 試験により RCDコンクリートとして一般的な所要の VC 値 (20 ± 10 秒) が得られるよう、それぞれ単位水量を変化させた配合試験により決定した。

表ー 3.4～表ー 3.6 に決定した各年度の供試体作製用コンクリートの配合を示す。

表ー 3.4 供試体作製用コンクリートの配合 (平成 25 年度)

配合区分	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	標準 VC の範囲 (秒)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤マスターポリリス No. 8 (C×%)	空気量調整剤マスターエア 303A (C×%)	備考	
							水 W	セメント C	細骨材 s	粗 骨 材 S					
										80～40mm	40～20mm				20～5mm
A 配合	40	3±1	—	3.2～5.7	49.3	41.7	139	282	785	—	564	564	0.25	0.002	外部コンクリート相当
B 配合	40	—	20±10	3.2～5.7	74.7	41.7	118	158	876	—	630	630	0.25	—	RCDコンクリート相当

表ー 3.5 供試体作製用コンクリートの配合 (平成 26 年度)

配合区分	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	標準 VC の範囲 (秒)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤マスターポリリス No. 8 (C×%)	空気量調整剤マスターエア 303A (C×%)	備考	
							水 W	セメント C	細骨材 s	粗 骨 材 S					
										80～40mm	40～20mm				20～5mm
A 配合	40	3±1	—	3.2～5.8	49.3	41.7	139	282	785	—	564	564	0.25	0.006	外部コンクリート相当
B 配合	40	—	20±10	0.6～3.3	70.9	41.7	112	158	879	—	635	634	0.25	—	RCDコンクリート相当

表ー 3.6 供試体作製用コンクリートの配合 (平成 27 年度)

配合区分	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	標準 VC の範囲 (秒)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤マスターポリリス No. 8 (C×%)	空気量調整剤マスターエア 303A (C×%)	備考	
							水 W	セメント C	細骨材 s	粗 骨 材 S					
										80～40mm	40～20mm				20～5mm
A 配合	40	3±1	—	3.2～5.8	49.3	41.7	139	282	782	—	564	564	0.25	0.006	外部コンクリート相当
B 配合	40	—	20±10	0.6～3.3	70.9	41.7	112	158	879	—	635	634	0.25	—	RCDコンクリート相当

4. 供試体作製

各試験に使用した供試体は以下のように作製した。

(1) 圧縮強度試験用供試体

供試体は、直径 15cm×高さ 30cm の円柱形とした。

A 配合（外部コンクリート相当）は鋼製型枠に 2 層に分けて詰め、1 層につき棒状バイブレーターで 3 点締固めた後、突き穴が無くなりモルタルが上面に浮きあがる程度に木槌で鋼製型枠側面を打撃することにより締固めた。

B 配合（RCD コンクリート相当）は、鋼製型枠に 3 層に分けて詰め、1 層につき突き棒で 25 回突き固めた後、モルタルが表面に浮きあがってくるまで振動タンパにより 10 秒/層程度締固めた（写真-4.1）。なお、各層間の締固め後は、突き棒で平滑面をかき乱して次層との馴染みをよくした。

供試体上面は作業翌日にセメントペーストキャッピングを施し、材齢 2 日で脱型し、約 3 ヶ月間恒温水槽で養生を行い、材齢 91 日～92 日の間に試験を行った。



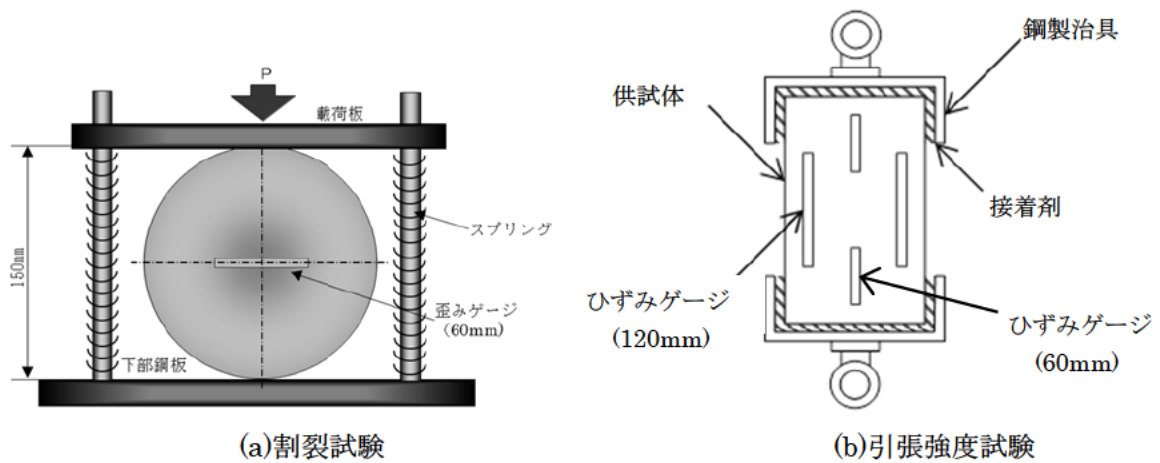
写真- 4.1 供試体作製（タンパ締固め）状況（B 配合）

(2) 引張強度試験用供試体

供試体は、圧縮強度試験用と同様に直径 15cm×高さ 30cm の円柱形として作製した。作製方法は基本的に圧縮強度試験用供試体と同様であるが、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- 4.1 に示す以下の処置を行った。試験時の材齢は 91 日～115 日である。

直接引張試験用供試体については、端部に引張载荷用治具を固定する必要があることから、接着面の不陸などによる接着不良を避けるため、両端部を高さ 3cm ずつ切除した（高さ 24cm）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（ゲージ長 120mm×4 枚、ゲージ長 60mm×4 枚、計 8 枚）。

割裂試験用供試体については、同様の加工を行う必要はないが、必要に応じ両試験の間で供試体を融通できるように同様の加工を施したものを用いた。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－ 4.1 引張試験用供試体の作製

(3) 破壊エネルギー試験用供試体

破壊エネルギー試験用の角柱供試体は A 配合・B 配合とも鋼製型枠に 2 層に分けて詰め、1 層につき突き棒で 80 回突き固めた後、モルタルが表面に浮き上がってくるまで振動タンパにより 10～20 秒／層程度締固めた（写真- 4.2）。なお、各層間の締固め後は、突き棒で平滑面をかき乱して次層との馴染みをよくした。

作製した供試体は、脱型後約 3 ヶ月間恒温水槽で養生を行った。試験時の材齢は 100 日～115 日である。



写真- 4.2 供試体作製（タンパ締固め）状況（破壊エネルギー試験用）

5. 試験方法

5.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」により行った。また、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」により、載荷中のひずみ計測も行い静弾性係数を求めた。

5.2 引張強度試験

5.2.1 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－ 5.1 に示す。

なお、以下本文中では載荷速度条件に応じて、1N/mm²/s 未満は「静的載荷」、10N/mm²/s 以上は「急速載荷」と呼ぶ。

表－ 5.1 引張強度試験実施一覧

実施 年度	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
H25	A 配合					○	○	○	○
	B 配合	○	○	○	○	○	○	○	○
H26	A 配合					○	○	○	○
	B 配合					○	○	○	○
H27	A 配合					○		○*	
	B 配合					○		○*	

* A 配合：外部コンクリート相当、B 配合：RCD コンクリート相当。

** 「事前繰返し有」のケースでの「静的載荷」・「急速載荷」は、事前繰返し載荷（静的載荷）後の単調載荷による破壊時の載荷速度条件を示す。

*** ※印は、疲労試験として実施。

5.2.2 単調載荷試験

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、載荷速度や載荷パターンを除き、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。

載荷速度は、JIS A 1113 に規定されている静的載荷条件（応力増加速度 0.06N/mm²/s 前後）から大規模地震時を想定した急速載荷条件までの範囲で設定した。ここで、急速載荷での載荷速度は、一般的な重力式コンクリートダム（堤高 100m）の有限要素モデルを用いた線形動的解析によって得られた堤体内（上流端堤敷部）に発生する引張応力の増加速度（最大約 100N/mm²/s）を参考に設定した。静的載荷での試験は一般的である万能試験機（写真- 5.1）を使用し、急速載荷ではサーボ制御式急速載荷試

験装置³⁾(写真- 5.2、防衛大学校所有)を使用した。

なお、応力増加速度は荷重中必ずしも一定とならず、特に荷重初期は加速域となる。このため、図- 5.1 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- 5.1 に示すように算出した。ひずみ速度の算出に用いるひずみ値は、割裂引張試験では2箇所のひずみゲージの平均値、直接引張試験では中央の4箇所のひずみゲージの平均値を用いた。

なお、直接引張試験においては、ほぼすべてのケースで荷重途中で応力・ひずみが一時的に減少する現象がみられ、その後、応力・ひずみが再度増加し、破壊に至った。この一時的な応力低下は、荷重増加に伴い、治具・供試体間の接着面の一部剥離による応力解放による可能性などが考えられる。このため、一時的な応力・ひずみの減少が発生した場合は、応力・ひずみの一時的な減少後、応力又はひずみが単調に増加し始めた点とピーク点(最大応力点、最大ひずみ点)を結ぶ直線の勾配として算出した(図- 5.2)。

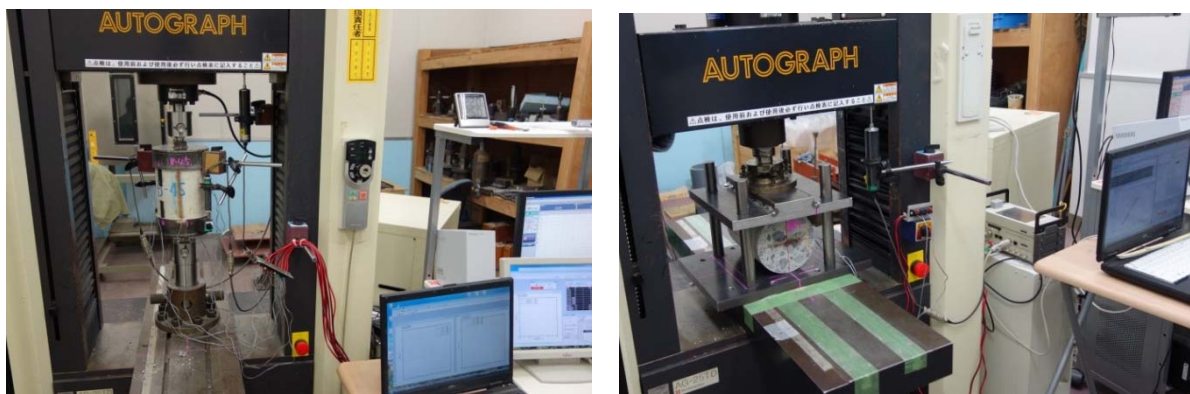
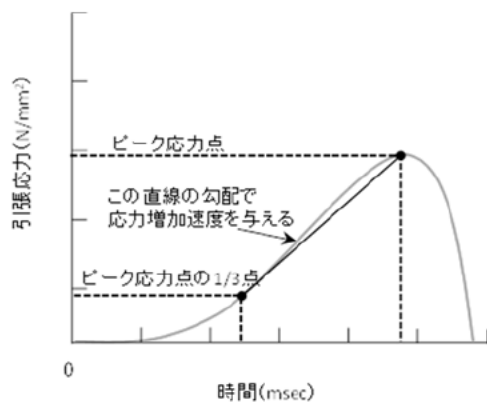


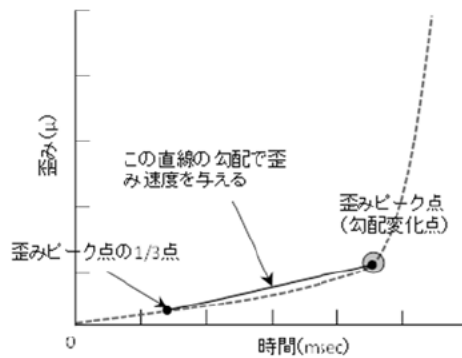
写真- 5.1 引張試験(静的荷重) 左: 直接引張試験 右: 割裂引張試験



写真- 5.2 引張試験(急速荷重) 左: 直接引張試験 右: 割裂引張試験

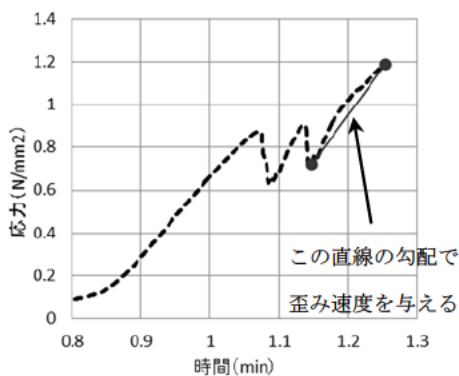


(a) 応力増加速度

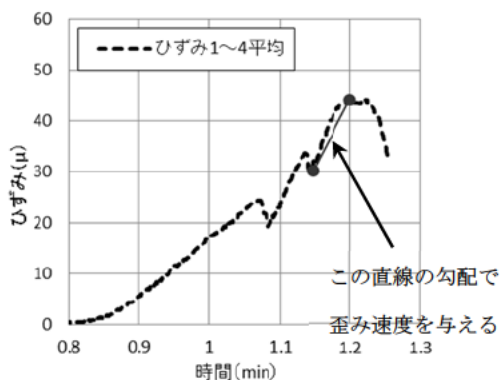


(b) ひずみ速度

図一 5.1 応力増加速度およびひずみ速度算出方法



(a) 応力増加速度



(b) ひずみ速度

図一 5.2 直接引張試験における応力増加速度およびひずみ速度算出方法

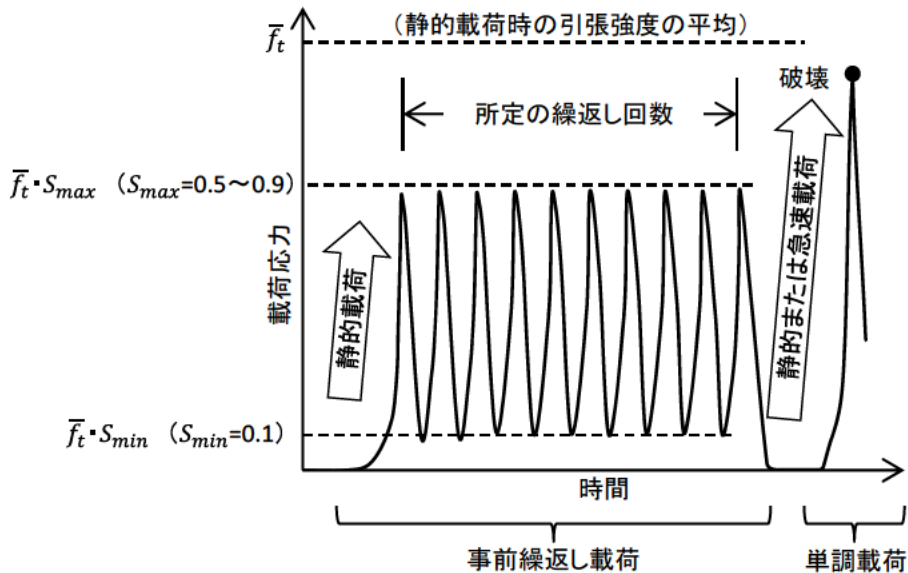
5.2.3 繰返し引張試験

(1) 繰返し载荷方法

繰返し载荷による応力履歴がダムコンクリート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(図一 5.3)。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 $0.06\pm 0.04\text{N/mm}^2/\text{s}$)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。

なお、繰返し回数は平成 25 年度及び 26 年度の試験では(2)に示す実地震動による応力履歴の推定を踏まえ 10 回、または 20 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 回までの繰返し回数での引張疲労試験も行った。



図一 5.3 繰返し引張試験方法(概念図)

(2) 実地震動による応力履歴の推定

(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、重力式コンクリートダム（H=90m）の地震応答解析（線形動的解析）により、堤体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。

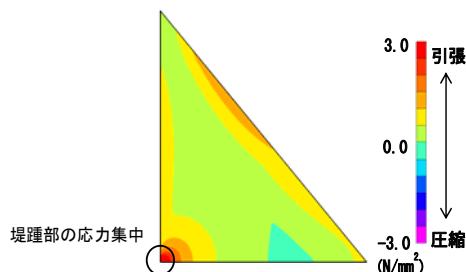
解析に用いた地震波形は、実ダム（重力式コンクリートダム）で観測された地震動のうち、地震計の設置位置や最大加速度を指標として、表－ 5.2 に示す地震動を選定した。ただし、内陸型地震での地震波形はその周波数応答特性の違いによる影響を小さくするため、大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）¹⁾ に示される内陸型地震を対象とした照査用下限加速度応答スペクトルに適合するよう振幅調整を行った波形（最大水平加速度約 300cm/s²）とした。

表－ 5.2 解析に用いた地震波

観測年月日	地震名	地震タイプ*	観測 ダム名	最大水平加速度 (cm/s ²)
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
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
2011.03.11	東北地方太平洋沖	海溝型	高柴	151.03
2011.04.11	福島県浜通りの地震	内陸型	高柴	265.40

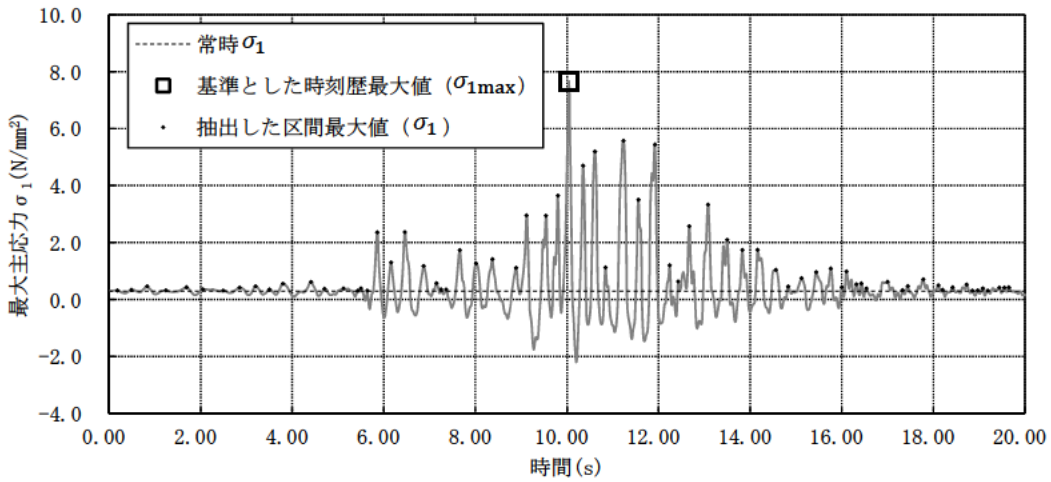
* 内陸型地震の解析では、観測波形を下限加速度応答スペクトル（最大水平加速度約 300cm/s²）に適合するよう振幅調整した。

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－ 5.4 に示す。フィレットを設けない場合、重力式コンクリートダムの地震時の最大主応力 σ_1 は、一般に堤踵部で最大となるが、本解析においても同様の傾向である。この堤踵部の応力時刻歴を抽出した結果を図－ 5.5 に示す。



図－ 5.4 最大主応力 σ_1 （全時刻最大）の分布の一例

（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－ 5.5 堤踵部最大主応力 σ_1 時刻歴の一例

(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)

σ_1 の最大値は、時刻 10.04 s における 7.67 N/mm²であるが、その前後でも引張側（+側）の応力のピーク値が発生している。そこで、抽出したピーク値 σ_1 を時刻歴最大値 σ_{1max} で除して応力振幅比S（式(5.1)）とし、その値を超過するピークの個数の関係を整理した結果を図－ 5.6 に示す。

$$S_{(t)} = \sigma_{1(t)} / \sigma_{1max} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

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]

σ_{1max} ：最大主応力の最大値[N/mm²]

図－ 5.6 より、同一振幅比に対するピーク値の超過回数は、内陸型に比べ地震動の継続時間が長い海溝型の方が多くなっている。弾性範囲を超える可能性が高い応力振幅としてS=80%、90%の時を考えると、繰返し回数が多い海溝型でもS=80%で十数回、S=90%で数回程度の繰返し回数である。このことを踏まえて、静的載荷時の引張強度の平均値 \bar{f}_t に対する最大応力比 S_{max} の主な試験ケースを 0.8 及び 0.9 とし、各々での繰返し回数を 20 回及び 10 回とした。

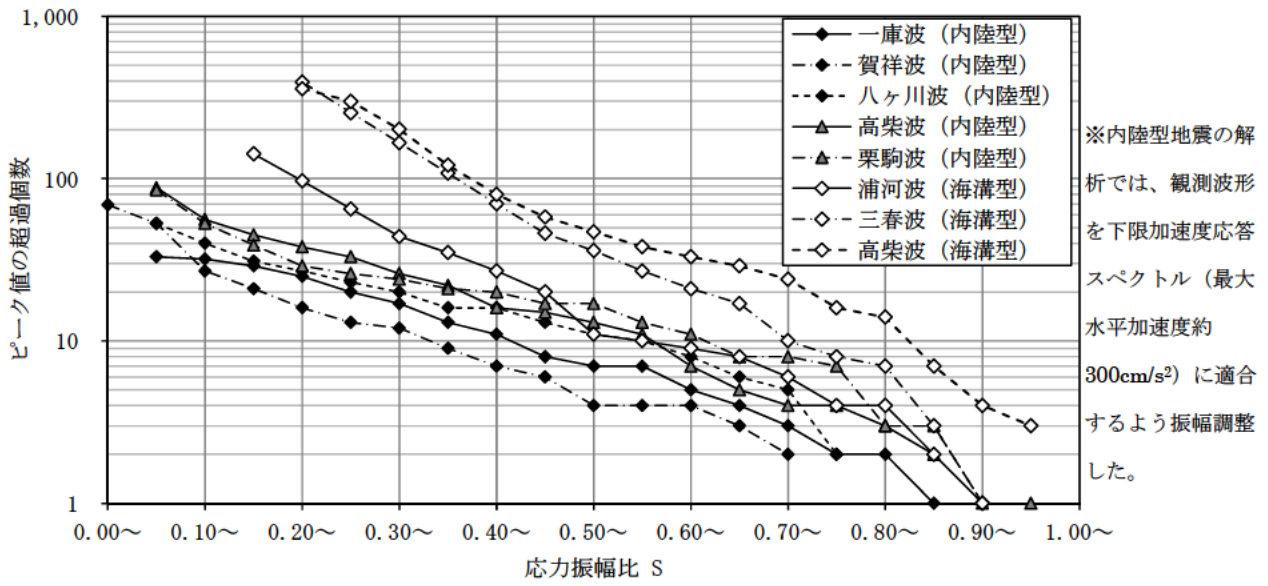


図- 5.6 応力振幅比 S とピーク値の超過個数 (堤踵部)

5.3 破壊エネルギー試験

破壊エネルギー試験は、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」⁴⁾（以下「JCI 規準」、図－ 5.7）に準じた方法で行い、急速载荷を含めたすべての試験を静的载荷での引張試験に使用した万能試験機（写真- 5.1）を用いて実施した。なお、JCI 規準では载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。

载荷速度は、JCI 基準での規定速度（CMOD 速度 0.1mm/min 以下）での静的载荷のほか、地震時における動的载荷条件でのダムコンクリートの破壊エネルギーについて把握するため、10mm/min、100mm/min および 667mm/min の急速载荷条件で実施した。

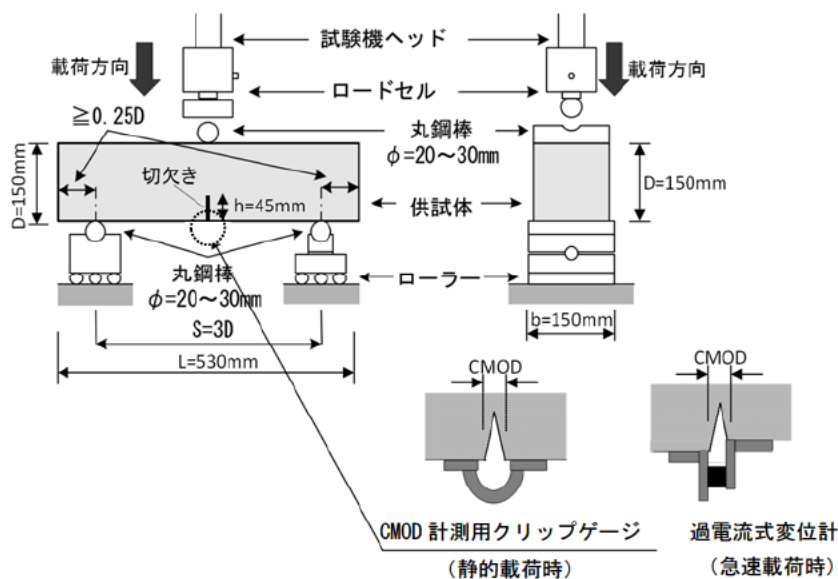
実施した破壊エネルギー試験の一覧を表－ 5.3 に示す。

载荷方法の概要を図－ 5.7 に示す。静的载荷での試験では、供試体中央に荷重を载荷しながら、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（サンプリング速度 = 20Hz）をもちい破断時まで CMOD を測定した。また、急速载荷での試験ではより CMOD 測定時のサンプリング速度を大きくできる渦電流式変位計（サンプリング速度 = 5kHz）を用いて破断時まで CMOD を測定した。

表－ 5.3 破壊エネルギー試験実施一覧

実施 年度	配合*	供試体数量(本)			
		CMOD 速度(mm/min)			
		0.1	10	100	667
H26	A 配合	3	3	3	2
	B 配合	3	3	3	2
H27	A 配合	3		3	4
	B 配合	3		3	4

* A 配合：外部コンクリート相当、B 配合：RCD コンクリート相当。



図－ 5.7 破壊エネルギー試験方法

6. 試験結果および考察

6.1 圧縮強度試験

6.1.1 試験結果

圧縮強度試験で得られた圧縮強度および静弾性係数の一覧を表ー 6.1 に示す。なお、静弾性係数は、ひずみゲージの値を用いて、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」により算出した。

表ー 6.1 圧縮強度試験結果一覧

実施 年度	配合	供試体形状	ピーク強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
			各値	平均	各値	平均
H25	A 配合	円柱	50.4	50.2	34.3	35.2
			51.2		35.3	
			48.9		35.9	
	B 配合	円柱	22.5	22.5	31.9	32.2
			22.2		33.0	
			22.9		31.6	
H26	A 配合	円柱	61.1	61.2	33.8	33.1
			61.1		32.6	
			61.5		32.8	
	B 配合	円柱	30.9	32.2	30.7	32.2
			32.8		34.7	
			33.0		31.3	
H27	A 配合	円柱	53.5	52.1	35.9	35.8
			49.4		36.2	
			53.5		35.3	
	B 配合	円柱	30.4	30.2	33.1	33.4
			30.3		34.3	
			29.9		32.8	

6.2 引張強度試験

6.2.1 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－ 6.2～表－ 6.7 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、各供試体の破壊時における最大荷重値から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。

$$f_t = \frac{2P_{cr}}{\pi dL} \quad (6.1)$$

ここに、

f_t : 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－ 5.1 および図－ 5.2 に示した方法で求めた。

表一 6.2 直接引張試験結果一覧

実施 年 度	配 合	載荷 パターン	最大荷重 (kN)	引張強度		載荷速度**			備 考
				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)	区分	
H25	B 配合	単調載荷	18.9	1.070	0.95	0.033	1.837E-06	静的	
			18.6	1.053	0.94	0.094	4.966E-06		
			20.9	1.185	1.06	0.078	3.500E-06		
			19.7	1.113	0.99	0.050	2.234E-06		
			20.1	1.135	1.01	0.054	2.334E-06		
			20.9	1.184	1.05	0.071	4.190E-06		
			22.0	1.268	1.13	—	—		
			23.0	1.291	1.15	—	—		
			23.0	1.307	1.16	—	—		
			23.0	1.300	1.16	—	—		
			25.0	1.527	1.36	—	—		
			事前載荷*** S _{min} =0.1 S _{max} =0.7 1 回	24.0	1.349	1.20	23.030		1.005E-03
		27.0		1.519	1.35	43.141	5.235E-03		
		25.5		1.431	1.27	37.594	3.334E-03		
		29.5		1.668	1.49	249.965	6.700E-03		
		事前繰返し載荷 S _{min} =0.1 S _{max} =0.5 10 回	18.2	1.030	0.92	0.044	1.696E-06	静的	
			19.8	1.125	1.00	0.037	1.493E-06		
			20.0	1.132	1.01	0.049	1.648E-06		
			20.9	1.183	1.05	0.044	1.854E-06		
			18.8	1.066	0.95	0.036	1.961E-06		
			22.3	1.266	1.13	0.041	2.362E-06		
		事前繰返し載荷 S _{min} =0.1 S _{max} =0.7 10 回	20.0	1.140	1.02	0.045	2.425E-06	静的	
			20.2	1.148	1.02	0.049	2.323E-06		
			17.5	0.994	0.88	0.053	2.099E-06		
			19.5	1.102	0.98	0.048	2.211E-06		
			20.6	1.171	1.04	0.042	2.130E-06		
			19.6	1.109	0.99	0.042	1.108E-06		
		事前繰返し載荷 S _{min} =0.1 S _{max} =0.8 10 回	19.7	1.118	1.00	0.052	2.296E-06	急速	
			20.5	1.160	1.03	0.050	2.361E-06		
			19.3	1.096	0.98	0.054	2.173E-06		
			19.1	1.086	0.97	0.052	5.011E-06		
			19.4	1.105	0.98	0.049	2.067E-06		
			20.2	1.152	1.03	0.050	2.162E-06		
			25.0	1.380	1.23	12.875	2.228E-03		
			28.0	1.575	1.40	55.335	7.535E-03		
			27.0	1.512	1.35	212.423	1.411E-02		
			26.0	1.467	1.31	43.516	9.796E-04		
			28.0	1.595	1.42	236.721	6.218E-03		
			25.0	1.425	1.27	22.317	1.006E-03		

* 「強度比」は同一ケースの単調・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）は単調載荷時（事前繰返し載荷ケースでは繰返し載荷後の単調載荷時）の値。「—」は計測できなかったもの。

*** 急速載荷における単調載荷試験においては、載荷途中に治具と供試体間の一部剥離によるものと思われる一時的な応力低下現象が見られ、応力増加速度・ひずみ速度の算出が困難であったため（応力増加速度、ひずみ速度が「—」のケース）、最大応力比 S_{max}=0.7 の事前載荷（1 回）を行い、その後急速載荷による直接引張試験を実施したケース。

表一 6.3 割裂引張試験結果一覧(1)

実施 年度	配合	荷 載 パ タ ー ン	最大荷重 (kN)	引張強度		荷 載 速 度**			備 考
				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)	区 分	
H25	A 配合	単調荷 載	198.0	4.188	0.92	0.060	8.94E-06	静 的	
			210.0	4.446	0.98	0.060	1.96E-05		
			234.0	4.957	1.09	0.060	1.25E-05		
			206.0	4.381	0.97	0.060	1.55E-05		
			211.0	4.479	0.99	0.060	1.46E-05		
			224.0	4.755	1.05	0.060	1.29E-05		
			330.0	6.994	1.54	171.385	4.31E-02	急 速	
			290.0	6.186	1.36	59.627	1.45E-02		
			300.0	6.438	1.42	101.172	7.68E-03		
		事前繰返 し 荷 載 S _{min} =0.1 S _{max} =0.5 10回	221.0	4.683	1.03	0.060	1.13E-05	静 的	
			208.0	4.421	0.98	0.060	3.88E-06		
		事前繰返 し 荷 載 S _{min} =0.1 S _{max} =0.7 10回	193.0	4.314	0.95	0.064	4.70E-06		
			199.0	4.213	0.93	0.060	5.54E-06		
		事前繰返 し 荷 載 S _{min} =0.1 S _{max} =0.8 10回	212.0	4.496	0.99	0.060	9.36E-06		
			203.0	4.312	0.95	0.060	3.02E-06		
			216.0	4.576	1.01	0.060	8.16E-06		
			170.8	3.623	0.80	0.060	6.79E+00		1回目で破壊
			171.0	3.628	0.80	0.060	6.56E+00		2回目で破壊
		事前繰返 し 荷 載 S _{min} =0.1 S _{max} =0.9 10回	177.6	3.769	0.83	0.060	1.38E+01		1回目で破壊
			192.2	4.078	0.90	0.060	7.36E+00		1回目で破壊
		事前繰返 し 荷 載 S _{min} =0.1 S _{max} =0.8 10回	310.0	6.573	1.45	280.839	1.98E-02		急 速
			295.0	6.268	1.38	179.991	2.84E-02		
			265.0	5.650	1.25	65.137	9.18E-03		
			325.0	6.926	1.53	111.536	1.08E-02		

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

** 「荷
載
速
度」（応力増加速度、ひずみ速度）は単調荷
載時（事前繰返し荷
載ケースでは繰返し荷
載後の単調荷
載時）の値。

表一 6.4 割裂引張試験結果一覧(2)

実施 年度	配合	荷 重 パ タ ー ン	最大荷重 (kN)	引張強度		荷重速度**			備 考	
				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)	区分		
H25	B 配合	単調荷 重	181.1	3.202	0.99	0.060	5.86E-05	静 的		
			161.2	2.851	0.89	0.060	2.38E-06			
			190.6	3.370	1.05	0.060	9.32E-06			
			176.9	3.127	0.97	0.060	7.17E-05			
			190.3	3.365	1.04	0.060	3.19E-06			
			192.8	3.410	1.06	0.060	1.84E-05			
			250.0	4.431	1.38	119.919	4.46E-02	急 速		
			250.0	4.420	1.37	44.031	2.89E-03			
			225.0	3.978	1.24	227.226	7.89E-03			
		事前繰返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.5 10回	156.0	2.756	0.86	0.059	2.05E-05	静 的		
			177.0	3.134	0.97	0.059	3.86E-05			
			203.0	3.586	1.11	0.059	2.45E-06			
		事前繰返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.7 10回	177.0	3.132	0.97	0.059	2.62E-06			
			169.0	2.996	0.93	0.060	1.04E-05			
			150.0	2.650	0.82	0.060	4.73E-06			
		事前繰返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.8 10回	165.0	2.915	0.91	0.060	4.35E-06		急 速	
			181.0	3.198	0.99	0.060	6.19E-06			
			191.0	3.616	1.12	0.066	4.23E-06			
			145.8	2.577	0.80	0.060	1.08E-05	6回目で破壊		
		事前繰返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.8 10回	245.0	4.357	1.35	129.156	8.28E-03	急 速		
			235.0	4.199	1.30	48.048	8.42E-03			
			260.0	4.578	1.42	244.856	4.63E-02			
		事前繰返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.8	145.9	2.579	0.80	0.060	4.21E-06	静 的	11回目で破壊	

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

** 「荷重速度」（応力増加速度、ひずみ速度）は単調荷重時（事前繰返し荷重ケースでは繰返し荷重後の単調荷重時）の値。

表 6.5 割裂引張試験結果一覧(3)

実施 年度	配合	荷 重 パ タ ー ン	最大荷重 (kN)	引張強度		荷 重 速 度**			備 考
				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)	区 分	
H26	A 配合	単調荷 重	220.4	4.677	1.12	0.072	1.77E-05	静 的	
			179.8	3.816	0.91	0.072	1.46E-05		
			242.8	4.044	0.97	0.072	1.38E-05		
			235.0	4.988	1.19	101.622	3.84E-02	急 速	
			340.3	7.221	1.73	859.989	4.07E-01		
		事 前 繰 返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.8 20回	213.6	4.533	1.08	0.059	9.63E-06	静 的	
			188.5	4.000	0.96	0.059	8.60E-06		
			185.4	3.934	0.94	0.060	6.66E-06		
			247.8	5.259	1.26	99.167	1.58E-02	急 速	
			300.5	6.377	1.53	860.020	1.15E-01		
		事 前 繰 返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.9 10回	216.4	4.592	1.10	0.059	1.72E-05	静 的	
			212.6	4.511	1.08	0.059	9.31E-06		
			177.2	3.759	0.90	0.060	7.18E-06		4回目で破壊
			177.2	3.759	0.90	0.060	1.76E-05		4回目で破壊
			177.3	3.761	0.90	0.060	8.37E-06		2回目で破壊
			177.1	3.757	0.90	0.059	6.87E-06		1回目で破壊
			281.4	5.972	1.43	101.810	9.30E-03		急 速
		B 配合	単調荷 重	195.4	3.455	0.99	0.060	5.63E-06	静 的
	193.0			3.413	0.98	0.060	6.54E-06		
	201.6			3.564	1.02	0.060	6.56E-06		
	303.8			5.373	1.55	150.405	5.34E-02	急 速	
	292.9			5.180	1.49	660.760	1.33E-01		
	事 前 繰 返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.8 20回		217.0	3.837	1.10	0.059	8.14E-06	静 的	
			198.0	3.501	1.01	0.060	4.90E-06		
208.3			3.684	1.06	0.059	5.54E-06			
157.9			2.792	0.80	0.060	5.46E-06	6回目で破壊		
290.0			5.129	1.47	157.714	4.65E-02	急 速		
308.7	5.460		1.57	680.929	1.56E-01				
事 前 繰 返 し 荷 重 S _{min} =0.1 S _{max} =0.9 10回	208.7		3.690	1.06	0.059	2.65E-06	静 的		
	177.5		3.139	0.90	0.060	4.56E-06		2回目で破壊	
	177.5		3.139	0.90	0.060	3.36E-06		2回目で破壊	
	177.6		3.141	0.90	0.056	4.79E-06		7回目で破壊	
	175.7		3.107	0.89	0.059	2.42E-05		1回目で破壊	
	255.4	4.517	1.30	137.860	1.99E-02	急 速			

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

** 「荷重速度」（応力増加速度、ひずみ速度）は単調荷重時（事前繰返し荷重ケースでは繰返し荷重後の単調荷重時）の値。

表 6.6 割裂引張試験結果一覧(4)

実施 年度	配合	荷 重 パ タ ー ン	最大荷重 (kN)	疲労寿命* Nr (回)	引張強度**		荷重速度***		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)	
H27	A 配合	単調荷 重	194.800	—	4.134	1.04	0.060	3.28E-06	静 的
			175.600	—	3.726	0.94	0.060	3.16E-05	
			194.700	—	4.132	1.04	0.060	2.07E-05	
			178.150	—	3.781	0.95	0.060	8.24E-06	
			192.400	—	4.083	1.03	0.060	3.96E-06	
			184.050	—	3.906	0.99	0.060	5.35E-06	
		事前繰返し荷 重 (疲労試験) S _{min} =0.1 S _{max} =0.9 100 回	168.000	1	3.565	0.90	0.060	3.99E-06	
			218.800	11	3.567	0.90	0.060	7.63E-06	
			168.000	19	3.565	0.90	0.060	7.55E-06	
			168.000	25	3.565	0.90	0.060	9.34E-06	
			168.000	37	3.565	0.90	0.060	1.98E-05	
			201.800	100→	4.281	1.08	0.060	6.70E-06	
			214.950	100→	4.561	1.15	0.060	3.65E-06	
			217.550	100→	4.617	1.17	0.060	4.76E-06	
			167.950	100→	4.626	1.17	0.060	5.76E-06	
			217.600	100→	4.618	1.17	0.060	6.43E-06	
			230.150	100→	4.884	1.23	0.060	4.62E-06	
			230.050	100→	4.882	1.23	0.060	5.35E-06	
			233.750	100→	4.960	1.25	0.060	3.13E-06	
			232.850	100→	4.941	1.25	0.060	3.76E-06	
			235.750	100→	5.003	1.26	0.060	4.58E-06	
			236.000	100→	5.008	1.26	0.060	1.35E-05	
			248.050	100→	5.264	1.33	0.060	7.38E-06	
			249.500	100→	5.295	1.34	0.060	6.04E-06	
		事前繰返し荷 重 (疲労試験) S _{min} =0.1 S _{max} =0.8 100 回	183.650	100→	3.897	0.98	0.060	5.10E-06	
			198.000	100→	4.202	1.06	0.060	4.47E-06	
213.650	100→		4.534	1.14	0.060	4.92E-06			
249.450	100→		5.294	1.34	0.060	3.75E-06			
230.150	100→		4.882	1.23	0.060	9.84E-06			
249.450	100→		5.294	1.34	0.060	3.75E-06			

* 疲労寿命は破壊時までの繰返し荷重回数。「100→」は所定上限繰返し回数(100回)で破壊しなかったことを示す。

** 「引張強度」の「各値」のうち繰返し荷重中に破壊したものは、その時の最大荷重値から求めた値。規定回数(100回)で破壊しなかったものは、その後の単調荷重による破壊時の最大荷重値から求めた値。「強度比」は同一配合の単調・静的荷重での引張強度(試験値の平均値)に対する比。

*** 「応力増加速度」は、単調荷重ケースについては応力の時刻歴よりピーク応力点とピーク応力の 1/3 の応力になる点を結ぶ直線の勾配として算出した。繰返し荷重ケースについては、繰返し荷重中に破壊したものは破壊時の直線の勾配から、規定回数(100回)で破壊しなかったものは、その後の単調荷重による破壊時の直線の勾配から単調荷重ケースと同様の方法で求めた。「ひずみ速度」については、ひずみの時刻歴より破断時ひずみとその 1/3 のひずみとなる点を結んだ直線の勾配として算出した。

表 6.7 割裂引張試験結果一覧(5)

実施 年度	配合	荷 重 パ タ ー ン	最大荷重 (kN)	疲労寿命* N_r (回)	引張強度**		荷重速度***			
					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)	区分	
H27	B 配合	単調荷重	224.7	—	3.974	1.13	0.060	2.07E-04	静的	
			189.4	—	3.348	0.95	0.060	2.22E-05		
			213.2	—	3.770	1.07	0.060	8.20E-05		
			183.6	—	3.246	0.92	0.060	1.49E-05		
			195.1	—	3.450	0.98	0.059	5.90E-05		
			187.6	—	3.317	0.94	0.060	4.76E-05		
		事前繰返し荷 (疲労試験) $S_{min}=0.1$ $S_{max}=0.9$ 100 回	178.7	1	3.160	0.90	0.060	8.31E-06		
			178.5	1	3.157	0.90	0.060	6.64E-05		
			178.9	3	3.163	0.90	0.060	2.16E-05		
			178.9	5	3.164	0.90	0.060	9.89E-06		
			179.1	27	3.166	0.90	0.060	1.32E-05		
			179.0	32	3.165	0.90	0.060	1.57E-05		
			178.9	33	3.164	0.90	0.060	2.10E-05		
			178.9	33	3.164	0.90	0.060	2.20E-05		
			178.9	46	3.164	0.90	0.060	1.21E-05		
			179.0	49	3.165	0.90	0.060	8.48E-06		
			179.0	51	3.165	0.90	0.060	9.44E-06		
			179.0	57	3.165	0.90	0.060	1.46E-05		
			179.0	63	3.165	0.90	0.060	7.78E-06		
			179.1	89	3.166	0.90	0.060	2.60E-05		
			208.1	100→	3.680	1.05	0.060	7.20E-06		
			223.1	100→	3.944	1.12	0.060	3.50E-06		
			226.0	100→	3.996	1.14	0.060	4.06E-06		
			241.8	100→	4.276	1.22	0.060	5.01E-06		
			事前繰返し荷 (疲労試験) $S_{min}=0.1$ $S_{max}=0.8$ 100 回	195.5	100→	3.457	0.98	0.060		1.17E-05
				205.3	100→	3.631	1.03	0.060		5.19E-06
				214.7	100→	3.796	1.08	0.060		5.23E-06
				215.8	100→	3.816	1.08	0.060		8.42E-06
				221.6	100→	3.918	1.11	0.060		2.60E-06
				232.4	100→	4.109	1.17	0.060		4.25E-06

* 疲労寿命は破壊時までの繰返し荷重回数。「100→」は所定上限繰返し回数(100回)で破壊しなかったことを示す。

** 「引張強度」の「各値」のうち繰返し荷重中に破壊したものは、その時の最大荷重値から求めた値。規定回数(100回)で破壊しなかったものは、その後の単調荷重による破壊時の最大荷重値から求めた値。「強度比」は同一配合の単調・静的荷重での引張強度(試験値の平均値)に対する比。

*** 「応力増加速度」は、単調荷重ケースについては応力の時刻歴よりピーク応力点とピーク応力の 1/3 の応力になる点を結ぶ直線の勾配として算出した。繰返し荷重ケースについては、繰返し荷重中に破壊したものは破壊時の直線の勾配から、規定回数(100回)で破壊しなかったものは、その後の単調荷重による破壊時の直線の勾配から単調荷重ケースと同様の方法で求めた。「ひずみ速度」については、ひずみの時刻歴より破断時ひずみとその 1/3 のひずみとなる点を結んだ直線の勾配として算出した。

6.2.2 単調載荷試験結果の考察

(1) 圧縮強度との関係

既往研究^{5),6)}や実ダムでの試験事例における一軸圧縮強度（荷重速度 $0.01\text{N/mm}^2/\text{s} \sim 0.1\text{N/mm}^2/\text{s}$ ）と静的・単調荷重（同）での引張強度の関係に今回実施した単調・静的荷重ケースの結果を加えて図-6.1 に示す。静的・単調荷重での割裂引張強度、直接引張強度とも、一軸圧縮強度に対する比はほぼ既往の研究・試験事例の範囲内であることがわかる。

また、一般にコンクリートの割裂引張試験ではコンクリートの破壊面が規定されるのに対し、直接引張試験では供試体の最も弱い部分で破壊が生じることなどから、割裂引張強度より直接引張強度が小さくなると考えられ、図-6.1 に示した既往研究においてこの傾向が認められるが、この点は今回の試験でも同様であった。

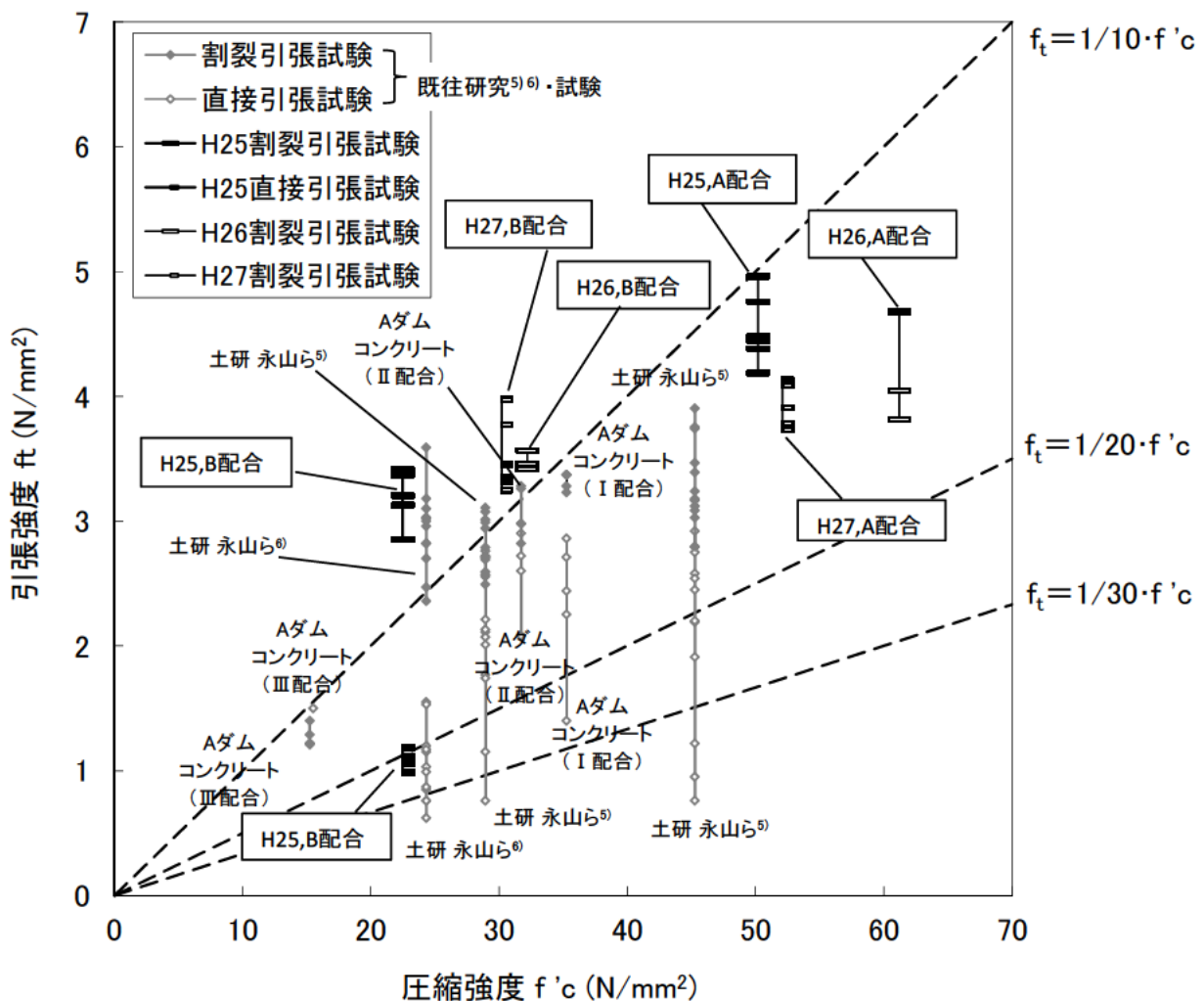


図-6.1 圧縮強度と引張強度の関係（荷重速度 $0.01 \sim 0.1\text{N/mm}^2/\text{s}$ ）

(2) 荷速度による影響

単調荷での直接引張試験および割裂引張試験で得られた応力-ひずみ関係の一例を図- 6.2 に示す。直接引張試験においては、ほぼすべてのケースで荷途中に応力・ひずみが一時的に減少する現象がみられ、その後、応力・ひずみが再度増加し、破壊に至った。この一時的な応力低下は、荷重増加に伴い、治具・供試体間の接着面の一部剥離による応力解放による可能性が考えられるが、その後の破壊に至るまでの応力-ひずみ曲線の形状は、割裂引張試験とほぼ同様の形状となっている。

割裂引張試験による応力-ひずみ曲線は、引張応力の増加に伴いひずみはほぼ線形的に増加し、その後非線形となって破断に至っているが、静的荷に比べ急速荷の方が線形領域が広がり、ピーク強度も増加している。

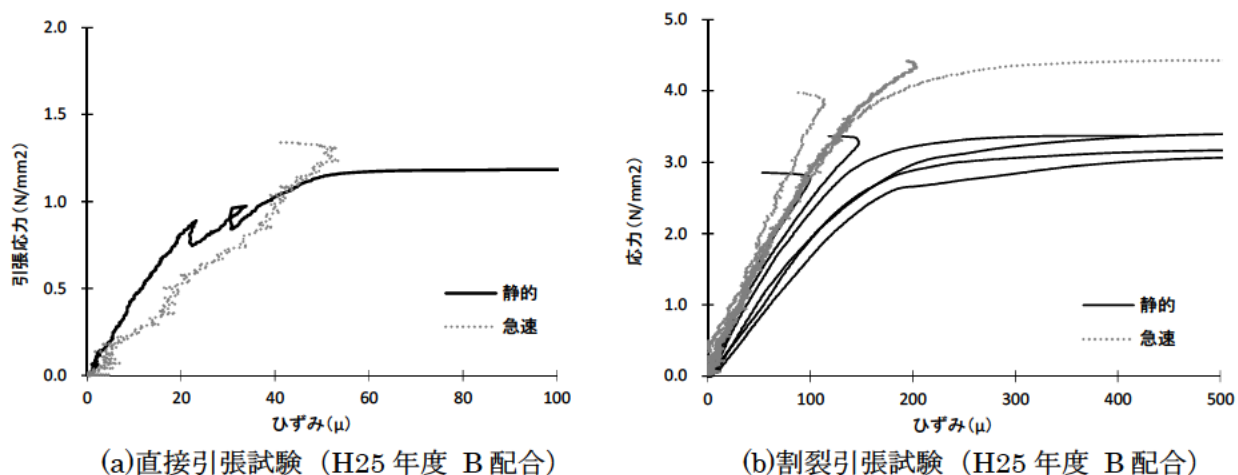
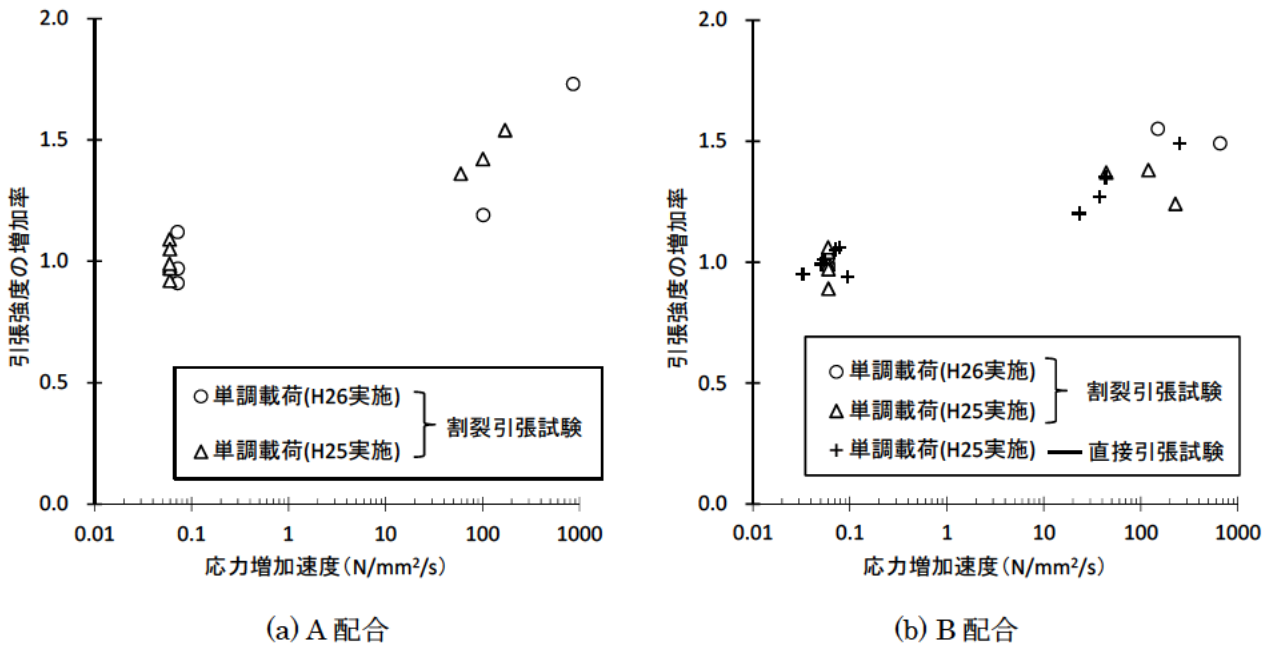


図- 6.2 応力-ひずみ曲線の例

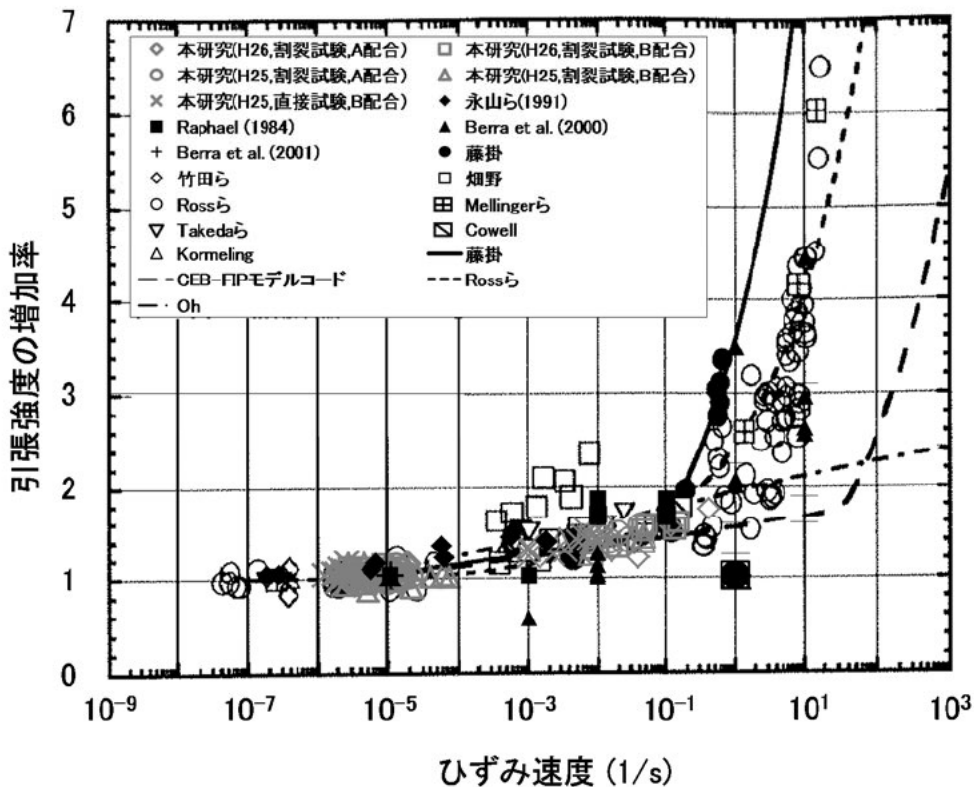
直接引張試験および割裂引張試験での荷速度（応力増加速度）と引張強度（ピーク強度）の単調・静的荷ケースでの平均値に対する増加率との関係を図- 6.3 に示す。

急速荷での引張強度は直接引張試験・割裂引張試験とも、静的荷時に比べ明らかに増加する傾向が認められる。直接引張試験では静的荷時の 1.2~1.5 倍程度（B 配合）、割裂引張試験では静的荷時の 1.2~1.7 倍程度（A 配合）、1.2~1.6 倍程度（B 配合）となった。



図一 6.3 荷重速度と引張強度の増加率の関係

参考として、一般のコンクリートを対象にその引張強度（静的荷重時の強度に対する増加率）とひずみ速度の関係についての各研究者による既往の試験結果を整理したもの（藤掛⁷⁾による）に今回の試験結果のほかダムコンクリートを対象とした永山ら⁵⁾による試験結果を加筆すると図一 6.4 のようになる。今回の試験結果は、 $10^{-1}(1/s)$ 程度以下のひずみ速度範囲に限られるが、一般のコンクリートを含む既往研究と概ね整合する結果であることがわかる。

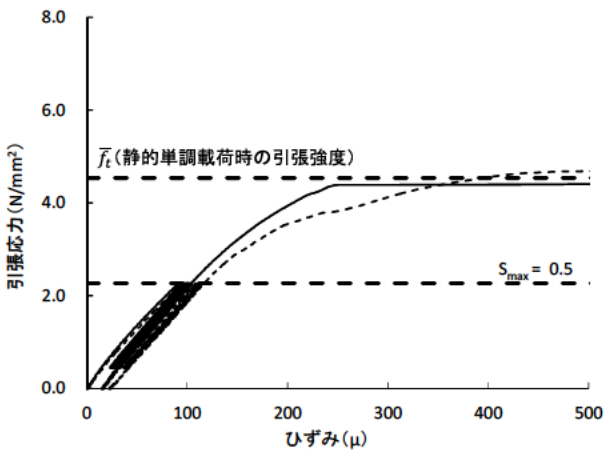


図一 6.4 ひずみ速度と引張強度の増加率の関係（藤掛⁷⁾に加筆）

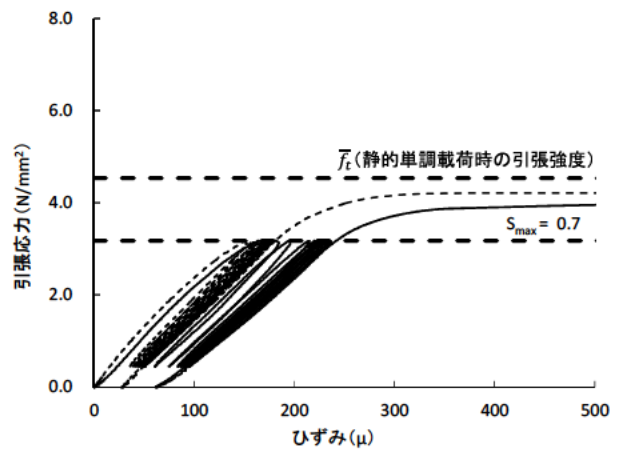
6.2.3 繰返し引張試験結果の考察

(1) 応力～ひずみ関係

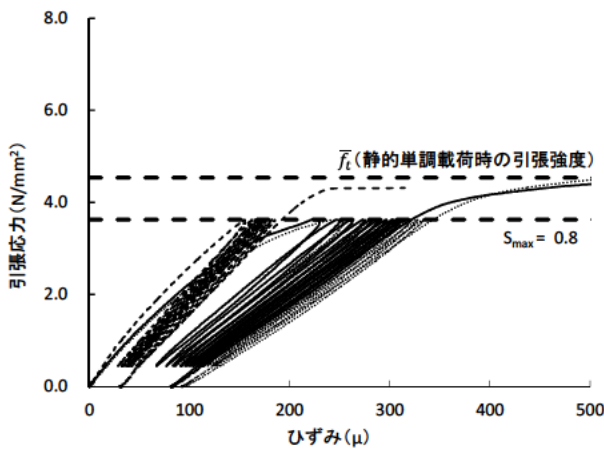
繰返し引張試験のうち、繰返し回数を 10 回とした割裂引張試験で得られた応力～ひずみ曲線（ひずみは供試体両端面に貼付したひずみゲージによる計測値の平均）の一例を図－ 6.5 および図－ 6.6 に示す。各ケースとも、繰返し载荷に伴い徐々にひずみの蓄積が生じており、残留ひずみは繰返し载荷での最大応力比が大きくなるほど大きくなる傾向にある。なお、各回の繰返し载荷に伴って生じる残留ひずみの大きさは、1 回目の载荷によるものが 2 回目以降よりも大きい傾向がみられる。この原因として、1 回目の载荷時に载荷板と供試体上面が均等に接触せず、一時的にやや偏った载荷状態となった可能性が考えられる。



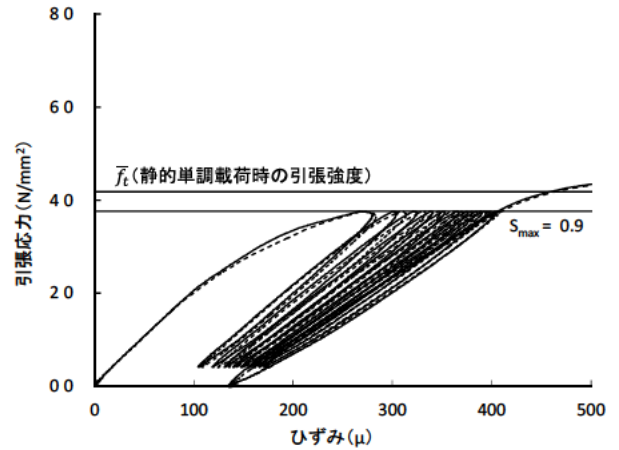
(a) 最大応力比 $S_{max}=0.5$ (H25 実施) (n=2)



(b) 最大応力比 $S_{max}=0.7$ (H25 実施) (n=2)

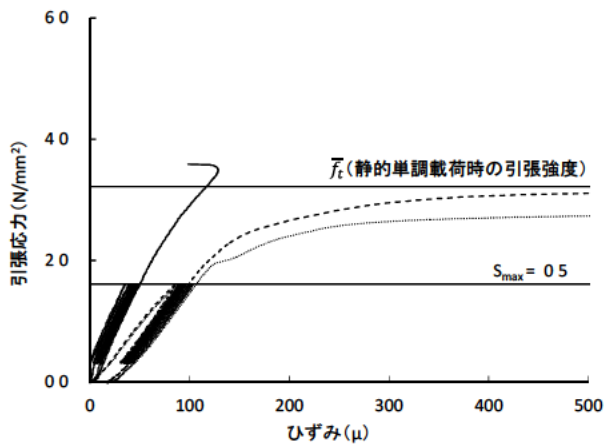


(c) 最大応力比 $S_{max}=0.8$ (H25 実施) (n=3)

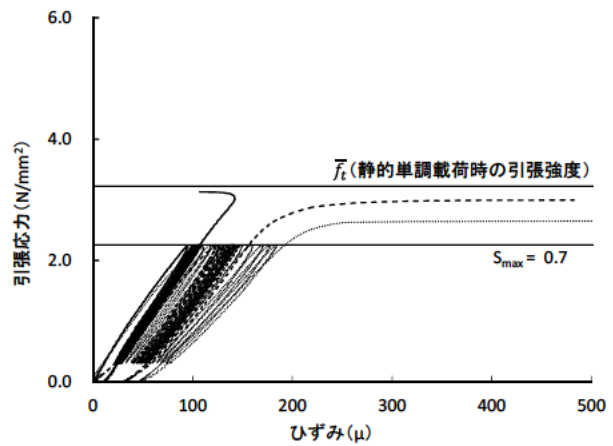


(d) 最大応力比 $S_{max}=0.9$ (H26 実施) (n=2)

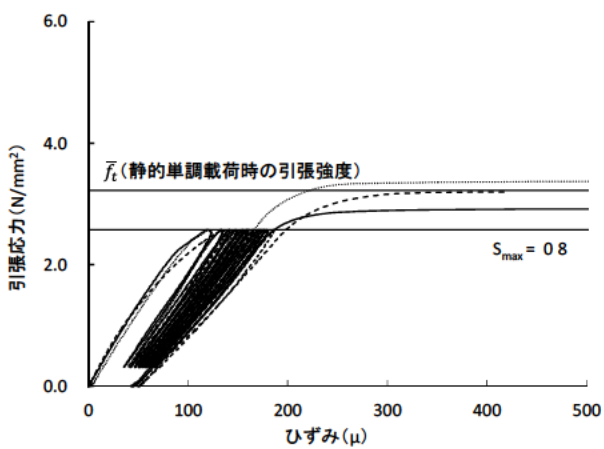
図－ 6.5 応力～ひずみ曲線（割裂引張試験、A 配合）（事前繰返し 10 回、n：供試体数）



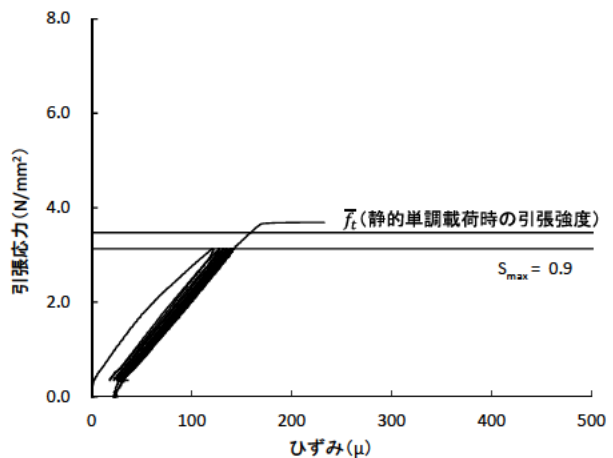
(a) 最大応力比 $S_{max}=0.5$ (H25 実施) (n=3)



(b) 最大応力比 $S_{max}=0.7$ (H25 実施) (n=3)



(c) 最大応力比 $S_{max}=0.8$ (H25 実施) (n=3)



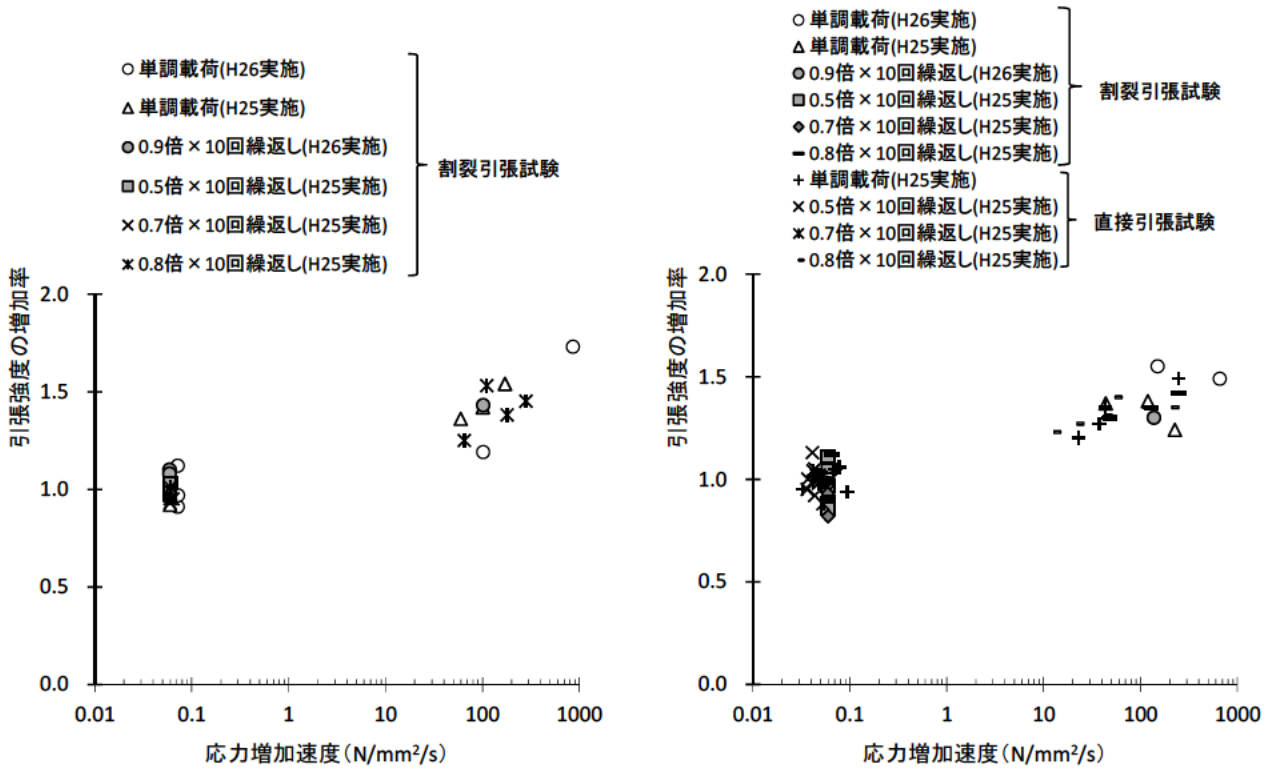
(d) 最大応力比 $S_{max}=0.9$ (H26 実施) (n=1)

図一 6.6 応力-ひずみ曲線（割裂引張試験、B 配合）（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について、繰返し载荷後の引張試験（直接引張試験および割裂引張試験）で得られた引張強度と载荷速度（応力増加速度）との関係を図一 6.7 に示す。また、静的载荷・急速载荷の別に最大応力比 S_{max} と引張強度の関係を整理したものを図一 6.8 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。しかし、繰返し载荷による影響については、今回実施したいずれのケースにおいても事前繰返し载荷を行わなかったケースと比べ、事前繰返し载荷を行ったケースでの明確な引張強度の低下は認められなかった。今回の試験条件（最大応力比 $S_{max} \leq 0.9$ 、事前繰返し回数 10 回）の範囲内では、供試体のばらつきに比べて明確になるほどの強度低下が生じなかった可能性があるが、割裂引張の場合には(1)に述べたように供試体と载荷板との接触部が事前载荷の際にやや変形することで接触面積が増加し、供試体に生じる引張応力が単調载荷ケースに比べやや小さかった可能性も考えられる。このため、より繰返し回数を多くした試験（引張疲労試験）により引張強度への影響を確認する必要があると考えられた。

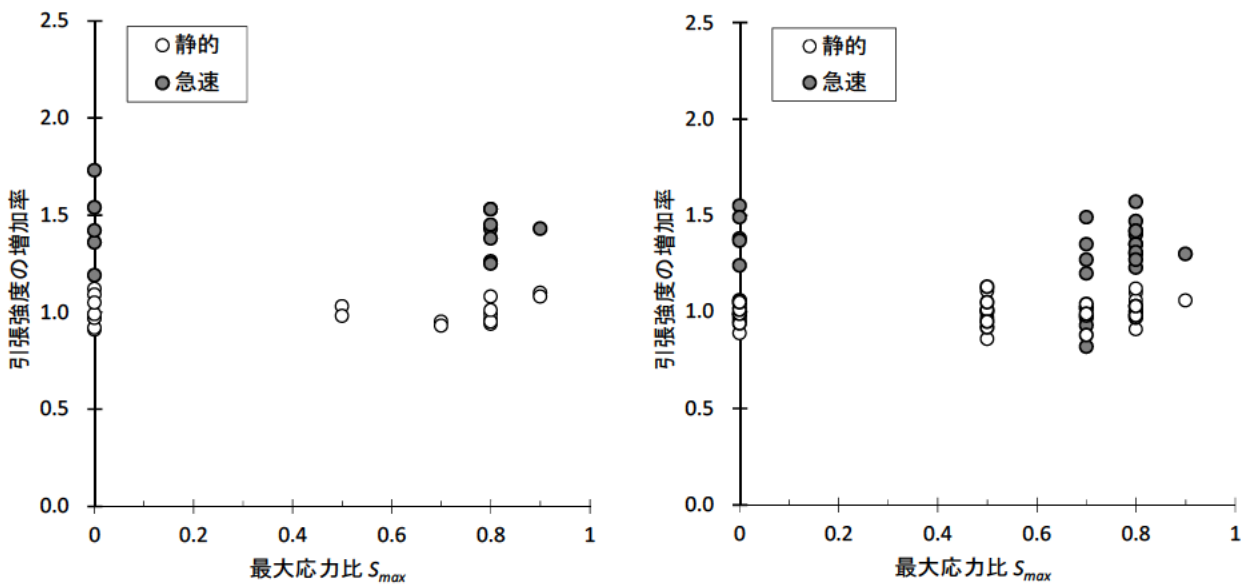


※引張強度の増加率は静的荷荷時の平均値に対する比。

(a) A 配合

(b) B 配合

図一 6.7 応力増加速度と引張強度の増加率の関係 (事前繰返し荷荷 10 回)



※引張強度の増加率は静的荷荷時の平均値に対する比。

(a) A 配合

(b) B 配合

図一 6.8 最大応力比と引張強度の増加率の関係 (事前繰返し荷荷 10 回)

(3) 引張疲労強度

割裂引張による繰返し回数を最大 100 回までとして実施した引張疲労試験の結果を表一 6.8 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（=0.1））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⁸⁾に基づく疲労寿命 N_r での生存確率^{9)、10)、11)}（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）までの事前繰返し载荷で破壊しなかったものは、「100→」と記載している。

なお、 $p(N_r)$ の算出は、既往研究^{9)、10)、11)}を参考に、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 (6.2)、繰返し回数が所定の上限回数（100 回）に達しても破壊しない供試体がある場合は、式 (6.3) により算出した。なお、式 (6.3) は、 n 個の供試体のうち、 m 個が所定の上限回数 N までに破壊しなかった場合、 $n+1$ 個の供試体が試験に供されたとして、所定の上限回数 N で $n-m+1$ 番目の供試体が破壊したとみなしたものである。

$$p(N_r) = 1 - \frac{r}{n+1} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

$$p(N_r) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

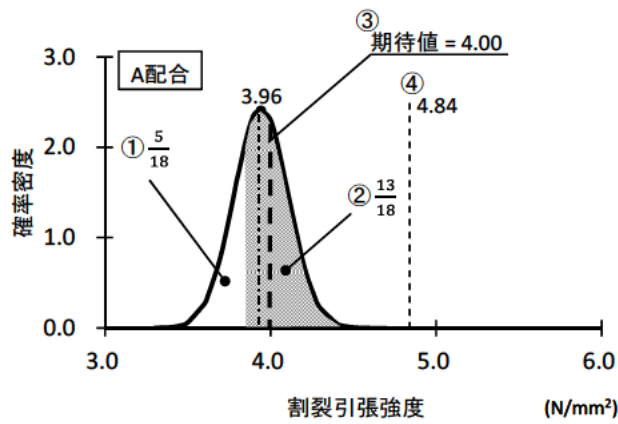
- ここに、 n ：同一条件で試験された総数(個)
- r ：総数 n 個の試験供試体の疲労寿命のうち、寿命の小さい方から数えた順番
- N_r ：疲労寿命 (回)

表一 6.8 のうち、A 配合（外部コンクリート相当）の供試体については、繰返し回数が所定の上限回数（100 回）に達しても破壊しなかったものが 18 本中 13 本存在し、繰返し载荷終了後に単調载荷を行って破壊させた際の引張強度（表一 6.6）の平均値が 4.84N/mm²であった。この値は、同配合の供試体に対して事前の繰返し载荷なしで実施した単調载荷時の引張強度の平均値 3.96 N/mm²の約 1.2 倍となっている。この原因として、上限回数までの繰返し载荷により供試体の変形が生じ、载荷板と供試体の接触面積が増加することで引張応力が徐々に低下していた可能性が考えられる。そこで、A 配合の最大応力比 S_{max} については、以下の考え方により補正を行うこととした。

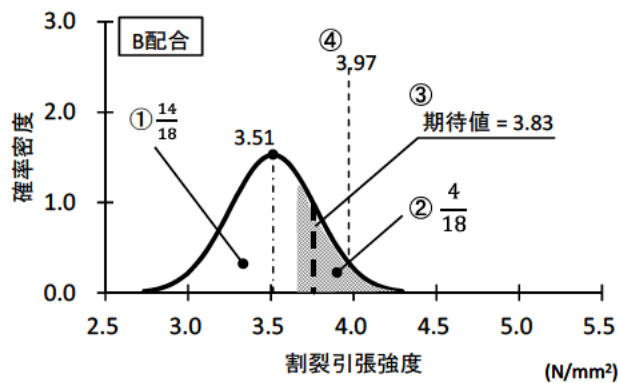
すなわち、事前の繰返し载荷無しで実施した単調载荷による割裂引張強度の確率分布が図一 6.9(a) に示すような正規分布に従うものと仮定し、同図の確率密度関数を用いて事前繰返し载荷の段階で破壊しなかった供試体の比率（13/18）に対応する引張強度の期待値を求めると 4.00 N/mm²となる。これより、実際には 100 回繰返し時の引張応力は最大応力比 $S_{max} = 0.9$ の 82.8%（= 4.00/4.84=0.826）しか掛かっておらず、最大応力比 $S_{max} = 0.74$ （= 0.9×0.826）になっていたものと考えた。そして、繰返し载荷 1 回目（ $S_{max} = 0.9$ ）～100 回目（ $S_{max} = 0.74$ ）の载荷荷重が線形的に低下したものと仮定し、A 配合についてはその平均値である最大応力比 $S_{max}=0.82$ として整理を行った。

なお、B 配合（RCD コンクリート相当）についても同様に、事前の繰返し载荷無しで実施した単調载荷による割裂引張強度の確率分布（図一 6.9(b)）から、事前繰返し载荷の段階で破壊しなかった供試体の比率（4/18）に対応する引張強度の期待値を求めると 3.83 N/mm²となる。この値は、繰返し载荷終了

後に単調荷重を行って破壊させた際の引張強度（表一 6.7）の平均値 3.97N/mm^2 とほぼ一致（ $= 3.83/3.97=0.964$ ）するため、B 配合については最大応力比 S_{max} の補正は行わなかった。



(a) A 配合



(b) B 配合

※①上限回数(100回)までに破壊した割合

②上限回数(100回)までに破壊しなかった割合

③上限回数(100回)までに破壊しなかった供試体の引張強度の期待値

④上限回数(100回)までに破壊しなかった供試体を単調荷重で破壊させたときの引張強度の平均値

図一 6.9 割裂引張強度（単調・静的荷重）の確率密度関数（正規分布）

表－ 6.8 引張疲労試験結果

実施 年 度	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（100回）後 の単調荷重での引張強度 (N/mm ²)		
H27	A 配合	0.9 (0.82 [*])	1	1	95.0%			
			2	11	90.0%			
			3	19	85.0%			
			4	25	80.0%			
			5	37	75.0%			
			6	100→		4.281	平均値 4.842	
			7	100→		4.561		
			8	100→		4.617		
			9	100→		4.626		
			10	100→		4.618		
			11	100→		4.884		
			12	100→		4.882		
			13	100→		4.960		
			14	100→		4.941		
			15	100→		5.003		
			16	100→		5.008		
			17	100→		5.264		
			18	100→		5.295		
	B 配合	0.9		1	1	95.0%		
				2	1	90.0%		
				3	3	85.0%		
				4	5	80.0%		
				5	27	75.0%		
				6	32	70.0%		
				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%		
				15	100→		3.680	平均値 3.974
				16	100→		3.944	
				17	100→		3.996	
				18	100→		4.276	

* 繰返し荷重中に引張応力が低減した可能性を考慮した補正值

** 疲労寿命は破壊時までの繰返し荷重回数。「100→」は所定上限繰返し回数（100回）で破壊しなかったことを示す。

$p(N_r)$ と N_r の関係を正規確率紙上にプロットしたものを図- 6.10 に示す。同図中には、最小二乗法による近似曲線も示している。

また、図- 6.10 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- 6.11 である。同図中には、最小二乗法により、原点 ($S_{max}=1, \overline{\log N_r}=0$) を通る直線として求めた曲線 (ダムコンクリートのS-N曲線) も示している。また、参考としてコンクリート標準示方書の解説¹²⁾と fib モデルコード¹³⁾に示される関係式も併せて示す。関係式①は繰返し回数が百回程度～数百万回の圧縮疲労試験による結果から算出されたものであるが、既往研究¹⁴⁾において、コンクリートの 200 万回引張 (割裂) 疲労強度は圧縮疲労強度とほぼ同じであるとの報告がされている。

$$\log N = 17 \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} \dots\dots\dots (6.4) \text{ 12}$$

$$\log N = 12(1 - S_{max}) \dots\dots\dots (6.5) \text{ 13}$$

図- 6.11 に示した今回の試験で得られたダムコンクリートのS-N曲線は、同図中に示したコンクリート標準示方書 (解説) に示される既往実験結果に基づく関係式に近い。同図より、最小応力比 S_{min} を引張強度の 10%とする同一振幅応力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 94%、同 100 回に対しては 88%程度になると想定される。

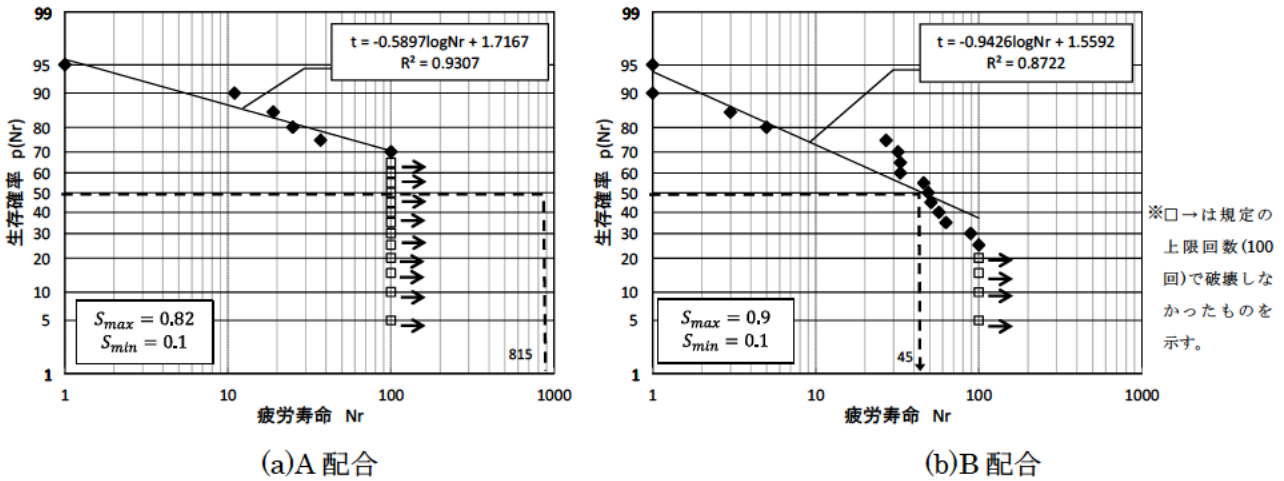
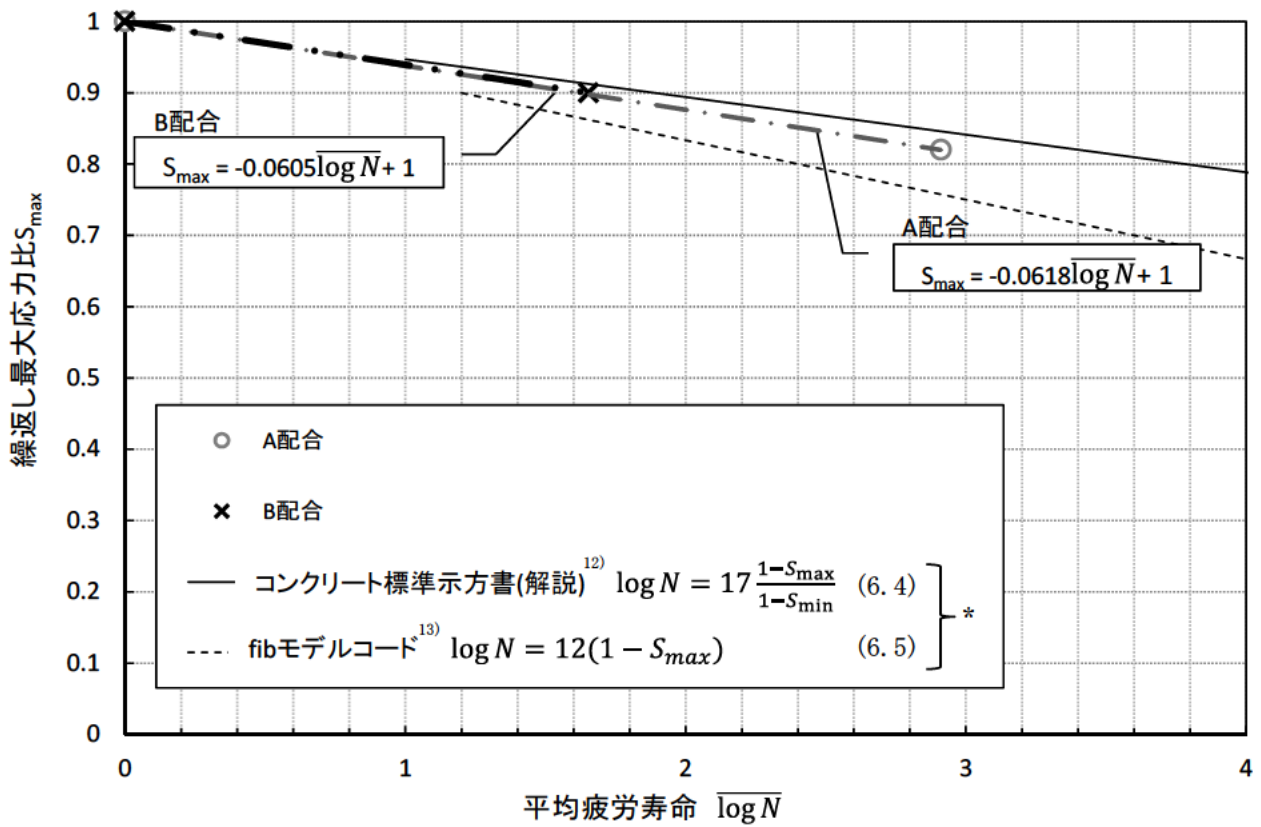


図- 6.10 コンクリート供試体の引張疲労寿命と生存確率の関係 (最小主応力比 $S_{min}=0.1$)



* コンクリート標準示方書(解説)¹²⁾にある式(6.4)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¹³⁾の式(6.5)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。

図一 6.11 引張繰返し载荷 ($S_{min} = 0.1$) での最大応力比 S_{max} と疲労寿命の関係

6.3 破壊エネルギー試験

6.3.1 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- 6.9 および表- 6.10 に、試験で得られた荷重-CMOD 曲線の一例（基準速度による結果）を図- 6.12 に示す。

なお、表- 6.9 および表- 6.10 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、(6.6)式 4)により算出した。また、同表中の破壊エネルギー増加率は各配合供試体の基準速度（静的載荷）での試験値（破壊エネルギー）の平均値に対する比である。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \times 1000 \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

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 曲線下の面積[N・mm]

W_1 : 供試体破断までに供試体の自重および載荷治具がなす仕事[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。

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_C \quad \dots\dots\dots (6.7)$$

ここに、 S : 載荷スパン[mm]

L : 供試体全長[mm]

m_1 : 供試体の質量[kg]

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

g : 重力加速度[9.807m/s²]

$CMOD_C$: 破断時における CMOD[mm]

表- 6.9 破壊エネルギー試験結果一覧(1)

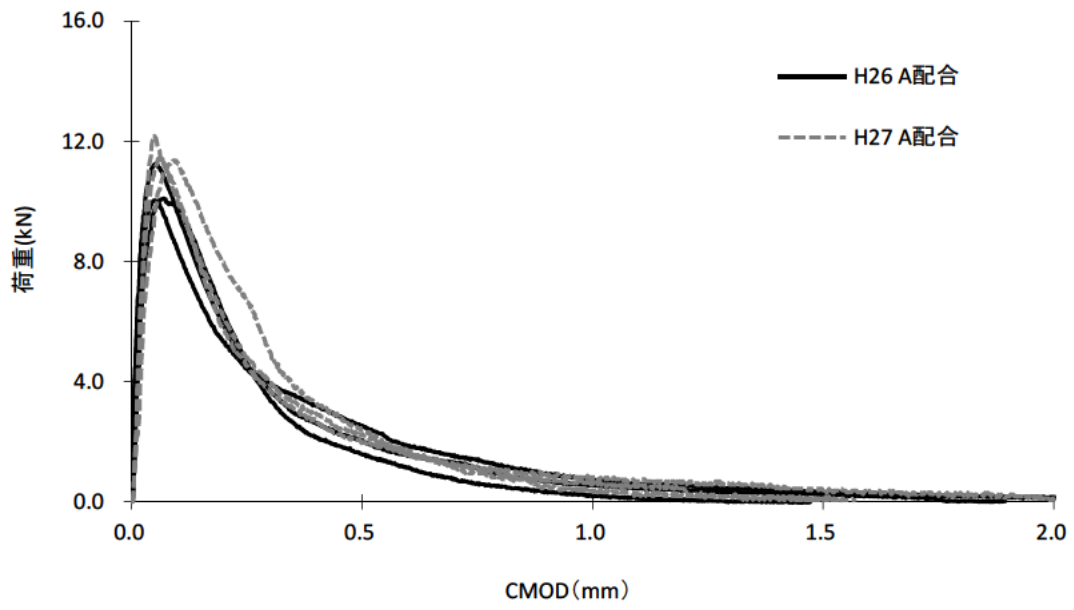
実施 年度	配合	供試体名	CMOD 速度 (mm/min)	破断時 最大荷重 (kN)	最大荷重時 CMOD(mm)	破壊エネルギー Gr(N/m)	破壊エネルギー 増加率*	
H26	A 配合	A-1	0.1	10.098	1.472	0.156	0.855	
		A-2		10.035	1.896	0.178	0.978	
		A-3		11.266	2.354	0.212	1.167	
		A-4	10	10.488	2.680	0.204	1.121	
		A-5		12.171	3.983	0.202	1.110	
		A-6		12.208	3.651	0.270	1.484	
		A-7	100	13.866	3.977	0.279	1.532	
		A-8		12.874	3.985	0.299	1.641	
		A-9		14.544	3.994	0.282	1.549	
		A-12	667	14.946	3.999	0.343	1.886	
		A-13		13.577	3.993	0.255	1.403	
		B 配合	B-1	0.1	11.065	2.831	0.244	1.293
			B-2		10.890	1.871	0.162	0.859
	B-3		8.930		1.761	0.160	0.848	
	B-4		10	9.734	4.000	0.255	1.356	
	B-5			13.427	3.964	0.333	1.769	
	B-6			11.882	3.964	0.299	1.586	
	B-7		100	11.995	3.996	0.250	1.326	
	B-8			12.811	4.000	0.272	1.443	
	B-9			11.241	4.000	0.312	1.655	
	B-12		667	14.004	3.999	0.326	1.728	
	B-13	13.427		4.000	0.320	1.696		

*各同一配合供試体の基準速度 (CMOD 速度 0.1mm/min) での試験値の平均値に対する比

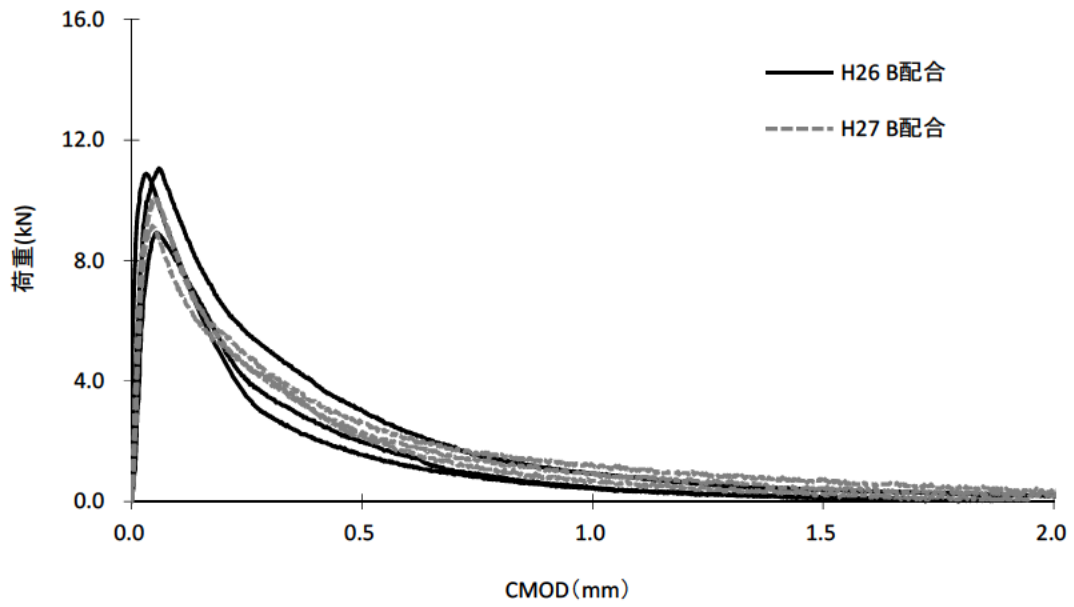
表－ 6.10 破壊エネルギー試験結果一覧(2)

実施 年度	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 増加率*
H27	A 配合	A-1	0.1	12.183	1.543	0.186	0.957
		A-4		11.367	2.136	0.223	1.146
		A-5		11.430	1.569	0.174	0.896
		A-2	100	12.560	1.827	0.188	0.966
		A-6		13.314	2.202	0.266	1.369
		A-8		12.183	1.710	0.196	1.009
		A-3	667	13.942	1.717	0.183	0.943
		A-7		14.695	2.766	0.302	1.554
		A-9		13.439	4.407	0.412	2.124
		A-10		15.888	2.455	0.264	1.358
	B 配合	B-1	0.1	9.169	2.632	0.204	1.048
		B-4		10.048	1.945	0.180	0.929
		B-5		10.048	2.808	0.236	1.216
		B-2	100	12.183	3.312	0.334	1.721
		B-6		11.367	3.554	0.298	1.537
		B-8		12.058	4.157	0.319	1.643
		B-3	667	14.946	2.566	0.230	1.186
		B-7		12.874	2.353	0.235	1.209
		B-9		14.758	3.301	0.328	1.692
		B-10		13.690	2.551	0.268	1.380

*各同一配合供試体の基準速度（静的載荷：CMOD 速度 0.1mm/min）での試験値の平均値に対する比



(a) A 配合



(b) B 配合

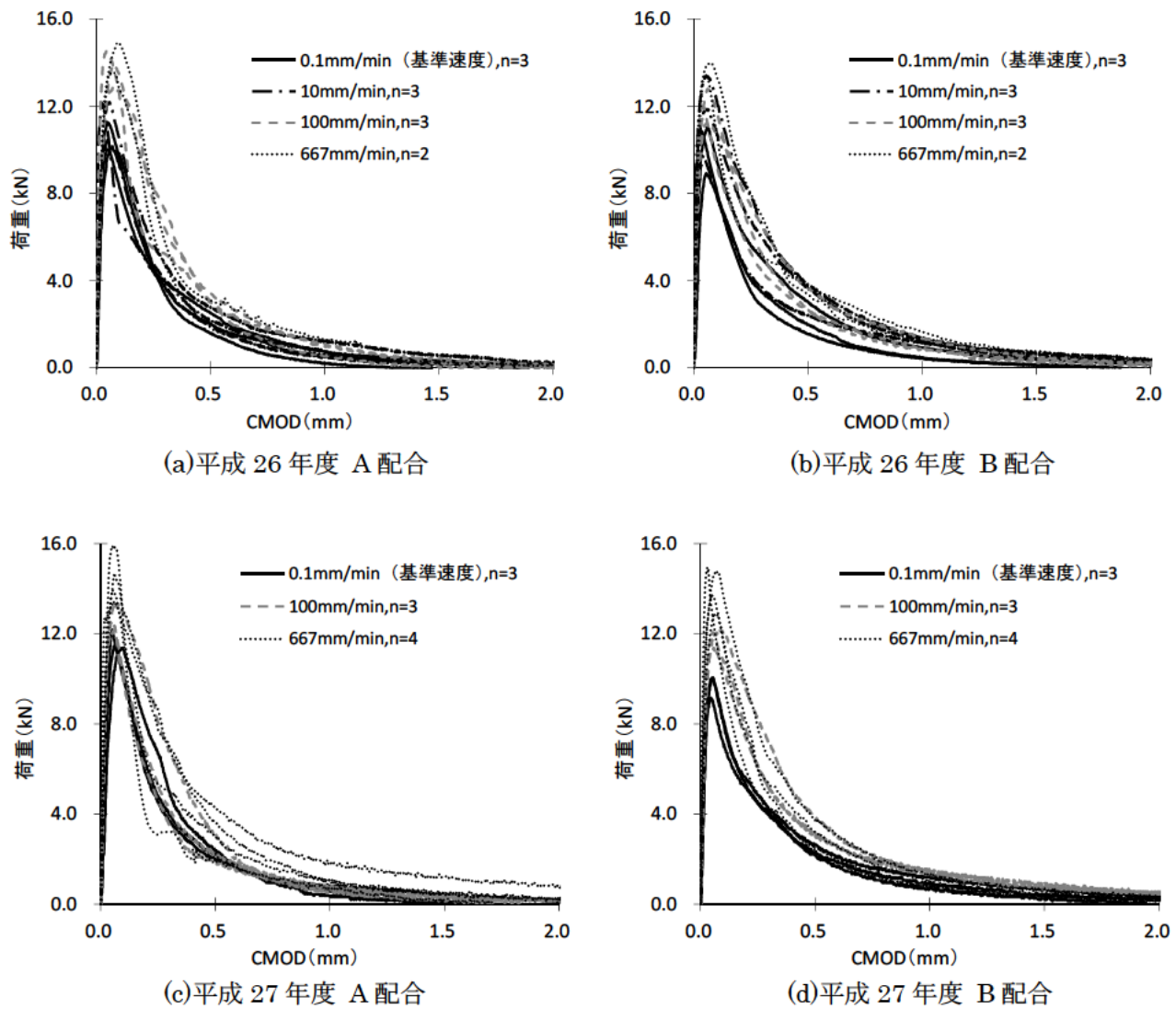
圖一 6.12 荷重-CMOD 曲線 (基準速度)

6.3.2 試験結果の考察

(1) 荷重—CMOD 関係

破壊エネルギー試験より得られた荷重—CMOD 曲線を図— 6.12 および図— 6.13 に示す。図— 6.12 では A 配合・B 配合全ケースの基準速度での静的試験で得られたもの、図— 6.13 では配合ごとに試験速度（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。

図— 6.13 より、A 配合、B 配合ともにピーク荷重値は概ね CMOD 速度が速いほうが大きくなっていくとともに、荷重—CMOD 曲線の荷重増加時の勾配も急になっている。



図— 6.13 荷重—CMOD 曲線 (n : 供試体数)

(2) 破壊エネルギー

表- 6.9 および表- 6.10 に示した CMOD 速度と破壊エネルギーの関係を図- 6.14 に示す。破壊エネルギーについては、基準速度 (= 0.1 mm/min) における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) で示している。

図- 6.14 より、CMOD 速度が増加すると全般的に破壊エネルギーが増加する傾向が認められる。ただし、CMOD 速度が増加すると破壊エネルギーのばらつきも大きくなっている。

なお、荷重速度 (試験速度) が破壊エネルギー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¹⁵⁾の研究がある。直接引張試験による同研究では、本検討での試験結果と同様に荷重速度が増加すると破壊エネルギーが大きくなることが報告されており、その理由として荷重速度が大きくなるとコンクリート中の間隙に含まれる水分の粘性効果や微細ひび割れ先端における慣性効果等の影響により最大引張応力が増加することが一因として挙げられる。また、コンクリート供試体中に形成されるひび割れは、荷重速度が大きくなるにしたがい粗骨材とモルタルの付着界面に沿って進展するよりも粗骨材を貫通して進展する傾向が強くなるとの報告¹⁶⁾もある。今回の実験結果についても同様の要因が関係していることが考えられる。

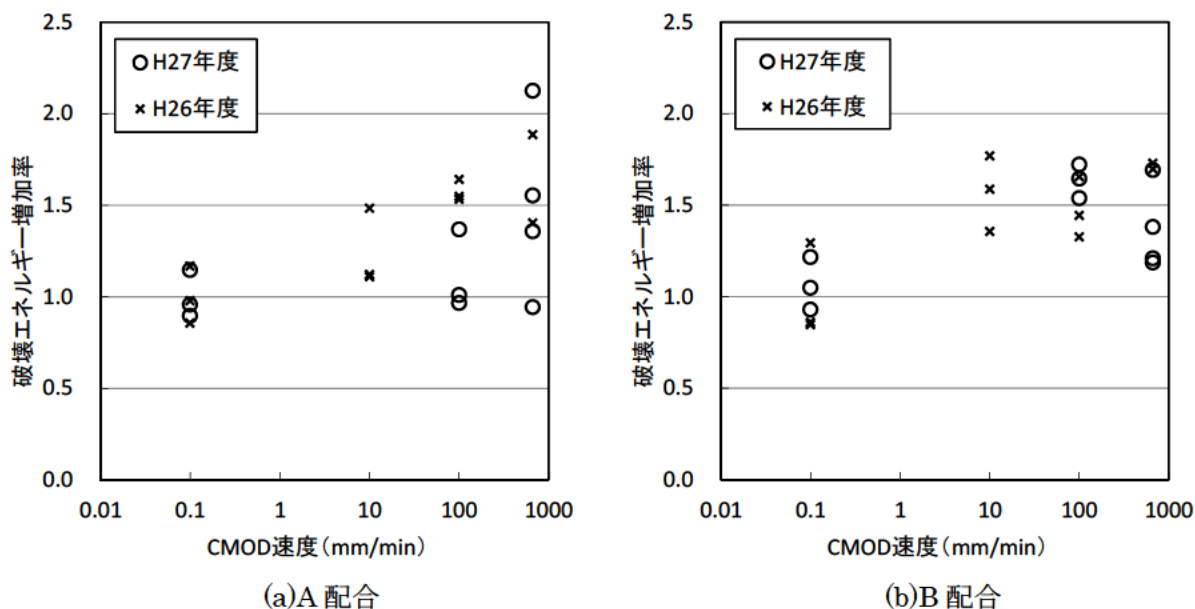


図- 6.14 CMOD 速度と破壊エネルギーの関係

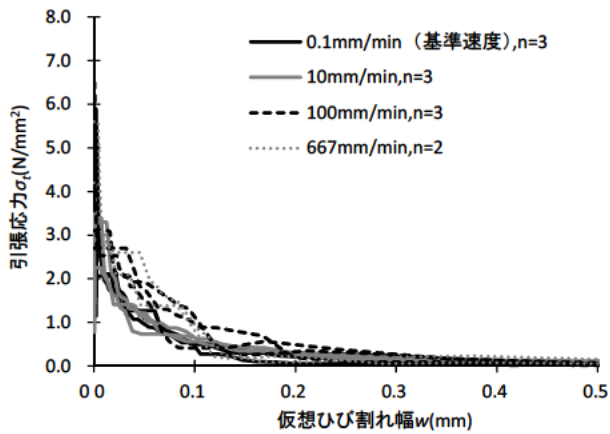
(3) 引張軟化曲線の推定

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、試験に用いたコンクリートの引張軟化曲線を推定した。解析は、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。逆解析により求めた引張軟化曲線を図- 6.15、その配合及び試験速度ごとに各供試体で得られた曲線を平均化したもの（以下「平均曲線」）を図- 6.16 にそれぞれ示す。なお、平均曲線は同一仮想ひび割れ幅における引張応力の平均値を算出（データが不足する区間については前後の値から内挿により補間した値を使用）することにより求めた。これらの図より、A 配合・B 配合ともに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破断という破壊過程を示すことが分かる。なお、図- 6.15 では分かりにくい図- 6.16 からは、A 配合・B 配合とも基準速度（CMOD 速度 = 0.1 mm/min）での試験より急速試験（CMOD 速度 = 100 mm/min）の方がやや上方にあり、上記③の過程における同一ひび割れ幅での応力がやや大きいことが分かる。このことが、急速載荷時の引張強度の増加とともに、図- 6.14 に示される試験速度（載荷速度）を大きくした場合に破壊エネルギーが増加することに対応していると考えられる。

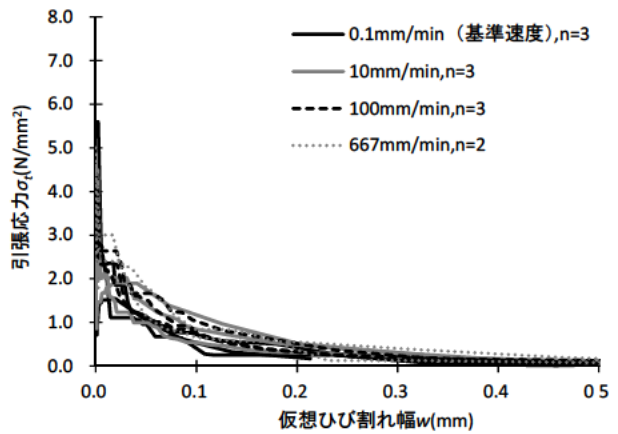
また、このような引張軟化曲線のモデル化を考える上で配合や載荷速度の違いが引張軟化曲線の形状に及ぼす影響を把握するため、図- 6.15 に示した引張軟化曲線のうち基準速度（CMOD 速度 = 0.1 mm/min）及び CMOD 速度 = 100 mm/min による試験結果から推定したものを引張応力 σ_t を引張強度 f_t 、仮想ひび割れ幅 w を[破壊エネルギー G_f /引張強度 f_t]でそれぞれ無次元化したものを図- 6.17 に示す。同図中には、配合及び試験速度ごとの平均曲線も示している。さらに、同一試験条件での平均曲線を載荷速度（CMOD 速度）及び配合別に比較したものをそれぞれ図- 6.18、図- 6.19 に示す。両図中には一般のコンクリートを対象としたコンクリート標準示方書²⁰⁾およびダムコンクリートを対象とした堀井ら²¹⁾によるモデル（いずれも 2 直線モデル）もあわせて示している。

図- 6.17 より、A 配合（外部コンクリート相当）の引張軟化曲線はコンクリート標準示方書に示される一般のコンクリートと類似した傾向、B 配合（RCD コンクリート相当）については A 配合に比べ軟化開始直後の応力低下が大きく、コンクリート標準示方書のモデルと堀井らによるモデルの中間的な形状となっていることが分かる。A 配合に比べ、モルタル分が少なく粗骨材の多い B 配合では、粗骨材の粒形・品質の不均質さによる影響を受けやすいものと考えられ、このことが A 配合に比べ軟化開始直後の応力低下が大きくなったことの一因として考えられる。

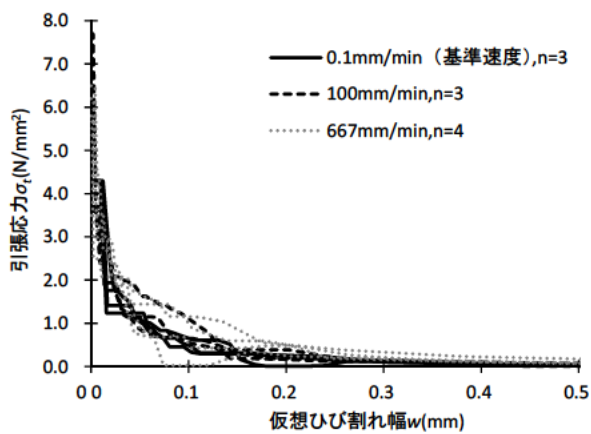
また、図- 6.19 より、A 配合・B 配合とも引張軟化曲線の形状に載荷速度の違いによる顕著な違いは見られないが、コンクリート標準示方書の 2 直線モデルでの折れ点に対応する付近での平均曲線の形状は、基準速度（CMOD 速度 = 0.1 mm/min）よりも急速試験（CMOD 速度 = 100 mm/min）の方がやや滑らかになっている。その違いは小さく明確な評価は難しいが、載荷速度の増加に伴うひび割れ進展経路の変化など破壊形態の変化を反映したものであるとすれば、このことも載荷速度の増加に伴い破壊エネルギーが増大することの一因になっている可能性が考えられる。



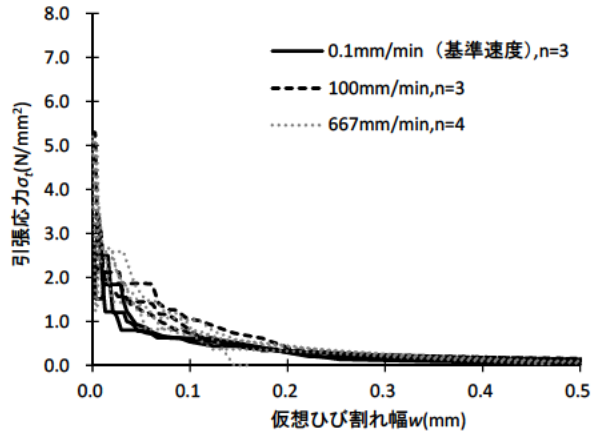
(a)平成 26 年度 A 配合



(b)平成 26 年度 B 配合

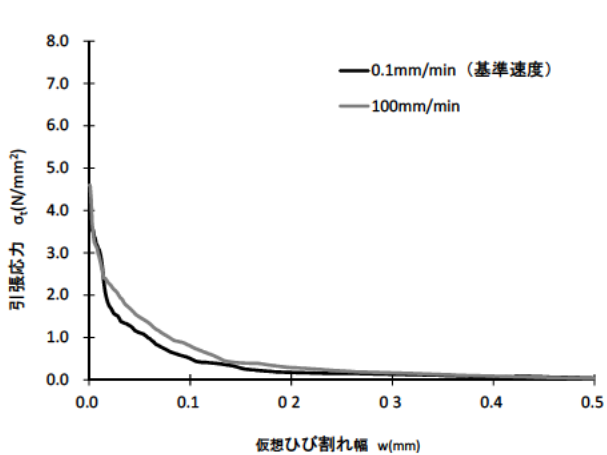


(c)平成 27 年度 A 配合

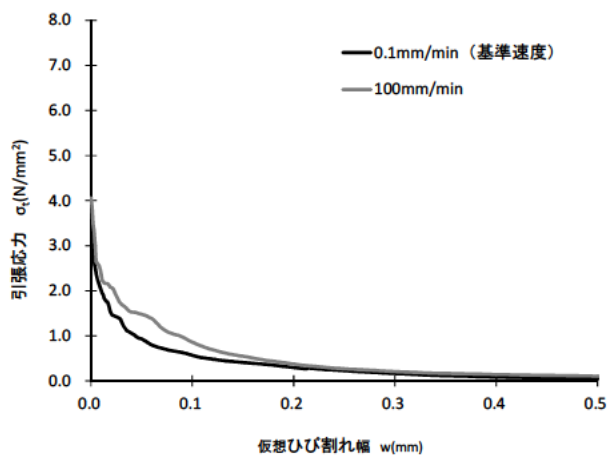


(d)平成 27 年度 B 配合

図一 6.15 多直線近似法による逆解析で推定した引張軟化曲線（各供試体、n：供試体数）

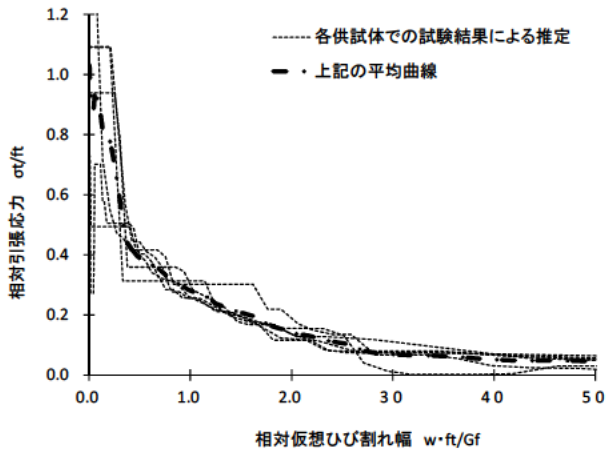


(a) A 配合

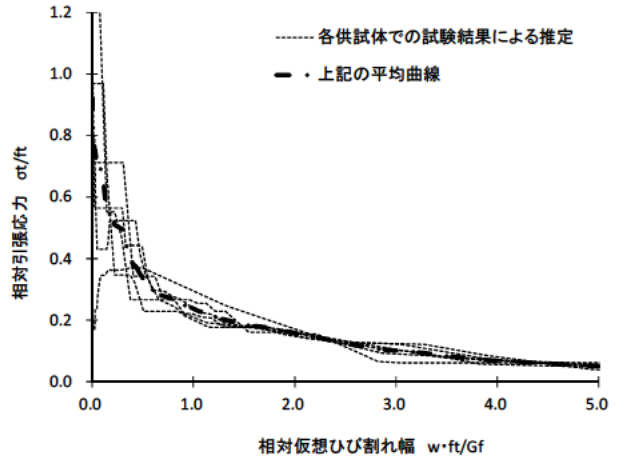


(b) B 配合

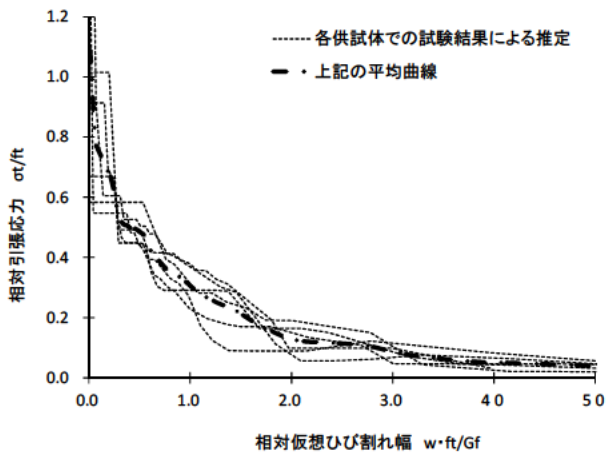
図一 6.16 多直線近似法による逆解析で推定した引張軟化曲線（平均）



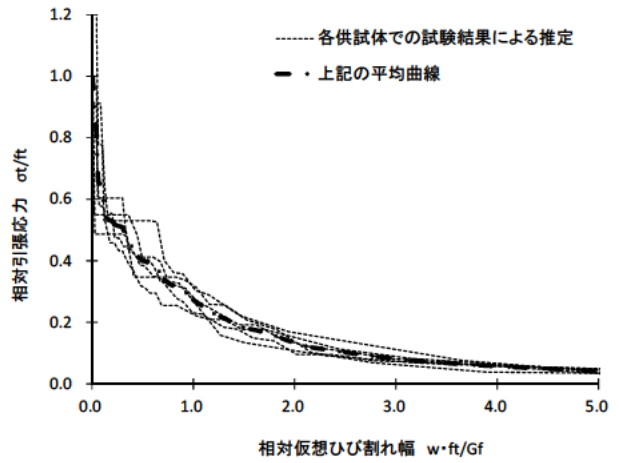
(a)A 配合 (CMOD=0.1mm/min)



(b)B 配合 (CMOD=0.1mm/min)

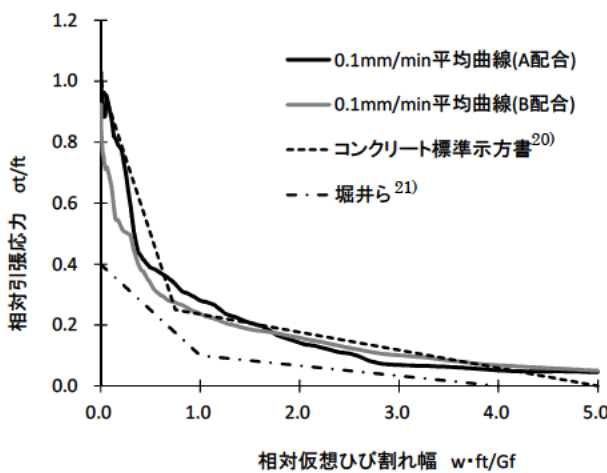


(c)A 配合 (CMOD=100mm/min)

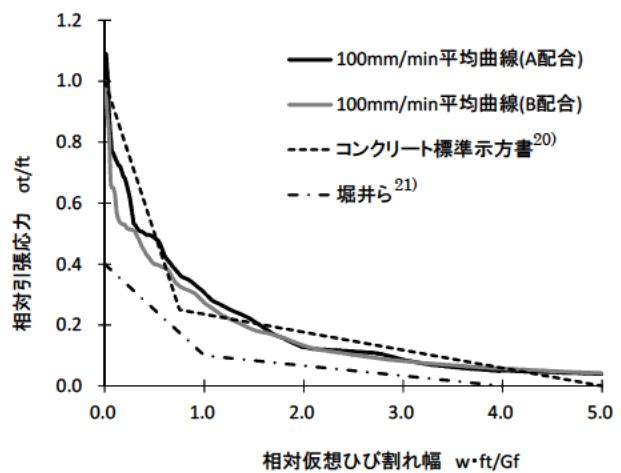


(d)B 配合 (CMOD=100mm/min)

図一 6.17 無次元化した引張軟化曲線 (各供試体及びその平均)

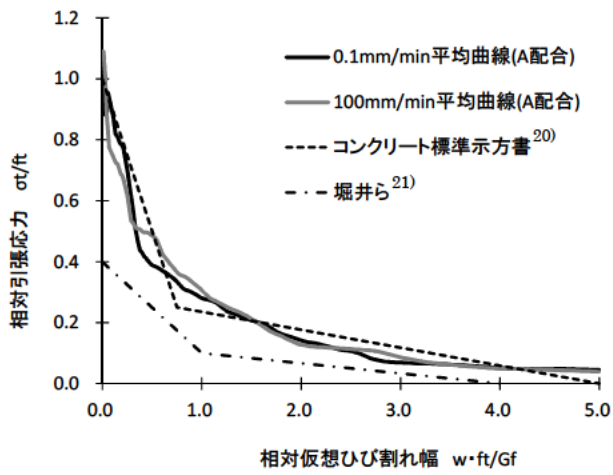


(a) CMOD=0.1mm/min

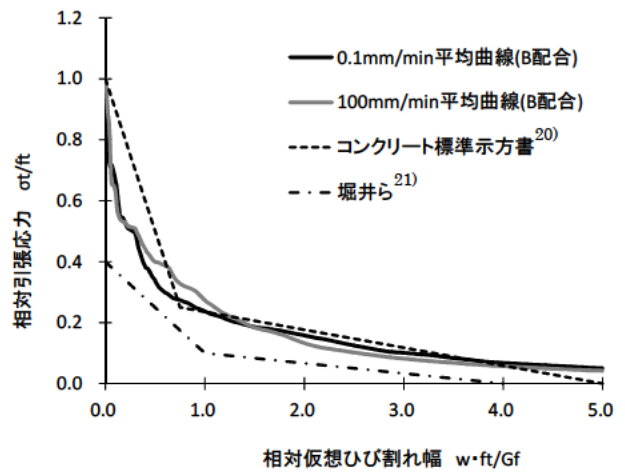


(b) CMOD=100mm/min

図一 6.18 無次元化した引張軟化曲線の比較 (载荷速度別平均)



(a) A 配合



(b) B 配合

図一 6.19 無次元化した引張軟化曲線の比較 (配合別平均)

7. まとめ

ダムコンクリートを想定した配合（A 配合：外部コンクリート相当、B 配合：RCD コンクリート相当）の供試体を用いて実施した室内試験により、載荷速度や繰返し載荷による応力履歴がダムコンクリートの引張強度や軟化特性に及ぼす影響について以下のような結果が得られた。

(1) 引張強度試験

- ・急速載荷時の引張強度は、A 配合（外部コンクリート相当）・B 配合（RCD コンクリート相当）とも静的載荷時に比べ増加する。
- ・事前繰返し載荷を実施した場合の引張強度は、今回の試験条件（最大応力比 $S_{max} \leq 0.9$ 、事前繰返し回数 10 回）の範囲内では、事前繰返し載荷を行わなかった場合の引張強度と比べ明確な低下は認められなかった。
- ・割裂引張による繰返し回数を最大 100 回までとして実施した引張疲労試験の結果より、ダムコンクリートにおける繰返し最大応力比 S_{max} と疲労寿命 N の関係（ $S-N$ 曲線）として、概ねコンクリート標準示方書に示される普通コンクリートでの関係に近い結果が得られた。

(2) 破壊エネルギー試験

- ・通常の試験速度（CMOD 速度）での試験結果と急速試験結果の比較から、A 配合・B 配合とも試験速度が増加すると破壊エネルギーは全般的に増加する傾向がある。ただし、試験速度が増加すると破壊エネルギーのばらつきも大きくなる。
- ・破壊エネルギー試験で得られた荷重－CMOD 曲線からの逆解析により、A 配合・B 配合とも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破断という破壊過程を示すと考えられる引張軟化曲線が得られた。
- ・試験速度（載荷速度）が異なる破壊エネルギー試験で得られた荷重－CMOD 曲線からの逆解析で推定されるダムコンクリートの引張軟化曲線の比較から、試験速度（載荷速度）が大きい方が同一ひび割れ幅での引張応力が上記③の過程で大きい傾向が得られた。このことは載荷速度が増加すると、破壊エネルギーが増加することと対応していると考えられる。
- ・無次元化した引張軟化曲線の形状は、A 配合（外部コンクリート相当）ではコンクリート標準示方書に示される一般のコンクリートと類似した傾向、B 配合（RCD コンクリート相当）についてはコンクリート標準示方書のモデルとダムコンクリートを対象とした堀井らによるモデルの中間的な形状となった。
- ・試験速度（載荷速度）の違いが無次元化した引張軟化曲線の形状に与える影響についてはあまり顕著でないが、A 配合・B 配合とも通常速度での試験よりも急速試験の方がコンクリート標準示方書の 2 直線モデルでの折れ点に対応する付近での形状がやや滑らかになる結果が得られた。

謝辞

本検討において、特殊な載荷装置を要する急速載荷での引張強度試験の実施にあたっては、試験が可能な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) 大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説、国土交通省河川局、2005.3
- 2) 永山 功、佐々木隆、波多野正博：載荷速度がコンクリートの引張強度に及ぼす影響、ダム技術、No. 148、pp. 25-30、1999.1
- 3) 江田 智、別府万寿博、大野友則、藤掛一典、佐藤紘志：引張試験法および試験体寸法の相違がコンクリートの動的引張試験強度に及ぼす影響、土木学会構造工学論文集、Vol. 49A、pp. 1279-1288、2003.3
- 4) 日本コンクリート工学協会：JCI 基準「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」(JCI-S-001-2003) 及び同付属書、2003
- 5) 永山 功、渡辺和夫、尾畑伸之：ダム用コンクリートの直接引張強度試験とその試験結果についての考察、ダム技術 No. 54、pp. 38-46、1991.3
- 6) 永山 功、渡辺和夫、佐々木隆、首藤美誠、庄司俊介、向江幸介：ダムコンクリートの直接引張強度についての実験的検討（その3）、土木研究所資料第3223号、1993.12
- 7) 藤掛一典：高ひずみ速度下におけるコンクリートの引張・圧縮特性に関する研究、筑波大学博士（工学）学位論文、1997.7
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete(*fib*):Model Code 2010,Finaldraft,Volume 1,*fib* Bulletins No.65,2012
- 14) 藤田嘉夫、海保康男：コンクリートの引張り、圧縮および曲げに関する疲労特性、セメント技術年報 21、1967
- 15) 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
- 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報告集、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) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp. 37-38、2013
- 21) 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

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4326 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