

## 論文 コンクリート増厚接合面のせん断強度に関する基礎的研究

杉本 啓太\*1・西内 達雄\*2

**要旨：**本研究ではダムの補強等に用いる増厚工法における新旧コンクリートの接合面の力学特性の把握を目的として、1) 接合面の処理方法、2) 接合面の垂直方向の直応力、3) 載荷速度を変化させた一面せん断試験を実施した。具体的には、接合面の処理方法として、打設面無処理、目荒らし処理、差し筋処理を行った接合面に対して、載荷条件の異なるせん断試験を実施し、接合面破壊時のせん断応力およびずれ変位量を一体のコンクリート試験体と比較した。結果として、目荒らし処理と差し筋処理による破壊時のせん断応力への影響の違いおよび載荷速度による破壊時のせん断応力の増加を示した。

**キーワード：**増厚、接合面、目荒らし、差し筋、一面せん断試験、せん断強度、載荷速度

## 1. はじめに

日本国内のダムやゲートピアにおいて、「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（案）・同解説」<sup>1)</sup>に従い、耐震性能照査が実施されている。同指針案には耐震性能照査の結果、所定の要求性能を満たさない場合、補強対策を検討することが示されている。しかし、ダムの耐震補強例は少なく、対策方法が確立されていない。ダムの耐震補強工法としては、断面の増厚が多く採用されるが、増厚により生じる接合面は設計時に一体として扱われることが多い。一般的な増厚に対しては、目荒らしやあと施工アンカーなどの処理を行うことにより、新旧コンクリートの一体化を担保する。一方で、ダムの増厚においては、目荒らし処理（以後、単に目荒らし）を施した接合面の引張・せん断強度を現地試験により計測し、常時あるいは地震時の発生応力を超えないことを確認し、さらに用心筋として既設面に鉄筋を挿入し露出させる処理（以後、差し筋）を施すことで、一体化を担保する<sup>2),3)</sup>。しかし、接合面の目荒らし状態に明確な規定はなく、目荒らしや差し筋による接合面の力学強度の担保に関して、定量的に検討をした例は少ない。また、地震時の荷重は瞬間的に動的な荷重が連続して作用する。圧縮・引張試験においては、動的な荷重が作用した際の強度増加であるひずみ速度効果が確認されており、評価式が提案されている<sup>4)</sup>。しかし、せん断強度に対する速度効果について検討された例は少ない。

本研究では、コンクリート増厚工法を対象とし、その接合面の力学特性の把握を目的として、さまざまな接合面状態を模擬した角柱試験体に対し、一面せん断試験を実施した。接合面の処理方法としては、無処理、目荒らし、差し筋とし、接合面のない一体物の試験体との比較を行い、接合面の処理方法による接合面破壊時のせん断応力（以後、破壊せん断応力）およびせん断伝達挙動の

変化について検討を行った。また、地震時には動的な荷重が発生するため、載荷速度を変化させた試験を実施し、載荷速度による影響についても検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体概要

試験体は、図-1 に示す 200×200×100mm の角柱とした。接合面を持つ試験体は 200×100×100mm である角柱の半分（以後、半角柱）の旧コンクリートを打設後、半角柱の新コンクリートを打設し、角柱とした。試験方法は接合面に対する一面せん断試験とした。試験パラメータは接合面の処理方法、接合面に垂直に作用する応力（以後、直応力）および載荷速度とした。接合面の処理方法は一体（接合面無し）、無処理、目荒らし、差し筋の4シリーズとし、それぞれを0, N, C, Sシリーズと呼ぶ。なお、実際の施工では、目荒らしおよび差し筋を併用するケースが多いが、各接合面の処理方法を明確にするために、組合せたケースは行っていない。初期直応力は1, 2MPaの2ケースとし、載荷速度を変えた動的試験では、初期直応力は1MPaのみとした。各ケースにおける試験体数は2体以上とした。試験ケース一覧を表-1に示す。

## 2.2 使用材料・試験体作成方法

使用材料は普通ポルトランドセメント、水、細骨材（茨城県産陸砂、密度 2.58g/cm<sup>3</sup>）、粗骨材（栃木県産石灰石砕石、密度 2.68 g/cm<sup>3</sup>）を用いた。粗骨材は最大寸法 20mm とした。表-2 に配合条件を示す。W/C は 50.4% とし、旧コンクリートと新コンクリートの配合条件は同様である。ここで、ダムコンクリートとしては粗骨材の最大寸法が小さく、新旧コンクリートの強度が同程度の限られた条件による検討であることを留意されたい。

接合面を持つ試験体の作成手順を以下に示す。半角柱の型枠に旧コンクリートを打設し、脱型後 20℃環境下で

\*1 一般財団法人 電力中央研究所 研究員（正会員）

\*2 一般財団法人 電力中央研究所 副研究参事 博士（工）（正会員）

2週間湿布養生した。その後、半角柱を角柱の型枠に設置して、残った空間に新コンクリートを打設し、脱型後常温環境下で水中養生した。

Nシリーズの試験体は旧コンクリートの打設面をコテ仕上げし、ラップを貼付して養生し、硬化後に新コンクリートを打設した。Cシリーズの試験体は、旧コンクリートが硬化後、ノミを用いて約5mm程度表面を削り、粗骨材が露出する状態の接合面とし、新コンクリートを打設した。Sシリーズの試験体は、旧コンクリートの打設直後に所定の本数の孔を導入し、硬化後にエポキシ接着剤を充填した孔にD10鉄筋を差し筋として挿入し、差し筋を露出した接合面に新コンクリートを打設した。なお、旧コンクリートの表面はNシリーズと同様にコテ仕上げがなされているが、孔を設ける際にラップを設置できなかったため、表面にブリージング水による波模様が生じている。差し筋の定着長は新旧コンクリート側ともに52mmとした。差し筋の本数は1本、2本(間隔100mm)とし、それぞれをS1、S2シリーズと呼ぶ。なお、実際の施工例では500mm間隔にD25鉄筋が設置されており<sup>3)</sup>、S1シリーズでは相似比を考慮して200mmの断面にD10を設置している。それぞれの接合面の処理状況を図-2に示す。なお、接合面を持たない一体の試験体は新コンクリートを角柱状に打設したものである。試験体に使用したコンクリートの試験時の力学特性を表-3に示す。また、Sシリーズに使用した差し筋の力学特性値を表-4に示す。

### 2.3 試験概要

せん断試験はJIS試験方法がないため、様々なもの

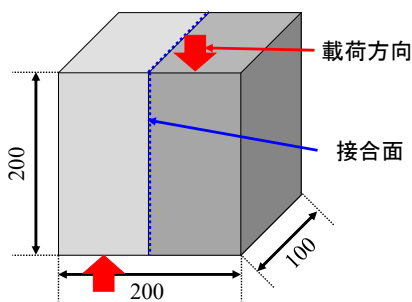


図-1 一面せん断試験体概要

が提唱されている。本研究では、魚本ら<sup>5)</sup>の文献を参考に図-3に示す小型の一面せん断試験を選定した。これはせん断応力と直応力の評価が直接可能であり、試験体が小型で人力による試験体の設置が可能となるためである。本研究におけるせん断試験の状況を図-4に示す。使用する治具はL字型で試験体の上下に配置し、水平方向から軸荷重、鉛直方向からせん断荷重を接合面に作用させる構造とした。軸荷重は4本のPC鋼棒を用いて水平方向に導入している。せん断面を200×100mmと仮定し、目標初期直応力が1MPaの場合は各PC鋼棒に約5kN

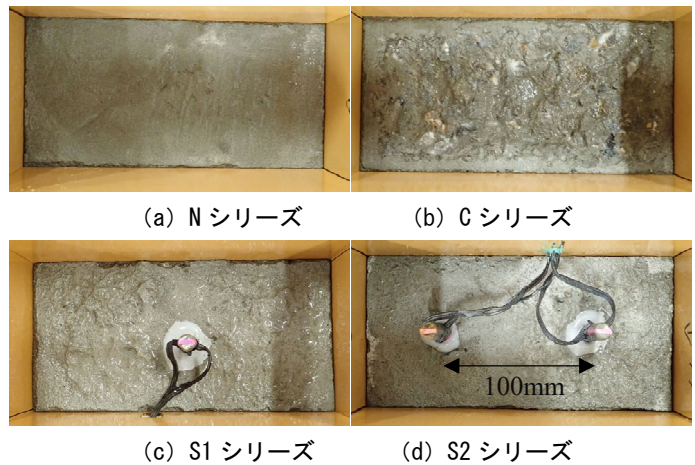


図-2 接合面の処理状況

表-1 一面せん断試験ケース

No	シリーズ	接合面 処理方法	初期直応力 [MPa]	載荷 速度	試験体 数量
0-1	0	一体	1	静的	2
0-2			2	静的	2
0-1D			1	動的	2
N-1	N	無処理	1	静的	2
N-2			2	静的	2
N-1D			1	動的	3
C-1	C	目荒らし	1	静的	2
C-2			2	静的	2
C-1D			1	動的	2
S1-1	S	差し筋 1本 (S1)	1	静的	2
S1-2			2	静的	2
S1-1D			1	動的	2
S2-1		差し筋 2本 (S2)	1	静的	2
S2-2			2	静的	2
S2-1D			1	動的	2

表-2 コンクリートの配合

W/C [%]	s/a [%]	Unit content [kg/m <sup>3</sup> ]				
		C	W	S	G	Ad
50.4	46.2	355	179	792	957	3.55

ここで、W/C：水セメント比、s/a：細骨材比、C：セメント、W：水、S：細骨材、G：粗骨材、Ad：AE減水剤を示す。

表-3 試験時のコンクリートの力学特性

力学特性値	圧縮強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	引張強度 [MPa]
コンクリート	43.5	35.9	3.31

表-4 差し筋用鉄筋の力学特性

力学特性値	降伏強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]	引張強度 [MPa]
D10	356.0	181.9	507.2

の軸荷重を導入している。なお、直応力の設定には岩下ら<sup>6)</sup>のダムを対象としたせん断試験を参考にした。L字型の治具の上部にはリニアガイドを設置し、水平方向の拘束を除去した。静的試験のみならず、高速荷重が可能な油圧アクチュエータを持つ荷重試験装置を用いた。

計測項目は接合面を境とした半角柱の中央の鉛直および水平変位、荷重点の鉛直荷重、直応力導入用PC鋼棒の荷重である。それぞれを変位計およびロードセルにて計測し、データロガーはEDX-100Aを使用した。動的試験では電気的な振動が計測値に現れるため、7項の移動平均処理を施している。

荷重手順を以下に示す。試験体の設置後、PC鋼棒のボルト締めにより直応力を導入する。荷重は変位制御とし、予備荷重として約5kNの荷重を行った後、荷重を0に戻し、本荷重を行う。接合面の破壊を確認後、さらにクロスヘッド変位を約1mm進めた後、除荷を行った。クロスヘッドの変位速度は静的試験においては約0.002mm/s、動的試験においては約50mm/sとした。なお、動的引張試験ではひずみ速度で約0.1(1/s)を境に増加傾向が大きくなる<sup>4)</sup>。本研究では予備荷重を踏まえ、試験体に直接作用する荷重速度が上記に対応する20mm/sとなることを目標として、動的試験の変位速度を設定した。ここで、荷重速度はリニアガイド下面における荷重速度である。

### 3. 試験結果

せん断応力の計算方法は式(1)に示す通りである。

$$\tau = F/A \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ はせん断応力 (MPa)、 $F$ は荷重荷重 (N)、 $A$ はせん断面の面積 (mm<sup>2</sup>)である。なお、せん断面の面積は破断面の投影面積とし、凹凸は考慮しない。

#### 3.1 静的試験結果

表-5に静的試験の結果を示す。ここで、接合面を境とした鉛直方向変位の差をずれ変位として、表には破壊時のずれ変位を示している。破壊せん断応力の算出にはせん断面が破壊し、直応力の急激な増加および接合面の開きの増加が起こる直前における荷重荷重を使用した。なお、0, Cシリーズにおいて接合面の破壊後もせん断応力が一時的に増加している。Sシリーズにおいて荷重終了後にひび割れが貫通したが、接合面は剥離しなかった。

#### 3.2 動的試験結果

表-6に動的試験の結果を示す。動的試験においては、試験開始時にクロスヘッドの総変位量を決めるため、破壊に至らない試験体もある。その場合は、平均値などを計算する場合に除去している。静的試験と同様にSシリーズにおいて荷重終了後に接合面は剥離しなかった。

#### 3.3 せん断応力-ずれ変位関係

図-5に静的試験の各シリーズおよび各直応力にお

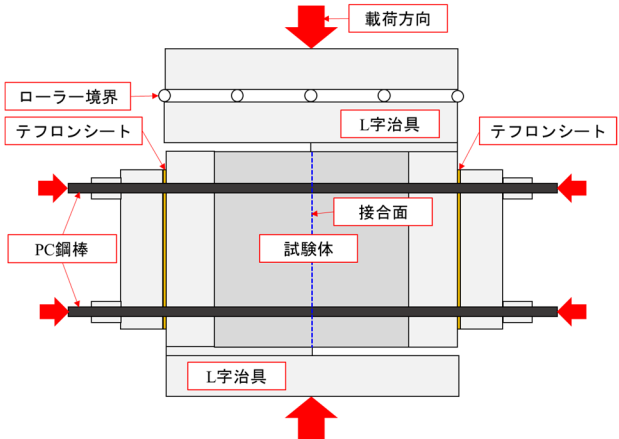


図-3 一面せん断試験の概要

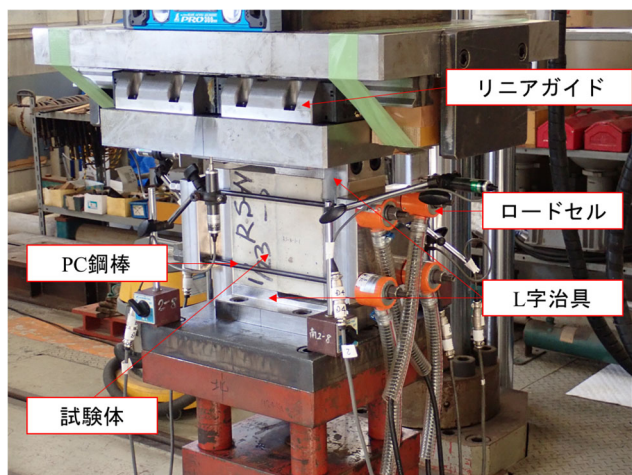


図-4 一面せん断試験の状況

表-5 静的試験結果

No	初期直応力 [MPa]	破壊せん断応力 [MPa]	破壊時直応力 [MPa]	破壊時ずれ変位 [mm]
0-1-1	1	7.17	1.44	0.346
0-1-2	1	8.16	2.12	0.460
0-2-1	2	8.42	2.15	0.273
0-2-2	2	9.28	2.71	0.544
N-1-1	1	2.20	1.07	0.108
N-1-2	1	3.09	1.20	0.163
N-2-1	2	4.31	2.13	0.265
N-2-2	2	4.49	2.10	0.354
C-1-1	1	4.99	1.34	0.366
C-1-2	1	4.93	1.26	0.197
C-2-1	2	6.01	2.44	0.305
C-2-2	2	6.21	2.44	0.393
S1-1-1	1	3.76	1.14	0.152
S1-1-2	1	3.55	1.12	0.064
S1-2-1	2	5.44	2.16	0.200
S1-2-2	2	4.48	2.07	0.222
S2-1-1	1	2.86	1.13	0.060
S2-1-2	1	4.02	1.11	0.066
S2-2-1	2	4.26	2.17	0.189
S2-2-2	2	4.61	2.06	0.118

るせん断応力-ずれ変位関係の一例を示す。ここで、 $\sigma$ は初期直応力である。Cシリーズの直応力 2MPa のケースを除き、破壊せん断応力の 50%程度までの応力を受けた後は、ほぼ一定の傾きを持ち、ずれ変位の増加に伴い破壊せん断応力が増加している。図-6 に全試験の破壊せん断応力とずれ変位の関係を示す。図より、静的試験結果において、破壊せん断応力および直応力の増加により破壊時のずれ変位が増加する傾向がある。

### 3.4 せん断応力-直応力関係

図-7 に各シリーズの静的試験のせん断応力-直応力の関係および破壊せん断応力と直応力の関係を示す。図-7 (f) に回帰した Mohr-Coulomb の破壊包絡線を併記しているが、詳細は4章で述べる。図から本試験は、せん断応力の増加に伴い、直応力が初期状態からわずかに増加していく。これはせん断面がずれることで、内部のペーストと骨材が接触して、せん断面が開く方向に力が作用し、試験体側面から直応力を作用させる PC 鋼棒を緊張するためである。0, Cシリーズでは、破壊後に急激な応力低下を起こさない。これは破壊後にせん断面が凹凸面であるためにすぐに接触するためと考えられる。一方で、N, Sシリーズは破壊後に急激な応力低下が確認さ

れた。これはせん断面が平滑であるため、せん断面の再接触までにずれ変位が必要であるとともに、せん断方向に抵抗する面積が小さいためと推察される。Sシリーズでは、応力低下後に徐々にせん断応力および直応力の増加がみられた。これはせん断面の開きが増加するに従い、差し筋が引張力を受けるとともにダウエル作用によりせん断力に抵抗するためである。しかし、本載荷装置では直応力は主に PC 鋼棒が受け持つため、差し筋に作用する引張力はわずかであると推察される。載荷終了後、Sシリーズはせん断面のひび割れが貫通しているが、試験体は一体の状態を保っていた。

## 4. 考察

### 4.1 直応力による影響

せん断試験における Mohr-Coulomb の破壊包絡線は一般的に式(2)の形で回帰されることが多い<sup>7)</sup>。

$$\tau_2 = \alpha\sigma_2 + \tau_1 \quad (2)$$

ここで、 $\tau_2$ はせん断応力 (MPa)、 $\tau_1$ は純せん断強度 (MPa)、 $\sigma_2$ は直応力 (MPa)、 $\alpha$ は係数である。

静的試験における各シリーズの破壊包絡線を図-7(f) および式(3)に示す。なお、式(3)は上から、0, N, C, S1,

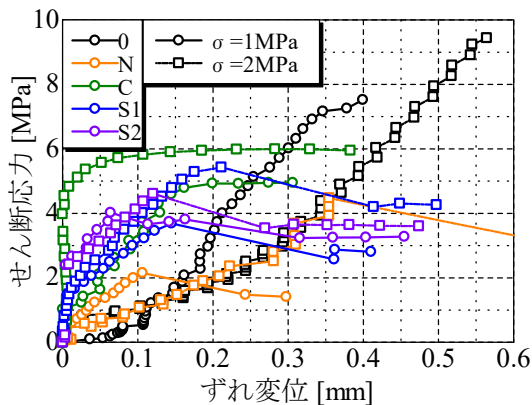


図-5 せん断応力-ずれ変位関係

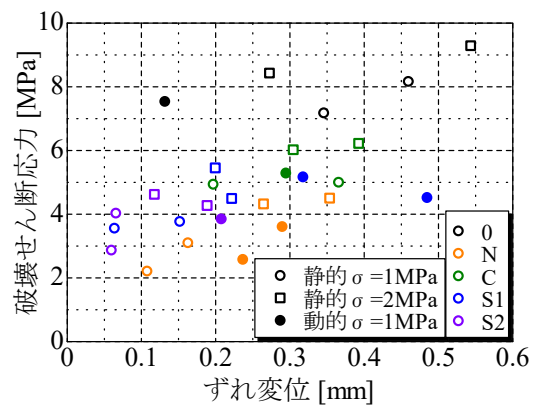


図-6 各試験破壊時のせん断強度とずれ変位関係

表-6 動的試験結果

No	初期直応力 [MPa]	破壊せん断応力 [MPa]	破壊時直応力 [MPa]	破壊時ずれ変位 [mm]	載荷速度	備考
0-1D-1	1	-	-	-	20.84	未破壊※1
0-1D-2	1	7.53	1.20	0.132	23.82	
N-1D-0	1	2.57	1.14	0.237	42.46	
N-1D-1	1	4.31	1.18	-	40.08	変位計の不備※2
N-1D-2	1	3.60	1.26	0.290	22.70	
C-1D-1	1	5.28	1.26	0.295	17.74	
C-1D-2	1	-	-	-	39.20	未破壊※1
S1-1D-1	1	5.16	1.19	0.318	19.06	
S1-1D-2	1	4.51	1.33	0.485	19.99	
S2-1D-1	1	3.84	1.16	0.208	35.85	
S2-1D-2	1	4.88	1.25	-	38.02	変位計の不備※2

※1 破壊に必要な載荷変位を与えることができなかったため、破壊しなかった。平均値には含めない。

※2 変位計による計測ができなかったため、ずれ変位のデータがない。ずれ変位のみ平均値には含めない。



S2の破壊包絡線である。

$$\begin{aligned}\tau_0 &= 1.66\sigma_0 + 4.76 \\ \tau_N &= 1.82\sigma_N + 0.56 \\ \tau_C &= 1.04\sigma_C + 3.60 \\ \tau_{S1} &= 1.36\sigma_{S1} + 2.10 \\ \tau_{S2} &= 0.96\sigma_{S2} + 2.40\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、式(3)の切片は推定される純せん断強度である。

図-7 (f) から、全シリーズにおいて直応力が増加することにより、破壊せん断応力は増加することがわかる。つまり、接合面の処理方法に関わらず、直応力の増加に伴うせん断強度の増加は見込むことができる。

#### 4.2 接合面性状による影響

接合面の処理方法に着目する。図-7 (f) から各シリーズの破壊包絡線の傾きは約1~1.8であった。試験数が少ないため、ばらつきの影響が大きいと考えられる。0とNシリーズおよびCとS2シリーズを比較すると、傾きは概ね同程度である。傾きが同程度と仮定すると接合面の処理方法による影響が純せん断強度（式(3)の切片）のみに現れる可能性がある。

破壊せん断応力は各試験において破壊時の直応力が異なるため、直接比較できない。そこで、式(3)に対し、任意の直応力を代入した場合の破壊せん断応力について比較する。任意の直応力は、初期直応力として想定した1MPa、2MPaの間である1.5MPaとした。結果を表-7に示す。表より、直応力1.5MPaを想定した破壊せん断応力は接合面の存在により、0シリーズと比較して46~71%まで減少した。0シリーズに対する破壊せん断応力の

低下量は、N、Sシリーズで3~4MPa程度の低下であるが、Cシリーズで2MPaの低下にとどまっている。目荒らしは破壊せん断応力を保持する効果があるといえる。一方で、Sシリーズは差し筋の本数に関わらずNシリーズと破壊せん断応力が同程度であり、差し筋は目荒らしと比較して破壊せん断応力の保持への寄与が小さい。しかし、Sシリーズ以外のほぼ全ての試験体は試験終了後に接合面が剥離したのに対し、Sシリーズは接合面の破壊後も、接合面の開きの増加とともにせん断荷重が増加する傾向がみられ、試験終了後も剥離しなかった。本研究の範囲では、差し筋はせん断荷重による接合面の破壊防止への寄与は小さいが、剥離防止には有効である。つまり、接合面の連続性は担保するがひび割れによる遮水性などの影響に注意が必要である。

#### 4.3 载荷速度による影響

载荷速度による影響を比較する。動的試験における直応力は1ケースのみのため、静的試験のように式(2)の形に表せられない。そこで、比較を行う静的試験のせん断

表-7 接合面処理方法による破壊せん断応力の比較  
(直応力: 1.5MPa)

シリーズ	包絡線上のせん断応力 [MPa]	破壊せん断応力比 ※1	破壊せん断応力低下量 [MPa] ※1
0	7.25	1.00	-
N	3.31	0.46	3.94
C	5.17	0.71	2.08
S1	4.14	0.57	3.11
S2	3.84	0.53	3.41

※1 0シリーズの破壊せん断応力を基準とする。

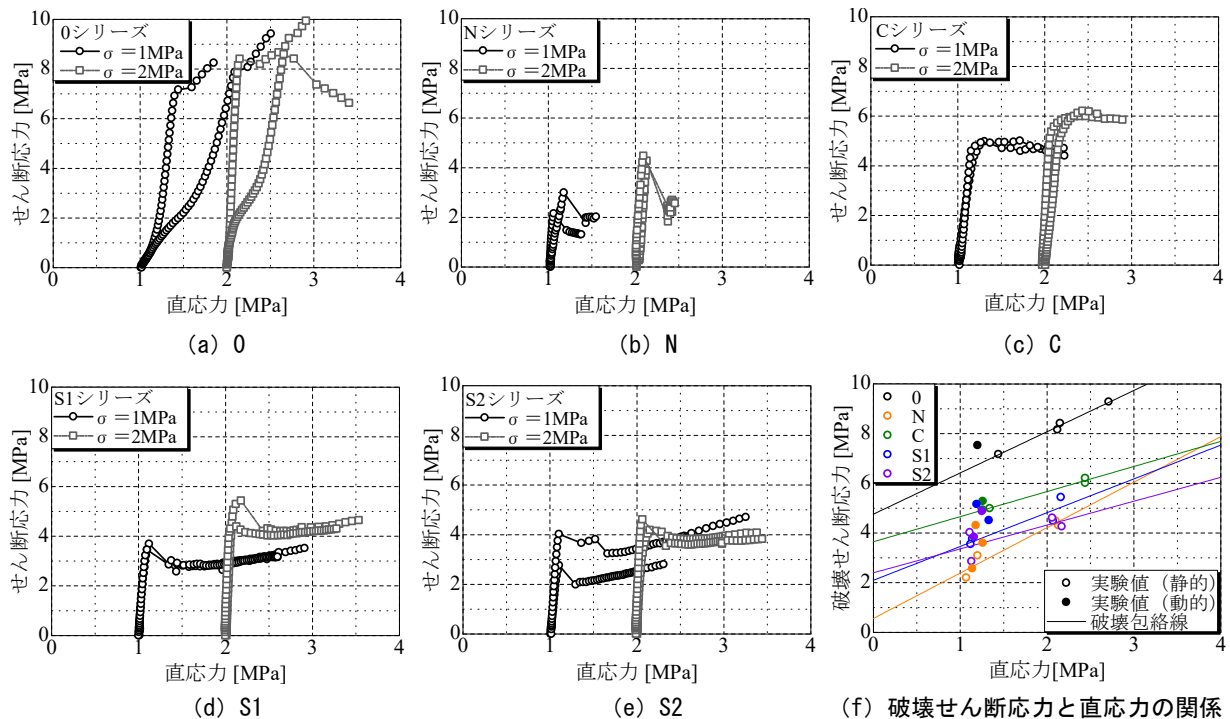


図-7 各シリーズのせん断応力-直応力関係および破壊せん断応力と直応力の関係

表一8 載荷速度による破壊せん断応力の比較

シリーズ	動的試験平均破壊せん断応力 [MPa]	動的試験破壊時平均直応力 [MPa]	動的試験平均載荷速度 [mm/s]	破壊包絡線上の破壊せん断応力 [MPa] ※1	破壊せん断応力比 ※2	破壊せん断応力増加量 [MPa] ※2
0	7.53	1.20	23.82	6.75	1.12	0.78
N	3.49	1.19	35.08	2.74	1.27	0.75
C	5.28	1.26	17.74	4.92	1.07	0.36
S1	4.83	1.26	19.53	3.81	1.27	1.02
S2	4.36	1.21	36.94	3.56	1.22	0.80

※1 動的試験の破壊時直応力を静的試験の破壊包絡線（式(3)）に代入した。

※2 静的試験の破壊包絡線上の破壊せん断応力を基準とした。

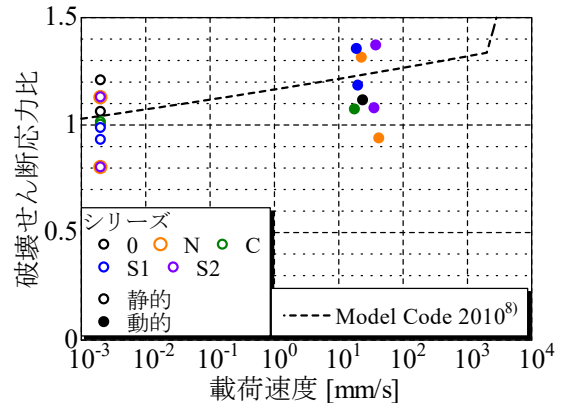
応力は動的試験における直応力を式(3)に適用した値とし、動的試験の破壊せん断応力と比較することとした。結果を表一8に示す。表より、全ての接合面に対して、動的試験の破壊せん断応力が静的試験の破壊包絡線から求めたせん断応力よりも大きいことが示された。その増加率は7%~27%程度となっており、一概には評価できない。一般的に引張強度の速度効果はひずみ速度に関係がある<sup>4)</sup>と言われており、本試験においても破壊せん断応力と載荷速度の関係を調べた。図一8に破壊せん断応力比と載荷速度の関係を示す。ここで、破壊せん断応力比の基準は静的試験の破壊包絡線から求めたせん断応力である。そのため、直応力の異なる静的試験の破壊せん断応力比の平均値が1とはならない。また、図中に引張強度のひずみ速度効果に関するCEB-FIPのモデルコード<sup>8)</sup>を併記した。なお、せん断方向長さ200mmをひずみ速度に乗じて、載荷速度に換算した。図一8から載荷速度による速度効果はモデルコードと概ね一致している。しかし、本研究では各接合面のシリーズに対して、載荷速度が1ケースのみの実施にとどまるため、各接合面性状における載荷速度の影響については、定量的な評価ができず、今後の検討課題とする。

## 5. 結論

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- (1) 一体のコンクリートに対し、無処理、目荒らし、差し筋の全ての接合面の破壊時のせん断応力は低下する。
- (2) 接合面の処理方法を変化させた場合でも、直応力の増加に伴い、破壊時のせん断応力およびずれ変位は増加する。
- (3) 無処理の結果に対し、目荒らしは破壊時のせん断応力の増加に寄与するが、差し筋は影響が小さい。一方で差し筋は剥離防止には有効である。
- (4) 動的な一面せん断試験において、載荷速度の増加に伴う破壊時のせん断応力の増加を確認した。しかし、試験体数が少ないため、試験結果の蓄積が必要である。

ダムコンクリートには通常より大きな粗骨材が使わ



図一8 破壊せん断応力比-載荷速度関係

れるため、今後は寸法効果に着目した力学特性の把握に展開する予定である。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 佐藤敏幸，高橋義信，中野範彦：飯豊川飯豊川第一発電所のダムゲートレス化，電力土木，No.289，pp.17-19，2000.9
- 3) 松田智行，藤原洋一郎，山崎崇正：西郷ダム改造工事におけるコンクリート一体化処理・堤体摩耗対策，電力土木，No.374，pp.86-90，2014.11
- 4) 藤掛一典ほか：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
- 5) 魚本健人，峰松敏和：コンクリートのせん断強度試験方法に関する基礎的研究，コンクリート工学論文，Vol.19，No.4，pp.16-27，1981.4
- 6) 岩下友也ほか：コンクリートダムの亀裂分離ブロックにおける地震時挙動の個別要素解析，土木学会地震工学論文集，pp.1231-1237，2007.8
- 7) 野口貴文：コンクリートの非線形性状—圧縮・引張・せん断実験，コンクリート工学，Vol.39，No.9，pp.110-114，2001.9
- 8) CEB-FIP: Model Code 2010, Final draft, Volume 1, 2012