

V-3 繊維補強コンクリートのPull-out試験 について (その2)

北海道工業大学 正員 堀口 敬

// 清野 克徳

// 野矢 尚文

1. はじめに

コンクリートに鋼繊維を混入すると、そのせん断特性が著しく改善されることは良く知られている。鋼繊維補強コンクリート（以下SFRCと略称する）のせん断特性に関する報告は少なく、その試験法も未だ確立されていない。この理由は、従来のせん断強度試験法では、載荷方法や載荷装置に特別な配慮が必要となること、供試体の形状や試験法そのものが複雑であることなどが挙げられる。さらに、多くの試験法では純せん断応力状態での破壊とはならないことが問題となる。

本報告は、非破壊試験法として試験方法も容易であるPull-out試験¹⁾に着目し、Pull-out強度とせん断強度との相関関係を検討したものである。比較したせん断強度試験法としては従来から提案されている直接二面せん断試験、間接一面せん断試験、ルーマニア式せん断試験の三種類である^{2), 3), 4)}。さらに比較のため、Pull-out強度と他の力学的強度（圧縮強度、曲げ強度）との関連性の検討も行った。

2. 実験概要

・**使用材料** 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0.6φ×30mm（アスペクト比=50）の変断面形状のものをを用いた。又、混和材としてシリカフュームを用い、減水剤はナフタリンスルホン酸塩系のものを使用した。細骨材率は60%、粗骨材の最大粒径は15mmに設定した。コンクリートの供試体は全部で16種類の配合を用いその因子と水準は表-1、及び表-2に示す。

・**練り混ぜ** ミキサーは強制練りミキサー（オムニミキサー）を用い、骨材、セメントを各30秒練り混ぜ後、鋼繊維をファイバーボールが出来ないように均等になるように投入して2分間練り混ぜた後、水を加えた。シリカフュームを混入した配合では予めシリカフュームと水を入念に練り混ぜを行い、スラリー状にして投入した。その後低速で30秒、高速で1分30秒の計2分間練り混ぜを行った。コンクリート供試体は材令24時間で脱型し、室温20度、湿度60%の恒温室内で気乾養生し材令28日で実験を行った。

・**Pull-out試験** 試験法などの詳しい内容は前報⁵⁾に示したなお、本報告では供試体に埋めこんだボルトは径17mm、ワッシャー径(d)35mmのものをを用い、反力リングの直径は70mm、80mmで行い、それにより頂角(α)は、それぞれ54.5°、

表-1 供試体の配合

No.	C	W	Vsf	S
1	1	1	1	1
2	1	1	2	1
3	1	2	1	1
4	1	2	2	1
5	2	1	1	1
6	2	1	2	1
7	2	2	1	1
8	2	2	2	1
9	1	1	1	2
10	1	1	2	2
11	1	2	1	2
12	1	2	2	2
13	2	1	1	2
14	2	1	2	2
15	2	2	1	2
16	2	2	2	2

表-2 因子と水準

因子	水準	
	1	2
単位セメント量 C (kg/cm ³)	400	500
単位水量 W (kg/cm ³)	175 ~ 180	220 ~ 225
鋼繊維混入率 Vsf (%)	1.0	2.0
シリカフューム 混入率 S (%)	0.0	20.0

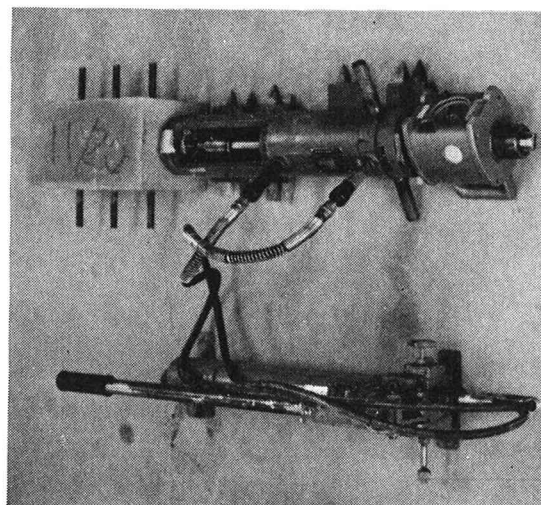


写真-1 pull-out試験装置の概要

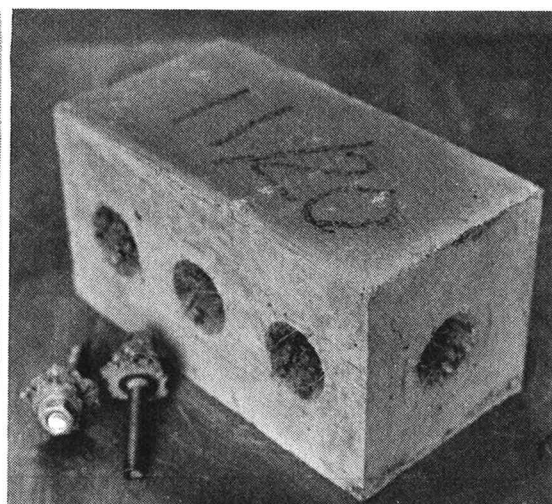


写真-2 pull-out試験供試体

67.0°となった。

・せん断強度及び他の力学的強度 本報告で用いたせん断試験の供試体寸法及び荷重方法を図-1に示す。直接二面せん断試験は、鋼製の荷重板にエッジを設けたものにより実施した。この試験法は、従来の二面せん断試験が荷重面全体に荷重するのに対し、せん断面近傍のみに荷重するために供試体下面中央部に働く曲げ応力の影響が小さくなるので従来の二面せん断試験より優れていると報告されている^{2), 3)}試験法である。間接一面せん断試験は線荷重で実施する方が望ましいと考えられるが、本報告のように鋼製の荷重板で部分荷重とした場合でもせん断面に働く応力は線荷重の場合とほぼ同じである^{2), 3)}ので部分荷重として実施した。ルーマニア式せん断試験は鋼製の荷重板を用い線荷重とした。計算断面で破断させるために切り欠きから荷重点までの距離(b)を10~85mm及び、切り欠き深さを10~32.5mmまで変化させて実施した。

	直接二面せん断試験	ルーマニア式せん断試験	間接一面せん断試験
荷重 方法 及び 供試体 寸法 (mm)			
強度	$\tau = P / 2A$	$\tau = P / 3A$	$\tau = P / A$
算定式	$P = \text{最大荷重}$ $A = \text{断面積}$		

図-1 各せん断試験法の供試体寸法及び荷重方法

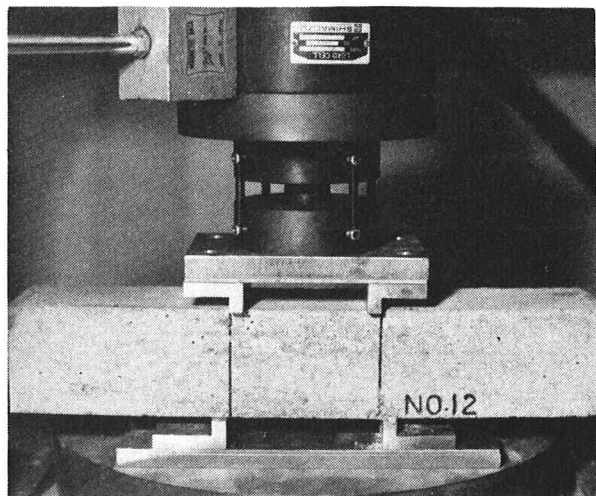


写真-3 直接二面せん断試験

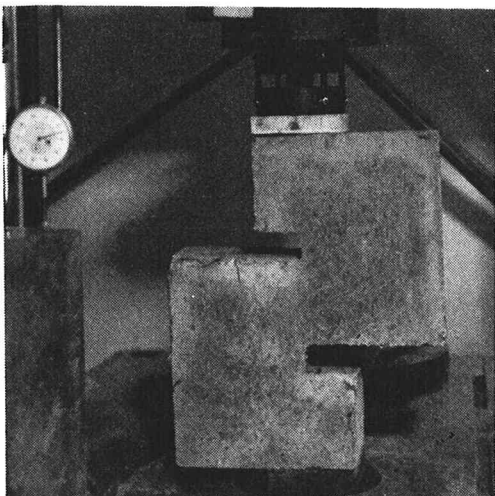


写真-6 間接一面せん断試験

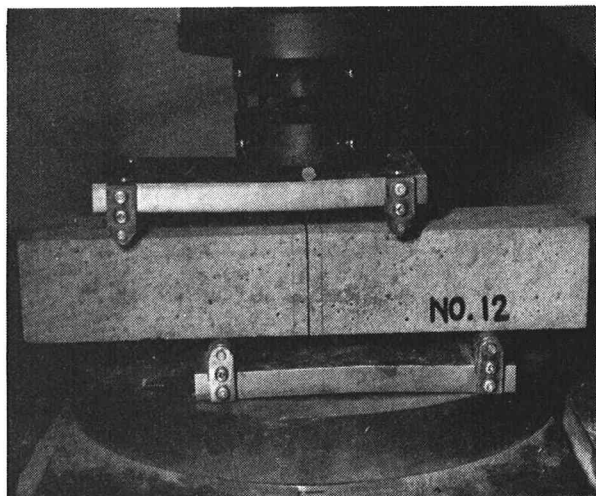


写真-4 ルーマニア式せん断試験



写真-7 試験後の供試体(SFRC)

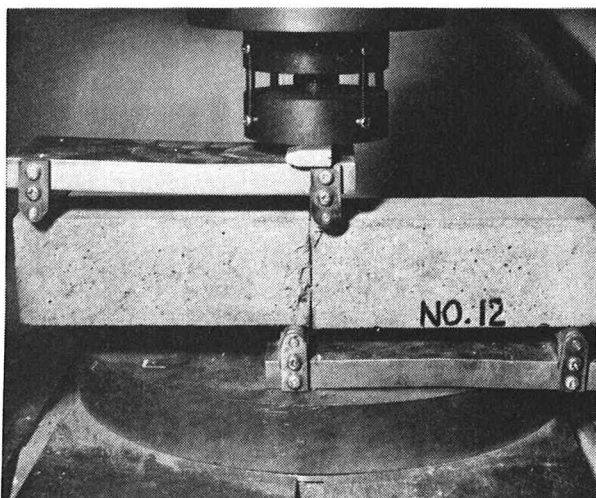


写真-5 試験後の供試体(SFRC)

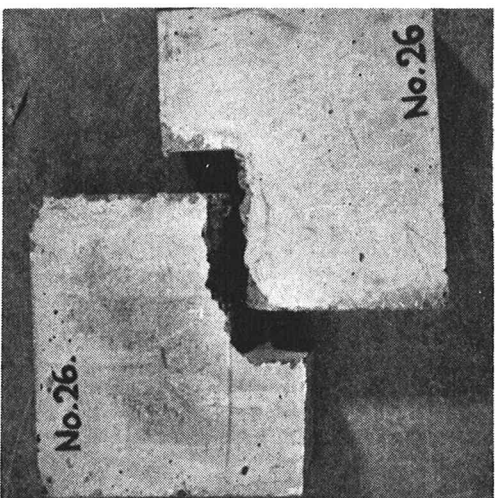


写真-8 試験後の供試体(普通コンクリート)

3. 実験結果及び考察

今回の実験の結果をまとめると表-3になる。Pull-out強度は各4本の平均値、せん断強度（間接一面せん断試験は1回）と曲げ強度は3本の供試体の平均値、圧縮強度は8本の供試体の平均値を用いた。Pull-out強度と各配合因子との分散分析の結果を表-4、5に示す。表-4、5はそれぞれ頂角 α が 54.5° 、及び 67.0° のPull-out強度の測定値である。表-4から頂角 54.5° の時のPull-out強度に関しては、シリカフェーム混入率、単位セメント量、及び単位水量の因子が1%危険率有意水準を満足し、鋼繊維混入率が5%危険率有意水準を満足した。頂角 67.0° の時のPull-out強度に関しても全く同様の結果が得られた（表-5）。これらの因子の効果グラフを示すと図-2 になる。今回の実験で設定した頂角の範囲内では頂角によるPull-out強度の変化は一次元的な関係であり交互作用は存在しなかった。図-3,4,5はPull-out強度と各種せん断強度との相関を示したものであり、図-6、7はPull-out強度と圧縮強度、曲げ強度との相関を示したものである。これらの図を用いてPull-out強度とせん

表-3 実験結果のまとめ

NO.	Pull-Out強度 (N/mm ²)		圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)		
	$\alpha=54.5^\circ$	$\alpha=67.0^\circ$			直接二面	間接一面	ルーマニア式
1	6.368	3.768	40.79	5.15	8.49	6.59	2.92
2	6.964	4.565	45.68	7.68	10.75	5.09	10.33
3	5.150	3.996	33.32	5.79	7.51	5.22	2.14
4	5.304	3.708	34.11	5.91	8.66	6.40	8.64
5	6.322	4.861	53.27	7.39	10.67	7.42	6.94
6	7.510	5.577	57.31	9.33	13.32	7.50	4.55
7	6.863	4.957	39.88	5.67	12.96	8.60	6.04
8	6.699	4.520	43.64	7.76	10.44	8.07	9.71
9	7.124	4.838	46.53	5.12	8.89	8.14	3.12
10	7.410	5.316	53.46	8.75	11.69	7.64	4.24
11	5.534	4.041	34.98	6.50	8.67	5.73	6.59
12	6.586	4.829	44.41	7.61	10.03	6.36	4.42
13	8.758	6.271	63.99	7.34	11.52	9.14	7.33
14	9.389	7.333	67.63	9.12	12.85	12.66	5.07
15	6.446	4.333	53.80	7.54	11.42	6.32	——
16	7.370	5.554	54.72	6.77	12.19	8.93	3.65

表-5 Pull-out強度の分散分析表 ($\alpha=67.0^\circ$)

因子	平方和	自由度	平均平方和	F値	寄与率
S	2.86	1	2.86	17.88**	19.61
C	4.15	1	4.15	25.94**	28.98
W	2.55	1	2.55	15.94**	17.36
S $\times$ W	0.81	1	0.81	5.06	4.72
W $\times$ C	0.41	1	0.41	2.56	1.82
Vsf	1.29	1	1.29	8.06*	8.21
S $\times$ Vsf	0.41	1	0.41	2.56	1.82
E	1.28	8	0.16	——	17.48
T	13.77	15	——	——	100.00

表-4 Pull-out強度の分散分析表 ($\alpha=54.5^\circ$)

因子	平方和	自由度	平均平方和	F値	寄与率
S	3.46	1	3.46	15.38**	17.04
C	4.97	1	4.97	22.09**	25.00
W	6.11	1	6.11	27.16**	31.01
S $\times$ W	0.81	1	0.81	3.60	3.08
Vsf	1.36	1	1.36	6.04*	6.98
E	2.25	10	0.23	——	17.89
T	18.98	15	——	——	100.00

断、圧縮、曲げ強度との相関を計算すると表-6のような結果となる。Pull-out強度と直接二面せん断試験、間接一面せん断試験は相関の高い右上がりの回帰直線が得られたが、ルーマニア式せん断試験では顕著な相関関係が得られなかった。

これはルーマニア式せん断試験自体が従来から報告されているようにせん断試験法としての精度が劣る²⁾ためであると考えられる。圧縮強度との相関についてはMalhotra¹⁾らの報告にもあるように高い相関関係が得られたがせん断強度との相関に比較し同等か、やや低い値となった。曲げ強度との相関に関しては、圧縮強度との相関よりも低い値となった。頂角の違いによる各強度とPull-out強度との相関係数の違いは、せん断強度については大きな差異がないが、圧縮、曲げ強度との場合には明白な違いが生じた。従って、Pull-out試験により、これら圧縮強度或いは曲げ強度を推定する場合には、頂角の設定に注意が必要であると思われる。

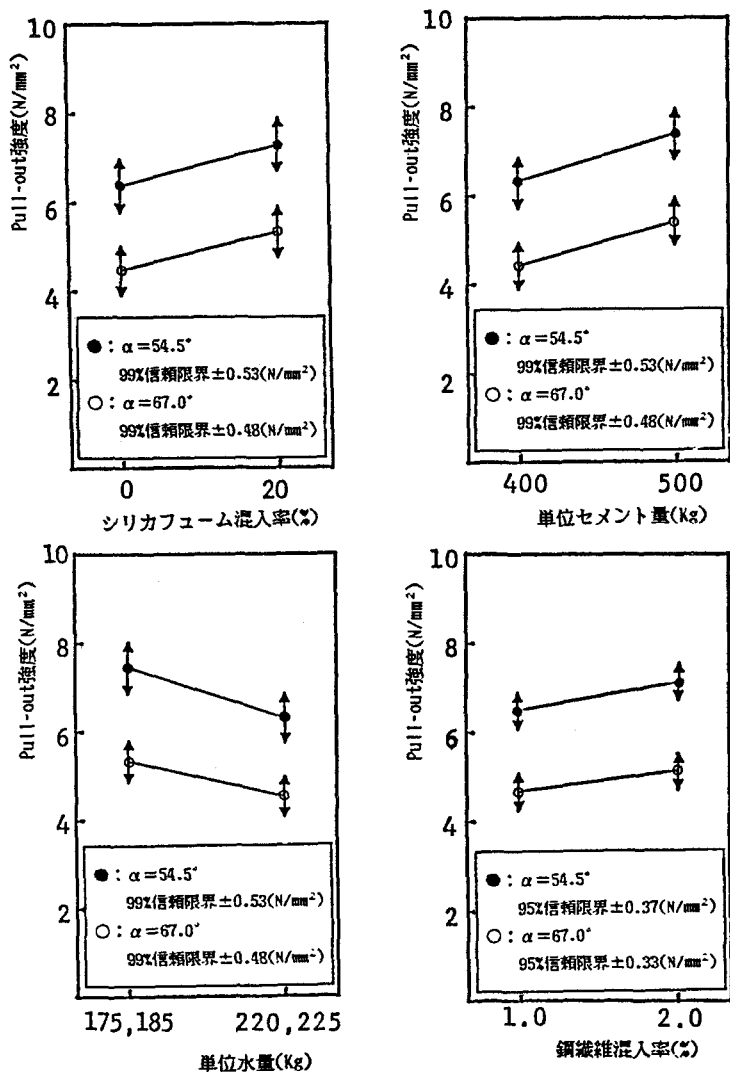


図-2 Pull-out強度に影響を及ぼす各因子の効果グラフ

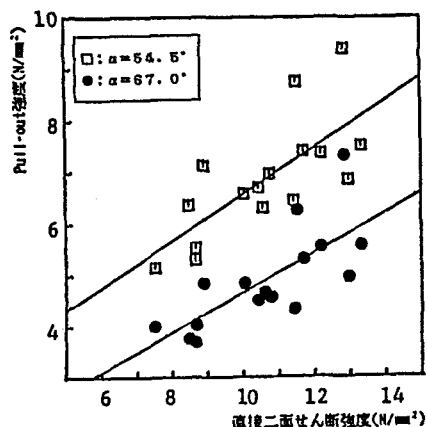


図-3 Pull-out強度と直接二面せん断強度との関係

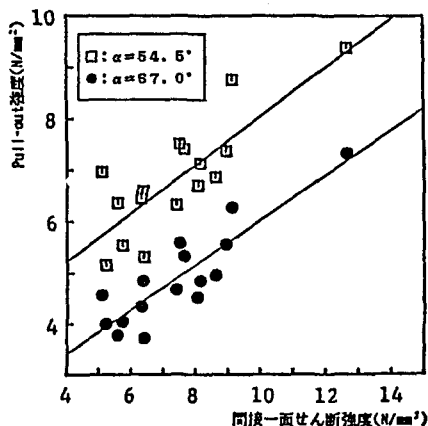


図-4 Pull-out強度と間接一面せん断強度との関係

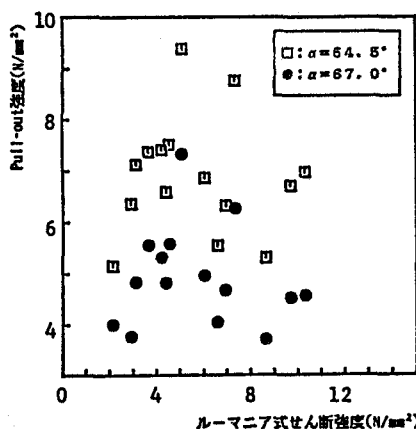


図-5 Pull-out強度とルーミア式せん断強度との関係

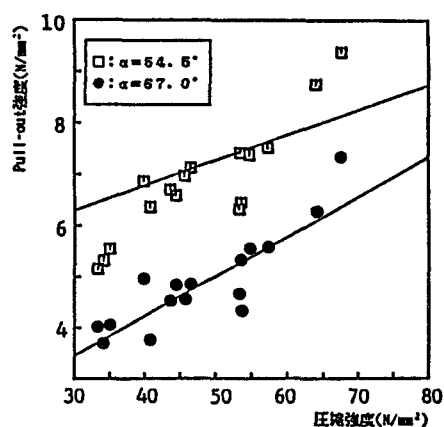


図-6 Pull-out強度と圧縮強度との関係

表-6 Pull-out強度と各力学的強度との相関係数及び回帰式

			直接二面	間接一面	ルーミアア	圧縮	曲げ
回帰式 $S_p = ax + b$	54.5°	a	0.46	0.48	-0.01	0.06	0.47
		b	2.01	3.27	6.93	4.76	3.51
	67.0°	a	0.40	0.44	-0.03	0.08	0.45
		b	0.68	1.62	5.13	1.00	1.73
相関係数	54.5°		0.727	0.822	0.014	0.608	0.559
	67.0°		0.741	0.881	0.088	0.875	0.843

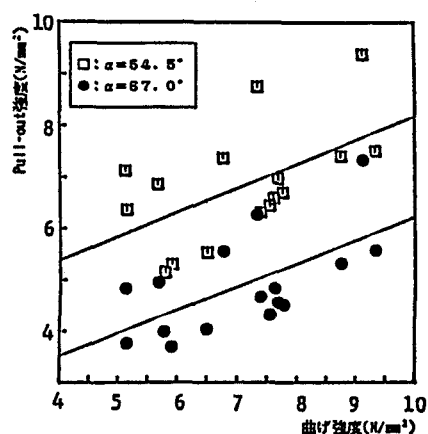


図-7 Pull-out強度と曲げ強度との関係

4. まとめ

今回の実験の結果をまとめると次のようになる。

(1) Pull-out強度に影響を及ぼす因子は単位セメント量、単位水量、シリカフューム混入率、鋼繊維混入率であった。

(2) せん断試験法として、従来から合理的な試験法として推奨されている直接二面せん断試験、間接一面せん断試験によるせん断強度は、Pull-out強度と優れた相関関係を示し、Pull-out強度によってSFRCのせん断強度が推定できる事が判明した。

(3) SFRCのPull-out強度とせん断強度、圧縮強度、曲げ強度との相関を検討した結果、せん断強度、圧縮強度、曲げ強度の順に高い相関を示し、Pull-out強度は圧縮よりもむしろせん断強度の性状に近いものと考えられる。

参考文献

- 1) V.M.Malhotra; Evaluation of the pull-out test to determine strength of in-situ concrete; Matériaux et constructions, Vol.8, No.43, 1975, pp.19-30.
- 2) 魚本, 峰松; 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, Vol.19, No.4, 1981, pp.106-117.

- 3) 峰松, 小林, 魚本; 繊維補強コンクリートのせん断試験; 土木学会第35回年講, 1980, pp.127-128.
- 4) 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; 土木学会第32回年講, 1977, pp.32-33.
- 5) 堀口, 阿部, 石田, 牧野; 繊維補強コンクリートのpull-out試験について; 土木学会北海道支部論文集 第41号, 1985, pp.588-591.