

各種コンクリートの一面せん断試験と二面せん断試験
に関する基礎的研究

長 森 正

星槎道都大学研究紀要

美術学部

第 3 号

2022 年

各種コンクリートの一面せん断試験と二面せん断試験 に関する基礎的研究

長 森 正

要約

本論文はせん断強度に関する文献等を参考にして、簡便にせん断強度を算定する方法として直接せん断試験を実施した。曲げ強度試験体を利用した直接二面せん断試験と円柱試験体を利用した直接一面せん断試験を実施して、圧縮強度とせん断強度との関係を確認した。結果としてせん断強度と圧縮強度との相関関係は、二面せん断試験及び一面せん断試験ともに、一般的に推定されている圧縮強度の1/4~1/6程度の値に近似した結果を示し、簡便な試験法であることを確認した。

1. はじめに

本論文は星槎道都大学研究紀要の創刊号「火山礫コンクリートの直接二面せん断強度に関する基礎的研究」¹⁾と第2号「各種コンクリートの直接一面せん断強度に関する基礎的研究」²⁾の2論文を加筆し、主にせん断強度特性についてまとめたものである。

コンクリートの分野において単に「強度」といえば「圧縮強度」を示している。一般的にコンクリートの各種強度（引張強度・曲げ強度・せん断強度）等は、圧縮強度から概ね推定することができる。その値は圧縮強度18~60 N/mm²の範囲では下記に示すような値として推定されている。引張強度は圧縮強度の1/10~1/13、曲げ強度は圧縮強度の1/5~1/7、せん断強度は圧縮強度の1/4~1/6程度とされている。JIS試験方法では圧縮強度、引張強度、曲げ強度は確立されているが、せん断強度はJIS試験方法がなく圧縮強度から推定されている現状であり、決定的な基準化された試験方法は確立されていない。これはコンクリートのせん断強度試験方法は従来から国内、国外をあわせても数多くの方法が提案されてきたが、載荷方法や試験機具、供試体形状の複雑化などに一長一短があり、得られるせん断強度にも大きな差異が生じるとされてきた理由による。本論文ではせん断強度に関する研究文献^{3)~6)}等を参考にして、比較的簡単に試験ができる方法で実用せん断強度試験を実施する。試験は曲げ試験体を利用した二面せん断試験法と円柱供試体を利用した一面せん断試験法である。

本論文ではコンクリートのせん断強度の基礎データを上述した直接二面せん断試験と直接一面せん断試験を実施してデータを取得し、圧縮強度、引張強度、曲げ強度との関係を改めて確認することを目的とし検討するもの

である。各種コンクリートの種類として、①普通コンクリート、②人工軽量コンクリート、③火山礫置換コンクリート2種、④鋼繊維補強コンクリート、⑤ビニロン繊維補強コンクリートについて実験報告するものである。

2. 使用材料

本実験で製作したコンクリートの種類は、①普通骨材コンクリート、②軽量コンクリート、③火山礫コンクリート、④繊維補強コンクリートであり、それに伴う骨材としては、普通骨材、人工軽量骨材、火山礫骨材である。

表1に火山礫骨材、人工軽量骨材、普通骨材の物理的性質を示す。また、繊維補強コンクリートとしては鋼繊維コンクリート及びビニロン繊維コンクリートを製作した。鋼繊維は長さ30 mm、断面0.5×0.5 mmの矩形波型のタイプを使用した。またビニロン繊維とはポリビニルアルコール(PVA)をアセタール化して得られる合成繊維の総称であり、多種類あるが本研究で使用したビニロン繊維(PVA fiber)は標準長さ30 mm、断面はφ660 μのタイプを使用した。

表1 骨材の物理的性質

種類	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率* (%)	単位容積質量 (kg/m ³)	実積率 (%)
火山礫	0.78	1.17	46.2	393	50.4
軽量粗骨材	1.25	1.61	9.7	794	63.5
軽量細骨材	1.68	2.01	9.8	1110	66.1
普通粗骨材	2.66	2.72	2.07	1650	62.0
普通細骨材	2.44	2.57	2.9	1660	68.0

*24時間吸水率

3. 二面せん断試験

3.1 調合方法

コンクリートの種類は骨材種別、圧縮強度の大小から検討し、普通コンクリートをNA、人工軽量コンクリート2種をLA、火山礫コンクリートをL50及びL100とした4種類とする。これらの圧縮強度は既往の実験⁷⁾から、10 N/mm²~40 N/mm²程度の範囲である。本実験では軽量コンクリート2種を基準とし、粗骨材に対し支筋降下軽石を容積比で50%と100%の2種類容積置換したものを火山礫コンクリートとした。

調合は普通コンクリートをNAとして、設計基準強度F_c: 24 N/mm²、スランプ18 cm、粗骨材最大寸法G_{max}: 20 mm、人工軽量コンクリート2種をLAとして、標準調合から、呼び強度24 N/mm²、水セメント比48%、スランプ18 cm、目標空気量5%の組み合わせを使用した。火山礫コンクリートは容積比で50%置換した調合をL50、100%置換した調合をL100とした。使用したセメントは普通ポルトランドセメント(密度3.15 g/cm³)、混和剤はAE減水剤を単位セメント量の0.25%使用した。表2、表3及び表4に調合表を示す。

表2 普通コンクリート調合表

種類	設計基準強度 (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
普通 コンクリート	24	57	41	18	4.5
	単位量 (kg/m ³)				
	W	C	S	G	AE減水剤
	180	314	722	1072	0.78

W:水, C:セメント, S:普通細骨材, G:普通粗骨材, s/a:細骨材率

表3 軽量コンクリート2種調合表

種類	呼び強度 (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
軽量2種	24	48	49	18	5.0
	単位量 (kg/m ³)				
	W	C	S	G	AE減水剤
	180	375	641	535	0.94

W:水, C:セメント, S:軽量細骨材, G:軽量粗骨材, s/a:細骨材率

表4 調合表(二面せん断試験)

種類	W/C	単位量 (kg/m ³)					備考
		W	C	S	G	火山礫	
NA	57	180	314	722	1072	-	普通
LA	48		375	641	535	-	軽量2種
L50	48				267	194	火山礫50%
L100	48				-	388	火山礫100%

3.2 二面せん断試験方法

せん断試験に関しては、文献^{3)~6)}を参考にして4点載荷による二面せん断強度試験を検討する。これはJISには規定されていないが、関連学協会等では鋼繊維補強コンクリートを対象とした二面せん断試験方法が提案されている。土木学会では「JSCE-G553 鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法」⁸⁾、コンクリート工学会では「JCI-SF6 繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法」である。今回のコンクリートは繊維補強ではないが、上記試験に準拠して実施する。二面せん断強度試験タイプの試験方法は、曲げ試験終了後の二つに切断された試験体を再利用する。これは新たに製作する必要が無く、さらに曲げ強度の確認できた供試体でせん断強度も同時に試験することが出来る利点があるためである。圧縮・引張試験の供試体はΦ100×200 mmの円柱供試体とする。曲げ試験の供試体は断面100×100 mm、長さ400 mmの角柱とし、3等分点載荷法による試験とする。せん断試験体は曲げ試験終了後の切断された破断試験体とする。なお試験体の養生方法は20℃水中養生とした。

図1に二面せん断試験の載荷図を示す。

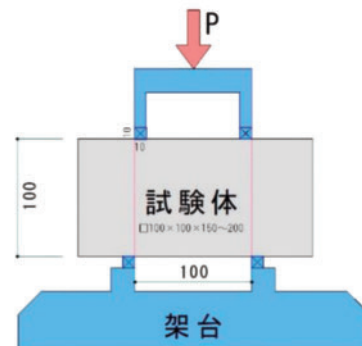


図1 二面せん断試験載荷図

3.3 二面せん断試験結果及び考察

(1) 硬化コンクリートの性状

硬化コンクリートの試験結果を表5に示す。圧縮強度試験、割裂引張強度試験の結果はそれぞれ3本の平均で試験材齢は28日水中養生(20℃)とした。

(2) 二面せん断強度特性

JIS試験要領に準拠して、3等分点載荷法による曲げ試験を実施した後、その破壊された両端の試験片を4点載荷による二面せん断試験を図1に示すように実施した。NAのせん断強度が最大で5.82 N/mm²、LAが5.33 N/mm²、L50が4.18 N/mm²、L100が3.81 N/mm²を記録した。普通コンクリートNAと軽量コンクリート2種LAの圧縮強度差はLAが1.38倍と大きいですが、

表5 二面せん断試験結果

記号	スラ ンプ	見掛け 密度	圧縮 強度	偏差	引張 強度	偏差	曲げ 強度	偏差	静弾性 係数×10 ⁴	せん断 強度	備考
	(cm)	(kg/m ³)	(N/mm ²)		(N/mm ²)		(N/mm ²)		(N/mm ²)	(N/mm ²)	
NA	15.5	2340	26.1	1.1	2.3	0.6	3.0	0.7	2.43	5.82	普通
LA	18.7	1699	36.2	0.9	2.5	0.8	2.2	0.6	1.55	5.33	軽量2種
L50	17.6	1672	22.1	5.1	2.1	0.7	2.3	0.3	1.46	4.18	火山礫50%
L100	17.0	1584	16.3	1.6	1.6	0.2	1.9	0.1	1.09	3.81	火山礫100%

せん断強度差はLAが10%程度で低い値を示した。せん断強度も曲げ強度と同様に、軽量コンクリート2種の人工軽量粗骨材自体が外力による割裂（割れ）することが関係すると思われる。火山礫50%タイプL50は軽量コンクリート2種LAの約0.8倍、火山礫100%タイプL100はLAの約0.7倍程度の値を示した。またL50とL100とのせん断強度差は約9%程度であった。

全般的なせん断破壊状況は二面あるせん断面のうち、どちらかの面に脆性的にせん断破壊が生じる破壊タイプと、中央部に微細な曲げひび割れが発生し、その後最大荷重載荷時にどちらか一方のせん断面に脆性的にせん断破壊が生じるタイプの2種類が見受けられた。両側のせん断面が同時にせん断破壊する状況は発生していない。

せん断強度の比較図を図2に示す。試験時のせん断破

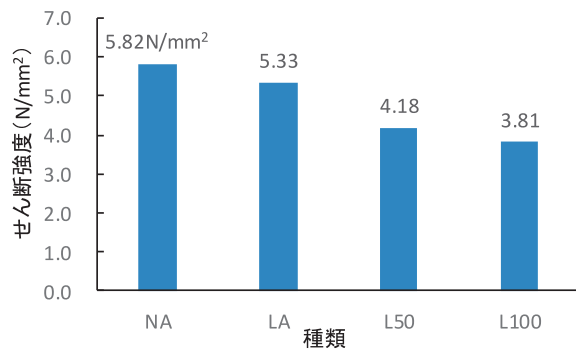


図2 せん断試験結果



写真1 せん断破壊状況（左せん断面）

壊状況の一例を写真1に示す。

(3) 圧縮強度と二面せん断強度の相関

圧縮強度 f_c とせん断強度 τ の平均値の相関関係を $[f_c/\tau]$ で検討してみると、次のような結果を得た。

- ・普通コンクリートNA： $\tau \cong f_c/4.5$
- ・軽量コンクリート2種： $\tau \cong f_c/6.8$
- ・火山礫50%置換タイプ： $\tau \cong f_c/5.3$
- ・火山礫100%置換タイプ： $\tau \cong f_c/4.3$

上記の結果から軽量コンクリート2種LAのせん断強度値が大きく $\tau \cong f_c/6.8$ を示したが、他は一般的な推定式の1/4~1/6の範囲に収まっている。これはLAの圧縮強度が予備強度より著しく大きい為であり、調合予備強度値に近い圧縮強度であったならばLAもこの値に収まると思われる。したがって、圧縮強度とせん断強度の関係は上記関係式により推定できるとと思われる。図3に圧縮強度とせん断強度の相関関係図を示す。

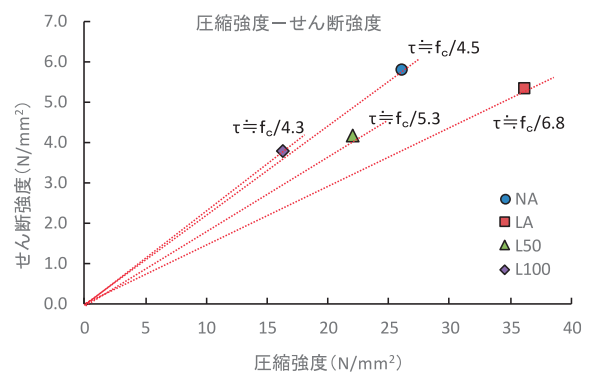


図3 圧縮強度とせん断強度の相関関係

4. 一面せん断試験

4.1 調合方法

コンクリートの種類は二面せん断試験と同様に、①普通コンクリートをNA、②人工軽量コンクリート2種をLA、③粗骨材を50%置換した火山礫コンクリートをL50、④粗骨材を全て火山礫骨材とした火山礫コンクリートをL100とした4種類とした。

更に繊維補強コンクリートを追加して、⑤鋼繊維コンクリートをSF、⑥ビニロン繊維コンクリートをVFとした6種類のコンクリートを製作した。火山礫コンクリートの調合を含む4種類の調合表を表6に、さらに繊維補強コンクリートの調合表を表7に示す。

4.2 一面せん断試験方法

一面せん断試験に関しては、管理供試体として共用できる利点を理由に一般的な円柱供試体(φ100×200mm)とした。その供試体にスリット(幅:3mm, ダイヤモンドカッター使用)を切削した。スリットの位置は上縁・下縁から75mm, そのせん断有効間隔を50mmとした。一面せん断試験供試体作成の切削状況を写真2, 詳細図を図4に示す。

4.3 一面せん断試験結果及び考察

実施した6種類の試験結果を表8に示す。

(1) 硬化コンクリートの性状

硬化コンクリートの圧縮強度試験, 割裂引張強度試験の結果はそれぞれ3本の平均で試験材齢は28日水中養生(20℃)とした。

表6 調合表(一面せん断試験)

種類	W/C	単位量 (kg/m ³)					備考
		W	C	S	G	火山礫	
① NA	57	180	314	722	1072	—	普通
② LA	48				535	—	軽量2種
③ L50	48				267	194	火山礫50%
④ L100	48				—	388	火山礫100%

表7 繊維補強コンクリート調合表

記号	W/C (%)	混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	S	G	SF	PVA
⑤ SF	48	1.5	180	375	626	522	117.8	
⑥ VF					626	522		19.5

S: 人工軽量細骨材, G: 人工軽量粗骨材, SF: 鋼繊維,
PVA: ビニロン繊維

(2) 一面せん断強度特性

従来コンクリート構造物の設計において、コンクリートの純せん断強度が問題にされることは少なく、せん断強度を試験によって直接求める例は少なく稀である。

コンクリートのせん断強度は試験方法によって異なる値となることが指摘されているが^{9) 10)}, これは試験方法によって作用応力が異なり、純せん断応力状態を再現できないためであり、数種の応力状態になっていることが要因である。従来から提案されているせん断強度試験方法の代表的なものとして、1) ルーマニアせん断法、2) 直接二面せん断法、3) 直接一面及び間接一面せん断法、4) 押し抜きせん断法、5) 多軸載荷試験などがあり、それぞれの試験方法には種々の改良型があるといわれて



写真2 一面せん断試験供試体切削状況

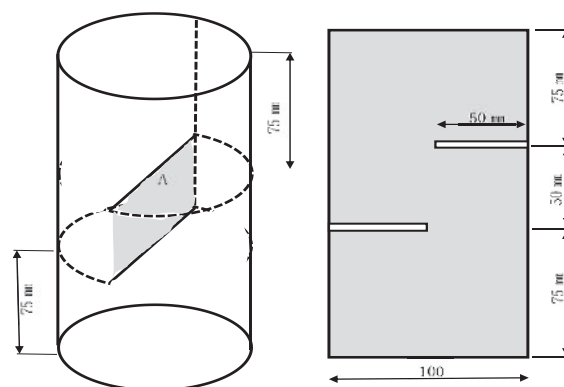


図4 一面せん断試験供試体

表8 一面せん断試験結果

記号	見掛け密度	圧縮強度	偏差	引張強度	偏差	曲げ強度	偏差	静弾性係数×10 ⁴	一面せん断	備考
	(kg/m ³)									
① NA	2340	26.1	1.1	2.3	0.6	3.0	0.7	2.43	4.48	普通
② LA	1699	36.2	0.9	2.5	0.8	2.4	2.9	1.55	2.51	軽量2種
③ L50	1672	22.1	5.1	2.1	0.7	2.3	0.3	1.46	2.46	火山礫50%
④ L100	1584	16.3	1.6	1.6	0.2	1.9	0.1	1.09	2.47	火山礫100%
⑤ SF	1764	38.6	3.7	5.1	0.2	4.8	1.3	1.49	10.63	鋼繊維
⑥ VF	1713	37.8	1.8	4.3	0.4	3.7	0.9	1.50	6.85	ビニロン繊維

いる。そのなかで JIS には規定されていないが、関連学協会等では鋼繊維補強コンクリートを対象とした二面せん断試験方法が提案されている。土木学会では「JSCE-G553 鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法」⁸⁾、コンクリート工学会では「JCI-SF6 繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法」である。ここでは直接一面せん断法の改良として、上述した簡便な方法で一面せん断試験を実施した。図 5 に一面せん断試験結果の平均値を示す。

NA のせん断強度が最大で 5.82 N/mm²、LA が 2.51 N/mm²、L50 が 2.46 N/mm²、L100 が 2.47 N/mm²、短繊維の SF が 10.63 N/mm²、VF が 6.85 N/mm² を記録した。NA を基準とすると、LA、L50、L100 の圧縮強度は大きく異なるが、一面せん断強度はほぼ同様な値となった。せん断強度も曲げ強度と同様に、人工軽量粗骨材や火山礫骨材自体による強度（骨材の割れ）が低く、骨材が割裂することが関係すると思われる。一方で短繊維混入による影響は、曲げ強度と同様にせん断強度は大きく増加した。LA に対して鋼繊維 SF は約 4.2 倍、ビニロン繊維 VF は約 2.8 倍となった。試験時の一面せん断破壊状況の一例を写真 3 に示す。

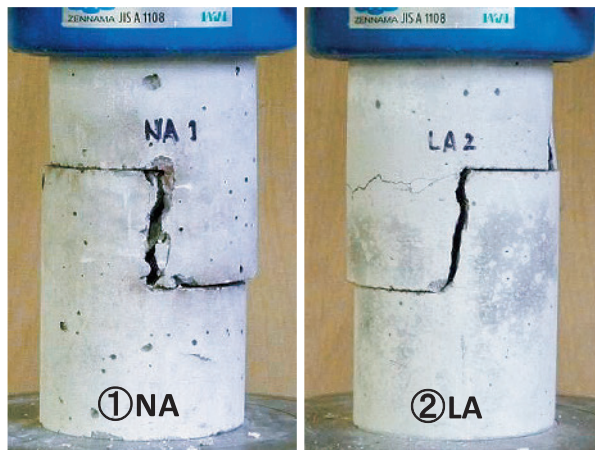
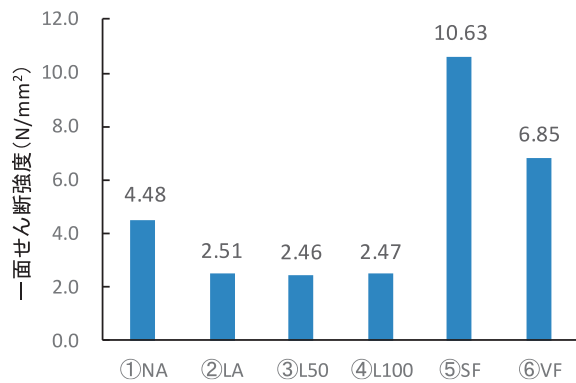


写真 3 一面せん断試験状況 (① NA・② LA)

(3) 圧縮強度と一面せん断強度の相関

圧縮強度 f_c と一面せん断強度 τ の平均値の相関関係を $[f_c/\tau]$ で検討し表 9 に示す。

表 9 圧縮強度と一面せん断強度の相関

種類	圧縮強度 f_c	一面せん断強度 τ	f_c/τ
	N/mm ²		
①NA	26.1	4.48	5.8
②LA	36.2	2.51	14.4
③L50	22.1	2.46	9.0
④L100	16.3	2.47	6.6
⑤SF	38.6	10.63	3.6
⑥VF	37.8	6.85	5.5

- ・普通コンクリート① NA : $\tau \approx f_c/5.8$
- ・軽量コンクリート② LA : $\tau \approx f_c/14.4$
- ・火山礫 50%置換③ L50 : $\tau \approx f_c/9.0$
- ・火山礫 100%置換④ L100 : $\tau \approx f_c/6.6$
- ・鋼繊維コンクリート⑤ SF : $\tau \approx f_c/3.6$
- ・ビニロン繊維コンクリート⑥ VF : $\tau \approx f_c/5.5$

一般的な推定値である圧縮強度 f_c の 1/4~1/6 の範囲に収まっているの種類は、普通コンクリート NA と短繊維の SF 及び VF である。軽量コンクリート LA は $\tau \approx f_c/14.4$ と他と大きく異なった。これは圧縮強度値が設計呼び強度値よりも著しく大きい為である。火山礫置換タイプは圧縮強度値が低いが、一面せん断強度値は軽量 2 種の LA と同程度の値であった。人工軽量骨材、火山礫骨材ともに骨材自体の強度が低いためと考えられる。また鋼繊維タイプの一面せん断強度はビニロン繊維タイプの約 1.5 倍を記録した。図 6 に圧縮強度と一面せん断強度の相関図を示す。

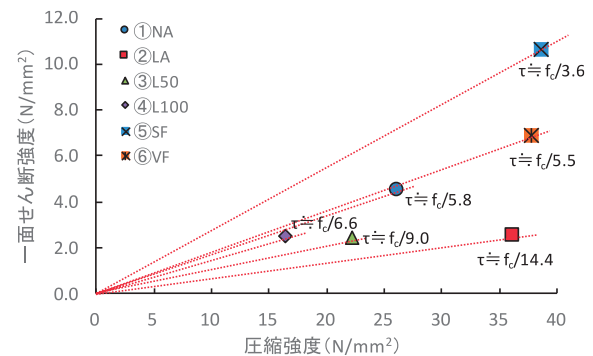


図 6 圧縮強度とせん断強度の相関

4. まとめ

本論文は星槎道都大学研究紀要の創刊号「火山礫コンクリートの直接二面せん断強度に関する基礎的研究」¹⁾と第 2 号「各種コンクリートの直接一面せん断強度に関

する基礎的研究²⁾の2論文を加筆し、まとめたものである。その結果実験範囲内で次のような知見を得た。

- (1) 曲げ試験体を利用した二面せん断試験では、圧縮強度 f_c と実用せん断強度 τ の平均値の相関関係 $[f_c/\tau]$ は図3で示す結果を得た。この結果から軽量コンクリート2種LAのせん断強度値が大きく $\tau \approx f_c/6.8$ を示したが、他は一般的な推定式の $1/4 \sim 1/6$ の範囲に収まっている。これはLAの圧縮強度が予備強度より著しく大きい為であり、調合予備強度値に近い圧縮強度であったならばLAもこの値に収まると思われる。圧縮強度と実用せん断強度の関係は上記関係式により推定できると思われる。
- (2) 一般的な円柱供試体($\phi 100 \times 200$ mm)を利用した一面せん断試験では、圧縮強度 f_c と実用せん断強度 τ の平均値の相関関係 $[f_c/\tau]$ は図5で示す結果を得た。LAの軽量コンクリート2種の圧縮強度が設計呼び強度よりも大きい為、 $1/14.4$ を記録したが、NAが $1/5.8$ 、L100が $1/6.6$ 、SFが $1/3.6$ 、VFが $1/5.5$ を記録し、一般的な推定値である圧縮強度 f_c の $1/4 \sim 1/6$ の範囲にほぼ収まっている。
- (3) 一面せん断試験および二面せん断試験の圧縮強度 f_c とせん断強度 τ の相関関係 $[f_c/\tau]$ は上述した関係式により推定できると思われる。したがって簡単にせん断強度を推定する方法として、円柱供試体や曲げ供試体を利用した直接せん断試験は十分に有効性があることを確認した。

参考文献

- 1) 長森正：火山礫コンクリートの直接二面せん断強度に関する基礎的研究，星槎道都大学研究紀要，創刊号，pp225-233
- 2) 長森正：各種コンクリートの直接一面強度に関する基礎的研究，星槎道都大学研究紀要，第二号，pp117-124
- 3) 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 No.81, 4-2
- 4) 佐藤立美：コンクリートせん断強度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.1, 2008
- 5) 高野真希子他：コンクリートの実用せん断強度の定式化とRCはりのせん断圧縮破壊強度算定への適用性，日本大学生産工学部研究報告A, 2003年6月第36巻第1号
- 6) 高野真希子他：圧縮荷重によるコンクリートの実用せん断強度決定法に関する研究，土木学会第56回年次学術講演会，平成13年10月
- 7) 長森正：火山礫を置換した軽量コンクリートの強度特性に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第17巻1号，pp.1-7, 2006
- 8) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書規準編 社団法人土木学会，2000.6 pp452～
- 9) 構造材料の安全性に関する標準化のための調査研究・研究報告書，建材センター，昭和52年3月
- 10) 遠藤，青柳：コンクリートのせん断試験方法に関する一考察，第32回土木学会年次学術講演会梗概集，昭和52年10月
- 11) 長森正，越前谷智：火山礫を利用した軽量コンクリートの強度・乾燥収縮性状に関する実験的研究，資源・素材学会誌 Journal of MMIJ Vol.127 pp.46-51, 2011.1
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法 1999 社団法人日本建築学会 平成12年4月 P38～
- 13) 長森正：火山礫を置換した軽量コンクリート床版の押抜きせん断耐力に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.327-328, 2007.9
- 14) 長森正：火山礫を置換した軽量コンクリートの付着性状に関する基礎的研究，道都大学紀要，美術学部第33号，pp.75-81, 2007
- 15) 建築実験技術研究会：建築実験法 彰国社 1996年4月 pp157～
- 16) 太平洋マテリアル(株)：技術資料構造用人工軽量骨材アサノライト
- 17) 日本第四紀学会編集委員会編：第四紀露頭集日本のテフラ，pp.2627, 1996
- 18) 北海道恵庭市教育委員会編：2004北海道恵庭市詳細分布調査報告書カリンバ3遺跡(3)，pp.212, 2004

Basic research on direct shear test and two-sided shear test of various concrete

NAGAMORI Tadashi

Abstract

In this paper, the direct shear test was carried out as a simple method to calculate the shear strength with reference to the literature on shear strength. A direct two-sided shear test using a bending strength test piece and a direct one-sided shear test using a columnar test piece were carried out to reconfirm the relationship between compressive strength and shear strength.

As a result, the correlation between the shear strength and the compressive strength shows a result close to the value of about $1/4$ to $1/6$ of the generally estimated compressive strength in both the two-sided shear test and the one-sided shear test. It was confirmed that it was a simple test method.

