

V-7 繊維補強コンクリートのPullout試験 について (その3)

北海道工業大学 正員 堀口 敬
 ” 佐藤 文人
 ” 高山 尚史
 ” 石田 宏行

1. 目的

コンクリート構造物の強度推定を目的とした非破壊法の1つであるPullout試験法(引き抜き試験法)が、その高い精度から注目されている。

著者らは、鋼繊維補強コンクリート(以下SFRCと呼ぶ)に関するPullout試験法を実施し、SFRCのPullout強度が圧縮強度よりもむしろ曲げ強度との相関が高いことを第一報で報告した¹⁾。さらに前報では、セン断強度との相関関係に関して検討を行い、SFRCのPullout強度とセン断強度とが、セン断試験法の種類によりその相関係数は異なるものの、高い相関関係を示すことを報告した²⁾。

本研究では、さらに広範囲のSFRCのPullout強度と各種セン断試験法によるセン断及び曲げ強度、圧縮強度との相関関係を検討することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。鋼繊維は市販の $\phi 0.6 \times 30\text{mm}$ (アスペクト比=50)の変断面形状のもの(以下A繊維と呼ぶ)と、 $\phi 0.5 \times 30\text{mm}$ で両端がフック加工され、水溶性のりにより20~30本が束になっているもの、従って初期の換算アスペクト比が小さく練りまぜが容易となるもの(以下B繊維と呼ぶ)を使用した。また混和材としてシリカフェームを用い、減水剤はナフタリンスルホン酸塩系のものを使用した。全てのSFRCは細骨材率を60%、粗骨材の最大粒径を15mmに設定した。

コンクリートの供試体は全部で29種類の配合を用い、表-1に示すように繊維混入率(Vf)およびシリカフェームのセメントに対する代替率(Sf)を変化させた。

2.2 練りまぜ及び打設方法

ミキサーは強制練りミキサー(アイリッヒ型)を用い、骨材、セメントを各30秒練りまぜ後、鋼繊維をファイバーボールができないように均等に投入して2分間練りまぜた後、水を加えた。シリカフェームを混入した配合ではあらかじめシリカフェームと水を入念に練りまぜを行い、スラリー状にして投入した。その後5分間練りまぜを行った。コンクリート供試体は材令24時間で脱型し、室温20°C、湿度60%の恒温湿室で気乾養生し、材令28日で実験を行った。

2.3 Pullout試験(図-1)

試験方法などの詳しい内容は、前報と同様なので省略する。供試体に埋め込んだボルト径は17mm、ワッシャー径は35mmのものを用いた。反力リングの直径は70mmと80mmであり、埋め込み深さは34mmとした。従って破壊面がなすコーンの頂角(α)は54.5°と67.0°となる。

表-1 コンクリートの配合表

No.	T. F.	Vf (%)	Sf (%)
1	—	0	0
2	A	0.5	0
3	A	1.0	0
4	A	1.5	0
5	A	2.0	0
6	A	2.5	0
7	B	0.5	0
8	B	1.0	0
9	B	1.5	0
10	B	2.0	0
11	B	2.5	0
12	—	0	10
13	B	0.5	10
14	B	1.0	10
15	B	1.5	10
16	B	2.0	10
17	B	2.5	10
18	—	0	20
19	B	0.5	20
20	B	1.0	20
21	B	1.5	20
22	B	2.0	20
23	B	2.5	20
24	—	0	30
25	B	0.5	30
26	B	1.0	30
27	B	1.5	30
28	B	2.0	30
29	B	2.5	30

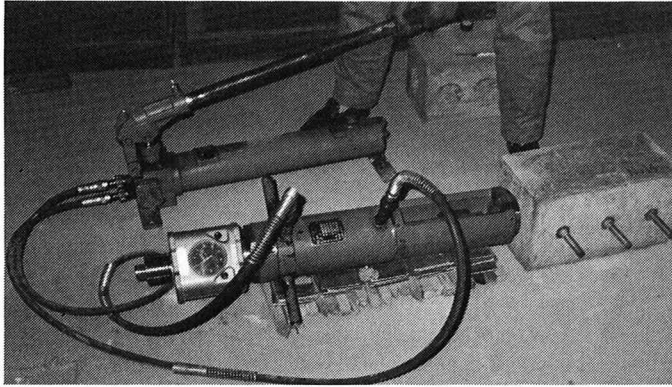


図-1 Pullout試験装置の概要

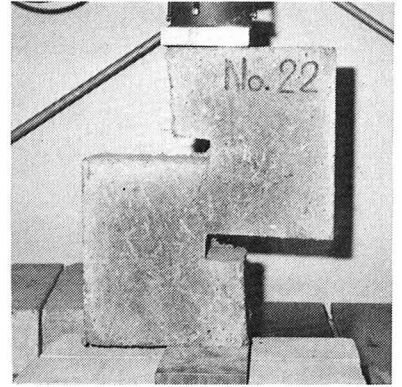


図-2 間接一面せん断試験

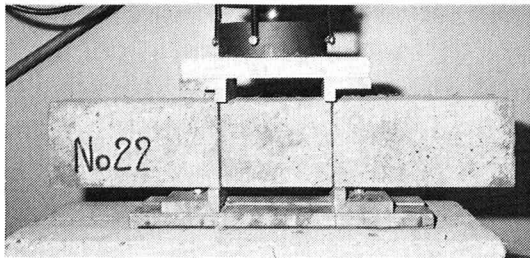


図-3 直接二面せん断試験

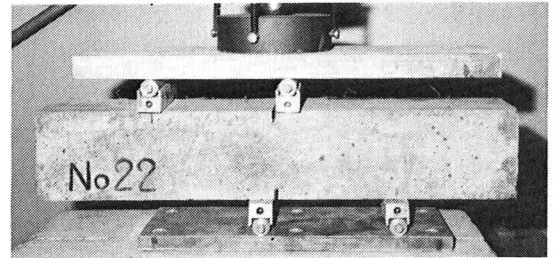


図-4 ルーマニア式せん断試験

2.4 セン断強度試験及び他の力学的試験

間接一面せん断試験(図-2)および直接二面せん断試験(図-3)の方法については、前報と同様であるので省略する。ルーマニア式せん断試験方法はZ. P. Bazntら³⁾の方法を用い、支点間隔を切り欠きからそれぞれ100mm, 2mmとして载荷した(図-4)。

3. 実験結果

今回の実験結果をまとめると表-2のようになる。Pull-out強度は反力リングの径を二種類にしたため各頂角について4本の平均値を示した。せん断強度は、間接一面せん断強度を除き3本の供試体の平均値を示した。曲げ強度は3本の供試体の平均値を示し、圧縮強度は曲げ試験の切片を用いて6本の供試体の平均値で示した。

表-2 実験結果のまとめ

No.	Pull-Out強度 (Mpa)		圧縮強度 (Mpa)	曲げ強度 (Mpa)	せん断強度 (Mpa)		
	$\alpha=54.5^\circ$	$\alpha=67.0^\circ$			直接二面	間接一面	ルーマニア式
1	5.593	3.988	39.491	4.597	5.901	4.169	6.801
2	5.744	4.083	53.770	5.502	8.618	4.415	9.015
3	6.819	4.928	51.880	7.383	10.711	4.856	11.053
4	6.486	4.558	54.780	8.517	11.422	5.567	10.982
5	6.852	5.526	77.040	11.887	13.997	6.671	20.728
6	8.358	5.677	79.720	12.142	15.245	10.006	16.862
7	5.555	4.273	48.757	5.618	8.415	4.758	9.498
8	5.522	4.472	50.410	6.044	8.422	4.562	9.347
9	5.522	4.074	43.120	7.731	8.313	5.494	10.706
10	6.231	4.670	41.233	8.637	8.400	5.396	10.331
11	7.451	6.522	56.854	9.798	14.844	8.437	14.322
12	5.655	4.387	49.650	4.876	4.833	3.041	7.680
13	5.298	4.956	48.342	5.920	7.993	3.532	9.659
14	6.054	5.220	53.030	6.385	10.028	5.199	12.315
15	6.497	5.260	48.240	8.776	9.984	5.003	12.999
16	6.985	6.551	58.184	10.262	11.752	7.504	12.114
17	8.713	6.558	59.790	11.144	14.119	9.572	18.504
18	5.389	4.425	37.921	4.992	6.395	2.747	8.343
19	5.954	4.576	54.302	6.705	7.412	5.101	10.339
20	7.318	4.956	55.600	7.289	9.484	6.965	11.873
21	7.318	6.067	67.885	8.845	12.789	7.259	15.197
22	8.581	6.854	70.000	11.957	14.000	7.750	21.290
23	8.847	7.689	70.414	12.265	15.608	10.156	17.225
24	6.586	5.106	43.123	5.029	6.447	3.562	8.412
25	6.586	4.653	54.805	5.201	8.662	4.709	10.745
26	7.052	6.010	58.203	8.219	11.714	6.295	12.817
27	8.416	5.867	74.131	9.998	14.156	7.549	16.783
28	9.007	7.006	76.082	11.102	14.650	8.257	19.040
29	9.803	8.373	76.616	13.582	18.748	10.547	21.041

3.1 Pullout強度と各因子との関係

図-6, 7は, 2種類のSFRCの鋼繊維混入率に対する各頂角のPullout強度を示したものである。繊維混入率の増加にともないPullout強度も増加の傾向があるが, その関係は直線関係と言うよりもむしろ下に凸の右上がりの曲線を示すようである。繊維A, BのPullout強度はほぼ差がないが, 頂角 54.5° の場合においてA繊維の方がやや高い傾向を示した。

図-8, 9は, シリカフュームのセメントに対する代替率とB繊維を用いた各鋼繊維混入率のPullout強度を示したものでシリカフューム混入率が増加するとPullout強度が増加することがわかる。特に高い鋼繊維混入率の場合にシリカフュームの混入によるPullout強度の増加が顕著となる傾向がみられる。

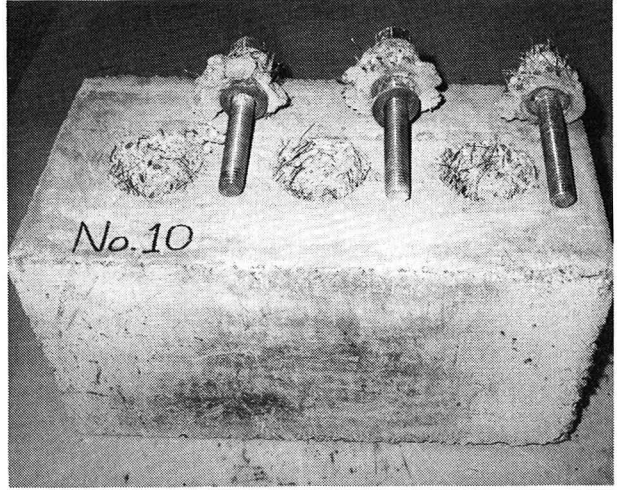


図-5 Pullout試験後の引き抜かれたコーン及び供試体(SFRC)

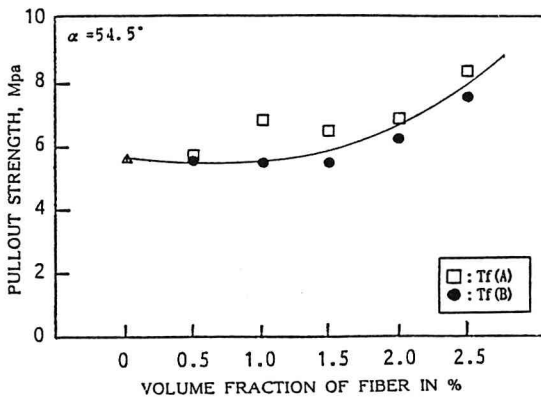


図-6 Pullout強度($\alpha=54.5^\circ$)と鋼繊維混入率との関係

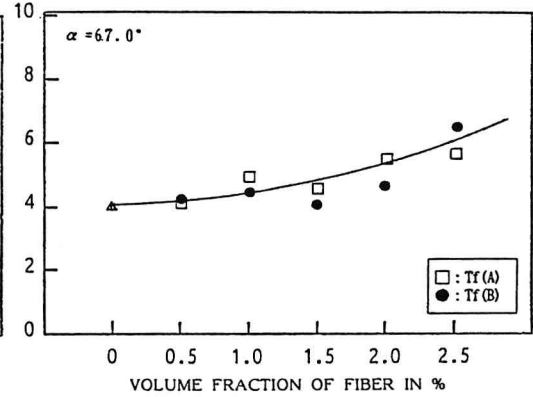


図-7 Pullout強度($\alpha=67.0^\circ$)と鋼繊維混入率との関係

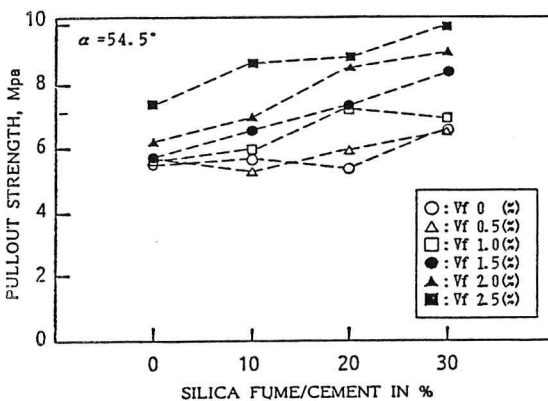


図-8 Pullout強度($\alpha=54.5^\circ$)とシリカフューム混入率との関係

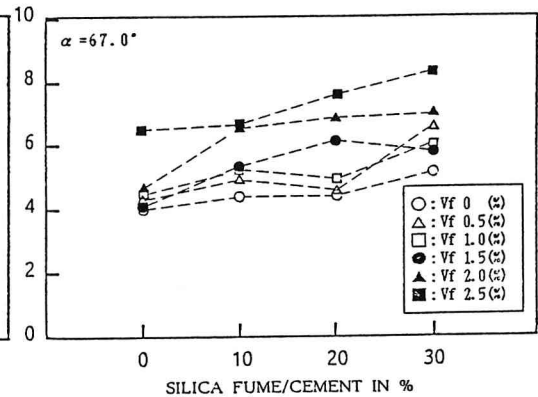


図-9 Pullout強度($\alpha=67.0^\circ$)とシリカフューム混入率との関係

3.2 Pullout強度と他の力学的強度との関係

図-10は、Pullout強度と直接二面せん断強度との関係を示したものである。直接二面せん断強度が増加するとPullout強度も増加し、直線的な傾向を示している。その回帰式を計算すると、表-3のようになる。各頂角における相関関係は、ほぼ同等の値を示していることが分かり、前報で報告した相関係数にほぼ近いを示している。Pullout強度と間接一面せん断強度との関係を示した図-11に関しても、同様に間接一面せん断強度が増加するとPullout強度も増加する右上がりの直線的な傾向を示した。

図-12は、Pullout強度とルーマニア式せん断強度との関係を示したものである。ルーマニア式せん断強度の増加にともない、コーンの頂角 54.5° 、 67.0° のPullout強度とも増加の傾向がある。前報の報告では、ルーマニア式せん断強度とPullout強度の相関は、非常に低い結果となったが、今回のルーマニア式せん断強度とPullout強度の相関は、高い結果を示した。これは前報で実施したルーマニア式試験を改良して、Z. P. Bazantらの方法を適用したための結果であると思われ、ルーマニア試験では、載荷点の位置が、重要な要素であることが推定される。

図-13は、Pullout強度と圧縮強度との関係を示したものである。圧縮強度が増加するとPullout強度も増加するが、両者の相関係数は、両頂角に関するPullout強度において最も低い値を示した。

図-14では、Pullout強度と曲げ強度との関係を示したものである。曲げ強度が増加するとPullout強度も増

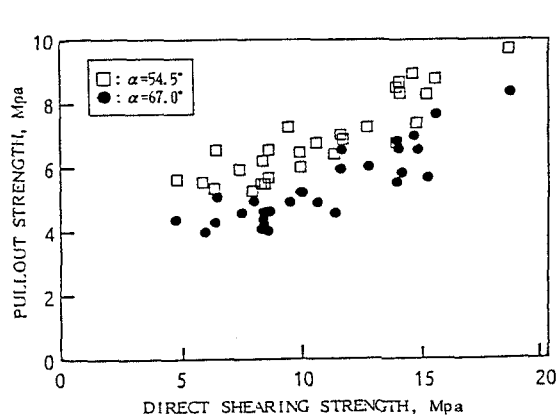


図-10 Pullout強度と直接二面せん断強度との関係

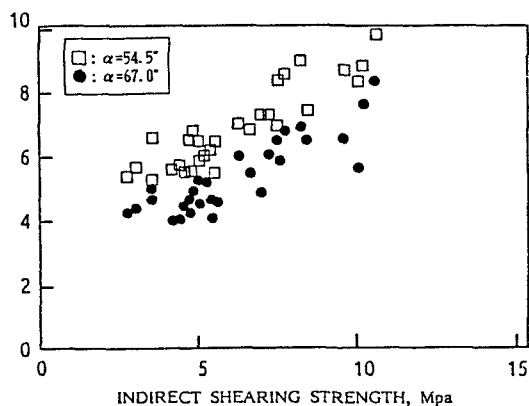


図-11 Pullout強度と間接一面せん断強度との関係

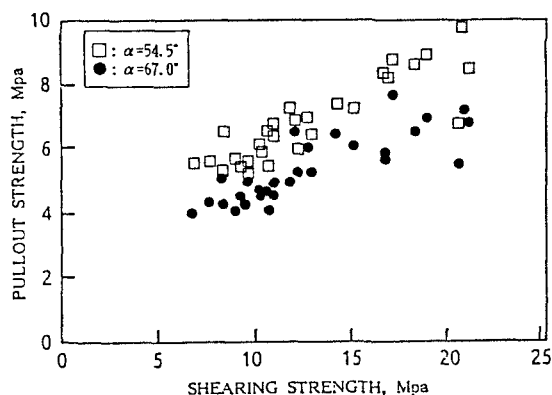


図-12 Pullout強度とルーマニア式せん断強度との関係

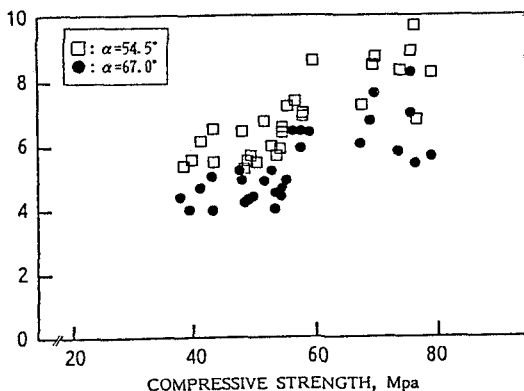


図-13 Pullout強度と圧縮強度との関係

加し、右上がりの直線的な傾向を示した、各頂角における相関係数は、ほぼ近い値となった。Pullout強度と各力学的強度との相関係数は、すべて高い値を示したが、特に間接一面せん断強度および直接二面せん断強度との相関係数が、高いことが判明した。また頂角の違いにより、Pullout強度と各力学的強度との相関係数は異なり54.5°の方が、すべて高い相関係数をとった。このことは、Pullout強度の特性がコーンの頂角により微妙に変化するものと推測され頂角の減少にともないせん断破壊の傾向が強まることが考えられる。Malhotraらは、Pullout強度が直接せん断強度と同程度の値をとることから、Pullout強度によりせん断強度が推定できることの可能性を示唆している⁴⁾。本報告の

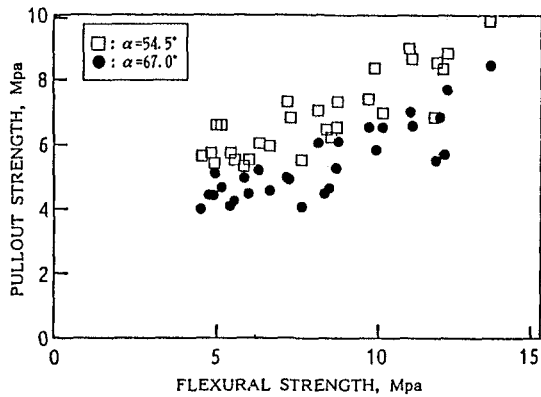


図-14 Pullout強度と曲げ強度との関係

表-3 Pullout強度と各力学的強度との相関係数及び回帰式

X SP	せん断強度			圧縮強度	曲げ強度
	直接二面	間接一面	ルーマニア式		
Pullout $\alpha = 54.5^\circ$	$Sp=0.33x+3.37$ (0.88)	$Sp=0.53x+3.65$ (0.82)	$Sp=0.26x+3.53$ (0.76)	$Sp=0.09x+1.98$ (0.68)	$Sp=0.41x+3.51$ (0.74)
Pullout $\alpha = 67.0^\circ$	$Sp=0.29x+2.32$ (0.76)	$Sp=0.42x+2.69$ (0.72)	$Sp=0.20x+2.73$ (0.68)	$Sp=0.07x+1.41$ (0.54)	$Sp=0.36x+2.44$ (0.71)

() は相関係数

結果からも、Pullout強度をもちいてかなりの精度でせん断強度を推定することが可能であることがわかる。

3.3 各せん断強度の関係

本報告で適用した3種類のせん断強度試験のうちルーマニア式せん断強度が最も高い値を示し、ついで直接二面せん断強度、間接一面せん断強度の順であった。この3種類のせん断強度試験間の特性を把握する目的で各せん断強度との相関関係を調べたものが図-15、図-16および図-17である。

図-15は、間接一面せん断強度と直接二面せん断強度との関係を示したものである。直接二面せん断強度の増加にともない間接一面せん断強度も増加する顕著な直線関係が示されていることがわかる。両者の回帰直線は、 $Y=0.59x$ となりその相

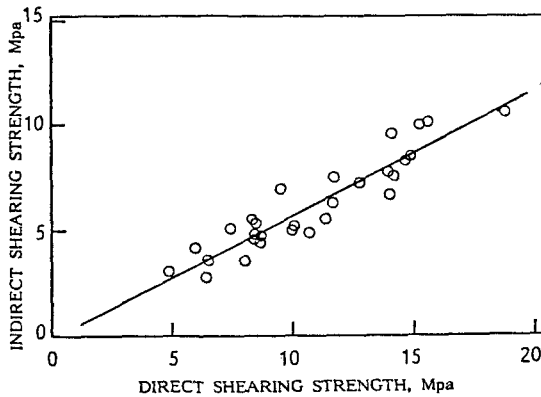


図-15 間接一面せん断強度と直接二面せん断強度との関係

関係数は0.86であった。この両者の関係が他のセン断強度との関係と比較して最も高い相関関係を示した。従って同配合のSFRCでは、間接一面セン断強度は直接一面セン断強度の約60%の値をとることが分かり直接二面セン断強度が10Mpaのとき間接一面セン断強度が6Mpaをとることがわかる。

図-16は、ルーマニア式セン断強度と直接二面セン断強度との関係を示したもので、その相関係数は0.83となり、間接一面セン断強度と直接二面セン断強度との関係について高い相関を示した。しかしながら直接二面セン断強度が約14 Mpa以上になるとバラツキが大きくなる傾向を示している。

図-17は、ルーマニア式セン断強度と間接一面セン断強度との関係で、ルーマニア式セン断強度と直接二面セン断強度との関係でみられたように、間接一面セン断強度が6Mpa程度までは、ルーマニア式セン断強度と高い相関がみられるが、それ以降になると両者の間にバラツキがみられる。

4. まとめ

本報告の結果をまとめると次のようになる。

(1) 広範囲の鋼繊維混入率、シリカフェウム混

入率に関してPullout試験を実施した結果、両因子ともにPullout強度に大きな影響を及ぼすことが判明した。

(2) Pullout強度と今回適用した全てのセン断強度とは優れた相関関係を示すことが明らかになった。

(3) 鋼繊維補強コンクリートのPullout強度とセン断強度、圧縮強度、曲げ強度との関係を検討した結果、セン断強度が特に高い相関を示しPullout強度により鋼繊維補強コンクリートのセン断強度が精度良く推定できることが判明した。

(4) コーンの頂角が小さいほどPullout強度とセン断強度との相関は高くなることが判明した。

《参考文献》

- 1) 堀口, 阿部, 石田, 牧野; 繊維補強コンクリートのPullout試験について: 土木学会北海道支部論文報告集, 第41号, 1985, pp. 588-591.
- 2) 堀口, 清野, 野矢; 繊維コンクリートのPullout試験について(その2): 土木学会北海道支部論文集, 第42号, 1986, pp. 477-482.
- 3) Z. P. Bazant and P. A. Pfeiffer; Shear fracture tests of concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol. 19, No. 110, 1986, pp. 111-121.
- 4) V. M. Malhotra; Evaluation of the pull-out test to determine strength of in-situ concrete: *Materiaux et Constructions*, Vol. 8, No. 43, 1975, pp. 19-30.

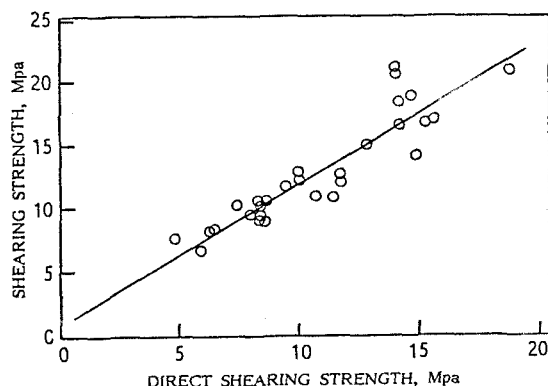


図-16 ルーマニア式セン断強度と直接二面セン断強度との関係

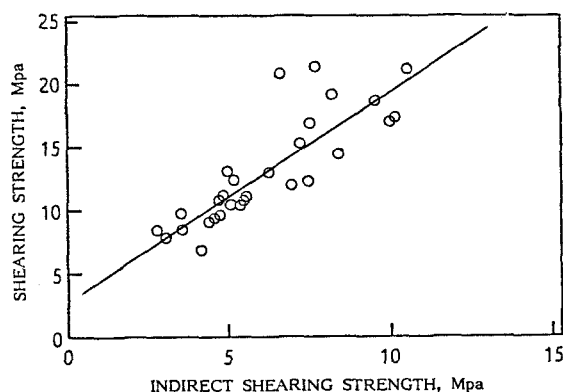


図-17 ルーマニア式セン断強度と間接一面セン断強度との関係