

[1086] 鋼繊維補強コンクリートの工学的特性に関する実験的研究

金 武漢^{*1}・洪 悦郎^{*2}・鎌田英治^{*3}・金 振晩^{*4}

1. はじめに

本研究はスチールファイバをコンクリートマトリックス内に均一に分散させた鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の工学的特性に関する実験的研究で, 鋼繊維長さ及び混和材料が鋼繊維補強コンクリートの施工性及び力学的特性に及ぼす影響を検討した後, 鋼繊維補強コンクリートの流動化性能改善及び高強度化のために高性能減水剤, シリカフューム及びフライアッシュ等の混和材料を混入して鋼繊維補強コンクリートの作業性及び施工性と力学的特性を向上させて, 鋼繊維補強コンクリートの現場適用可能性を実験的に比較・検討したものである。

2. 研究計画と研究方法

表1に実験の要因と水準を示し, 表2に使用した材料の物性を示す。コンクリートの調合は表3に示すように水結合材比30(%)としてプレーンコンクリート(PLC)と鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を製作した。なお, 鋼繊維補強コンクリートの繊維混入率は, 容積百分率1.0(%)の一定とし, 鋼繊維は正方形の断面で長さ20, 30, 40(mm)の3種類とした。また混和材の代替率はセメント重量に対して内割でシリカフュームは30(%), フライアッシュは10(%)とした。

コンクリートの混練は, 粗骨材→混和材→セメント→細骨材→水の順に100(ℓ)強制練りミ

表1 - 実験要因及び水準

Factor	Level			
W/B (°/wt)	30			
Addition Rates of Steel Fiber (°/vl)	0	1		
Length of Steel Fiber (mm)	-	20	30	40
Substituted Proportion of Admixture(%)	0	0	SF30	FA10
Addition Rates of Superplasticizer(%)	1.0	1.0	1.6	1.2

表2 - 使用材料の物理的性質

Cement	Specific gravity : 3.12 Type III (ASTM)
Fly-Ash	Specific gravity : 2.2
Silica Fume	Specific gravity : 2.1
Steel Fiber	Type: shearing steel fiber Cross section : square Specific gravity : 7.85 Aspect ratios : 36, 55, 73
Sand	Specific gravity : 2.64 FM : 2.56 Percentage of water absorption : 1.65
Gravel	Specific gravity : 2.59 FM 6.78 Percentage of water absorption : 1.65
Superplasticizer	Specific gravity : 1.10 Main component : synthetic polymers

表3 - コンクリートの調合

W/B (°/wt)	addition rates of Steel Fiber(%)	length of steel fiber (mm)	substituted proportion of admixture (°/wt)	addition rates of SP (%)	Unit Volume Content (ℓ/m ³)						
					water	cement	silica fume	fly ash	sand	gravel	steel fiber
30	0	--	0	1.0	195	206	0	0	206	383	10
	1	20 30 40	0	1.0						373	
			SF30	1.6	190	140	87	0	200	363	
			FA10	1.2	193	183	0	31	204	369	

*1 大韓民國 忠南大學教授 工科大学建築工学科, 工博 (正會員)

*2 關東學院大學教授, 工學部建築工学科, 工博 (正會員)

*3 北海道大學教授 工學部建築工学科, 工博 (正會員)

*4 大韓民國 忠南大學校大學院 建築工学科, 博士課程

キサに投入した後3分練り（1分混練→1分休止→2分混練）を採用した。また1分の休止の間に高性能減水剤を添加してスランプ18（cm）のコンクリートを作製し、その後鋼繊維を混入しながら2分間再練りを行った。

各要因及び水準別に施工性と力学的特性を比較・検討するためにまだ固まらないコンクリートにおいてスランプ、フロー、締固め係数、空気量、単位容積重量及び練上り温度を測定し、硬化コンクリートにおいて圧縮強度、割裂試験法による引張強度、動弾性係数、静弾性係数、超音波速度及び反発度を測定した。

3. 実験結果の分析及び検討

3. 1 まだ固まらないコンクリートの性状及び検討

まだ固まらないコンクリートの試験結果を表した表4及び鋼繊維の長さ及び混和材種類による単位容積重量と空気量の変化を表した図1によると単位容積重量は混和材を混入しない鋼繊維補強コンクリートの場合プレーンコンクリートと比較して大きな差異をみせないが、シリカフyum及びフライアッシュを混入した鋼繊維補強コンクリートの単位容積重量はプレーンコンクリートに比較して相対的に減少しておりその減少率は鋼繊維長さが長いほど大きく、またシリカフyumを混入した場合がもっと大きく表れた。

鋼繊維補強コンクリートの鋼繊維長さ及び混和材種類別空気量の変化をみると、混和材を混入しない鋼繊維補強コンクリートがプレーンコンクリートより相対的に少い空気量をみせ、フライアッシュを混入した鋼繊維補強コンクリートがシリカフyumを混入した場合より相対的に空気量が多い

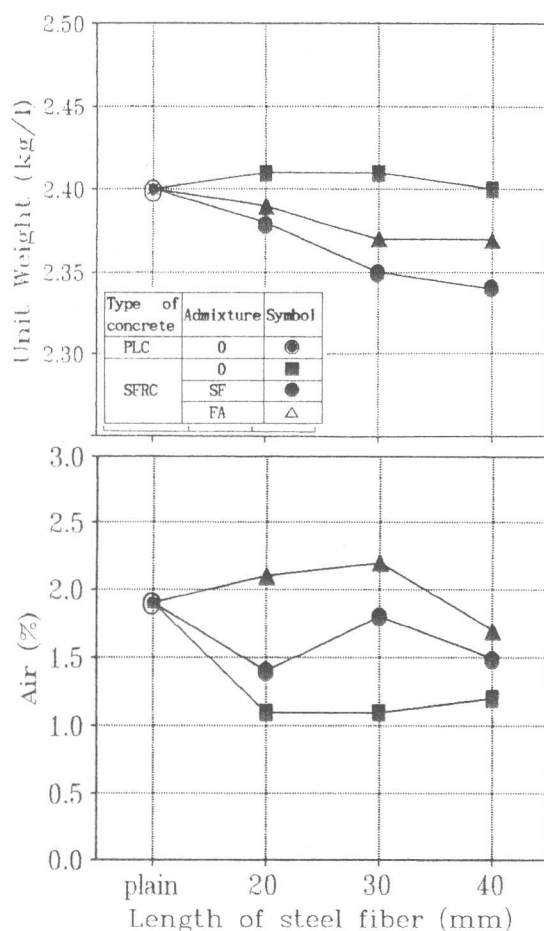


図1 鋼繊維の長さ及び混和材種類による単位容積重量と空気量の變化

表4 - まだ固まらないコンクリートの試験結果

W/B (%)	addition rates of Steel Fiber (%)	length of steel fiber (mm)	substituted proportion of admixture (%/wt)	air content (%)	tempe- rature (°C)	unit weight (kg/l)	slump (cm)		flow (cm)	compac- ting factor
							before*	after**		
30	0	0	0	1.9	16	2.40	18.5	-	43.5	0.99
				1.1	16	2.41	20.0	12.0	38.4	0.94
				1.4	15	2.38	20.0	15.5	39.0	0.98
				2.1	16	2.39	20.0	10.5	37.5	0.96
	1	20	SF30 FA10	1.1	15	2.41	20.5	10.0	37.6	0.95
				1.8	15	2.35	21.0	13.0	39.0	0.96
				2.2	16	2.37	19.5	8.0	37.0	0.94
				1.2	15	2.40	21.0	6.0	36.5	0.92
		30	SF30 FA10	1.5	14	2.34	21.0	10.0	38.5	0.95
				1.7	14	2.37	21.0	4.0	34.8	0.89
		40	SF30 FA10							

* slump of concrete before adding the steel fiber

** slump of concrete after adding the steel fiber

傾向をみせている。

図2は鋼繊維長さ及び混和材種別鋼繊維の混入によるスランプの変化を表したもので、鋼繊維の長さが長くなる程スランプ値の低下が大きく表れ、混和材を混入しない鋼繊維補強コンクリートに比べフライアッシュを混入した場合にはスランプ値の低下が大きく表れ、繊維補強コンクリートにフライアッシュを使用する時にはフライアッシュの品質に注意すべきであると思われる。シリカフュムを混入した鋼繊維補強コンクリートでは混和材を混入しない鋼繊維補強コンクリートよりスランプ値が大きく表れて鋼繊維長さ40(mm)においても10(cm)の相対的に良好なスランプ値をみせている。

また図3に示すように鋼繊維長さ及び混和材種別鋼繊維補強コンクリートのフロー値と締固め係数値の変化においてもスランプと類似な傾向をみせている。

鋼繊維補強コンクリートの場合、流動性が低下するのは鋼繊維混入時鋼繊維表面にセメントペーストが付着されコンクリートの流動性を付与する結合材の量が減少するものと鋼繊維自体がまだ固まらないコンクリートの変形と流動性を拘束した結果であると思われる。このような傾向は鋼繊維の長さが長くなる程流動性の低下が大きく表れ、また鋼繊維の混入率が増加するとこの傾向はもっと顕著であると予測される。

3. 2 硬化コンクリートの力学的特性の分析及び検討

硬化コンクリートの各種力学的特性の試験結果である表5と圧縮強度に及ぼす鋼繊維の長さ及び混和材料の種類の影響を示した図4で分るように鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度は材令28日以後プレーンコンクリートより高く表れ、鋼繊維の混入は繊維の拘束効果によってコンクリートの圧縮強度の増進に有利であることを示した。またシリカフュムを使用した鋼繊維補強コンクリートはほかの調合に比べ早強化の傾向は小さいが材令28日以後継続的な強度発現をみせ材令180日には28日強度より17～34(%)の強度を多く発現しておりシリカフュムの使用は鋼繊維補強コンクリートの施工性の改善ばかりでなく圧縮強度の増進にも寄与することと考えられる。なお、圧縮強度に及ぼす鋼繊維の長さの影響は認められなかった。フライアッシュを使用した場合は材令28日までは混和材を使用しない鋼

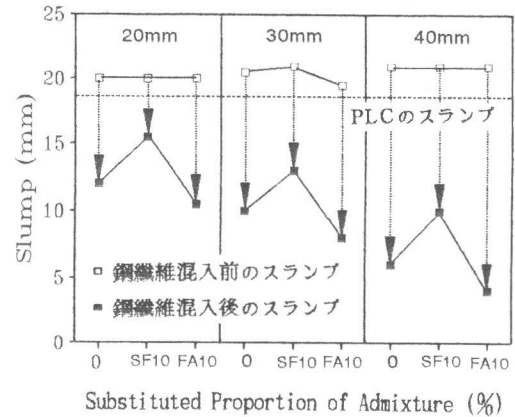


図2 鋼繊維の長さ及び混和材種別鋼繊維の添加によるスランプ値変化

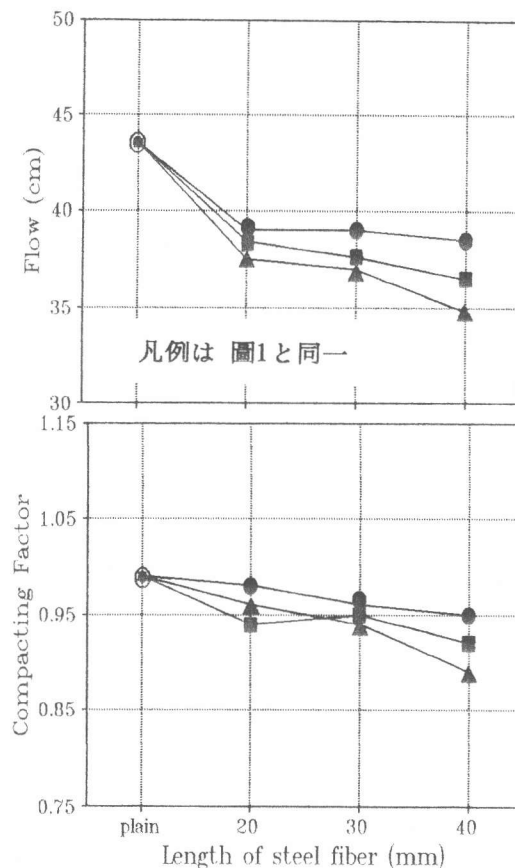


図3 鋼繊維の長さ及び混和材種類によるフロー値と締固め係数値の変化

繊維補強コンクリートに比べ若干低い水準の強度をみせているが28日以後には強度発現が高くほとんど同等な水準の圧縮強度をみせており、フライアッシュの使用は鋼繊維補強コンクリートの経済的側面で使用が考慮されると思われる。

表 5 - 硬化コンクリートの試験結果

W/B (°/wt)		30									
Addition Rates of Steel Fiber(%)		1									
Length of Steel Fiber (mm)		20				30				40	
Substituted Proportion of Admixture(°/wt)		0		SF30		FA10		0		SF30	
Addition Rates of SP (%)		1.0		1.6		1.2		1.0		1.6	
Unit Weight (kg/t)	7d	2.43	2.50	2.43	2.48	2.48	2.42	2.44	2.49	2.44	2.45
	28d	2.42	2.49	2.46	2.45	2.49	2.42	2.45	2.46	2.44	2.48
	60d	2.43	2.51	2.45	2.46	2.48	2.43	2.46	2.51	2.42	2.46
	90d	2.40	2.43	2.40	2.41	2.44	2.40	2.41	2.46	2.48	2.42
	180d	2.43	2.46	2.39	2.42	2.49	2.43	2.44	2.47	2.39	2.44
Compressive Strength (kg/cm ²)	7d	524	580	487	543	557	432	527	574	489	544
	28d	596	692	654	639	668	625	621	667	600	588
	60d	619	704	742	689	691	724	659	697	713	660
	90d	658	702	766	714	708	759	723	750	767	698
	180d	662	718	766	747	732	787	726	764	803	749
Percentage of compressive strength (%)	7d	88	84	74	85	83	69	85	86	82	93
	28d	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	60d	104	102	113	108	103	116	106	104	119	112
	90d	110	101	117	112	106	121	116	112	128	119
	180d	111	104	117	117	110	126	117	115	134	127
Splitting Tensile Strength (kg/cm ²)	7d	40	44	41	45	46	44	41	51	45	44
	28d	43	45	45	46	48	48	45	52	48	52
	60d	44	50	48	48	50	54	50	53	53	56
	90d	44	52	52	51	52	56	50	53	53	56
	180d	45	53	56	54	53	58	52	55	56	58
Brittleness Factors	7d	13.1	13.1	11.9	12.1	12.1	9.8	12.9	11.3	10.9	12.4
	28d	13.9	15.4	14.5	13.9	13.9	13.0	13.8	12.8	12.5	11.3
	60d	14.1	14.1	15.5	14.4	13.8	13.4	13.2	13.2	14.3	11.8
	90d	15.0	13.5	14.7	14.0	13.9	13.6	14.5	14.2	14.5	12.5
	180d	14.7	13.5	13.7	13.8	13.8	13.6	14.0	14.0	14.3	12.9
Dynamic Modulus of Elasticity (x10 ⁵ kg/cm ²)	7d	3.72	3.92	3.43	3.70	3.71	3.41	3.55	3.72	3.42	3.69
	28d	3.95	4.22	3.91	4.04	4.07	3.78	3.93	3.97	3.71	3.97
	60d	4.05	4.31	4.07	4.13	4.17	3.94	4.00	4.16	3.89	4.14
	90d	4.15	4.24	3.99	4.17	4.16	3.98	4.14	4.22	3.94	4.11
	180d	4.07	4.21	3.93	4.00	4.24	3.99	4.01	4.10	3.89	4.02
Static Modulus of Elasticity (x10 ⁵ kg/cm ²)	7d	2.70	3.02	2.59	2.55	2.83	2.60	2.45	2.63	2.39	2.51
	28d	2.79	3.15	2.82	2.94	2.86	2.82	2.80	2.78	2.61	2.62
	60d	2.95	3.16	2.89	3.03	3.11	2.99	2.98	3.10	2.85	2.98
	90d	3.27	3.38	3.10	3.27	3.33	3.38	3.10	3.27	3.11	3.33
	180d	3.27	3.42	3.22	3.25	3.35	3.33	3.15	3.21	3.12	3.22
Ultra Sonic Pulse Velocity (km/sec)	7d	4.41	4.35	4.12	4.19	4.24	4.16	4.22	4.31	4.19	4.26
	28d	4.45	4.42	4.26	4.39	4.28	4.21	4.43	4.34	4.24	4.40
	60d	4.56	4.59	4.51	4.57	4.57	4.39	4.58	4.48	4.44	4.67
	90d	4.49	4.57	4.43	4.49	4.46	4.42	4.48	4.58	4.38	4.54
	180d	4.57	4.58	4.47	4.46	4.50	4.47	4.52	4.55	4.48	4.59
Rebound Numbers	7d	40	41	39	40	40	38	39	41	38	40
	28d	42	45	44	44	42	42	42	43	40	40
	60d	44	46	46	44	45	46	45	46	46	45
	90d	44	47	47	45	45	46	47	49	48	47
	180d	45	47	48	46	47	49	47	49	50	48

* Percentage of each age compressive strength by 28 days compressive strength

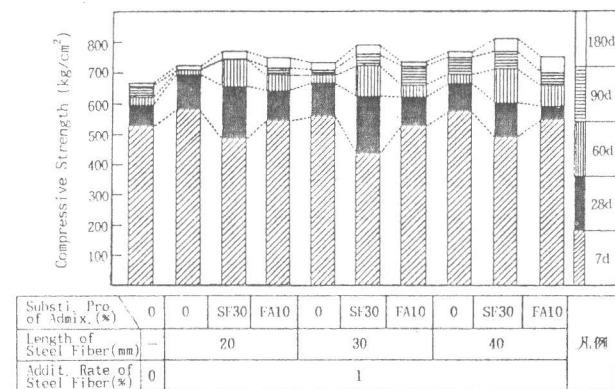


図 4 圧縮強度に及ぼす鋼繊維の長さと同和材種類の影響

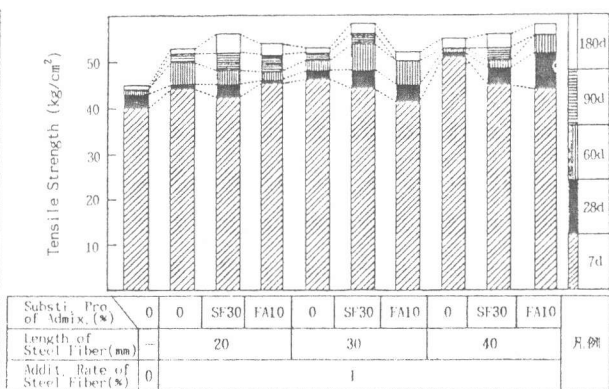


図 5 引張強度に及ぼす鋼繊維の長さと同和材種類の影響

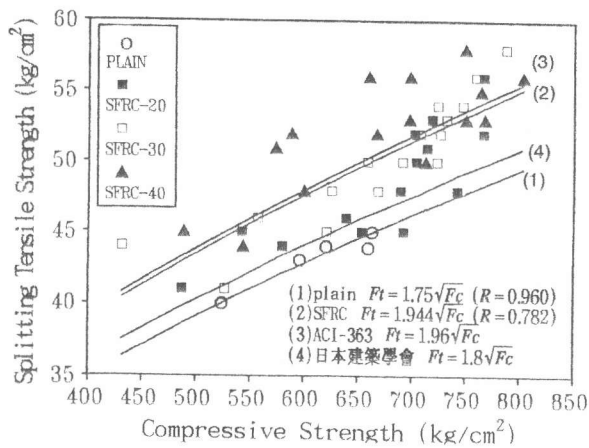


図 6 圧縮強度と引張強度の関係

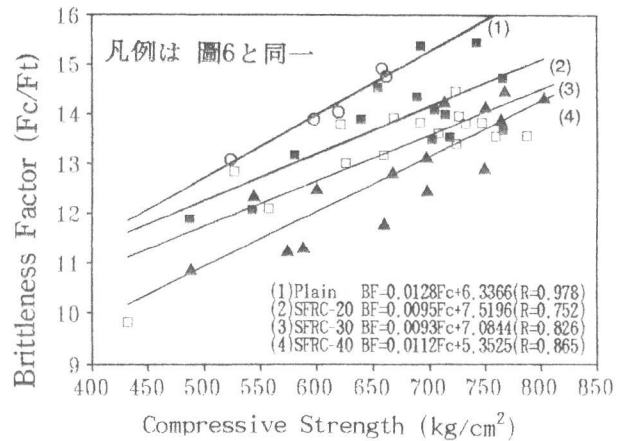


図 7 圧縮強度と脆度係数の関係

分かるようにコンクリートの圧縮強度の増加により脆度係数も増加しており[4][5], 鋼繊維を混入した場合には鋼繊維の長さが長いほど脆度係数が減少する傾向をみせており, 繊維の長さを増加させるのはコンクリートの靱性増進に有利であることを示している. また当然であるがプレーンコンクリートより鋼繊維補強コンクリートが低い脆度係数をみせている.

図 8 は圧縮強度と弾性係数の関係を表したもので, 静弾性係数の場合本実験結果は日本建築學會の規準, 友澤の提案式及び A C I - 3 6 3 の提案式に比べ同一圧縮強度において低い弾性係数値をみせており[1][2], プレーンコンクリートの場合には圧縮強度の増加によりその差異が小さくなって圧縮強度が700(kg/cm²)以上になると, ACI式及び友澤の提案式と同一な水準の弾性係数値をみせているが, 鋼繊維補強コンクリートの場合には強度が増加してもその差異は小さくならない. また動弾性係数の場合にも同一な圧縮強度で本実験の動弾性係数値は英國規準式[6]に比べ低い値をみせており, 弾性係数に対してはもっと深度ある研究が必要であると思われる.

図 9 は超音波速度と圧縮強度の関係を表したもので同一な圧縮強度では鋼繊維補強コンクリートがプレーンコンクリートより低い超音波速度をみせており, これは鋼繊維の混入がコンクリート内部の不連続面を増加させたために表れたものであると判断され, 超音波速度によるコンクリートの圧縮強度推定時鋼繊維の混入による補正値を設定すべきであると思われる. 反発度と圧縮強度の関係をみると図 10 のように鋼繊維及び混和材料の混入による有意する特異な傾向は表れないで, 反発度による圧縮強度推定の精度が高く表れている.

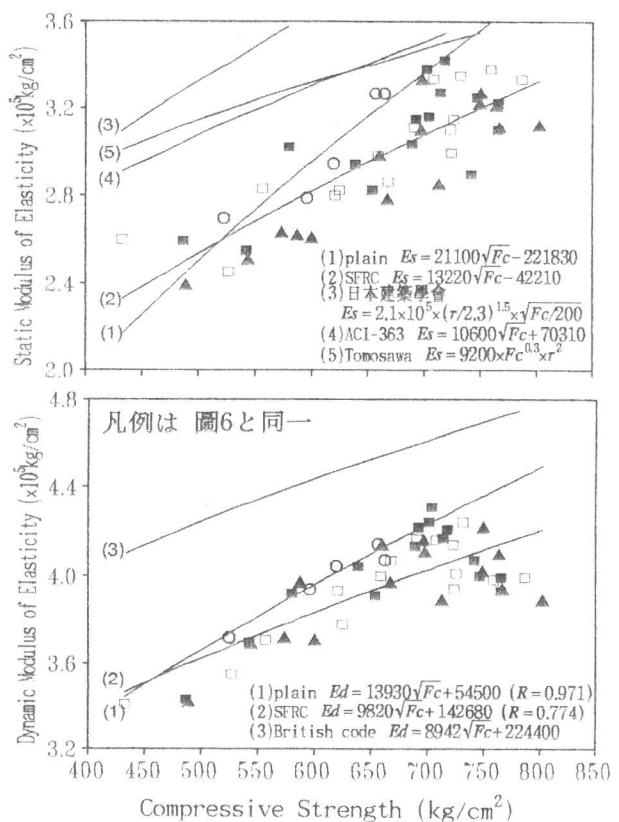


図 8 圧縮強度と弾性係数の関係

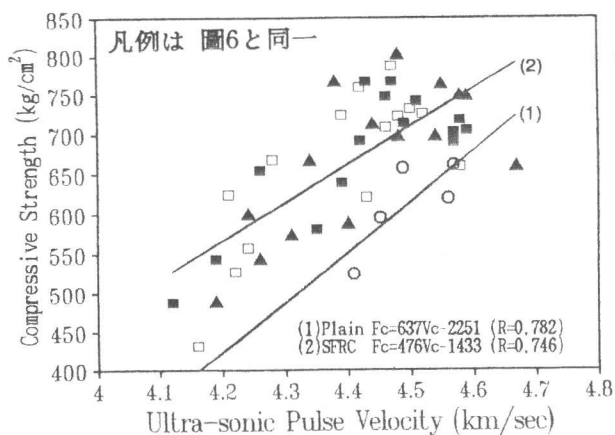


圖 9 超音波速度と壓縮強度の関係

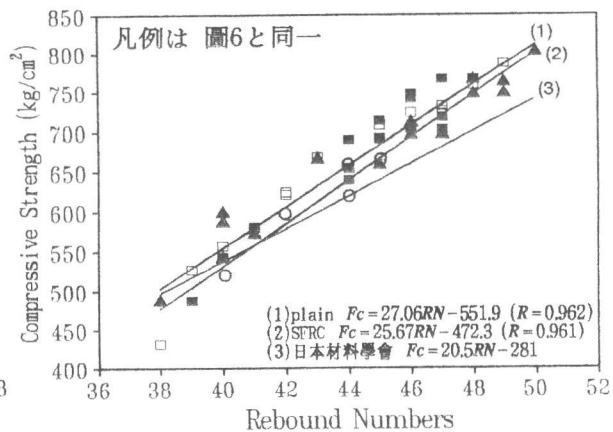


圖 10 反發度と壓縮強度の関係

4. まとめ

シリカフyum及びフライアッシュを混入した鋼纖維補強コンクリートの施工性と壓縮強度性状などの力學的特性を混和材種類及び鋼纖維長さなど實驗要因と水準別に比較・分析した結果を要約すればつぎのようである。

- 1) シリカフyum及びフライアッシュを混入したコンクリートではプレーンコンクリートと同一水準のコンシステンシをえるための高性能減水劑の量が増加されるが、鋼纖維補強シリカフyumコンクリートでは高性能減水劑を適切に使用して施工性が優秀なコンクリートの製作が可能である。
- 2) 鋼纖維の使用はコンクリートの靱性を増進させ、鋼纖維の長さが長いほど流動性は低下するが壓縮強度は同等な水準を維持し、脆度係數の減少を見せ鋼纖維の長さはコンクリートの引張強度及び靱性増進に有利な因子であると思われる。またシリカフyumは鋼纖維補強コンクリートの流動性及び力學的特性を改善されることに表れた。
- 3) 本實驗結果によると弾性係數値は各種規準に比べ低い水準を見せており、超音波速度で壓縮強度を推定する時には鋼纖維の混入による補正值を設定すべきであると思われる、非破壊試験値中に反發度が壓縮強度の推定時の精度が高く表れている。

参 考 文 献

- 1) ACI Committee 363 : State-of-the-Art Report on High Strength Concrete, Journal of ACI, Vol. 81, No. 4, pp.383~389, July~Aug. 1984.
- 2) 日本建築學會：鐵筋コンクリートの構造計算の規準・同解説, pp. 47~70, 1984.
- 3) 日本建築學會：スチールファイバーコンクリートの技術の現状, 丸善, pp.7~156, 1984.
- 4) ACI Committee 544 : State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, Journal of ACI, Vol. 70, No. 11, pp. 729~744, 1973.
- 5) 金 武漢・洪 悦郎・鎌田英治：高強度・流動化コンクリートの施工性と工學的特性に関する實驗的研究, コンクリート工學年次論文報告集, 第12巻 第1號, pp.269~274, 1990.
- 6) British Standard Institution : The Structural Use of Concrete, Part 1, Design, Materials Workmanship, London, CP 110, pp. 154, 1972.