

V—13 繊維コンクリートのコンシステンシーの判定方法について

北海道工業大学	正会員	堀口 敬
〃	学生会員	木村 倫之
〃	学生会員	神本 邦男
〃	学生会員	久保 信浩

1. 目的

近年、~~鋼繊維~~繊維補強コンクリート及びポリマーセメントコンクリート（以下SFRC及びSFRPCCと略す）の研究発表や実用例が数多く発表されている。^{1),2),3),4)} したがって、今後SFRC及びSFRPCCの使用量が増加することは、必至と思われる。しかし、SFRC及びSFRPCCは、繊維の混入によって繊維の混入率、形状、寸法などワーカビリティを支配する因子が増加するのみならず、それとともに他の配合因子の役割、効果も変化するもので、従来のワーカビリティとは幾分異なった観点からの検討が必要となる。

例えば、SFRC及びSFRPCCのワーカビリティを評価する場合は、従来から普通コンクリートに使用されているスランパ試験が、ワーカビリティの目安として有効であるが、この場合、突き棒による締固めは、繊維の配向性を乱す恐れがあるので、これに代わる適切な締固め方法を規定する必要がある。又、普通コンクリートの場合と同様のスランパ（3～18cm）を適用してSFRC及びSFRPCCの配合を定めると、単位水量や単位セメント量の過大なコンクリートとなるので注意を要する。¹⁾ 又、硬練りコンクリートのスランパ値（2.5cm以下）の場合などにおけるコンシステンシーに関しては、従来から「土木学会規準・振動台式コンシステンシー試験方法（鋪装用）」を用いて試験することが規定されている。この試験は、Vee Bee試験と呼ばれスランパ試験がまだ固まらないコンクリートの軟かさのうち主として静的な変形能力に関する試験法であるのに対し、主として流動性能に関する試験法である。さらに、その試験方法からして振動締固め特性を直接判定できる特徴を有している。したがって、沈下度（V.B. 試験の結果値）は、コンシステンシーの変化に敏感に対応し、スランパ試験では区別しにくいようなコンシステンシーの差を判別するのに適している。そこで、SFRC及びSFRPCCの締固め特性を判定するためにも最適であるといえよう。^{5),6)} しかし、スランパ試験のように手軽に現場管理試験に使用するのは不向きである。したがって、ワーカビリティの目安をスランパ試験の結果のみに頼ることに問題がある。そこで最近、ACI544委員会が繊維補強コンクリートのワーカビリティ試験法として提案した「Inverted Slump Cone Test」は、スランパ試験の簡便さとV.B. 試験などが示す振動による流動性の判定性能を上手く採り入れて現場向きにしている。⁷⁾

そこで本実験は、コンシステンシーを判定する目的で、ASTM規格によるInverted Slump Cone Test、V.B. 試験、本報告者が改良した逆スランパコーン試験、普通コンクリート用のスランパ試験及びフロー試験を実施し、その相関関係を求めた。それぞれの相関関係及びその有意性を検討する方法として実験計画法による解析を行った。⁸⁾

2. 実験概要

本実験は、実験計画法に基づきTable-1に示すように4因子、2水準をとり、L-16直交配列表によりTable-2に示すように割り付けを行った。

2-1 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。又、鋼繊維は、0.5mm×0.5mm×30mm（アスペクト比が9/d

=53.2)を直線状のものと先端をフック加工し

たものを用い、混入率を示し1.0%、1.5%とした。SFRPCCに使用したポリマーディスペーションは、SARラテックスを用い、その混入量は固形分で 50 kg/m^3 である。(P/Cは平均15%)配合は、水セメント比を40%、45%に変化させ、細骨材率は、60%とした。又、細骨材の吸水率は、規定(JIS A 1109規定)の結果1.7%、粗骨材の最大粒径は、15mmとした。

Table-1

Factor	1	2
Vf (%)	1.0	1.5
P (kg/m^3)	0.0	50.0
Kf	Hooked	Straight
W (kg/m^3)	155.0	166.0

Table-2

No	Kf	Sf	W	P
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	1	2	1
4	1	1	2	2
5	1	2	1	1
6	1	2	1	2
7	1	2	2	1
8	1	2	2	2
9	2	1	1	1
10	2	1	1	2
11	2	1	2	1
12	2	1	2	2
13	2	2	1	1
14	2	2	1	2
15	2	2	2	1
16	2	2	2	2

2-2 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、骨材とセメントを各30秒練り混ぜ後、鋼繊維をファイバーボールがきかないように手均等になるように投入し2分間練り混ぜた。その後、水あるいは水とポリマーディスペーションをあらかじめ混ぜたものを投入し低速で30秒さらに高速において1分30秒の計2分間練り混ぜた。

2-3 実験方法

- スランア試験 スランア試験は、JISA1101(コンクリートのスランア試験方法)により試験を行った。
- フロー試験 フロー試験は、ASTM C-124の規定により試験を行った。
- V.B. 試験 V.B. 試験は、土木学会標準 振動台式コンシステンシー試験方法により試験を行った。使用器具は、本実験では、VeeBeeコンシステメーター(C-141)を使用した。振動テーブルの振動数は、3000rpm、全振幅は、約0.3mmとした。スランアコーンは、ASTM C-143規定のものを使った。

- Inverted Slump Cone Test Inverted Slump Cone Testは、ACI 544委員会が提案したSFRCCのワーカビリティの試験方法により試験を行った。

使用器具は、円筒容器(ASTM C-138規定)、スランアコーン(ASTM C-143規定)、バイブレーター(ASTM C-192規定)、ストップウォッチ

試験方法は、Fig. 1のように円筒容器中央にスランアコーンをさかさまにし、スランアコーンを円筒容器底面から3in浮かして固定する。このスランアコーンに、2-2の練り混ぜ方法によって得た試料を緩く詰め上面

をスランアコーンの上端に合わせなければならない。この時、円筒容器、スランアコーン、バイブレーターは、あらかじめ濡らした布で湿らせておく。次に、バイブレーターを振動させながらコーン中心軸に沿って鉛直に容器の底面に達するまで数秒かけて差し込む。同時にストップウォッチで測定を開始する。そして、このままの状態をコーン中の試料が全て円筒容器内に流動落下仕終わるまで振動し続け、試験結果は、バイブレーターを差し込んだからスランアコーンの中の試料が空になるまでの所要時間を測り、その時間をsec単位の数値で表わし、これをInverted Slump Cone値とする。

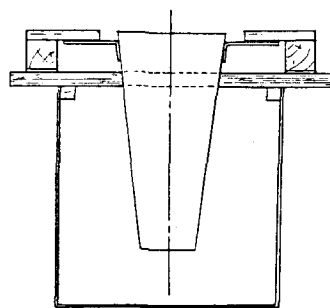


Fig-1 Inverted Slump Cone Test

●逆さスランア
コーン試験

本試験は、前記のInverted Slump Cone Testを本報告者が改良したものである。

使用器具は、スランアコーン（ASTM C-143規定）バイブレーター（ASTM C-192規定）、平らな鉄製の板（60cm×60cm）、コーンの高さ調節棒2本、ストッパウオッチ

試験方法は、Fig.-2のように平らな鉄製の板中央にスランアコーンをさかさまにし、木製の板で固定し置く。このスランアコーンに、2-2の練り混ぜ方法によって得た試料を緩く詰め上面をスランアコーンの上端に合わせながら、

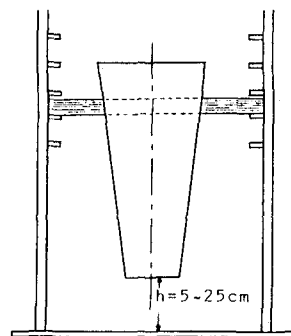


Fig-2 逆さスランアコーン試験

この時、あらかじめ鉄製の板、スランアコーン、バイブレーターは、濡らした布で湿らせておく。そして、規定した高さ（5cm～25cmに変化させる）にスランアコーンを上げる。それと同時にバイブレーターを振動させながらスランアコーン中心軸に沿って鉛直に鉄製の板に達するまで数秒かけ差し込む。同時にストッパウオッチで測定を開始する。そして、このままの状態スランアコーン中の試料が全て鉄製の板に流動落下仕終わるまで振動しつづけ、試験結果は、バイブレーターを差し込んでからスランアコーン中の試料が空になるまでの所要時間を測り、その時間をSec単位の数値で表わし、これを本実験の値とする。

●圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108によって行った。

●ポアソニ比

ポアソニ比の測定は、ポアソニ比測定機によって行った。

3. 実験結果

Table-3に示す値は、2-3の実験方法によって得た試験結果値である。又、表中のPCは、鉄繊維混入量が0のポリマーセメントコンクリートで、配合は、No.2から鉄繊維を除いたものとした。又、 σ_{28} は、材齢28日の圧縮強度（ kg/cm^2 ）を示し、Eは、圧縮強度試験におけるポアソニ比の測定結果によって得た接線弾性係数（ $\times 10^5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ）を示している。

Table-3

No.	Slump (cm)			Flow (cm)			VeBe (sec)			Inverted-Cone (sec)						σ_{28}	E
	1	2	mean	1	2	mean	1	2	mean	ASTM	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm		
1	2.8	3.4	3.1	38.2/37.2	38.2/37.0	37.7	53.6	62.3	58.0	41.5	26.2	20.0	17.7	8.4	5.4	501.65	2.23
2	15.3	10.1	12.7	50.6/48.8	40.2/39.6	44.8	5.2	10.0	7.6	34.7	54.4	30.8	21.8	10.0	7.0	281.60	2.55
3	7.4	7.5	7.5	44.2/43.8	45.4/44.5	44.5	9.4	25.4	17.4	24.3	22.6	11.2	4.3	3.5	2.9	377.60	3.82
4	13.0	13.8	13.4	47.0/45.5	46.9/46.0	46.3	3.4	5.5	4.5	32.2	38.7	18.1	13.2	6.3	5.8	297.70	2.60
5	0.6	0.6	0.6	38.9/33.7	36.3/33.7	35.7	172.0	150.0	156.0	95.0	66.0	47.0	24.0	15.0	9.0	459.96	3.34
6	5.5	7.2	6.4	39.6/39.4	41.7/41.2	40.5	33.3	11.8	22.6	39.8	97.6	43.8	18.2	15.8	9.9	329.80	2.76
7	7.5	8.0	7.8	42.6/41.6	43.0/41.4	42.2	62.0	50.5	56.3	33.0	26.5	13.7	9.7	6.1	3.5	453.59	2.37
8	10.8	9.0	9.9	40.0/39.1	41.0/39.9	40.0	9.4	39.8	9.4	49.8	85.5	45.8	19.3	11.0	6.1	323.83	2.62
9	2.0	1.4	1.7	36.3/35.5	36.7/34.0	35.7	86.8	76.0	81.4	48.7	32.2	28.6	15.0	12.0	11.4	479.17	3.95
10	12.5	16.0	14.3	43.1/42.4	48.9/48.1	45.6	19.8	5.0	12.4	36.2	60.2	24.8	17.0	7.4	4.6	332.95	2.44
11	8.1	8.2	8.2	46.6/46.4	47.7/46.3	46.8	16.5	15.3	16.2	21.4	15.0	7.2	5.0	2.3	2.0	433.96	4.05
12	24.6	23.5	24.1	50.3/48.7	54.8/54.0	52.0	8.4	1.5	5.0	0.0	23.2	15.0	11.0	5.8	5.4	348.66	3.12
13	3.2	3.0	3.1	34.4/33.7	34.7/33.9	34.2	114.0	125.0	119.5	47.8	33.2	20.6	12.8	9.0	5.6	455.82	4.24
14	14.3	14.3	14.3	41.8/40.8	43.3/42.9	42.2	26.4	14.0	20.2	50.6	54.4	27.0	15.8	8.2	7.3	365.60	2.92
15	10.5	11.0	10.8	49.9/49.4	50.5/49.4	49.8	21.0	8.0	14.5	26.2	27.1	7.1	3.2	1.3	1.0	452.60	3.79
16	11.3	13.1	12.2	44.1/41.6	44.9/44.1	43.7	10.8	9.4	10.1	43.7	55.6	24.2	16.4	9.3	8.4	294.50	2.36
PC	6.0	5.0	5.5	35.7/33.6	35.4/33.6	34.6	18.8	19.5	19.2	84.0	60.5	32.2	22.3	13.8	9.0	326.59	2.99

Table-4に示す値は、各試験方法によって得られたデータを因子別に分散分析した結果である。表中*印は、F検定において1%危険率有意水準を満足したもので、*印は、5%危険率有意水準を満足したものを表わしている。又、表中の因子K_rは、ポリマーディスパーションの混入量を示し、()内の数値は、因子寄与率(%)を示している。K_f:V_f、K_f:K_w、K_f:K_rは、フックの有無と各因子との交互作用を示している。

Table-4

Factor	Slump	Flow	V.B.	Inverted-Cone					
				ASTM	5cm	10cm	15cm	20cm	25cm
K _f	13.04 ^{**} (9.17)	8.08 ^{**} (4.65)	—	3.12 ^{**} (4.12)	7.79 ^{**} (9.70)	10.83 ^{**} (13.30)	11.14 ^{**} (10.46)	17.38 ^{**} (10.21)	—
V _f	6.41 ^{**} (4.12)	15.22 ^{**} (9.34)	10.54 ^{**} (8.00)	11.76 ^{**} (20.89)	16.95 ^{**} (20.44)	10.17 [*] (12.41)	2.16 [*] (1.19)	16.00 ^{**} (9.35)	1.93 [*] (1.18)
K _r	66.25 ^{**} (49.68)	20.04 ^{**} (12.51)	43.17 ^{**} (35.38)	—	27.52 ^{**} (34.00)	10.33 [*] (12.63)	18.19 [*] (17.74)	10.50 [*] (5.92)	8.29 [*] (9.22)
K _w	19.69 [*] (14.23)	57.93 ^{**} (37.40)	28.32 ^{**} (22.92)	14.60 ^{**} (26.41)	9.68 [*] (11.13)	18.93 [*] (24.27)	39.11 ^{**} (39.33)	64.72 ^{**} (39.71)	24.31 ^{**} (29.48)
K _f :V _f	—	—	3.11 [*] (1.77)	—	5.08 [*] (5.23)	8.42 [*] (10.05)	2.16 [*] (1.19)	15.06 ^{**} (8.76)	3.36 [*] (2.98)
K _f :K _w	—	9.85 [*] (5.81)	—	—	—	—	—	—	—
K _f :K _r	5.98 [*] (3.79)	—	—	—	—	—	—	—	—

Table-5に示す値は、下記の回帰式によって得た各試験の相関係数の中で最も高い数値である。()内の数字は、その値を得た回帰式の番号である。又、この時、SFRCとSFRPCCとの性状が著しく異ったため、対角線の上部にSFRC、下部にSFRPCCと分けて作製した。

Table-5

No.	Slump ⁽¹⁾	Flow ⁽²⁾	V.B. ⁽³⁾	Inverted-Cone					
				ASTM ⁽⁴⁾	5cm ⁽⁵⁾	10cm ⁽⁶⁾	15cm ⁽⁷⁾	20cm ⁽⁸⁾	25cm ⁽⁹⁾
(1)	—	0.772 (2)	0.895 (1)	0.908 (4)	0.744 (3)	0.969 (3)	0.877 (3)	0.935 (3)	0.892 (2)
(2)	0.365 (4)	—	0.883 (4)	0.925 (2)	0.786 (2)	0.864 (4)	0.879 (4)	0.831 (1)	0.758 (4)
(3)	0.827 (1)	0.505 (4)	—	0.694 (4)	0.423 (4)	0.822 (2)	0.846 (2)	0.922 (2)	0.883 (2)
(4)	0.695 (1)	0.280 (1)	0.841 (1)	—	0.945 (1)	0.957 (1)	0.819 (1)	0.782 (1)	0.653 (3)
(5)	0.865 (2)	0.531 (4)	0.884 (2)	0.452 (1)	—	0.857 (1)	0.646 (1)	0.713 (3)	0.240 (4)
(6)	0.735 (4)	0.423 (4)	0.834 (4)	0.378 (1)	0.910 (2)	—	0.853 (4)	0.982 (3)	0.864 (4)
(7)	0.567 (2)	0.237 (4)	0.557 (2)	0.447 (3)	0.666 (4)	0.702 (4)	—	0.915 (4)	0.824 (4)
(8)	0.838 (3,4)	0.460 (4)	0.689 (4)	0.220 (1)	0.849 (2)	0.839 (4)	0.569 (4)	—	0.951 (4)
(9)	0.604 (3)	0.397 (2)	0.423 (4)	0.193 (1)	0.386 (1)	0.345 (3)	0.172 (4)	0.020 (1)	—

- (1) $Y = ax + b$
 (2) $Y = a \times 10^{bx}$ ($a > 0$)
 (3) $Y = a + b \log x$
 (4) $Y = ax^b$ ($a > 0$)

4. 考察

- スランピア試験 スランピア試験に影響を及ぼす要因は、ポリマー混入量、単位水量、フックの有無、ファイバー混入量の順で、その寄与率は、それぞれ49.68%、14.23%、9.17%、4.12%であった (Table-4)。
 又、Fig-3は、SFRCでのスランピアと単位水量との関係を表わしたもので、相関係数は、0.676であった。
 他の試験との相関関係は、SFRCについては、本報告者らが提案した逆スランピアコーン試験の10cmの位置との相関が高く、SFRPCCにおいても、同5cmの位置との相関が高かった。
- フロー試験 フロー試験に影響を及ぼす要因は、単位水量、ポリマー混入量、ファイバー混入量、フックの有無の順で、その寄与率は、それぞれ37.40%、12.51%、9.34%、4.65%であった (Table-4)。
 又、Fig-4は、SFRCでのフローと単位水量との関係を表わしたもので、相関係数は、0.569であった。
 他の試験との相関関係は、SFRCについては、ASTM規定のInverted Slump Cone Testとの相関が最も高かった (Table-5)。又、SFRPCC

については、特に大きな相関が無かった。

• V.B. 試験

V.B. 試験に影響を及ぼす要因は、ポリマー混入量、単位水量、ファイバー量の順で、その寄与率は、それぞれ35.38%, 22.92%, 8.00%であった。(Table-4)。

他の試験との相関は、SFRCについては、本報告者が提案した逆さスランパコーン試験の20cmの位置との相関が最も高かった。又、SFRCPCについても、同5cmの位置との相関が最も高かった (Table-5)。

• Inverted Slump Cone Test

Inverted Slump Cone Testに影響を及ぼす要因は、単位水量、ファイバー混入量、フックの有無の順で、その寄与率は、それぞれ26.41%, 20.89%, 4.12%であった (Table-4)。

又、他の試験法との相関関係は、SFRCについては、本報告者が提案した逆さスランパコーン試験との相関が最も高かった。SFRCPCについては、V.B. 試験との相関が最も高かった。

• 逆さスランパコーン試験

逆さスランパコーン試験(5~25cm)に最も影響を及ぼす要因は、5cmの位置でポリマー混入であるのに対し、10~25cmの位置では、単位水量であった。

又、Fig-5, 6は、SFRCの当実験の10, 20cmと単位水量との関係を表わしたもので、相関係数は、それぞれ0.402, 0.452であった。

他の試験との相関関係は、試験全体を通して見て、SFRCにおいては、10cm, 20cmの位置の相関が高く、SFRCPCにおいては、5cmの位置が最も高い相関があった。

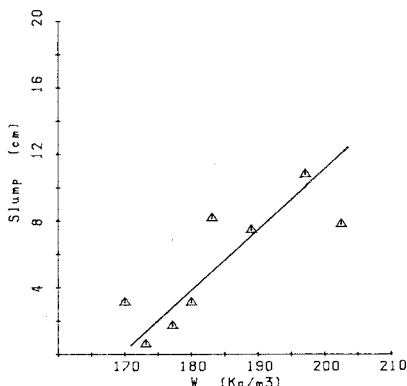


Fig-3 Slump vs W relationship

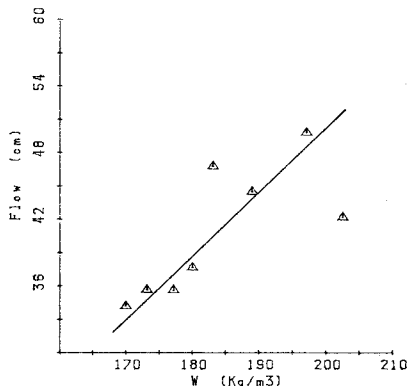


Fig-4 Flow vs W relationship

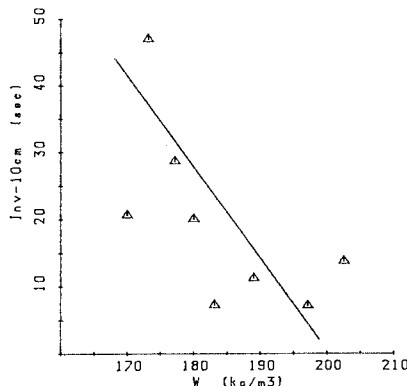


Fig-5 Inv-10cm vs W relationship

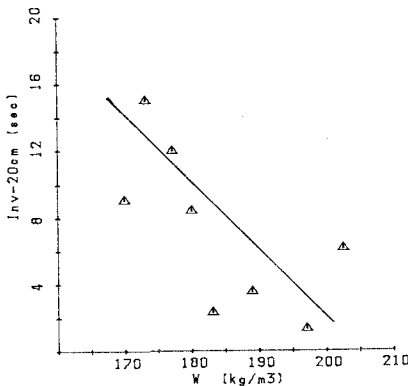


Fig-6 Inv-20cm vs W relationship

SFRPCCの時間
的なコンシステンシー
の変化をスランパ試験、
フロー試験、V.B. 試
験、逆さスランパコー
ン試験の10cmの位置
について行った結果、
Fig. 7, 8のよう
に直線的にコンシステ
ンシーが低下した。

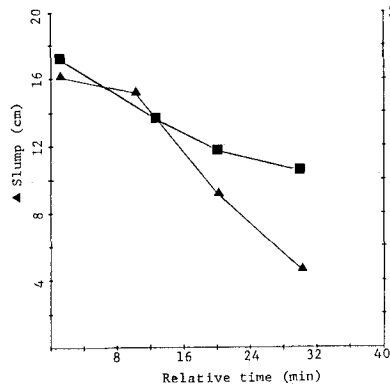


Fig. 7 Relative time vs Slump and Flow relationship

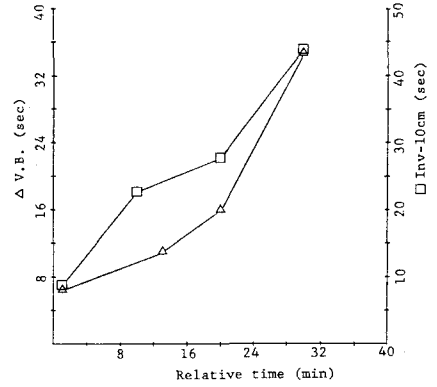


Fig. 8 Relative time vs V.B. and Inv-10cm relationship

5. まとめ

今回の実験の結果をまとめると次のことがいえる。

- 1) SFRCCのコンシステンシーの判定手段として試験法は、鋼繊維の形状が異なる場合は、スランパ試験、逆さスランパコーン試験(15、20cm)が有効である。又、混入量が変化する場合、フロー試験、Inverted Slump Cone Test及び逆さスランパコーン試験(5、20cm)が有効である。
- 2) ポリマーディスパージョンを混入するコンクリートにおいては、スランパ試験、フロー試験、V.B. 試験及び逆さスランパコーン試験(5、15cm)が有効である。
- 3) 単位水量によるコンシステンシーの変化を検討する場合では、本報告で行った試験のうちどれを用いても有効である。
- 4) 各試験法の特徴をまとめると、スランパ試験は、比較的広い範囲の因子について有効な試験法であるがポリマーディスパージョンの影響を大きく受ける。フロー試験は、どの因子にも対応できるバランスのとれた試験法である。本報告者が考案した改良逆さスランパコーン試験は、その落差を20cm程度にすると、バランスのとれた試験法となる。
- 5) 遅延剤を用いないSFRPCCの時間的なコンシステンシーの低下は、直線的であり、注意を要する。

参考文献

- 1) 「スチールファイバーコンクリートに関する調査研究報告書」, 日本トンネル技術協会 (1980. 3)
- 2) 小林 一輔: 「繊維補強コンクリート」, 土木施工 19巻 8号 (1978)
- 3) 小林 一輔ら: 「所要コンシステンシーを得るための繊維補強コンクリートの配合設計方法」, 土木学会 論文報告集 第293号 1980
- 4) 河野 清ら: 「鋼繊維補強コンクリートの構内舗装への応用実験」, 土木学会 第32回次学術講演会講演概要集 第5部
- 5) Mangat, P. S. et al Compactibility of steel fibre reinforced concrete, Concrete 1974
- 6) Hughes, B. P.: Assessing the workability of steel fibre reinforced concrete, RILEM Symposium 1978
- 7) ACI 544Committee: Measurment of Properties of Fiber Reinforced Concrete, ACI Journal (1978)
- 8) 田口 玄一: 「実験計画法」, 丸善 1975