

7章 鋼繊維補強軽量コンクリートの基本特性に関する技術資料 (No.13の転載)

7. 1 軽量コンクリートの鋼繊維補強のねらい

1. 1 普通コンクリートと軽量コンクリート

セメントコンクリートはセメントにより骨材を結合しただけの充填構造組織であり、引張強度が圧縮強度に比べ小さい。このためひび割れが発生しやすいことや、破壊時の挙動が脆性的になるという宿命的な特質を有している。

人工軽量骨材コンクリート（以下LCとし、ここでは粗骨材に軽量粗骨材を、細骨材に普通細骨材を使用した、いわゆる軽量1種コンクリートとする）は、その密度が同一の圧縮強度の普通コンクリート（以下NCとする）に比べ約20%小さい。この特徴を生かして、建築土木の幅広い分野でLCが活用されている。

土木構造物においてもLCは経済的でスレンダー

な上部構造を実現し、下部構造への荷重軽減に貢献できるため、LCを活用した構造物が数多く建設されている。（表1.2参照）一方、LCはNCに比べ一部の力学的性状がやや劣る部分もある。表1.1に本委員会の実験結果による同一配合のNCとLCの強度特性の比較を示す。

これらの結果から、圧縮強度および引張強度は差がないが、静弾性係数はNCの60%、曲げせん断強度、曲げ強度は75%程度である。このためLCを使用する構造物の設計には、これらのことを配慮した設計手法が採用されてきた。しかし、近年、道路橋床版などでは、せん断や曲げ強度などのNC並への向上が求められ、これを理由にLCの採用が困難とされるなど、土木用途への活用が減退している。

表一. 1 LCとNCの強度特性の比較

	W/C (%)	単位容質 T/m ³	気乾単位容質 T/m ³	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 10 ⁴ N/mm ²	引張強度 N/mm ²	曲げ強度 N/mm ²	せん断強度 N/mm ²	曲げせん断 N/mm ²
NC	48	2.28	2.26	39.1	2.94	2.78	4.88	4.74	2.2
LC	48	1.91	1.85	38.2	1.85	2.69	3.81	4.72	1.7
LC/NC(%)		84	82	98	63	97	78	99	76

(注) せん断強度は二面せん断試験、曲げせん断強度は梁の曲げせん断試験による、材齢は28日
単位容質は単位容積質量を、気乾単位容積は気乾単位容積質量をあらわす。

表一. 2 日本におけるLCの主な土木向け実績 (件数)

用途	設計強度 (N/mm ²)	年代					
		64~'69	70~'74	75~'79	80~'84	85~'89	90~'94
床版	21以下	8	5	0	0	3	6
	24以上	29	15	9	3	6	12
	40以上	0	0	0	0	0	3
橋脚	21以下	1	0	0	0	0	0
	24以上	1	1	1	0	0	0
	40以上	0	0	0	0	0	0
桁	21以下	0	0	0	0	0	0
	24以上	4	1	0	0	0	1
	40以上	9	0	0	0	6	0
計		52	22	10	3	10	21

1. 2 土木構造物における活用

ALA協会がまとめた昭和39年から平成6年までの日本におけるLCの土木構造物への使用実績の概要は表1.2に示すようである。

日本では、軽量アスファルトや軽量盛土などのわずかの例を除き、ほとんどが床版や桁あるいは高欄・橋脚・フーチングなど橋梁構造物への活用である。図1.1に、文献(T.A.Holm and T.W.Bremner The Durability of Structural Lightweight Concrete)から引用した、北米における橋梁構造物への適用の推移を示す。また図中には上記ALA協会の

調査による日本での適用の推移を示す。

この図から、北米における近年の普及の急拡大に対して日本では昭和45年に爆発的な普及が見られたが、以降は激減し、北米における推移とは対照的である。この理由として、経済性や施工性あるいは強度特性など種々のことがらが挙げられている。

図1.2に文献(西川和廣、ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテ橋の提案、橋梁と基礎、97-8)から引用した日本における建設年次別橋梁数および形式別橋梁延長を示す。

これらの図からLC床版が採用されることの多い鋼橋の推移を見ると、昭和50年をピークに鋼橋の

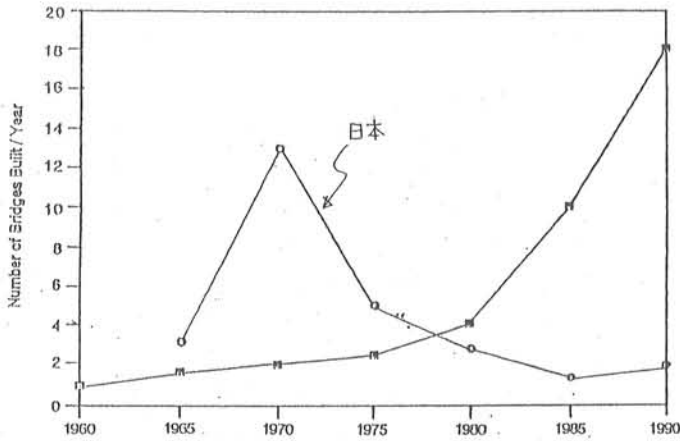
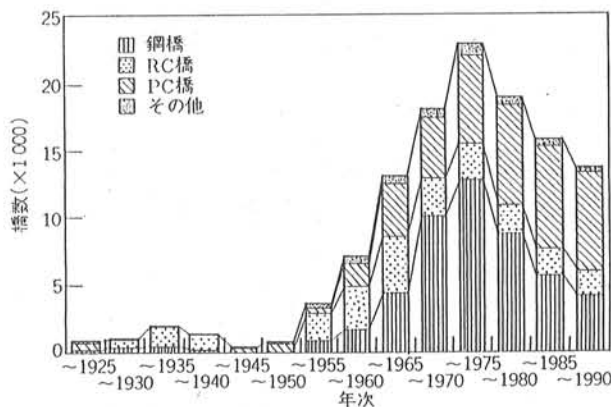
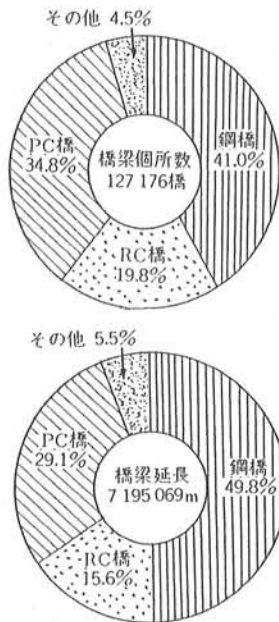


Fig. 1--Number of major bridges built per year in North America using structural lightweight concrete (Expanded Shale Clay and Slate Institute task force updating of ref. no. 1)

図一.1.1 LC活用橋梁数の日米比較



図一.2 建設年次別橋梁数および平成6年4月現在の橋梁数および延長

建設シェアは低下し、代わりにPC橋が隆盛を示している。しかし、橋梁延長では約半数を鋼橋が占めている。これらのデータからは新設される橋梁への適用のみでなく、既設の鋼橋のストックの大きさから、更新される床版へのLCの適用のポテンシャルの高さがうかがえる。車両積載荷重の大型化を迎え、このような更新される床版は桁の継続使用を考えると、軽量化が最も望ましい技術であろう。

1. 3 LCの補強

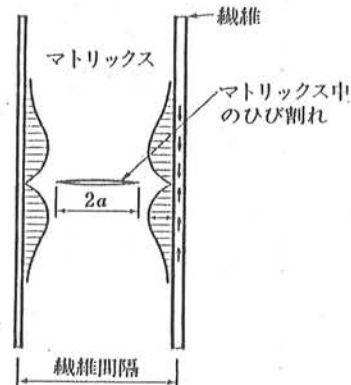
LCはその軽量性を活かしてスレンダーで経済的な構造物を実現させる材料として極めて有望である。ただし、日本では過去の採用の経験からLCの弱点の補強が求められている。これを経済的に実現することができれば、LCは再び関光を浴びることができる。

本研究報告はLCを鋼繊維により補強することとし、その物性や耐久性を含む性能の調査確認を行ったもので、これを高性能LCとして、橋梁の床版への適用を目指すものである。

1. 4 繊維補強効果の考え方

1960年代、Romualdiらは脆性材料の強度を説明したGriffithの理論を応用して鋼繊維補強の研究を行った。マトリックスであるコンクリートよりも高い弾性係数および強度を有する鋼繊維によりコンクリートが有する欠陥・空隙から発生したひび割れが繊維部分で止まってしまい、ひび割れの進展を防止する。すなわち、繊維の平均間隔に反比例して脆性材料の欠陥・空隙の大きさは小さくなり、セメントコンクリートの引っ張り強度は平均繊維間隔を小さくすれば著しく高めることができるというものである。¹⁾

(図一.3, 1.4)



図一.3 鋼繊維による脆性材料のひび割れ拘束機構モデル (文献1による)

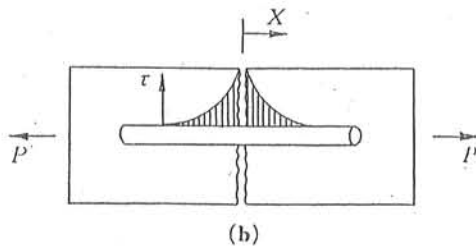


図-1.4 ひび割れ後の繊維-マトリックス界面せん断応力分布の例 (文献2による)

近年の研究報告²⁾によれば例えば初期ひび割れ強度の増大のようなひび割れ前における補強効果と、ひび割れ発生後ひび割れ面が繊維により橋架けされ繊維の引き抜け抵抗によりひび割れをまたいで応力が伝達され、複合体の脆性的な破壊が防止されるという(靱性効果)二つの現象に分けて補強効果が議論されている。最近では、後者がより重要な補強効果とし繊維補強複合体の終局強度や変形性能の改善に関する研究報告が多い。

一方、松井³⁾によればRC床版の最終損傷形態は一部コンクリートが抜け落ち、路面が陥没する現象であり、その多くにおいて上面のコンクリートは骨材化しているという。さらに、このような現象は主桁のずれ止めによる拘束から床版コンクリートの乾燥収縮によるひび割れが発生し、床版に加わる種々の交通荷重による変形が雨水の存在下でこのひび割れ面をもみ合い擦り合うことにより発生するという。繊維による補強がひび割れ面の動きを強く抑制する

のであれば、このような現象は発生することがなく、床版の疲労耐久性の向上に大きく貢献する可能性がある」と指摘している。

1.5 補強用繊維

コンクリート補強用の繊維は多種多様なものが検討されているが、それらの種類とその物理的性質を表1.3に示す。一般にコンクリートの欠陥の補強にはマトリックスであるコンクリートより高いヤング率の繊維を、また繊維補強複合体としての靱性を高める目的には上記よりやや低いヤング率の繊維が用いられる。

近年においてコンクリート補強に使用されている繊維とその使用例は表1.4のようである。

これら各種コンクリート補強用繊維の中で鋼繊維はその研究の歴史は古く、他の繊維に比べて研究報告の質と量が豊富である。

当然、鋼繊維そのものの歴史も古く、改善改良が重ねられ、最も安定した性能が期待できる。

1980年に建築物のデッキプレートの配力鉄筋を省略するための鋼繊維補強軽量コンクリートの研究が東京大学工学部建築学科友澤研究室において取り組まれており、基礎データが存在し研究の継続に好都合である。

このようなことから、本委員会では補強用繊維として鋼繊維を採用することとなった。

表-1.4 繊維補強コンクリートの使用例

用途	特性		性能		材料				
	種類	気乾比重	圧縮強度 (Kg/cm ²)	曲げ強度 (Kg/cm ²)	セメント	骨材	繊維材料	混和剤	鉄筋防錆
(現場打設) 床版増厚	SFRC	2.42	400	70	普通 ポルトランド	普通骨材	スチール繊維		鉄筋無し
トンネル ライニング	SFRC	2.38	240	50	普通 ポルトランド	普通骨材	スチール繊維		鉄筋無し
トンネル 吹き付け	SFRC	2.38	240	50	普通 ポルトランド	普通骨材	スチール繊維		鉄筋無し
工場土間	SFRC	2.38	300	80	普通 ポルトランド	普通骨材	スチール繊維	流動化剤	特に無し
カーテンウォール (工場打設)	SFLRC	1.91	500	100	早強 ポルトランド	人工軽量 骨材	ステンレス 繊維	減水剤 増粘剤	特になし
	GLRC	1.50	250	90	特殊 セメント	超軽量骨材 珪砂	耐アルカリ性 ガラス繊維	高性能 減水剤	ステンレス
	CFLRC	1.65	250	80	特殊 セメント	粉末珪砂	ビッチ系 炭素繊維	増粘剤	ステンレス
	VFLRC	1.65		80	特殊 セメント	粉末珪砂	ビニロン 繊維	増粘剤 流動化剤	エポキシ樹脂 塗装

(注)ここに記載したものは主な用途の代表的な例である。カーテンウォールについては参考文献4)による。

表一.1.3 補強用繊維およびマトリックスの種類と力学的性質 (文献2による)

種別	素 材	種 別	直 径 (μ)	密度	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断伸度・ 降伏 (%)
無 機 織 維	石 綿	クリソタイル	0.02-30	2.55	588-980	157	2-3
		クロシドライト	0.1-20	3.37	2746-4120	167	2-3
	鋼	せん断	500	7.85	880	206	3.5
		伸 線	500	7.85	1180	206	3.5
		切 削	600程度	7.85	830	206	3.5
	ガ ラ ス	メルトエクストラクション	450	7.85	780	206	3.5
		A R	12.5	2.78	2450	74	3.6
		E	10	2.54	2160	71	4.8
	炭 素	A	10	2.46	2060	64	—
		PAN-IIM	7-9.7	1.95	1960-2450	382	0.5
		PAN-IIT	7.6-8.6	1.75	2650-3630	245	1.5
		ビッチ-GP	18	1.6	690-980	29	2.0-2.4
		ビッチ-HP	10	1.9	1960-2940	196	0.5-0.6
	アルミナ ボ ロ ン SiC		33-10	3.6	1080-1770	324	—
			100	2.62	2940-4410	392	—
		10-15	2.5	2940	196	—	
有 機 織 維	ポリエチレン	モノフィラメント	900	0.95	250-700	0.1-2.2	10-15
		モノフィラメント	10	0.98	2550-4710	69-127	2-5
	ポリプロピレン	モノフィラメント	10	0.9	300-760	3.5-4.9	23-25
		ファイブール	500	0.9	390	7.8	8
	ビニロン	モノフィラメント	14-16	1.3	980-1470	30-36	3-13
		アラミド	Kevlar49	11.9	1.45	2750-3530	123
	アクリル	Kevlar29	12	1.44	2840	68	4.4
		テクノーラ	12.4	1.39	3430	73	4.6
			18	1.18	830-930	17-19	9-11
	ポリアミド		4	1.14	760-980	4.9	13.5-19
	ポリエステル		—	1.38	730-860	7.9	11-13
セルロース		—	1.2	300-500	10	10-20	
マ ト リ ク ス	セメントモルタル	—	—	—	2.5-3.5	20-40	0.005- 0.015
	セメントコンクリート	—	—	—	3.0-4.0	10-40	0.005- 0.015

1. 6 鋼繊維補強コンクリートの特徴

(1) 物理的特性

繊維補強コンクリートの物理的特性に与える重要な影響因子は下記のようなものである。¹⁾

① 繊維種類 (材質、形状、寸法)

今回の研究に使用する鋼繊維の種類はA、B、Cの3種類である。マトリックスがコンクリートであることより、高度な補強効果をねらい骨材最大寸法(15mm)の3倍以上の長さのものを使用し、それぞれ製造方法の異なるものを選定した。

② 繊維とマトリックスの付着性状

採用した鋼繊維はマトリックスとの付着改善を工夫した両端フック型 (A: ϕ 0.8×60mm)、インデント型 (B: ϕ 0.7×50mm)、波形 (C: t 0.25×b 2.0×50mm) の三種である。それぞれの付着性能はメーカーにより明らかにされている。

③ 繊維の配向と分散

魚本¹⁾によればガラス繊維の成形法と配向および補強効率は表1.5のようなものである。今回採用する成形

法は流し込み法であるためこの表からは補強効率は20%以下となる。

④ 繊維混入率

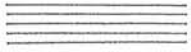
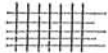


土木学会指針 (案) によれば繊維混入率はマトリックスに対する容積百分率にて表すこととしている。またその混入率は上限を定めていないが、一般には0.5~2.0%(40~160Kg/m³)を標準としている。本研究では経済性も考慮して0.5~1.0%(40~80Kg/m³)とした。

⑤ マトリックス (モルタル、コンクリート) の品質

本研究に使用するマトリックスは粗骨材に軽量骨材を、細骨材に普通砂を使用する軽量1種A/Eコンクリートである。配合は1995年に北陸新幹線の鋼橋床版に使用された流動化軽量コンクリートを標準とした。通常、コンクリートに鋼繊維を混入すると流動性は低下する。一般にこれを改善するにはコンクリート中のモルタルの量を増加させる手法がとられる。

この研究では鋼繊維複合体の軽量性と施工時におけるポンプ圧送性を同時に確保すると共に、乾燥収縮やクリープ性状の低下を押さえるため、モルタル量の増加は極力抑さえ高性能減水剤によりコンクリートの流動性を確保することとした。

表-1.5 ガラス繊維の補強効率と成型法
(文献1による)

配向性	補強効率 (%)	成型法
連続一軸配向 	100	パイプフィラメントワインディング成形 連続ロービング押し出し成形
連続二軸配向 	40~50	
連続ランダム配向 	35~45	モルタルインジェクション成形
二次元ランダム配向 	30~37	吹付け成形 (ダイレクトスプレー法 スプレーサクション法)
三次元ランダム配向	0~20	プレミックス成形 (振動流し込み法 プレス法 押し出し法)

(2) 鋼繊維補強コンクリートのその他の特性

繊維補強コンクリートの耐久性は普通コンクリートに比較して良く、空気量等、通常のコンクリートと同様な配慮さえ行えば高い耐久性を有する。軽量コンクリートにおいても同様であるが、特に凍結融解抵抗性の向上が顕著である。若干の問題点は特に塩分環境下に施工されるような場合に表層部の繊維が腐食し錆汁の発生など外観上不味であることである。このため一部にステンレスファイバーの使用や表面への防錆塗装などが採用されるケースがある。

ひびわれのない場合、あるいはその幅が微小であれば内部まで腐食することはなく、強度、変形性能等の物理特性は変化しない。しかし荷重等により大きな幅のひびわれが発生している場合は、ひびわれ近傍の繊維が腐食し耐荷力が低下することがあるといわれている。

1. 7 鋼繊維補強コンクリートの製造方法

鋼繊維補強コンクリートは一般にプレミックス法より製造される。具体的には、工場にてドライミックスする方法や、プラントでのコンクリートミキサー、あるいは打ち込み現場でのコンクリートアジテーター車への投入などの方法がある。過去においてはコンクリートアジテーター車の性能によっては一部にファイバーボールの発生が見られることがあったが、近年ではファイバーの改良によりこのような現象は見られなくなった。

参考文献

1. 魚本健人, 繊維補強セメント・コンクリート: コンクリート工学 Vol.33, 1995.1
2. 真嶋光保, 幸左賢二, 大野定俊, 繊維補強セメント/コンクリート複合材料, 1994 技報堂
3. 松井繁之, 床版の技術開発, 橋梁と基礎 Aug. 1997
4. 清家 剛, カーテンウォールへのFRCの応用 P C S A 1998 Vol.16
5. 小林, 渡辺: 鋼繊維で補強した軽量コンクリートの力学性状セメント・コンクリート No.509, July 1989
6. 土木学会, 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案) 1983.3
7. (社) 鋼材倶楽部, 鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル(トンネル編) 1995 技報堂
8. 友澤, 篠塚, 山下, フック付き鋼繊維を用いた軽量コンクリートの基礎的性状に関する研究, 日本建築学会大会, 1990. 10
9. (社) 鋼材倶楽部, スチールファイバーコンクリートの手引き



隅田川・桜橋(床版に使用)

7. 2 各種鋼繊維の特徴

1. 鋼繊維の製造方法による区分₁₎

鋼繊維は繊維補強用に種々のものが開発され現在では実用の域に達している。

鋼繊維を用いたコンクリートの補強に関する研究は、1910年のPortorにはじまり、1963年のRomualdiによる補強効果に関する論文発表が契機となって、世界的に広まったものと思われる。

わが国においても1970年代より各研究機関による研究開発が行われる様になり、土木学会による「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)(1983)」、日本建築学会による「スチールファイバーコンクリート技術の現状(1984)」、日本コンクリート工学協会による「繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準(1984)」などに成果としてまとめられている。

これまでに開発された鋼繊維は多数のものがあるが、製造法としては図2.1に示す方法に大別できる。

(a) 伸線切断法 圧延引き抜きされた鋼線を切断する方法、繊維直径は0.5~0.8mm程度、断面形状は円形もしくはそれに近い形状である。

(b) 薄板せん断法 冷間圧延薄鋼板(厚さ0.2~0.5mm)を細長くせん断することによりせん断加工する方法で、断面形状は正方形ないし長方形である。

(c) 厚板切削法 鋼の厚板などを切削する方法。素材は切削時の加工硬化を受けている。断面は三角ないし三日月状である。

(d) 溶鋼抽出法 溶融した鋼を抽出凝固させたもの。断面は三日月である。

これらの方法により製造された鋼繊維は、製造過程において、もしくは製造後にコンクリートとの機械的な付着を高めるため表面加工が行われている。繊維表面の加工は繊維とセメントマトリックスとの付着を増大させるために重要であり、種々の方法が考えられている。

加工部分は端部のみの場合と全面の場合があり、加工そのものは、折り曲げ、波形異形、フックなど図2.2に示すようなものがある。繊維の長さは25~60mm程度のもものが多く生産されており、繊維の換算直径は0.5~0.8mm程度となっている。

土木学会基準(案)による「コンクリート繊維」に対する品質規格では、鋼繊維の種類は形状により1種(角形断面)、2種(円形断面)、3種(三日月形断面)の3つに分類されている。断面形状と製造法は密接な関係があり、1種は薄板せん断法、2種は伸線切断法、3種は

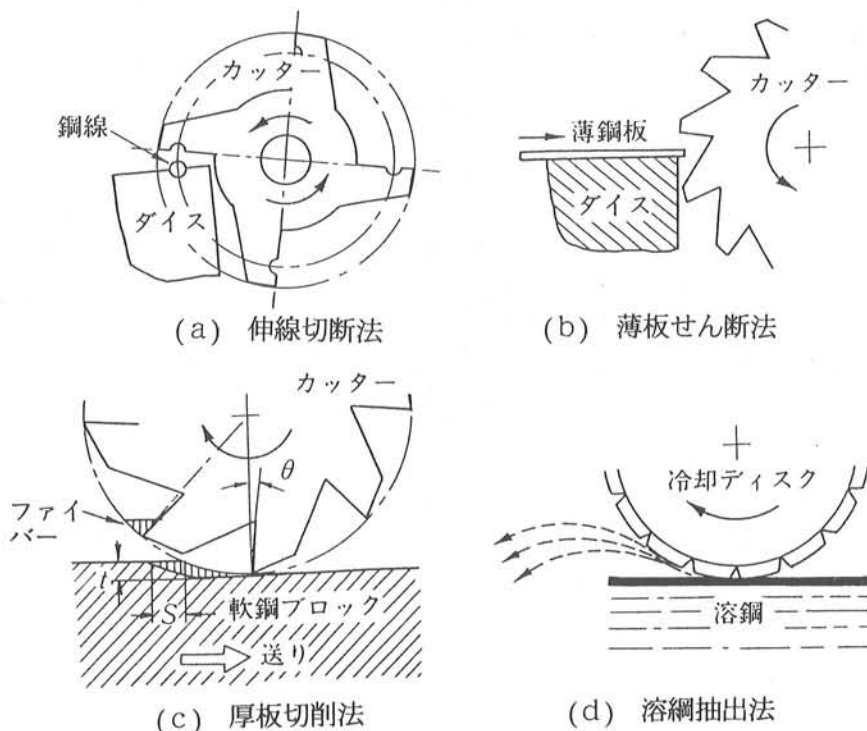




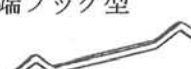






図-2.1 鋼繊維の製造方法

表-2. 1 代表的な鋼繊維の諸元 2)

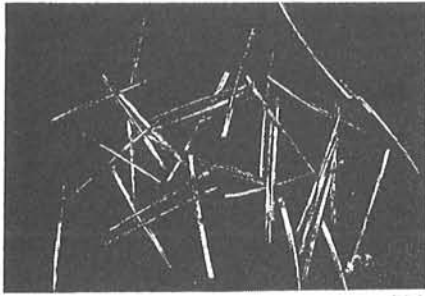
メーカー	商品名	寸法			素 材	製造方法	形 状
		厚さ	幅	長さ			
NKK	テスサ	0.5	0.5	20, 25, 30 40	JIS G 3141 SPCC	薄板 せん断法	インデント型 
	チャレンジ ⁺ AC	0.5	1.0	50	SPCC 相当 高強度材		端部インデント付き 
神鋼建材 工業(株)	シンコー ファイバー	φ0.6 [*]		25, 30, 40	JIS G 3532 SMW-B	伸線切断法	インデント型 
		φ0.7 [*]		45, (50)			
		φ0.8 [*]		50			
住友金属 建材(株)	ISファイバー	0.5	0.5	25, 30	JIS G 3141 SPCC	薄板 せん断法	波形 
		0.5	1.0	25, 30, (50)			
東京製綱 (株)	タイバック II	φ0.6 [*]		30, 40	JIS G 3532 SMW-B	伸線切断法	両端フック型 
		φ0.8 [*]		50, 60			
日鐵建材 工業(株)	スチーパー	0.5	0.5	25, 30, 40 50	JIS G 3141 SPCC	薄板 せん断法	波形 
	ニホレックス	φ0.6 [*]		32	JIS G 3106 SM -490相 当	厚板切削法	三日月両端フック型 
(株)ブリヂ ストン	タフグリップ	φ0.6		30	JIS G 3532 SMW-B	伸線切断法	両端フック付結束 
		φ0.75, φ0.8		30, 43, (60)			
日本冶金 工業(株)	RC-DB ファイバー	φ0.4, 0.5 [*]		22, 25, 30 35, 40	JIS G 4303 SUS431相当 SUS303相当	溶鋼抽出法	ドッグボーン型 断面 
	ステン スの のみ	φ0.3, 0.4 0.5 [*]					JIS G 4311 SUS310相当

(注1) 上表に掲げたものはいずれも各社の標準的なものである。

(注2) この他各社とも防錆用、耐火材料としてステンレス素材のものもある。

(注3) ※は換算丸線径。

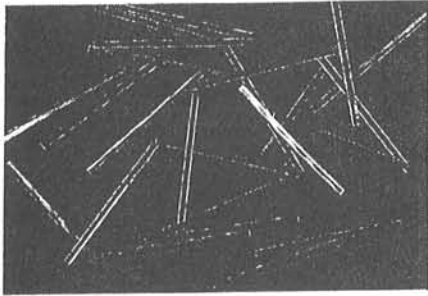
表中の○印が本研究にて使用したサイズ(但し、ISファイバーは現在サイズと異なる)



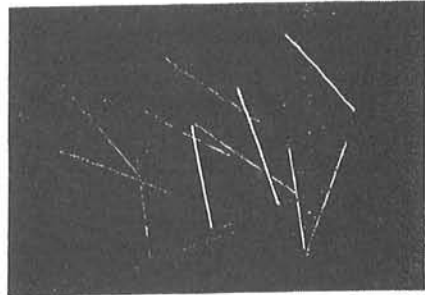
ISファイバー (住友金属建材(株))



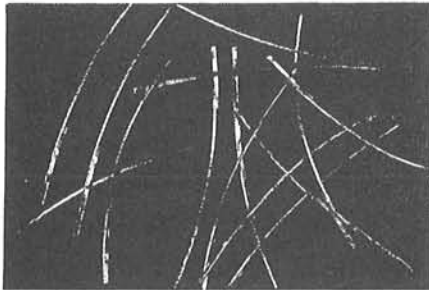
ニポレックス (日鉄建材工業(株))



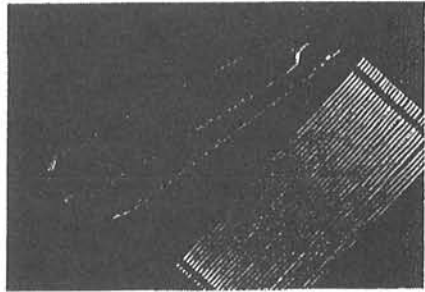
テササ (NKK)



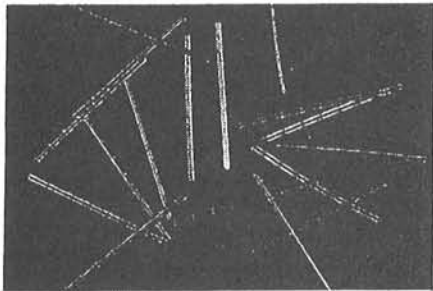
ステイバー (日鉄建材工業(株))



チャレンジ AC (NKK)



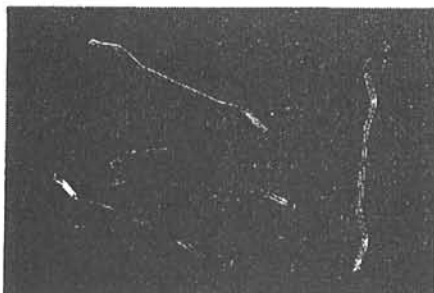
タフグリップ ((株)ブリヂストン)



シンコーファイバー (神鋼建材工業(株))



RC-DBファイバー (日本冶金工業(株))



タイパック II (東京製綱(株))



RCファイバー (日本冶金工業(株))

写真-2.1 代表的な鋼繊維の外観 2)

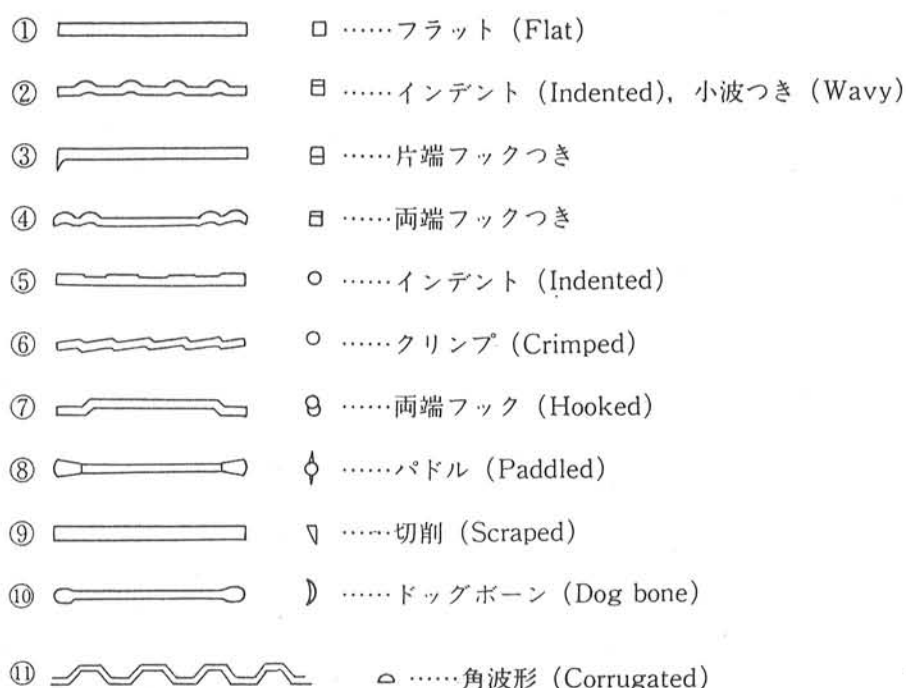


図-2.2 鋼繊維の形状による分類

厚板切削法もしくは溶鋼抽出法によると考えてよい。

鋼繊維の素材としては、JIS G 3141(冷間圧延鋼材)、JIS G 3532(鉄線)、JIS G 3101(一般構造用圧延鋼材)に適合する材料、またはこれと同等以上の鋼材を切断または切削して製造することとなっており、繊維としての引張強度は 60 kgf/mm^2 (588MPa)が規定されている。一般的には鋼繊維の強度は、製造時の加工硬化によって素材強度を上まわるようである。

繊維加工は繊維補強コンクリートの施工性を改善する観点からも関係しており、水溶性の接着剤により数十本の繊維を束ね、練り混ぜ時に分散する様に工夫された繊維もある。

2. 国内産鋼繊維

国内にて製造販売されている鋼繊維の製造方法は、前項の①~④のいずれの種類もありそれぞれの鋼繊維の特徴および外観は、表2.1および写真2.1に示すとおりである。

3. 研究会で採用した鋼繊維について

本研究会においては、鋼繊維補強人工軽量骨材コンクリート(SFLRC)として橋梁床版への適用を中心に研究を進めることとし、以下の項目について最も適する鋼繊維を選択することとした。

- ① 出来るだけ少ない混入量で補強効果(曲げ引張強度)の高いもの

- ② 打設現場にて鋼繊維をアジテータ車に投入可能なもの

- ③ 配筋併用にて施工可能なもの

一般に、鋼繊維の補強効果はアスペクト比(L/D: L:繊維長, D:繊維径)に良く対応し、図2.3に示す様にアスペクト比が大きい鋼繊維程、プレーンコンクリートに対する曲げ強度比が高い傾向を示している。

また、図2.4は、曲げ強度に及ぼす鋼繊維長さの影響について示したものであるが、鋼繊維長さの長いものを用いる程、強度は増大する傾向がある。

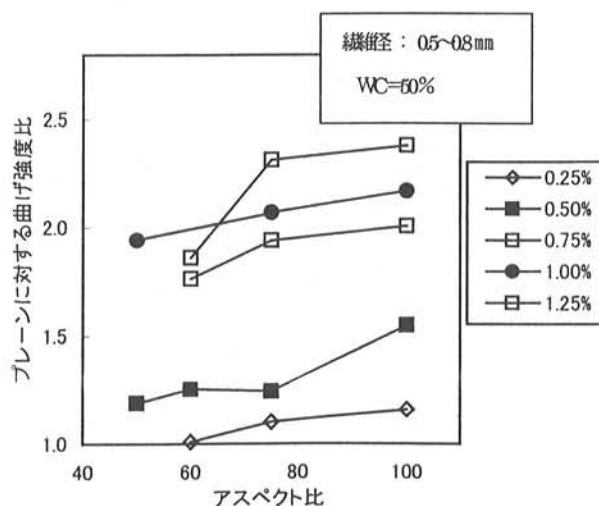


図-2.3 アスペクト比と曲げ強度比

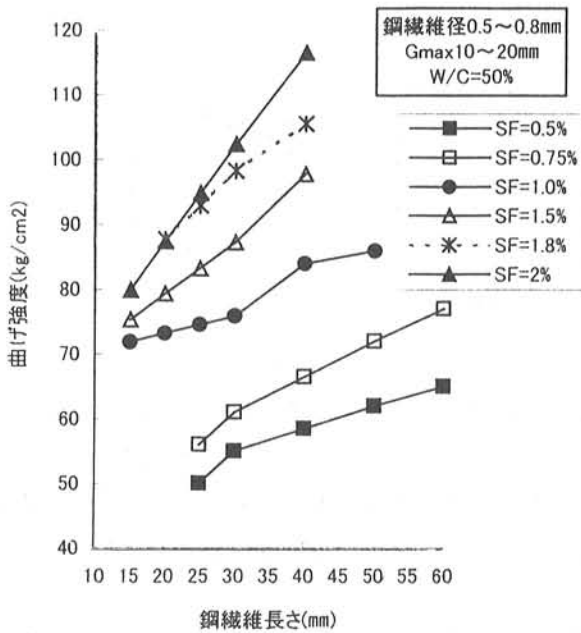


図-2.4 鋼繊維長ささと曲げ強度 4)

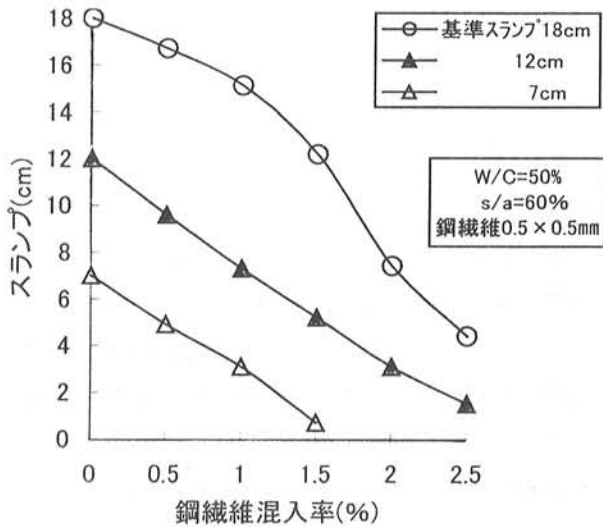


図-2.5 鋼繊維混入率とスランプ

一方、鋼繊維のコンシステンシーに及ぼす影響としては、鋼繊維の混入量によるものと、鋼繊維の長さによるものの2つが考えられる。図2.5に示す様に、フレッシュコンクリートに鋼繊維を混入すると、そのコンシステンシーは混入量の増加とともに著しく低下することとなる。その理由は鋼繊維の表面積による効果と繊維形状による内部摩擦の増大によるものといわれている。

同じく、図2.6は鋼繊維長さの影響を鋼繊維直径が一定である場合に示したものである。

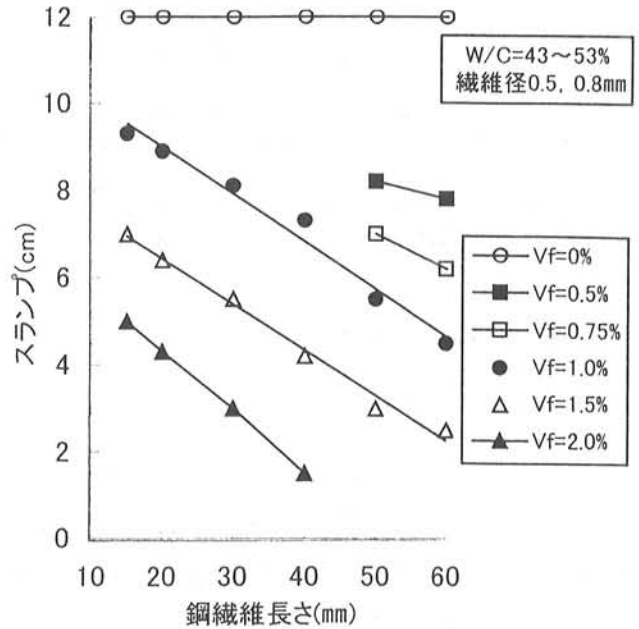


図-2.6 鋼繊維長ささとスランプ

この図より明らかな様に、ある一定のスランプのコンクリートに断面積が一定で長さの異なる鋼繊維を混入した場合のスランプの減少は、鋼繊維長さが大となる程著しいことがわかる。

以上のことから、鋼繊維を混入することにより、その配合は一般に単位水量を増大する必要があるが、このことはセメント量の増大にもつながり、乾燥収縮に対して好ましい手段とはいえないこととなる。

そこで、本研究会では高性能減水剤の使用により、単位水量の増大に対処することとした。

図2.7に高性能減水剤の添加により単位水量の減少

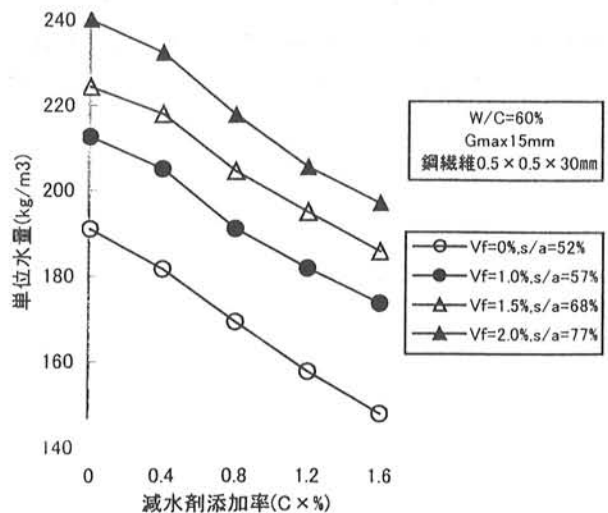


図-2.7 スランプ8cmを得るための高性能減水剤添加量と単位水量の関係

表-2.2 採用した鋼繊維

種別	製造方法	寸法(mm)	形状	アスペクト比	商品呼称	外観
A	伸線切断法	φ0.8×60	両端フック付結束	7.5	タフグリップ	
B	伸線切断法	φ0.7×50	インデント	7.1	シコファイバ-	
C	薄板せん断法	0.25×2.0×50	波形	6.3	ISファイバ-	

を図った結果を示す。

この図によれば、普通コンクリートと同様に高性能減水剤の添加量を増すに従って、単位水量はほぼ直線的に減少し、たとえば高性能減水剤添加量をセメント重量に対し0.8%程度用いることにより鋼繊維混入量1%の時の単位水量が繊維無混入のコンクリートの単位水量とほぼ同程度になるまで減ずることが可能であることがわかる。

以上より、採用すべき鋼繊維は、アスペクト比が大きいもので出来るだけ長さの長いものが好ましいと考えられ、表2.2に示す3種類の鋼繊維を選択した。

アスペクト比が大きい鋼繊維は、補強効果に優れる反面、その細長い形状ゆえに練り混ぜがしづらいという欠点を併せもつが、選択した鋼繊維はいずれも、水溶性接着剤で結合したり、表面を偏平に加工したりすることにより練り混ぜ性能を確保する工夫を施し、十分な施工実績を有している。

採用した3種類の鋼繊維の特徴は、それぞれのカatalogを要約すれば以下のとおりとなる。

鋼繊維A：水溶性接着剤により、数十本の鋼繊維が結束され板状となっているため、コンクリートへの投入

時に絡み合うことが少なく、また両端にフックを有することによりコンクリートとの付着を改善している。

鋼繊維B：両面に異形加工を施しており、従来鋼繊維に比べコンクリートの付着強度および分散性を改善している。

鋼繊維C：偏平断面とすることで、鋼繊維同士の摩擦が少なくなるため分散性が良好となり、端部が波形であるためコンクリートとの付着を改善している。

[参考文献]

- 1) 「繊維補強セメント/コンクリート複合材料」
真嶋光保 他著：技報堂出版
- 2) 「スチールファイバーの手引き」(社)鋼材倶楽部 編
- 3) 「鋼繊維補強コンクリート 一般的性質」小林一輔ら
コンクリート工学 1977.3
- 4) 「繊維補強コンクリート—特性と応用—」
小林一輔著：オーム社

7. 3 試験概要

3.1 対象としたコンクリート

今回の鋼繊維補強軽量コンクリートは土木構造物を対象としており、具体的には繊維補強効果の適用が最も期待される橋梁の床版コンクリートを想定した。

軽量コンクリートの種別は汎用性の高い軽量1種とし、対比用として砕石・川砂の普通コンクリートを用いた。スランプは床版を対象とした既往の報告¹⁾及び建築コンクリートを対象とした報告²⁾を参考にして18cmとした。

従来土木用のコンクリートのスランプは8~10cm程度が一般的であるが、最近のポンプ施工における圧送性を考慮した場合土木においても軟練りコンクリートの事例が増えている。この背景には最新の高性能AE減水剤の発達により、単位水量を増やすことなく施工性の良いコンクリートが容易に得られる技術の普及を挙げることができる。

3.2 検討項目及び試験過程

本試験は形状の異なる3種類の鋼繊維と軽量コンクリートを組み合わせた鋼繊維補強軽量コンクリートのついて、以下に示す項目について検討を行った。

- ① フレッシュ特性
- ② 鋼繊維の分散性
- ③ 硬化コンクリートの強度特性
- ④ 硬化コンクリートのじん性
- ⑤ 硬化コンクリートの耐久性
- ⑥ 部材としてのせん断特性
- ⑦ 硬化コンクリートの曲げ疲労特性

試験場所は項目により以下の3ヶ所で行った。

- ①~⑤: 株式会社八洋コンサルタント
- ⑥ : 大阪市立大学工学部土木工学研究所
- ⑦ : 社団法人セメント協会研究所

また、試験過程の概略を以下に示す。

- (1) 配合設定の基本となるスランプは、最新の高性能AE減水剤を使用することで製造可能となる18cmとし、単位水量は予備試験の結果より $180\text{kg}/\text{m}^3$ とした。
- (2) 水セメント比はALA協会の既往の実験を参考にし、 $W/C=48\%$ を中心に43%及び53%の3水準とした。
- (3) 鋼繊維の混入率は重量増加及び経済性を考慮し、0.75%を中心に0.5%及び1.0%の3水準とした。

- (4) フレッシュ性状及び硬化コンクリート各種強度関係は、全ての配合について行った。
- (5) 支圧強度及び耐久性関係試験は、 $W/C=48\%$ 鋼繊維混入率0.75%の中心の、鋼繊維A種のもののみとした。対比用として繊維を混入しない普通コンクリート及び軽量コンクリートについても行った。
- (6) 屋外暴露試験は28日間標準水中養生後、神奈川県茅ヶ崎市(海岸線より約3km)の建物の屋上に暴露し、表面の外観観察を中心に必要に応じて中性化及び塩分浸透性等を材齢3年まで行うこととした。
- (7) 梁の曲げせん断試験は $W/C=48\%$ の鋼繊維混入率0.75%の繊維A、B、C3種、普通コンクリート及び軽量コンクリートについて試験を行い、 $15\times 15\times 53\text{cm}$ 供試体の二面せん断試験との関連を検討した。
- (8) 引張強度の向上のみならず疲労強度の向上も見込まれるため、動的疲労試験の予備試験として曲げ疲労試験を行うこととした。
- (9) 曲げ疲労試験は $W/C=48\%$ の鋼繊維混入率0.75%の繊維A、B、C3種及び繊維を混入しない軽量コンクリートについて試験した。

3.3 使用材料及び配合条件

本試験に用いた鋼繊維は、表3.1に示す形状及び製造方法の異なる代表的な3種類であり、表3.2及び図3.1に示す各種材料を使用した。また、コンクリートの配合条件は表3.3に示す。

なお、本試験では鋼繊維は配合上全て外割で扱う。ただし、容積法による空気量の計算時には鋼繊維の容積も考慮する。

表-3.1 鋼繊維の種類及び諸元

種別記号	製造方法	寸法(mm)	形状
A ブリヂストン ルファ社製	鋼線切断法	φ0.8×60	両端フック付 結束型
B 神鋼建材 工業社製	鋼線切断法	φ0.7×50	インデント型
C 住友金属 建材社製	薄板切断法	厚 幅 0.25×2.0 ×50	波 型

表-3.2 使用材料一覧

項目	適用
セメント	普通ポルトランドセメント:日本セメント社製 密度 3.16g/cm ³
水	水道水
細骨材	静岡県大井川水系陸砂 表乾密度 2.60 吸水率 1.98% 粗粒率 2.74
粗骨材	人工軽量骨材:日本メサライト工業社製 絶乾密度 1.28 吸水率 26.5% 最大寸法 15mm 東京都青梅産硬質砂岩砕石 表乾密度 2.65 吸水率 0.72% 最大寸法 20mm
混和剤	ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤 :エヌエムビー社製

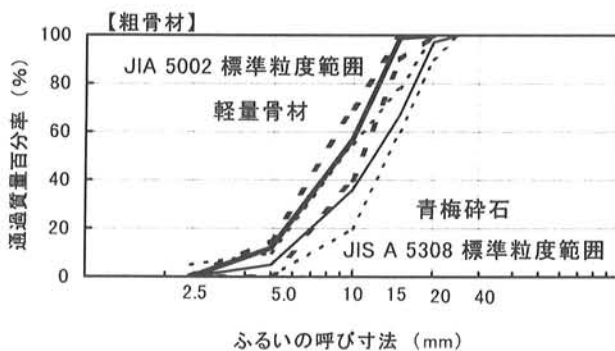
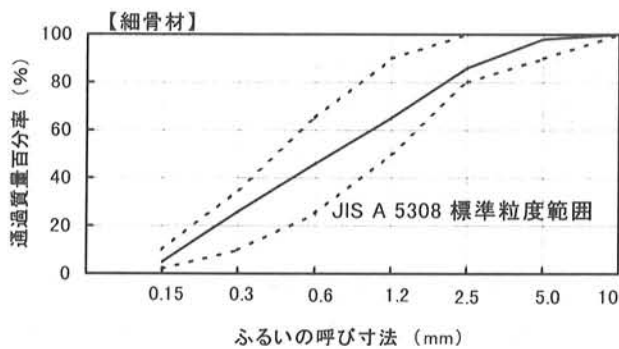


図-3.1 骨材の粒度分布

表-3.3 配合条件

要因		水準
粗骨材最大寸法(mm)		15
水セメント比(%)		43, 48, 53
鋼繊維	種類	A, B, C
	混入率(%)	0, 0.5, 0.75, 1.0
スランプ(cm)		18±1.5
空気量(%)		5±1 (4±1)

()内は普通コンクリート

3.4 試験項目及び試験方法

コンクリートの練り混ぜは容量 100 l の強制二軸型ミキサを用い、下記の方法により練り混ぜた。

また、試験組み合わせ、試験項目及び試験方法を表3.4及び3.5に示す。

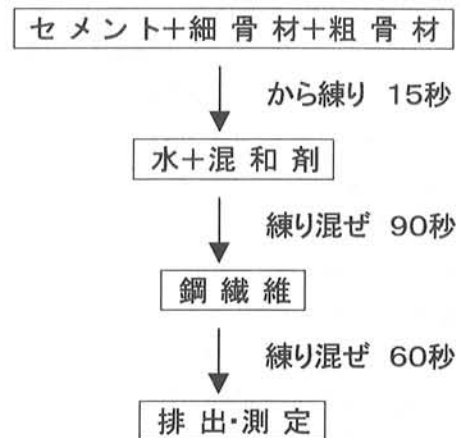


表-3.4 試験組合せ一覧

配合条件			強度関係試験										耐久性関係試験							
種類	鋼繊維		水セメント比 W/C (%)	スランブ スランブ (cm)	空気量 空気量 (%)	スランブ 空気量 温度	圧縮強度 (ボアソン比)		引張強度		曲げ タフネス	二面 せん断	支圧 強度	促進中性化	長さ変化	凍結融解	クリープ試験	屋外暴露		
	混入率 (%)	混入量 (kg/m ³)					7日	28日	7日	28日									28日	28日
※ 軽量コンクリート			48	18 ± 1.5	5 ± 1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
※ 普通コンクリート					4 ± 1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
A	0.75	60	43	18 ± 1.5	5 ± 1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-		
B						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-
C						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-
A	0.50	40	48	18 ± 1.5	5 ± 1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-		
B						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
C						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
A	0.75	60	48	18 ± 1.5	5 ± 1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
B						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
C						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	
A	1.00	80	48	18 ± 1.5	5 ± 1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-			
B						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-		
C						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-		
A	0.75	60	53	18 ± 1.5	5 ± 1	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-			
B						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-		
C						○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-		

※ 鋼繊維混入率0%

表-3.5 試験項目及び方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101-1975「コンクリートのスランプ試験方法」
空気量	JIS A 1116-1975「まだ固まらないコンクリートの単位容積質量及び空気量の重量による試験方法(重量法)」 JIS A 1128-1993「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力方法)」
供試体作製	JSCE-F 552-1983「鋼繊維コンクリートの強度及びタフネス試験用供試体の作り方」
圧縮強度	JSCE-G 551-1983「鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度及び圧縮タフネス試験方法」
静弾性係数 ポアソン比	JSCE-G 502-1983「コンクリートの静弾性係数試験方法」
引張強度	JIS A 1113-1993「コンクリートの引張強度試験方法」
曲げ強度 曲げじん性係数	JSCE-G 552-1983「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」
二面せん断強度	JSCE-G 553-1983「鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法」
支圧強度	圧縮強度試験に準じ、加圧面積比を1.0,0.54,0.11の3点に変化
凍結融解	JSCE-G 501-1986「コンクリートの凍結融解試験方法」
乾燥収縮	JIS A 1129-1993「モルタル及びコンクリートの長さ試験方法」
促進中性化	日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」付1
クリープ試験	JIS 原案「コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)」に準拠(角柱供試体使用)
梁のせん断強度	試験結果の項を参照
曲げ疲労特性	試験結果の項を参照

備考: 供試体寸法

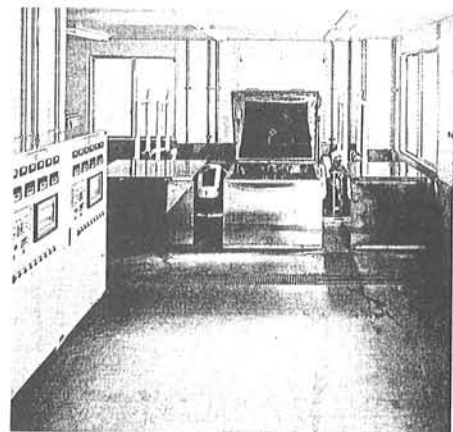
- φ15×30cm: 圧縮引張強度・静弾性・ポアソン比・支圧強度
- 15×15×53cm: 曲げ強度・曲げじん性・二面せん断・クリープ・曲げ疲労
- 10×10×40cm: 凍結融解・乾燥収縮・促進中性化
- 10×20×130cm: 梁のせん断強度

参考文献

- 1) 桐山・保坂・庭野・吉信:「鋼橋の床版に用いた軽量コンクリートの長距離ポンプ圧送」:土木学会第51回学術講演概要集 1996
- 2) 友澤・波多・桐ヶ谷・篠塚・山下・高羽:「フック付き鋼繊維を混入した軽量コンクリートの基礎的性状に関する研究」:日本建築学会学術講演概要集 1990(中国)



コンクリート試験



凍結融解試験装置

7. 4 フレッシュコンクリートの特性

4.1 単位水量選定結果

単位水量選定のために参考とした、各種規格及び文献における軽量コンクリートの単位水量基準を表4.1に示す。

表-4.1 軽量コンクリートの単位水量規格一覧

規格及び文献	単位水量 kg/m ³	スランプ cm	備考
RC示方書	特になし	5~12	
道路橋示方書	特になし	8	天然骨材
JASS5 一般コンクリート	185 以下	21 以下	
JASS5 高耐久コンクリート	175 以下	21 以下	
高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工 ⁴⁾	170	15	W/C=30~45%
鋼橋の床版に用いた軽量コンクリートの長距離ポンプ圧送 ⁴⁾	165	12~18	W/C=48%
フック付き鋼繊維を混入した軽量コンクリートの基礎的性状に関する研究 ⁴⁾	175	18	W/C=35~55%

上記の各種規格文献の中で最後のものは鋼繊維が混入した軽量コンクリートであり本試験と類似しているが、

W/C 及び鋼繊維混入率が若干異なる。これらを参考に行った単位水量選定試験結果を表4.2に示す。

その結果、繊維混入後にスランプ 18cm を得るためにはベースとなるコンクリートはスランプ 27cm 程度と非常に柔らかいコンクリートが必要であり、このベースコンクリートを分離させない良好なものにするためには、混和剤使用量と単位水量及び細骨材率との最適な組合せがあることが分かった。

本試験の中心的な配合条件である鋼繊維の混入率 1.0% では、単位水量 180kg/m³ が必要であることがいえる。ただし、繊維混入率が 1.0% より少ない場合は、単位水量 180kg/m³ 以下でもスランプの範囲を満足する可能性があり、水量の低減を図ることができる。

このように、繊維の混入率により単位水量の上限値が異なることが推定されるが、本試験では全体の条件を統一するため同一の水量 180kg/m³ で行うこととした。

単位水量 180kg/m³ は前述の各種単位水量表と比較した場合、JASS5の一般と高耐久の中間に位置し基本性状試験の主旨を考慮して妥当な水量と判断された。表4.3にフレッシュ試験結果を示す。

表-4.2 鋼繊維コンクリート単位水量選定試験結果

配合 No.	コンクリート区分	単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維混入率 % (kg/m ³)	高性能 AE減水剤 (C×%)	スランプ (cm)			コンクリート状態	考 察
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			ベース (フロー)	繊維混入後	変化量		
1	軽量 コンクリート	165	48.0	48	165	344	842	570	-	0.90	23.5	-	-	良好	軽量コンクリートコリーとして良好繊維を混入するにはモルタル量が不足細骨材率を大きくする必要有り
2		175	48.0	48	175	365	822	554		0.90	24.0	-	-	良好	
3	繊維 コンクリート	175	48.0	56	175	365	956	476	0.75 (60)	1.10	27 (63×62)	16.0	-11.0	良好	繊維混入後のスランプが若干固いベースを柔らかくする必要があるが混和剤使用量限界と思われる
4		180	48.0	56	180	375	943	471		1.05	27 (63×62)	18.5	-8.5	良好	混和剤を増やさず水量を増加させて繊維混入後に所定のスランプが得られた
5		175	48.0	58	175	365	993	449		1.30	27 (75×73)	18.0	-9.0	分離	所定のスランプが得られているが分離を起こしている改善するにはモルタル分を増やす必要有り
6		180	48.0	64	180	375	1084	379		1.35	27 (78×75)	19.0	-8.0	良好	細骨材率及び水量を増やすことで所用のコンクリートが得られた混和剤使用量増加は分離を助長するため水量増加が必要であった

表-4.3 フレッシュコンクリート試験結果

鋼 織 維 種類	水セメント比		細骨材率 s/a	単位量 (kg/m ³)				混和剤(C×%)		スランブ* (cm)	空気量(%)		単位容積質量 (kg/m ³)	
	混入率 (%)	混入量 (kg/m ³)		W/C (%)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤 SP-8N		空気量調整剤 775S	重量法		圧力法 ※2
※1 軽量コンクリート			48	48	180	375	811	549	0.35	0.009	18.0	4.7	4.5	1921
					18.5	5.0	4.8	1915						
※1 普通コンクリート			48	48	180	375	824	912	0.45	0.007	18.5	4.4	4.2	2281
					18.0	4.1	4.0	2287						
A			43	54	180	419	894	475	1.00	0.009	19.0	5.7	5.1	1997
B									0.75	60	1.00	0.012	19.0	5.6
C			43	54	180	419	894	475	1.00	0.012	18.5	5.8	5.0	1995
									1.00	0.012	18.5	5.8	5.0	1995
A			48	56	180	375	949	463	1.10	0.011	18.5	5.7	5.6	1996
									1.10	0.013	19.0	5.8	5.6	1995
B	0.75	60	48	56	180	375	949	463	1.10	0.013	17.5	5.7	5.5	1996
C			48	56	180	375	949	463	1.10	0.013	17.5	5.7	5.4	1997
									1.10	0.013	18.0	5.6	5.5	1998
A			48	56	180	375	949	463	1.35	0.010	18.0	5.6	5.5	1998
									1.35	0.012	19.0	5.7	5.6	1995
B	1.00	80	48	56	180	375	949	463	1.35	0.012	17.5	5.7	5.4	1997
C			48	56	180	375	949	463	1.35	0.012	17.5	5.7	5.4	1997
									1.35	0.012	18.0	5.6	5.5	1998
A			48	56	180	375	949	463	1.35	0.010	19.0	5.6	5.2	2063
									1.35	0.012	-	5.4	5.3	2067
B	1.00	80	48	56	180	375	1084	379	1.35	0.012	18.0	5.0	5.4	2076
C			48	56	180	375	1084	379	1.35	0.012	17.0	5.2	5.0	2071
									1.35	0.012	18.0	5.4	4.9	2068
A			53	58	180	340	998	450	1.25	0.012	18.5	5.3	5.4	2069
									1.25	0.012	19.0	5.7	5.6	1998
B	0.75	60	53	58	180	340	998	450	1.25	0.014	19.0	5.9	5.7	1993
C			53	58	180	340	998	450	1.25	0.014	17.5	5.6	5.4	1999
									1.25	0.014	18.5	5.8	5.5	1996
A			53	58	180	340	998	450	1.25	0.014	18.0	5.8	5.5	1995
									1.25	0.014	19.0	5.8	5.4	1995

※1 鋼繊維混入率0%

※2 骨材修正係数は2.0%とした。

コンクリート温度は19.5~21.0℃

備考：鋼繊維は外割扱いとした。

4.2 細骨材率

鋼繊維コンクリートの配合として最も特長的なものとして、細骨材率の選定を挙げることができる。すなわち、鋼繊維を混入することにより、コンクリートの流動性が大きく拘束されるため、繊維混入前のベースコンクリートは細骨材率を大きくし繊維の流動を妨げないモルタル部分を増やすことが大切である。図4.1の繊維混入率と細骨材率の関係によると、鋼繊維の混入率を0.5、0.75及び1.0%と増やすに従い、細骨材率は52%、56%及び64%と急激に増加している。

これを普通コンクリートの場合と比較すると、図4.2の普通コンクリートの繊維混入率と最適細骨材率の関係²⁾における混入率1.0%粗骨材寸法15mmの場合の細骨材率は56%であり、軽量の64%が8%高くなっているが、これは軽量コンクリートの特長というよりは繊維の長さ依存するものと考えられる。すなわち、図4.3の繊維の長さとの関係²⁾にもみられるように、普通コンクリートにおいても長いタイプの繊維の場合は細骨材を高くする必要があり、混入率は異なるが長さが2倍になると10%程度

増加している。本試験の繊維長5~6cmの細骨材率8%増加は繊維の長さにより支配的であるといえ、骨材の種類に影響は少ないといえる。

また、水・セメント比の違いと細骨材率の関係は図4.4の普通コンクリートの場合²⁾と図4.5の本試験の結果からもわかるように繊維の混入による特別な影響は認められず、通常の配合設計における細骨材率の変化で対応できる。

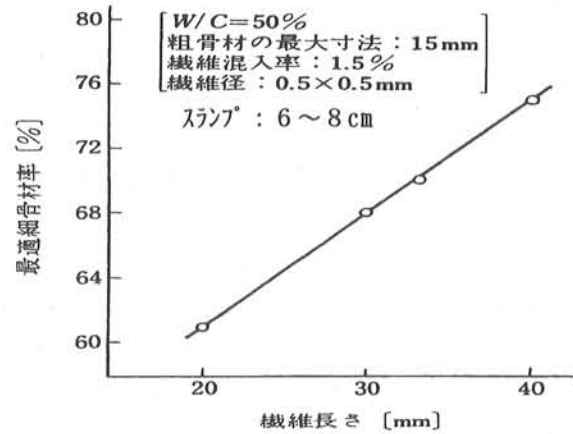


図-4.3 最適細骨材率に及ぼす繊維長さの影響(NC)⁴⁾

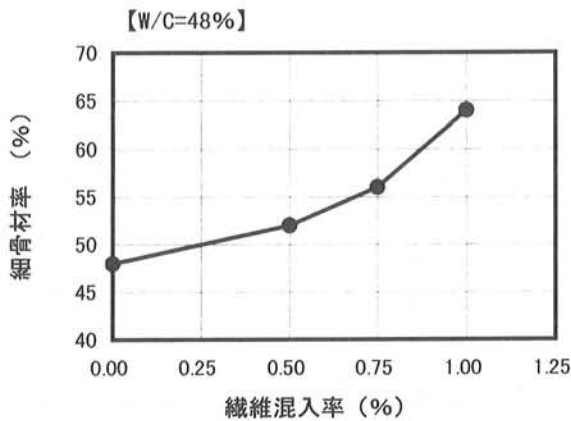


図-4.1 繊維混入率と細骨材率の影響(LC)

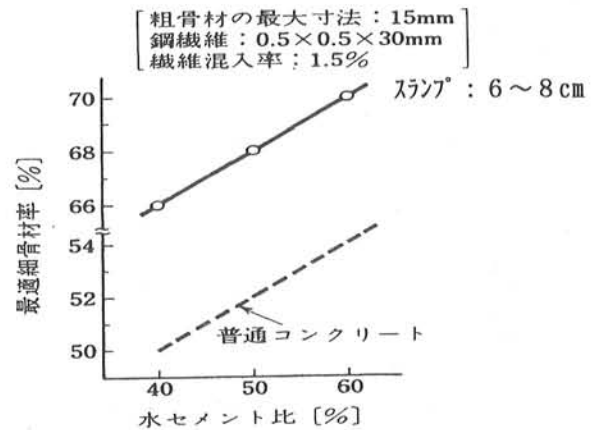


図-4.4 最適細骨材率に及ぼす水セメント比の影響(NC)⁴⁾

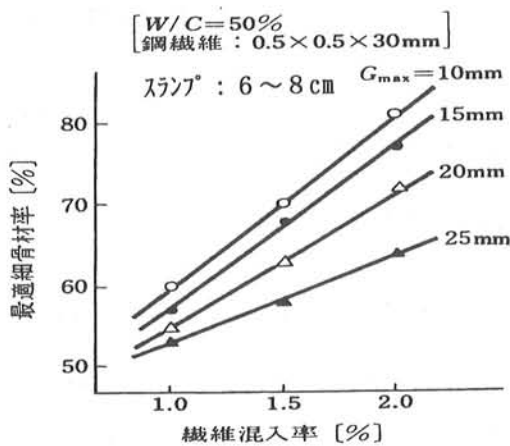


図-4.2 最適細骨材率に及ぼす繊維混入率の影響(NC)⁴⁾

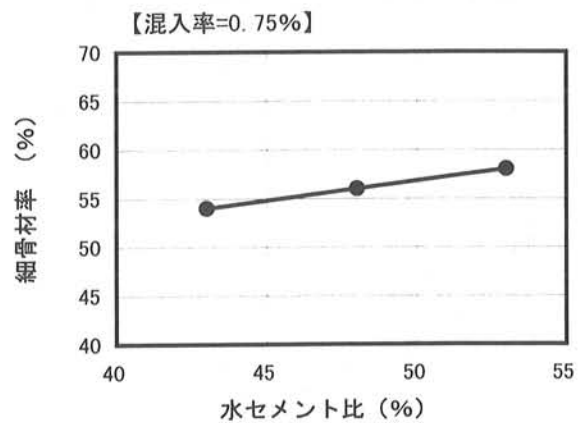


図-4.5 水セメント比と細骨材率の関係(LC)

4.3 混和剤使用量

鋼繊維を混入しようとする必要がありスランプは小さくなる。そのため従来は単位水量を増加させて所要のスランプを得ていたが、これは混和剤に減水率が一定のAE減水剤を使用する場合の手法であり、単位水量に及ぼす影響として粗骨材の最大寸法、細骨材率、繊維の混入率及び長さの違い等が挙げられ、普通コンクリートにおける各種性状はすでに報告されている。²⁾しかし、現在は使用量を変えることにより減水率を自由にコントロールできる高性能AE減水剤が普及しており、本試験においても配合により単位水量を変化させることなく所定のスランプを得るため高性能AE減水剤を使用し、材料分離やファイバボール等の無いワーカブルなコンクリートを得ることができた。

繊維混入率に伴うスランプ低下を補うための高性能AE減水剤使用量の変化は、図4.6によると鋼繊維1.0%程度までは直線的に増加しており、最大使用量も1.35%とこの種の混和剤としては標準的な使用量の範囲内にあり、配合として無理のないものであるといえる。また、図4.7のセメント水比の変化に対しても大きな変化は認められず、ほぼ直線的で緩やかな比例関係を示している。

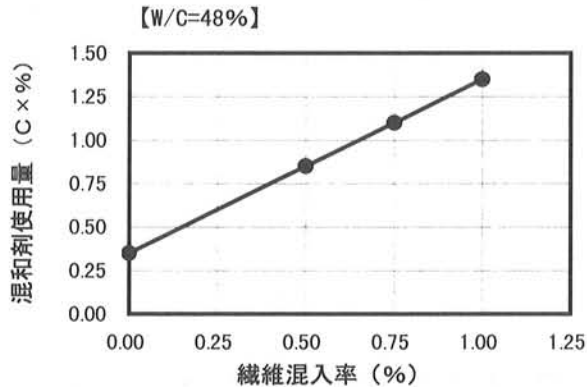


図-4.6 繊維混入率と混和剤使用量の関係

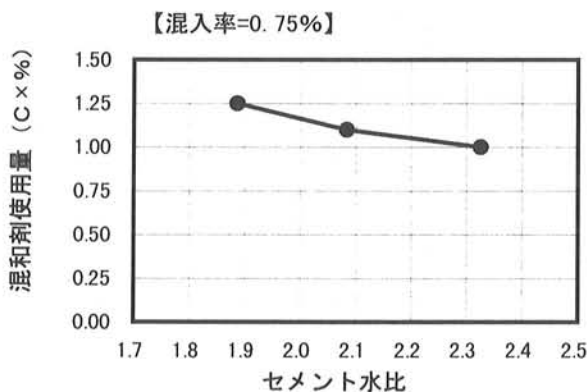


図-4.7 セメント水比と混和剤使用量の関係

4.4 単位容積質量

軽量コンクリートの最大の特長が普通コンクリートと比べ単位容積質量が小さいことにある。一般的に普通コンクリートが2.3t/m³程度とすると軽量1種コンクリートが1.9t/m³、軽量2種が1.8t/m³程度とされ、コンクリート自重の低減を容易に行うことができる。鋼繊維補強軽量コンクリートにおいても単位容積質量が小さいことは大きな特長として挙げることができ、単位容積質量を大きく左右する要因は単位容積粗骨材量といえる。すなわち、軽量骨材(本試験は粗骨材)をいかに多く使用できるかにより決定され、鋼繊維の混入率を多くするに従い細骨材率が増加するということは、粗骨材量が減少することを意味する。

図4.8の繊維混入率と単位容積質量の関係によると、鋼繊維無混入の軽量コンクリート単体の場合1.92t/m³程度であるが、鋼繊維0.5%混入の配合は2%増加の1.96t/m³、0.75%配合は4%増加の2.00t/m³及び1.0%配合は2.07t/m³程度に増加する。軽量コンクリートの特長を考慮すれば、鋼繊維混入率0.75%程度の配合までが適当といえる。なお、水セメント比の変化による単位容積質量は、図4.9によると細骨材率の増減とセメント量の増減が相殺されるためほとんど変化は認められない。

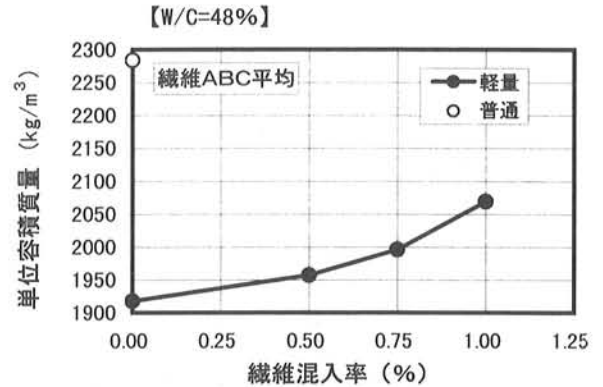


図-4.8 繊維混入率と単位容積質量の関係

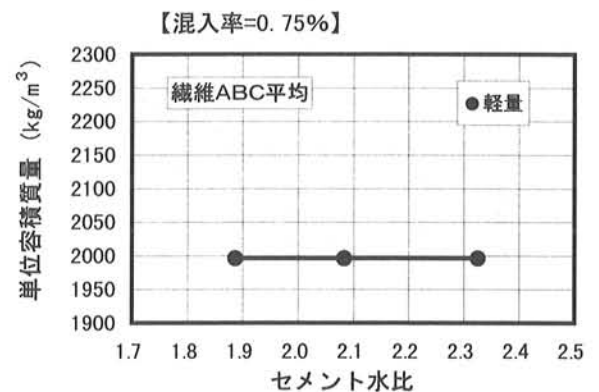
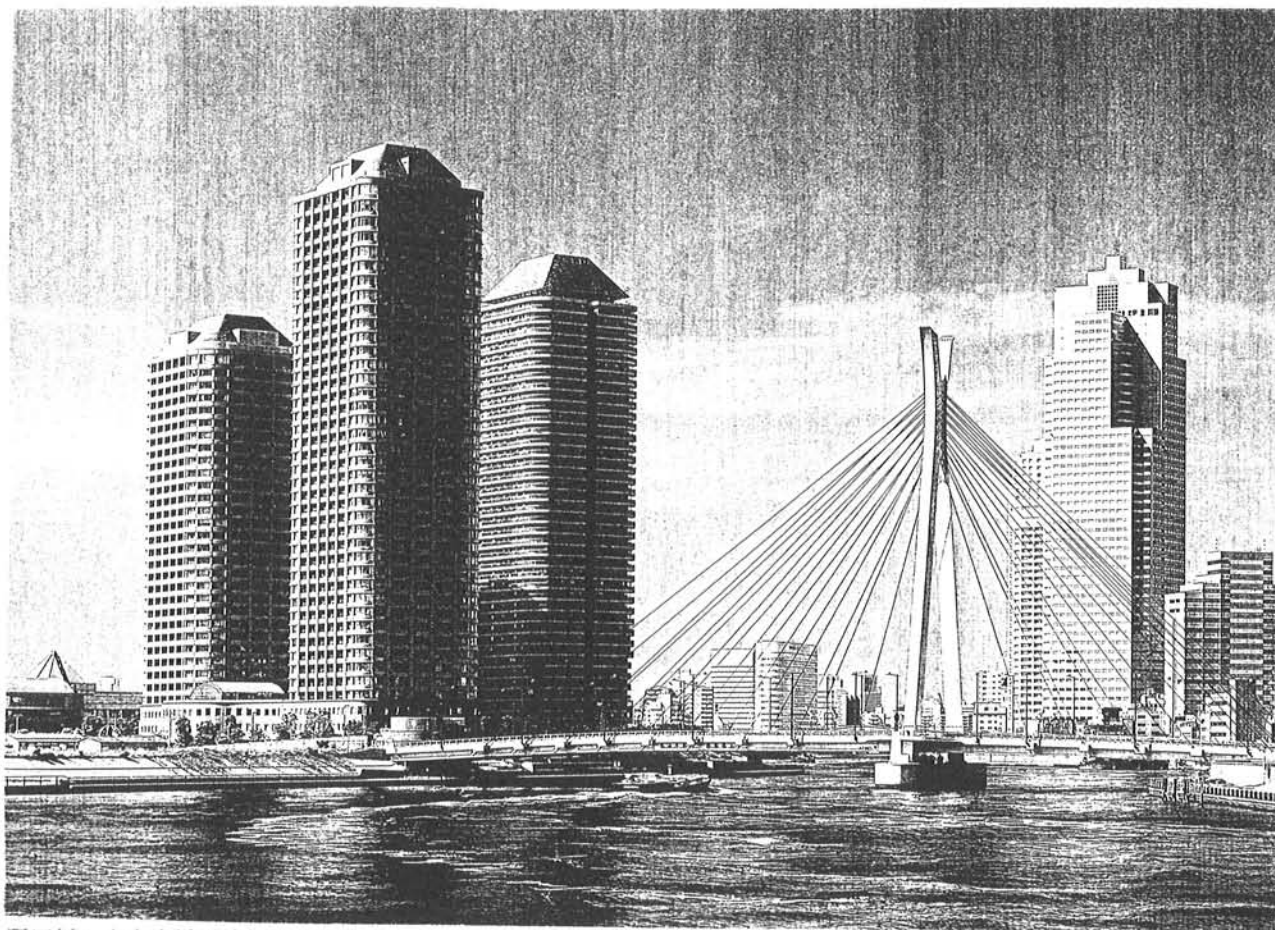


図-4.9 セメント水比と単位容積質量の関係

参考文献

- 1) 「高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工」: 日本建築学会
- 2) 桐山・保坂・庭野・吉信: 「鋼橋の床版に用いた軽量コンクリートの長距離ポンプ圧送」: 土木学会第51回学術講演概要集 1996
- 3) 友澤・波多・桐ヶ谷・篠塚・山下・高羽: 「フック付き鋼繊維を混入した軽量コンクリートの基礎的性状に関する研究」: 日本建築学会学術講演概要集 1990 (中国)
- 4) 小林一輔・岡村雄樹: 「所要のコンシステンシーを得るための鋼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 No.293 1980



隅田川・中央大橋（床版に使用）

7. 5 鋼繊維の分散性と配向

今回使用した鋼繊維は前述されたように長い繊維を採用している。不連続の繊維を補強材としていることより、マトリックス中に均一な分散と配向を図ることは、硬化コンクリートの品質に大きな影響を与える。

特に長い繊維は補強効果が優れるが、分散と配向にバラツキが生じやすいといわれている。

上記見解は普通コンクリートでの検証であり、今回の骨材は軽量骨材であるが、基本的には普通コンクリートと同様な分散と配向を示すと予測される。確認のために以下の試験方法にて、軽量コンクリートにおける鋼繊維の分散について調べた。

本編は鋼繊維補強軽量コンクリートにおける鋼繊維の分散性について、試験室規模でのフレッシュコンクリートと硬化コンクリートについて述べる。

配向についてはコンクリートの打ち込み時に、部材断面により特定方向への配向が問題となる。今回は基礎試験とのこともあり、配向試験については次期ポンプ圧送試験等にて評価することとした。

5. 1 鋼繊維の分散と配向の評価方法について

(1) 測定方法の概説

本論に入る前に、普通コンクリートにおける鋼繊維の分散と配向について記す。鋼繊維の分散度を定量化する方法として、①～③の3つ方法がある。

- ①法：変動係数のような統計量を用いる方法
- ②法：分散係数を用いる方法
- ③法：磁気式測定器による方法
- ④法：X線透過写真による方法

繊維の配向を調べる方法として、④法の方法があるが、定性的評価のみである。PCの画像処理で検討されているが、実用化に至っていないこともあり、今回の試験では配向については調査を割愛している。

(2) フレッシュコンクリートにおける鋼繊維の分散について

マトリックスコンクリート中における鋼繊維の分散測定方法として、土木学会「鋼繊維補強コンクリート設計施工指針案」で鋼繊維混入率試験方法がある。その1つとして、

「洗い分析方法」があり、これは上記①法に該当し、

式(1)にて鋼繊維の混入率(%)を求める。

$$V_f = \frac{W_{sf}}{V \cdot \rho_{sf}} \times 100 \quad \text{-----(1)式}$$

ここに、 V_f ：鋼繊維混入率(%)

W_{sf} ：容器中の鋼繊維の重量(g)

V ：容器の容積(cm^3)

ρ_{sf} ：鋼繊維の単位体積重量(g/cm^3)

(3) 硬化コンクリートでの分散性

コアなどの切断片を任意の要素断面に分割して、各要素毎の繊維本数を測定し、それぞれを試料とみなして、分散係数を求める。

$$\alpha = \exp[-\psi(x)] \quad \text{-----(2)式}$$

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{\sum (X_i - x_m)^2}{n}} / x_m$$

ここに、 X_i ：試料中に含まれる繊維数

n ：試料数

x_m ：試料に含まれる繊維の平均値

上式によれば、各試料中に含まれる繊維数が、ここでは各要素毎に繊維が均一に分散している場合、 α は1となる。1要素に集中し、他の要素にない場合は α は0となる。つまり、分散係数 α は0と1. 0の値をとることになる。

次に、この繊維本数より繊維密度を求めて、切断面に直角な方向への配向係数 β を次式によって求める方法がある。

$$\beta = \frac{\rho a}{P} \quad \text{-----(3)式}$$

ここに β ：配向係数

(二次元ランダムでは0.667となる)

ρ ：繊維密度 単位面積当たりの繊維本数

a ：繊維の断面積

P ：容積混入率(%)

5. 2 試験概要

(1) 使用した鋼繊維と配合

鋼繊維の形状は、A:両端フック付き($\phi 0.8 \times 60\text{mm}$)、B:インデント($\phi 0.7 \times 50\text{mm}$)、C:波形($0.25 \times 2.0 \times 50\text{mm}$)であり、コンクリートの配合は表5. 1に示す様に同一とした。

尚、鋼繊維の混入率は0.75%($60 \text{ kg}/\text{m}^3$)である。

(2) 試験方法

① フレッシュコンクリートにおける分散性試験

表-5. 1の配合を強制2軸型ミキサで1バッチ100リットルとしてコンクリートを練り混ぜたものより、2ヶ所から容積既知の容器(6.95リットル)に試料を分取する。この試料を水洗いし磁石にて鋼繊維を分離し、その重量を測定する。

表一.5.1 分散性試験を実施した配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					混入量 kg/m ³
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
48.0	56.0	180	375	949	463	4.13	60

容積あたりの鋼繊維量を(1)式にて算出する。但し、今回は、 ρ_{SF} :鋼繊維の単位体積重量(g/cm³)=7.85≒8.00としている。

② 硬化コンクリートにおける分散性試験

供試体はJSCE-F55「試験室における鋼繊維コンクリートの作り方」によって作成した15×15×53cmの寸法にて曲げ試験を実施した試験体より、厚さ5cmのカットサンプルを作成した。

このサンプルの断面15×15cmを3cmメッシュにて25分割として、各メッシュ毎の本数を数えて断面の分散係数を(2)式¹⁾にて求める。

次にカットサンプルの気中、水中重量を測定し、その後粉碎して鋼繊維を取り出し重量を計量する。

計量した鋼繊維重量を鋼繊維体積(気中重量-水中重量)で除して混入量を求める。

5.3 試験結果と考察

(1) フレッシュコンクリートでの分散性

表5.2に鋼繊維3種類の洗い試験結果を示す。

表一.5.2 フレッシュコンクリートでの分散性

繊維種別	重量 (g)	混入量 (kg/m ³)	(混入率) (%)	0.75%対比 (%)
A	377	54.2	0.68	90.3
	389	56.0	0.70	93.3
B	395	56.8	0.71	94.7
	402	57.8	0.72	96.3
C	390	56.1	0.70	93.5
	431	62.0	0.78	103.3

土木学会規準では、洗い分析のバラツキは2個の平均値の5%以内と規定されている。

繊維AおよびBは2個のバラツキは小さいが、0.75%対比では100%以下の結果となっている。

また、軽量コンクリートの場合も、普通コンクリートを用いた場合と同様な鋼繊維の分散傾向にある。

(2) 硬化コンクリートの分散性

表5.3に鋼繊維の種類毎での測定結果の一例を示す。下欄には(2)式より求めた分散係数(α)を示す。

表一.5.3 断面の鋼繊維本数結果

(3cmメッシュ毎の繊維本数) 打込み面:上側

9	2	8	6	12
16	8	8	12	10
14	31	6	5	4
6	10	4	14	8
17	16	16	10	13

総本数 繊維A : 265本
分散係数 α : 0.67
n=3の平均値 0.59

14	7	11	11	6
4	10	12	5	9
8	10	12	6	9
14	10	11	11	10
6	11	15	9	16

総本数 繊維B : 265本
分散係数 α : 0.73
n=3の平均値 0.67

9	18	16	15	6
6	8	8	15	7
7	16	11	9	3
19	13	5	8	8
7	21	14	13	9

総本数 繊維C : 265本
分散係数 α : 0.65
n=3の平均値 0.63

(2)式によれば、各試料中に含まれる繊維数が各要素各要素毎に繊維が均一に分散している場合は、αは1となる。1要素に集中し、他の要素に無い場合はαは0となる。つまり、分散係数αは0と1.0の間の値をとることとなる。

当結果のαは鋼繊維間で顕著な差は認められず、一般に普通コンクリートで見られる分散係数と同程度である。¹⁾

表5.4にはカットサンプル粉碎後の鋼繊維重量の測定結果を示す。厚さ5cm程度のカットサンプルは容積1.2リットル程度でも設計混入量率に対して±10%以内のバラツキになっている。

繊維種類に着目すると、繊維AおよびBは平均値対比

5%程度とフレッシュコンクリートと同様なバラツキが認められた。

表-5.4 粉砕による鋼繊維重量測定結果

繊維種別	試料容積 (cm ³)	SF重量 (g)	混入量 (kg/m ³)	(混入率) (%)	0.75%対比 (%)
A	1274	75.9	59.6	56.7	94.7
	◎ 1240	69.0	55.7	(0.71)	
	1199	65.7	54.8		
B	1191	80.8	67.8	65.2	109.0
	◎ 1241	78.3	63.1	(0.82)	
	1173	76.0	64.8		
C	1224	75.9	62.2	63.7	107.0
	◎ 1220	83.8	68.7	(0.80)	
	1216	74.2	60.8		

(表中 ◎印は、表5.3に示すサンプルの結果)

次に、この硬化後の繊維数量を用いて、(3)式に示す配向係数 β を求めた結果を表5.5に示す。

表-5.5 配向係数算出結果

繊維種別	混入量 (kg/m ³)	繊維総本数	繊維断面積 (cm ²)	配向係数 (β)
A	56.7	242	0.005	0.745
B	65.2	258	0.004	0.553
C	63.7	267	0.005	0.732

二次元ランダムに配向している場合は、 $\beta=0.637$ となる。三次元ランダムでは $\beta=0.5$ となる。繊維AおよびCは二次元配向に近く、繊維Bは三次元配向に近い結果となっている。

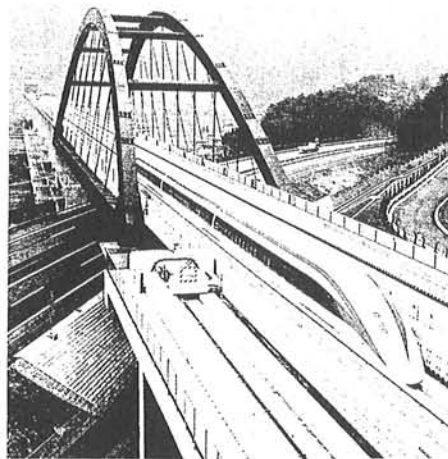
5.4 まとめと今後

フレッシュコンクリートと硬化コンクリートで鋼繊維の分散性を調査したが、軽量コンクリートにおいても普通コンクリートと同様の分散状態を示していることが確認された。

練り混ぜ規模が100リットル容積と小さいこともあり、今後、実機およびアジテータ車練りでの施工試験により鋼繊維の分散性について、更に確認していきたい。

[参考文献]

- 1) 「繊維補強コンクリートの特性と応用」 小林一輔著
- 2) 「繊維補強セメント/コンクリート複合材料」 真嶋光保他著



山梨リニア実験線・小形山架道橋(床版に使用)

7. 6 強度特性

6. 1 はじめに

鋼繊維補強コンクリートの力学的特性を最も端的に表すものとして、荷重-変形特性をあげることができる。図-6. 1は鋼繊維補強コンクリートの試験体に引張荷重が作用した場合の荷重変形曲線を示している。鋼繊維補強コンクリートはプレーンコンクリートに比較すると次のような特長がある。

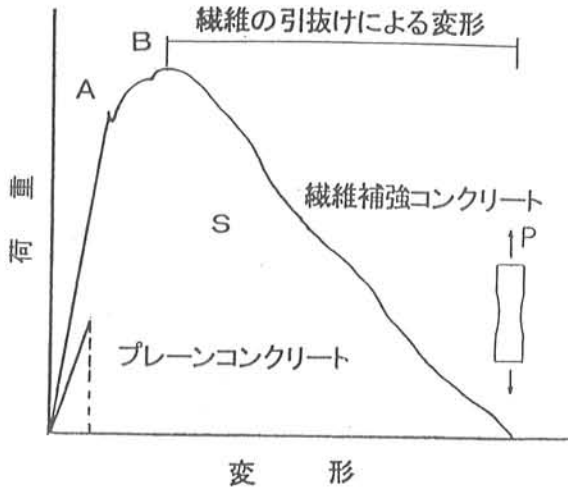


図-6.1 鋼繊維補強コンクリートの引張り荷重変形曲線

- ① 最初にひび割れを生じるA点に相当する荷重(初期ひび割れ荷重)がプレーンコンクリートに比べ向上すること。
- ② A 点を超えると荷重は鋼繊維とセメントマトリックス硬化体との界面で付着破壊を生じる まで鋼繊維によって伝達され、最大荷重(B 点-引張強度)に達するが、この間は著 しく非線形になること。
- ③ 最大荷重に達した後も鋼繊維が引抜けつつ 外力に抵抗し、これを破断させるには極めて大きい仕事量を必要とすること(じん性が高い こと)。

等であり、この三項目が鋼繊維補強コンクリートの構造材料としての基本的な特性である。本章では、鋼繊維補強した軽量コンクリート以下(SFLC)の強度特性について報告する。表-6. 1に強度試験結果一覧を示す。比較材である鋼繊維無混入の軽量コンクリート(以下 LC)および普通コンクリート(以下 NC)の結果も併せて示す。曲げ特性における初期ひび割れ強度、曲げ靱性については 7.7 項で報告する。

6. 2 圧縮強度と静弾性係数

図-6. 2に圧縮強度と繊維混入率の関係を示す。

SFLCの圧縮強度は繊維混入率の増加や繊維の種類による顕著な改善効果は認められずLCおよびNCに対しても同程度であった。

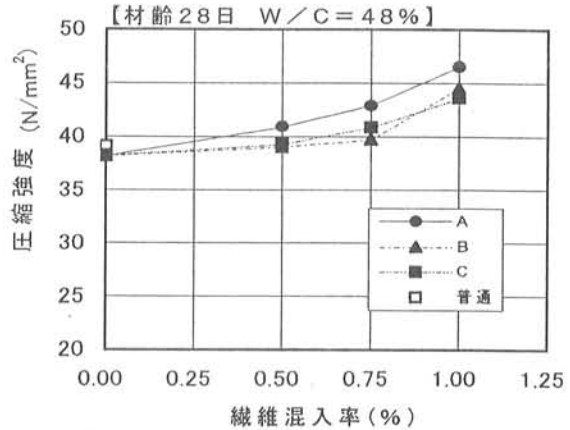


図-6.2 繊維混入率と圧縮強度の関係

図-6. 3に静弾性係数と繊維混入率の関係を示す。

静弾性係数に及ぼす繊維種類の影響は認められず、普通コンクリートに比べ静弾性係数は小さく、鋼繊維の混入による顕著な改善効果は無かった。

試験状況を写真-1に示す。

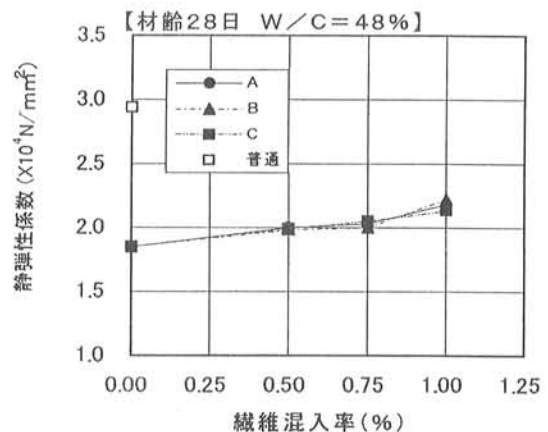


図-6.3 繊維混入率と静弾性係数の関係

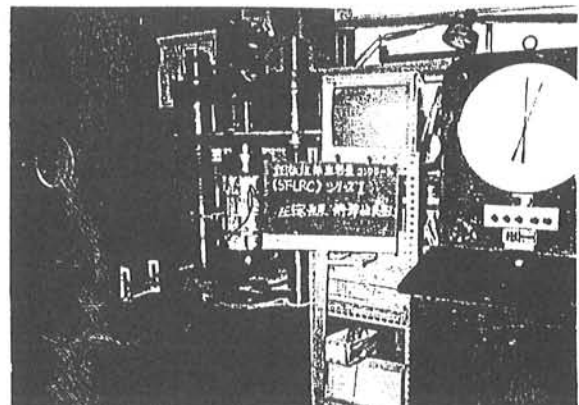


写真-1 圧縮強度・静弾性係数の試験状況

表-6.1 硬化コンクリート試験結果

種類	鋼 織 維		水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)		ポアソン比		引張強度 (N/mm ²)		曲げ強度 (N/mm ²)	曲げじん性係数 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)		
	混入率 (%)	混入量 (kg/m ³)			7日	28日	7日	28日	7日	28日	7日	28日				7日	28日
	※ 軽量コンクリート		48	48	48	28.2	38.2	1.73	1.85	0.167	0.145	2.48	2.66	3.81	0.04	4.72	
	※ 普通コンクリート					31.1	39.1	2.68	2.94	0.171	0.164	2.50	2.78	4.88		0.04	4.74
A						36.1	47.6	1.97	2.06	0.158	0.187	3.05	3.34	6.31		5.65	8.42
B	0.75	60	36.2	45.7	1.91	2.09	0.175	0.187	3.09	3.43	5.95		4.41	8.71			
C			35.7	47.5	2.00	2.13	0.174	0.178	3.06	3.20	5.59		4.16	8.21			
A			31.2	40.9	1.88	2.00	0.172	0.174	2.58	3.14	5.70		4.87	5.85			
B	0.50	40	30.0	39.0	1.75	1.98	0.178	0.176	2.69	3.02	4.91		4.06	5.86			
C			30.5	39.3	1.86	1.99	0.167	0.168	2.77	2.91	4.25		3.46	5.57			
A			31.5	42.9	1.93	2.03	0.182	0.187	2.66	3.19	7.06		6.07	7.82			
B	0.75	60	30.6	39.7	1.88	2.00	0.179	0.182	2.78	3.12	6.52		5.31	7.44			
C			33.3	40.8	1.89	2.05	0.186	0.181	2.83	2.97	5.54		3.66	7.55			
A			36.5	46.5	2.03	2.18	0.171	0.161	2.90	3.60	7.60		6.51	8.38			
B	1.00	80	36.3	44.5	2.02	2.22	0.171	0.167	2.98	3.41	8.59		6.52	8.55			
C			35.2	43.6	1.98	2.13	0.178	0.178	2.93	3.65	6.33		4.79	8.19			
A			25.9	34.8	1.72	1.92	0.167	0.168	2.58	2.85	6.66		5.70	6.73			
B	0.75	60	28.5	36.5	1.77	1.96	0.167	0.181	2.69	3.04	5.76		3.91	6.74			
C			28.7	37.8	1.73	1.97	0.173	0.183	2.66	2.91	4.74		2.88	6.83			

注) 強度及び係数は各配合3本の平均値 ※ 鋼繊維混入率0%

6.3 静弾性係数のばらつき

SFLC の静弾性係数のばらつきを把握する目的で、同一バッチのコンクリートから作製した30本の供試体を用いて圧縮強度試験を行った。W/C48%、繊維混入率0.75%、A種鋼繊維を用いた試験結果を表-6.2に示す。SFLCはLCに比べ標準偏差が小さくなる傾向が認められる。

表-6.2 静弾性係数のばらつき

種類	圧縮強度	静弾性係数	標準偏差
LC	35.5	1.99×10^4	0.11×10^4
SFLC-A	38.4	2.02×10^4	0.07×10^4

単位: N/mm²

6.4 引張強度

図-6.4に引張強度と繊維混入率の関係を示す。SFLCの引張強度は鋼繊維の混入により改善され、繊維混入率の増加とともに高くなる傾向が認められる。SFLCの引張強度はLCに対して3種類の平均で鋼繊維0.5%混入の場合14%、0.75%混入では16%、1%混入では33%向上した。NCに対しては鋼繊維0.5%混入では9%、0.75%混入では11%、1%混入では28%向上した。

試験状況を写真-2に示す。

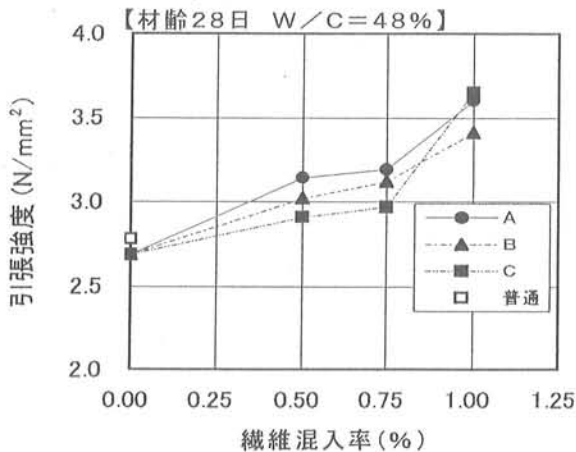


図-6.4 繊維混入率と引張強度の関係

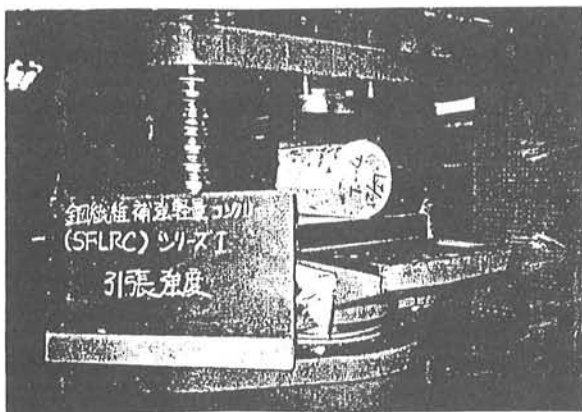


写真-2 引張強度試験状況

6.5 曲げ強度

図-6.5に曲げ強度と繊維混入率の関係を示す。曲げ強度の結果は基礎試験後に実施した同一配合の各種試験のデータを加味した。追加された試験結果を表-6.3に示す。SFLCの曲げ強度は鋼繊維の混入により改善され繊維混入率の増加とともに著しく高くなる傾向が認められる。

表-6.3 追加試験結果(W/C48%, 0.75%, 材齢28日)

試験名	A種鋼繊維		B種鋼繊維	
	曲げ強度	曲げじん性係数	曲げ強度	曲げじん性係数
基礎試験	6.83	6.06	4.86	4.01
曲げ疲労試験	7.01	—	6.77	5.76
輪荷重走行試験	7.61	6.05	7.42	5.82
物部川事前試験	6.80	6.09	7.02	5.66
平均	7.06	6.07	6.52	5.31

単位: N/mm²

試験状況を写真-3に示す。

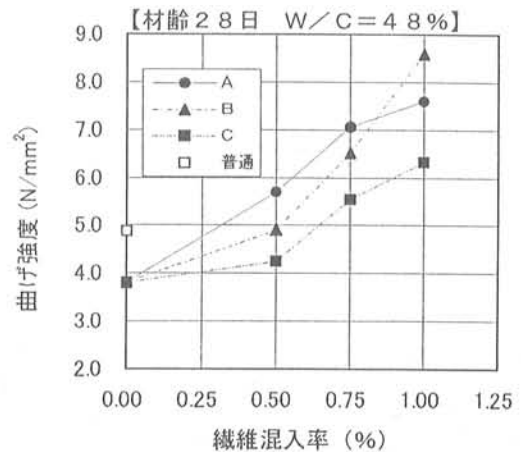


図-6.5 繊維混入率と曲げ強度の関係

SFLCの曲げ強度はLCに対して3種類の平均で鋼繊維0.5%混入の場合30%、0.75%混入では51%、1%混入では97%向上した。NCに対しては鋼繊維0.5%混入で同等となり、75混入%では18%、1%混入では54%向上した。

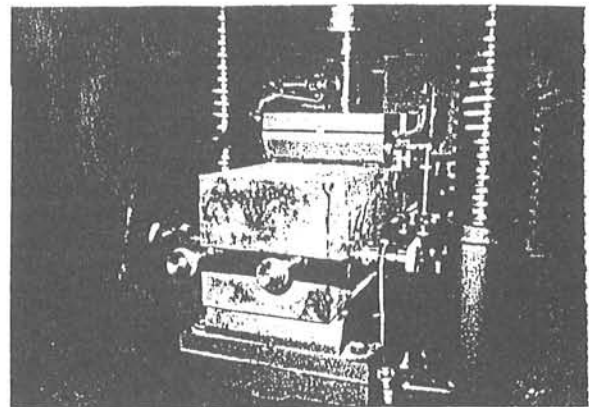


写真-3 曲げ強度試験状況

6.6 せん断強度

図-6.6にせん断強度(2面)と繊維混入率の関係を示す。SFLCのせん断強度は鋼繊維の混入により改善され、繊維混入率の増加とともに高くなる傾向が認められる。SFLCのせん断強度はLCに対して3種類の平均で鋼繊維0.5%混入の場合22%、0.75%混入では61%、1%混入では77%向上した。NCに対しては鋼繊維0.5%混入では22%、0.75%混入では60%、1%混入では77%向上した。

試験状況を写真-4に示す。

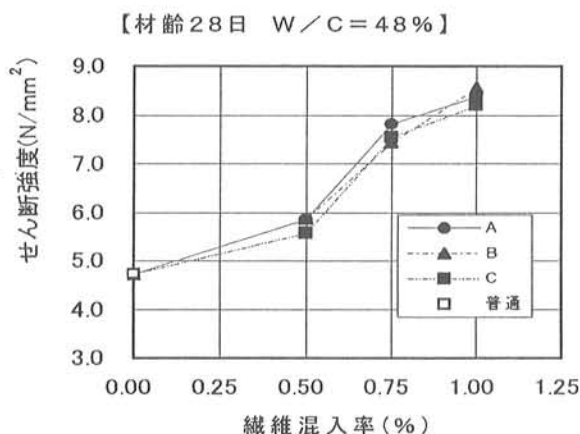


図-6.6 繊維混入率とせん断強度の関係

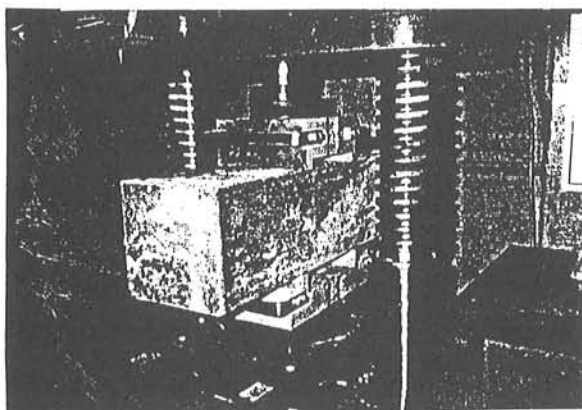


写真-4 せん断強度試験状況

6.7 支圧強度

W/C48%、鋼繊維混入率0.75%、A種鋼繊維を用いた場合の支圧強度と支圧面積の関係を表-6.4および図-6.7に示す。

表-6.4 支圧強度と支圧面積の関係

種類	繊維混入率	支承面積/支圧面積		
		1.00	1.86	9.00
LC	0%	39.5	52.1	98.0
NC	0%	40.2	53.8	101.0
SFLC-A	0.75%	43.0	56.8	112.0

単位: N/mm²

SFLCの支圧強度はLCに対して9~14%、NCに対して5~10%向上した。SFLCは支承面積と支圧面積の比が大きくなると支圧強度が高くなる傾向がある。

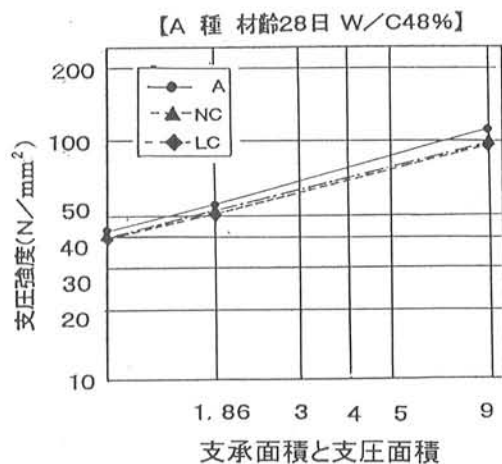


図-6.7 支圧強度と支圧面積の関係

6.8 LCおよびNCとの強度比について

SFLCは配合上の理由から繊維混入率の増加とともに細骨材率が高くなり、単位体積質量はLCに対して鋼繊維0.5%混入の場合2%、0.75%混入では4%、1%混入では8%高くなった。

一般的にLCの強度特性は単位容積質量との相関が強いといわれており、単位容積質量の影響を除くためにLCに対する強度比を単位容積質量の比で除して比較する事にした。この強度比と繊維混入率の関係を図-6.8に示す。

全ての項目で特性が改善され強度比は繊維混入率の増加(即ち細骨材率の増加)による単位容積質量の増加を上回ることが明らかになった。特に曲げ強度とせん断強度の強度比が高い。

SFLCのNCに対する強度比と繊維混入率の関係を図-6.9に示す。静弾性係数を除き強度比は改善さ

れ、LCに対する強度比と同じような傾向を示している。

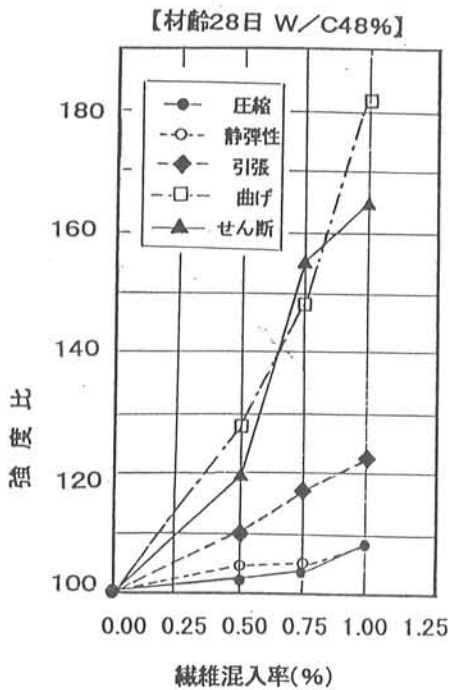


図-6.8 繊維混入率とLCとの強度比の関係

6.9 まとめ

鋼繊維補強軽量コンクリートの強度特性は軽量コンクリートに比較して改善され特に曲げ強度、せん断強度が高く、引張強度についても効果が認められた。繊維混入率0.5%の場合普通コンクリートと同等以上の強度特性が確認された。

参考文献 小林一輔 最新コンクリート技術選書9
昭和55年山海堂

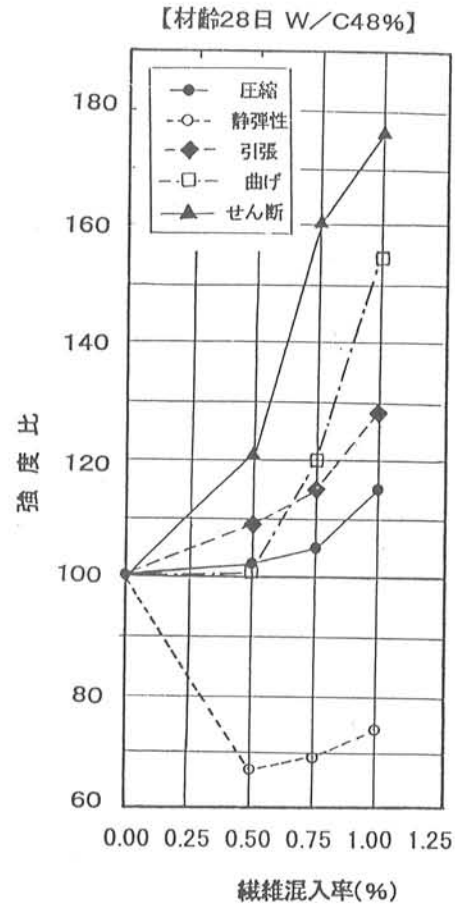


図-6.9 繊維混入率とNCとの強度比の関係

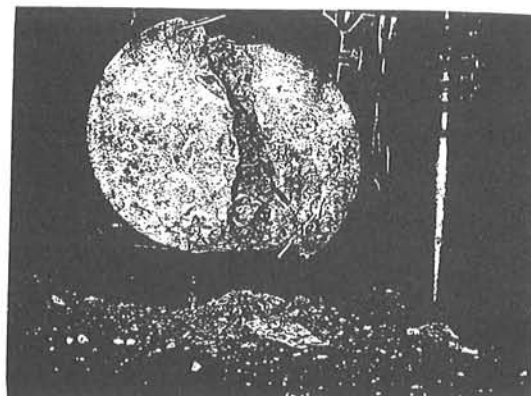


写真-5 引張り強度試験後の破壊状況

7. 7 曲げじん性

7.1 はじめに

鋼繊維補強コンクリートの最大の効果は曲げ荷重に抵抗する能力が大きいことを挙げることができる。荷重が増加し続けてもたわみ変形量は増加するが、普通コンクリートと異なり突然破壊にいたることはなく、徐々に変形を増しながら破壊に至る。この現象を曲げに対してねばり強い、すなわち靱性であるという。

図7.1に荷重とたわみ曲線の試験例を示す。繊維無混入コンクリートの場合、最大荷重に到達すると直ちに供試体は破壊をおこし試験は終了する、一方繊維補強されたコンクリートは曲げ荷重の増加に伴いひび割れが発生するがすぐに破壊することはなく、繊維の架橋効果³⁾によりその後も荷重は増加し続け最大荷重点を迎えた後緩やかに低下する。最初にひび割れが発生した時点は一般的に初期曲げひび割れ発生時と称され、条件によっては若干の反力低下に伴う僅かな荷重低下を伴う場合もある。

曲げじん性係数とは、ある特定のたわみ限界(供試体スパンの1/150 本試験では3mm)までの曲げタフネス(図7.1の曲線内面積)をたわみ量で除して限界点までの平均荷重として求めたものであり、鋼繊維の混入率や種類の相違を比較するのに適しているとされている。また、初期の曲げひび割れ時の強度及び最大強度(曲げ強度を意味する)の比較は鋼繊維のタイプによる特長をみるこ

とできるとされている。

以下に曲げじん性係数の計算式を示す。

$$f_b = (T_b / \delta_{tb}) \times (l / bh^2)$$

f_b : 曲げじん性係数 (N/mm²)
 T_b : 図7.1の曲線内面積 (N・mm)
 δ_{tb} : スパンの1/150のたわみ (mm)
 l : スパン (mm)
 b : 破壊断面の幅 (mm)
 h : 破壊断面の高さ (mm)

表7.1に本試験の曲げ靱性に関する強度、靱性係数及び初期曲げひび割れ強度の結果一覧を示す。

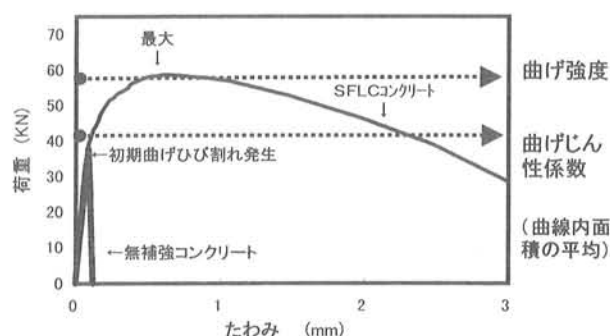


図-7.1 荷重-たわみ曲線例

表-7.1 曲げじん性試験結果

種類	鋼 繊 維		水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げじん性 係数 (N/mm ²)	初期曲げひ び割れ強度 (N/mm ²)
	混入率 (%)	混入量 (kg/m ³)					
※ 軽量コンクリート			48	48	3.81	0.04	3.81
※ 普通コンクリート					4.88	0.04	4.88
A	0.75	60	43	54	6.31	5.65	4.37
B					5.95	4.41	3.98
C					5.59	4.16	4.64
A	0.50	40	48	52	5.70	4.87	4.34
B					4.91	4.06	4.25
C					4.25	3.46	4.23
A	0.75	60	48	56	7.06	6.07	4.66
B					6.52	5.31	4.05
C					5.54	3.66	4.80
A	1.00	80	48	64	7.60	6.51	5.50
B					8.59	6.52	4.96
C					6.33	4.79	4.69
A	0.75	60	53	58	6.66	5.70	4.80
B					5.76	3.91	4.71
C					4.74	2.88	4.74

注) 曲げ強度及び曲げじん性係数は各配合3本の平均値 ※ 鋼繊維混入率0%

7.2 曲げじん性係数による検討

図7.2に繊維混入率と曲げじん性係数の関係を示す。これによると、曲げじん性係数は鋼繊維の混入率の増加と共に大きくなり、混入率0.5%で最小3.46N/mm²～最大4.87N/mm²、0.75%では最大6.07N/mm²及び、1.0%では最大6.52N/mm²と増えている。全体的には0.5%の混入でかなりの増加を示すが、その後1.0%混入までの靱性係数の増加率は0.5%までの傾向に比べ若干小さい。

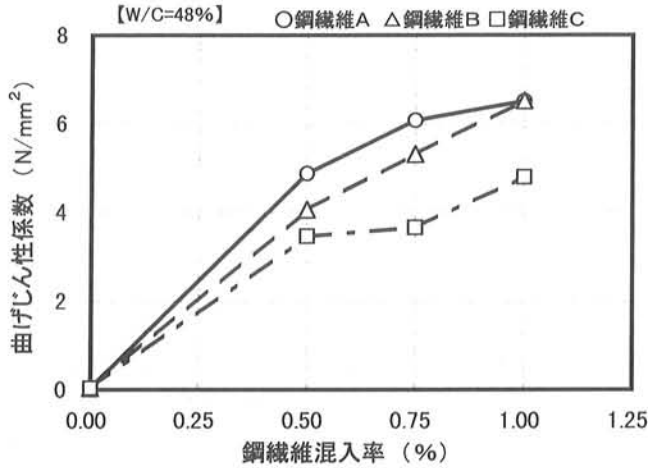


図-7.2 繊維混入率と曲げじん性係数の関係

図7.3に繊維混入率0.75%におけるセメント水比と曲げじん性係数の関係を示す。これによると、繊維混入率が同一の場合水セメント比の変化が曲げじん性係数に及ぼす影響は混入率の変化の場合と比べると小さく、曲げじん性係数5.0N/mm²以上のレベルでは水セメント比が変化してもほぼ同程度であり、頭打ちとなる傾向にある。本試験の水セメント比48%を中心に±5%程度の範囲では、曲げじん性係数は鋼繊維混入率の影響が支配的であることがいえる。

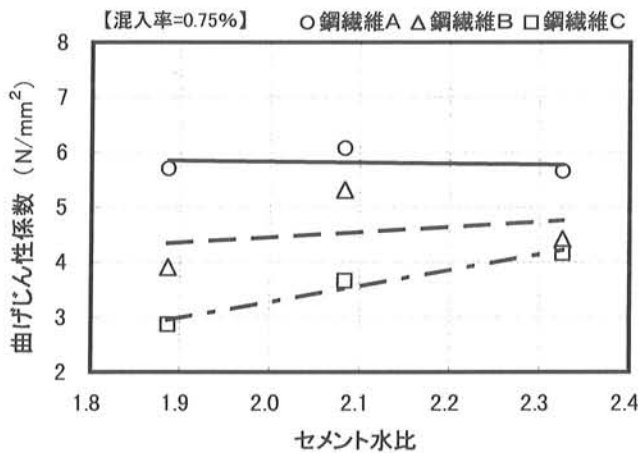


図-7.3 セメント水比と曲げじん性係数の関係

7.3 各種限界点強度による検討

(1) 初期曲げひび割れ強度との関係

各配合の鋼繊維補強軽量コンクリート(SFLC)の初期曲げひび割れ強度を普通(NC)コンクリートの場合を100%として鋼繊維の種類毎に比較した結果を図7.4～5に示す。これによると、SFLCの初期曲げひび割れ強度は鋼繊維混入率と共に増加する傾向は認められるが、水セメント比による影響は顕著ではない。また、何れの場合も混入率0%の軽量コンクリート単味の78%以上は示しており、鋼繊維を混入することにより軽量コンクリートの改善が認められ、混入率1.0%程度で普通コンクリートと同程度の性状を示す。

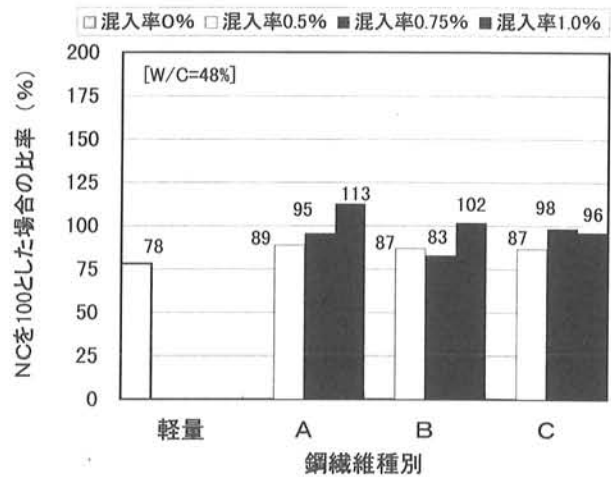


図-7.4 普通コンクリートに対する鋼繊維コンクリートの強度比率の関係(初期曲げひび割れ・混入率別)

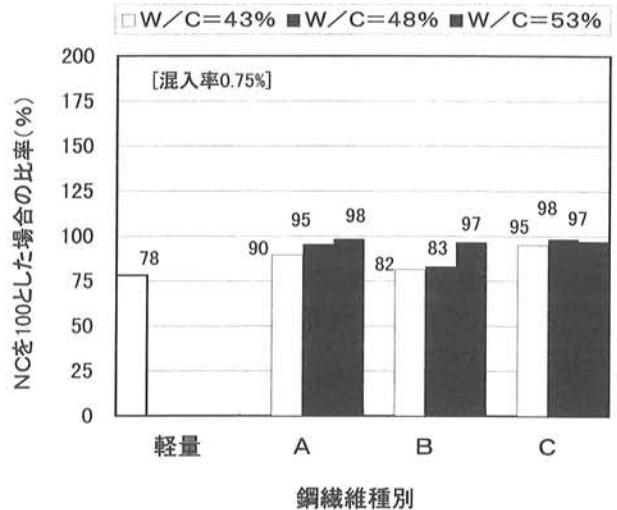


図-7.5 普通コンクリートに対する鋼繊維コンクリートの強度比率の関係(初期曲げひび割れ・セメント水比別)

(2) 曲げ強度との関係

SFLCの曲げ強度(最大荷重時強度)の発現性状を普通コンクリートと比較した図7.6~7によると、混入率の増加による繊維の効果がよく現れている。混入率 0.5%時で3者の平均 102%と普通コンクリートと同等であり、混入率 1.0%では最大 80%程度も増加しているものもある。水セメント比の関係は、初期曲げひび割れと同様に明確な傾向は認められなかった。

参考文献

- 1) 眞嶋・幸佐・大野著「繊維補強セメント/コンクリート複合材料」技報堂出版

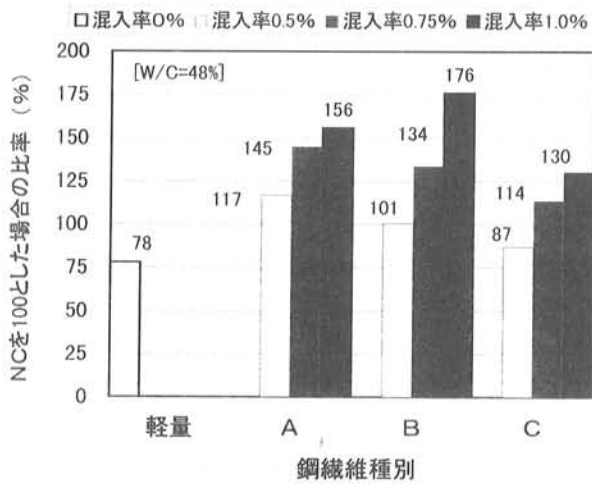


図-7.6 普通コンクリートに対する鋼繊維コンクリートの強度比率の関係(曲げ強度・混入率別)

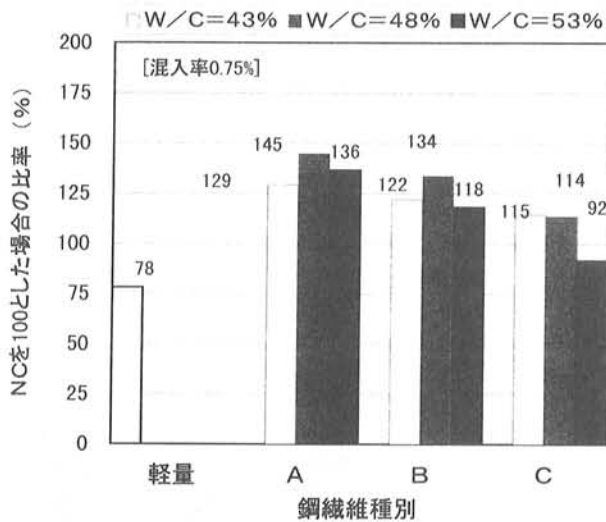
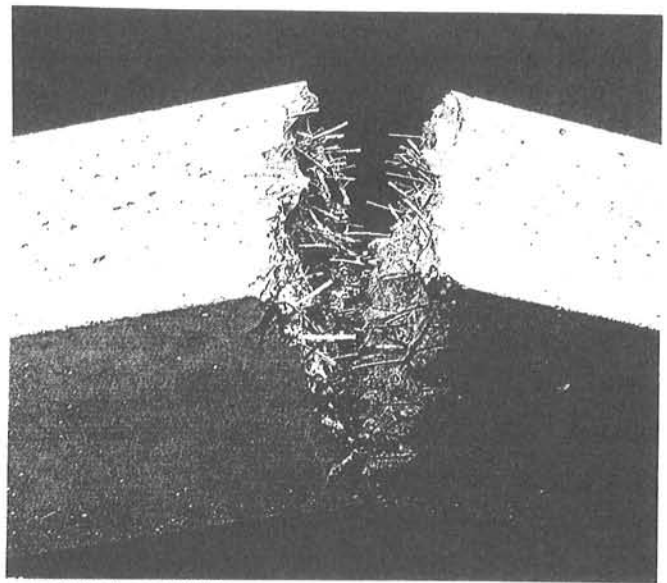


図-7.7 普通コンクリートに対する鋼繊維コンクリートの強度比率の関係(曲げ強度・セメント水比別)



曲げ試験体の破壊状況

7. 8 耐久性

コンクリート構造物に要求される耐久性能は、構造物の使用目的によって異なる。また、構造物の耐久性は、外的環境条件・設計条件・使用材料の性質や施工方法などの影響を受けることが多い。

よって、耐久性を一つの品質としてみる場合、①中性化と鉄筋の発錆、②乾燥収縮ひび割れと漏水、③凍結融解、④表面劣化、⑤クリープ特性が主として検討され、そのほか耐熱性・耐薬品性・疲労特性なども検討項目として取り挙げられている。

以下に示した結果は、軽量コンクリートに鋼繊維を混入した「鋼繊維補強軽量コンクリート」の耐久性について調べたものである。

8. 1 試験概要

試験項目とコンクリートの種類を表8.1に示した。

表-8.1 試験項目とコンクリートの種類

配合名	鋼繊維 混入率 (Vol.%)	試験項目					水/ セメント (%)
		促進 中性化	乾燥 収縮	凍結 融解	屋外 曝露	クリープ	
LC ⁽¹⁾	—	○	○	○	○	—	48.0
NC ⁽²⁾	—	○	○	○	○	—	48.0
SFLC ⁽³⁾	0.75	○	○	○	○	○	48.0

(1)軽量コンクリート、(2)普通コンクリート、(3)鋼繊維補

8. 2 供試体の形状

クリープ試験以外の供試体形状は、JSCE-F55「試験室における鋼繊維補強コンクリートの作り方」に従って、10×10×40cmの角柱体とした。クリープ試験の供試体形状は、15×15×53cmの角柱とし、クリープ用として2体、乾燥収縮用として2体の計4体を作製した。なお、供試体中心部にはP C鋼棒を設置するためのシース管を配置した。

8. 3 促進中性化

(1)試験方法

試験は、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」に従った。供試体は材齢1日で脱型し以降材齢4週まで20℃水中に浸漬して養生した。材齢4週以降は、温度20℃・湿度60%の恒温恒湿室内で4週間気中養生を行った。なお、気中養生の4週

間目に供試体の打込み面および底面をエポキシ樹脂でシールした。

気中養生終了後、各供試体は温度20℃・湿度60%・炭酸ガス濃度5%に調整した試験槽に入れて促進養生を行った。中性化深さの測定は、促進試験開始後1, 4, 8, 13, 26週の各材齢とした。測定は、コンクリートの切断面に1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧した時、赤く着色しない部分を中性化部分としてコンクリート表面からの深さを測定し、その平均値を中性化深さとした。

(2)試験結果

日本建築学会「高耐久性コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」2章 耐久設計では劣化現象の種類における許容劣化状態に対して、中性化については「鉄筋が発錆しないこと、屋外にあってはかぶり厚さの深さまで中性化しないこと、屋内にあってはかぶり厚さより20mm奥の深さまで中性化しないこと」としている。

本試験の結果を図8.1に示す。本試験では、炭酸ガス濃度5%の苛酷な雰囲気暴露したが、中性化の進行

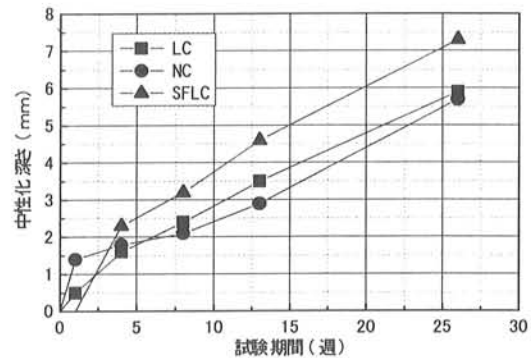


図-8.1 促進中性化試験結果

速度は何れのコンクリートも概ね同じ傾向にあった。中性化深さは6~7mmで、絶対値としてはSFLCが幾分か大きかったものの、全体としては3者の間には殆ど差は見られず、中性化に対する抵抗性は良好であると判断された。材齢26週における各コンクリートの中性化の状況を写真8.1に示す。

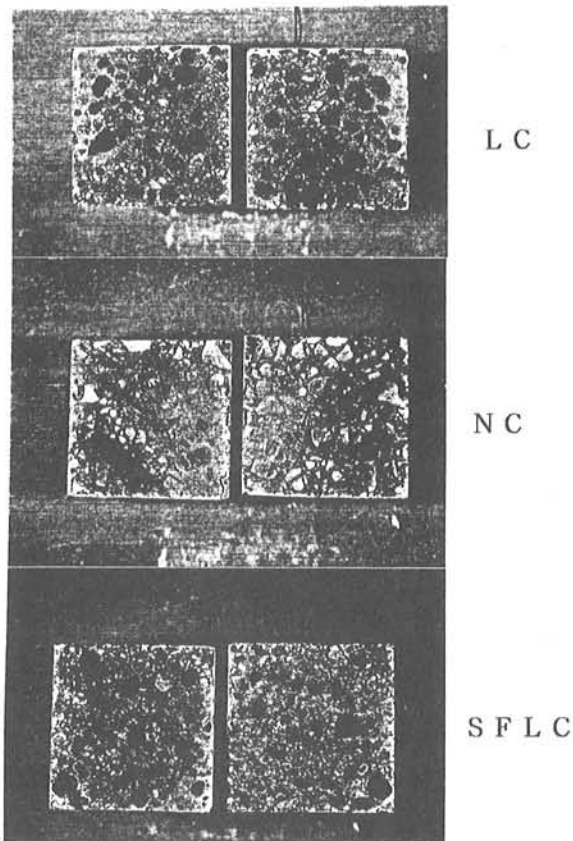


写真-8.1 中性化状況

るといわれている。また、軽量コンクリートのように密度や弾性係数が小さいコンクリートほど収縮低減効果は大きいとの報告もある。しかしながら、本試験におけるSF LCの収縮率はNCより若干小さかったものの、LCとほぼ同等であり鋼繊維による効果は見られなかった。このことから、鋼繊維による収縮低減を期待するには混入率を更に大きくする必要があるものと考えられる。

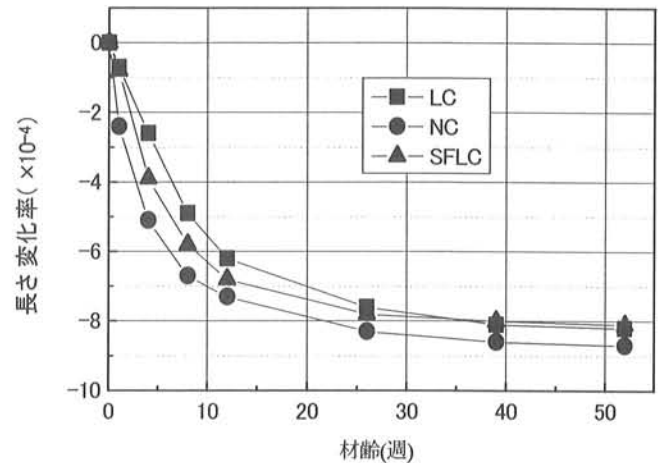


図-8.2 乾燥収縮試験結果

8.4 乾燥収縮

(1) 試験方法

試験はJIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に従った。

供試体は材齢1日で脱型し以降材齢7日まで20℃水中に浸漬して養生した。材齢7日で水中より取り出し、温度20℃・湿度60%の恒温恒湿室に保管し、材齢1年までの長さ変化を測定した。

(2) 試験結果

軽量コンクリートは、骨材中に多量の水分を持っているので、同一環境条件下においては普通コンクリートに比較して乾燥が遅れるため、初期材齢での長さ変化は小さいが、乾燥収縮の収斂時には普通コンクリートとほぼ同等の収縮率となる。本試験に於ける乾燥収縮試験の結果を図8.2に、また気中養生での質量変化率の結果を図8.3に示した。材齢1年における長さ変化率は8～9×10⁻⁴であった。この値は無拘束状態で試験をした既往報告の結果とよく一致している。

一般に、鋼繊維混入率を1.5～2%にした場合、繊維の拘束効果によって乾燥収縮は20～30%程度低減され

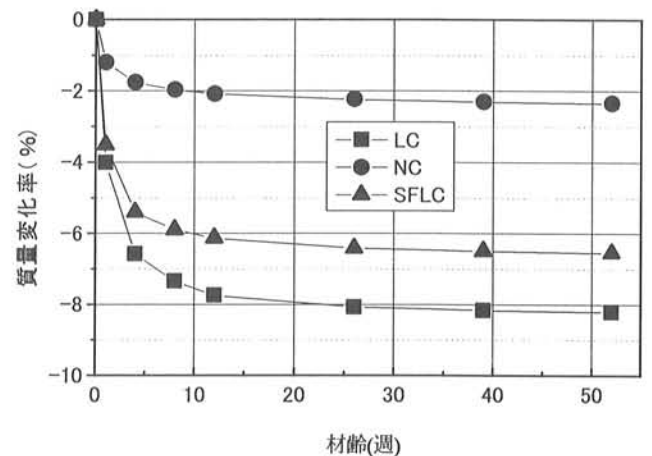


図-8.3 質量変化

8.5 凍結融解

(1) 試験方法

試験はASTM C 666 A法に準じて行った。供試体は材齢1日で脱型し、以降材齢14日まで20℃水中に浸漬して養生した後、材齢28日まで温度20℃・相対湿度60%の恒温恒湿室で乾燥させてから、凍結融解試験槽に入れて試験を開始した。なお、凍結温度は-18℃・融解温度は5℃とし、1サイクルの所用時間は約4時間とした。

(2) 試験結果

各サイクル数に於ける相対動弾性係数を図8.4に、また気中養生前後での質量変化率を表8.2に示した。

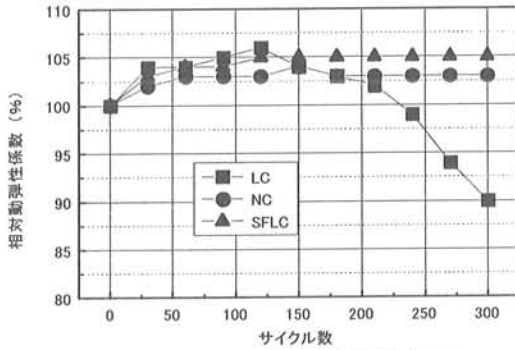


図-8.4 相対動弾性係数

表-8.2 乾燥による供試体の質量変化

配合名	水切時(kg/m ³)	乾燥後(kg/m ³)	質量減少率(%)
LC	1.941	1.848	4.8
NC	2.306	2.274	1.4
SFLC	2.032	1.949	4.1

300回の繰り返し凍結融解終了時における耐久性指数はLCの90%に対して、SFLCならびにNCでは103~105%と高い値を示した。通常、軽量コンクリートは水中での急速凍結融解を繰り返した場合、早期に弾性係数の低下や崩壊現象の生じることが知られている。これは、主として軽量骨材中の水が凍結によって膨張し、大きな水圧を及ぼすことにより組織がルーズ化するためである。本試験において良好な耐久性を示したのは、凍結融解開始前に14日間の気中養生を行ったことで、コンクリート全体の水分が4%程度減少していたことによるものと考えられる。LCは120サイクルを過ぎた辺りから相対動弾性係数の低下が目立つが、SFLCは殆ど弾性係数の変化が見られず、300サイクルでは僅かであるが、NCより大きい耐久性を示した。SFLCが優れた耐久性を示した理由としては粗骨材量が少ないことからコンクリート中の全水量が少なかったこと、乾燥に伴うコンクリート中の水分量の減によって凍結時の水圧が小さくなったことに加えて、鋼繊維の拘束作用によるコンクリート表面の損傷防止効果が寄与したものと推察される。写真8.2に300サイクル後の表面劣化状況を示した。

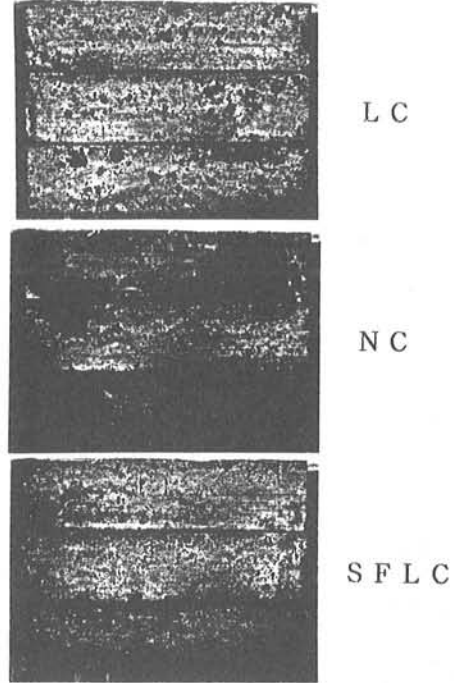


写真-8.2 表面劣化状況(300サイクル)

8.6 屋外暴露

(1) 試験方法

供試体は材齢1日で脱型し、以降材齢28日まで20℃水中に浸漬して養生した。水中養生終了後、神奈川県茅ヶ崎市内(海岸線より約3km)の建物の屋上に自然状態で暴露し、外観変化・繊維の腐食状況ならびに中性化の進行状況を調べた。なお、試験材齢は暴露開始後6ヶ月、1年及び3年とした。

(2) 試験結果

暴露材齢3年における試験結果は表3に示したとおりである。何れのコンクリートも中性化は全く見られなかった。SFLCは、発錆や表面剥離などの現象もなく

表-8.3 屋外暴露試験結果

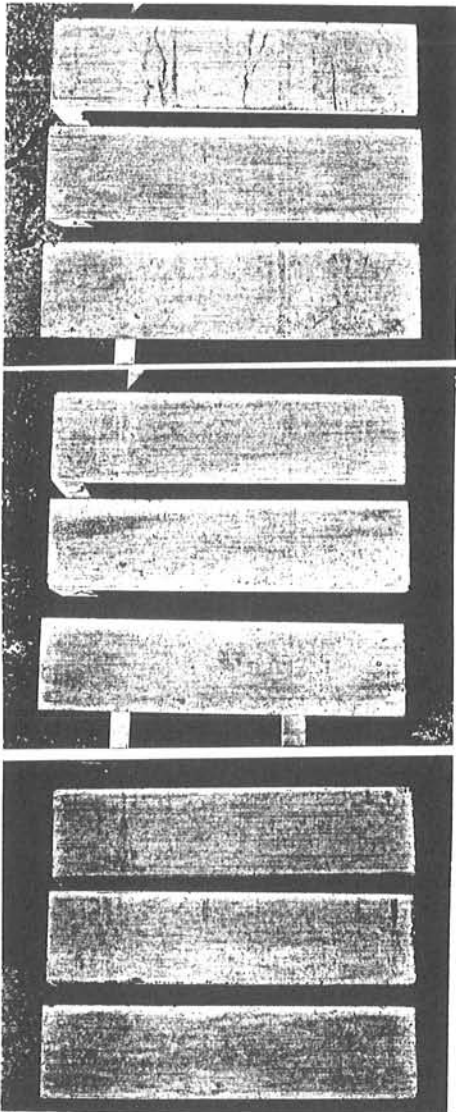
配合	鋼繊維		1年後			3年後		
	種類	混入率(vol%)	中性化深さ	発錆	表面損傷	中性化深さ	発錆	表面損傷
LC	-	-	0mm	なし	なし	0mm	なし	なし
NC	-	-	0mm	なし	なし	0mm	なし	なし
SFLC	A	0.75	0mm	なし	なし	0mm	なし	なし
	B	0.75	0mm	なし	なし	0mm	なし	なし

健全な状態にあった。暴露試験体の状況を写真8.3に示した。

参考までに、(社)鋼材倶楽部発行のスチールファイバーコンクリートの手引き[第3版]より、普通コンクリートを用いた鋼繊維補強コンクリートの曝露試験結果例を表8-4に示す。

表 8-4 曝露試験結果例 (SFRC)

ひび割れ幅	中性化深さ(mm)		鋼繊維腐食深さ(mm)	
	2年4ヶ月	5年8ヶ月	2年4ヶ月	5年8ヶ月
0mm(なし)	2.7	3.2	—	—
0.2mm	—	12.0	—	7.0
0.3mm	—	22.0	—	15.0



LC

NC

SF LC

写真 8-3(曝露試験状況)

8.7 クリープ試験

(1) 試験方法

クリープ試験は J I S 原案である「コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)」に準拠し、P C 鋼棒式角柱法とし、載荷応力は材齢 28 日の圧縮強度の 1/3 (13.8N/mm²) とした。

(2) 試験結果

材齢 1 年までの結果を図 8-5、8-6 に示した。これによれば、材齢 1 年でほぼ安定した状態になっていることが認められる。

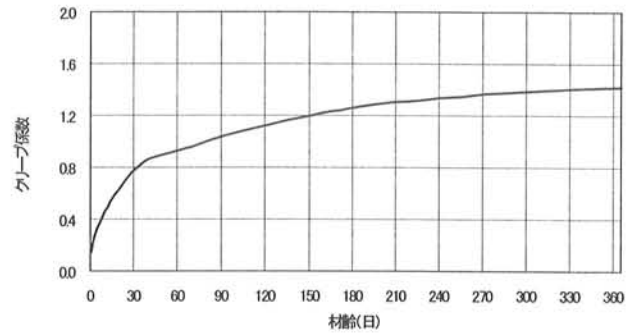


図 8-5 材齢とクリープ係数の関係

弾性ひずみ : 622×10^{-6}

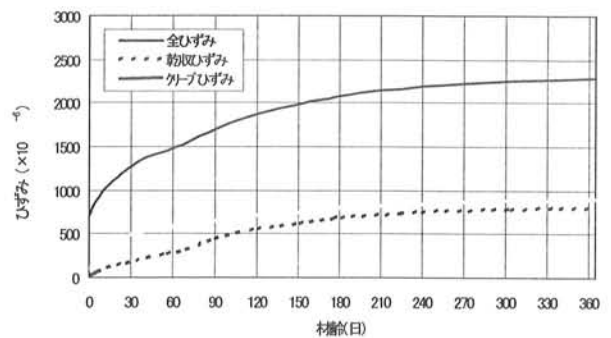


図 8-6 材齢と各種クリープひずみの関係

8.8 まとめ

人工軽量骨材コンクリートに鋼繊維を 0.75% 混入したコンクリートの耐久性は、促進中性化および乾燥収縮については無混入時の性状と概ね同等であった。凍結融解抵抗性は、鋼繊維を混入することで大きな改善効果が認められた。屋外曝露試験に関しては材令的に短期であるため、コンクリート種類間の差異は生じていない。今後の追跡調査が必要である。本試験の結果から、鋼繊維を混入することで軽量コンクリートの弱点である、凍結融解抵抗性が大幅に改善されることが判明した。鋼繊維の混入率を高めることは耐久性の向上にとって非常に有効であるものと推察される。

7.9 せん断特性

本項では鋼繊維軽量コンクリートのせん断特性について報告する。

9.1 実験概要

実験は、材料特性を把握するために供試体によるせん断強度試験(二面せん断試験、結果は表6.1参照)を、また、構造特性を把握するためにRCはり部材を用いた試験を行った。

9.2 供試体によるせん断試験

(1) 使用材料

使用材料とその物性を表9.1に示す。

表-9.1 使用材料と物性値

使用材料	記号	物性
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルランドセメント; 比重3.16
細骨材	S	大井川産陸砂; 表乾比重2.60、吸水率1.98%、粗粒率2.74
粗骨材	G	人工軽量骨材; 絶乾比重1.28、吸水率26.5%、最大寸法15mm
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
鋼繊維	SF	A; 両端フック型、 $\phi 0.8 \times 60$
		B; インデント型、 $\phi 0.7 \times 50$
		C; 波形、 $0.25 \times 2.0 \times 50$

(2) 試験体の種類と配合

試験体の種類と配合を表9.2に示す。W/Cは43、48ならびに53%の3水準、繊維混入率は0、0.5、0.75、1 Vol%の4水準とした。軽量コンクリートは1種とし、スランプは $18 \pm 1.5\text{cm}$ 、空気量は $5 \pm 1\%$ とした。なお、繊維の種類別に細骨材率やその他の配合は変えていない。

表-9.2 試験体の種類と配合

試験体種類	鋼繊維混入率	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	SF
普通 (NC)	0	48	48	180		824	912	0
	(LC)				375	811	549	0
軽量 (SFCL)	0.5	43	54	180		881	505	40
						419	894	475
	0.75	48	56		375	949	463	60
					340	998	450	
	1	48	64		375	1084	379	80

(3) 試験方法

試験は土木学会規準(JSCE-E-G-553-1983)「鋼繊維補強コンクリートのせん断試験方法」に規定する二面せん断試験にしたがった。試験材齢は28日とし

た。

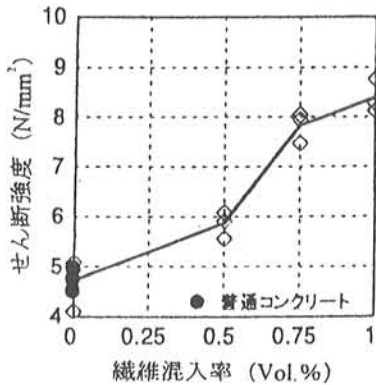


図-9.1 繊維混入率とせん断強度の関係(A種)

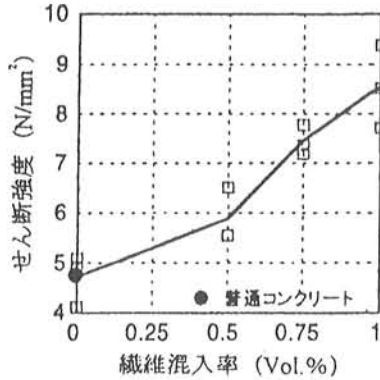


図-9.2 繊維混入率とせん断強度の関係(B種)

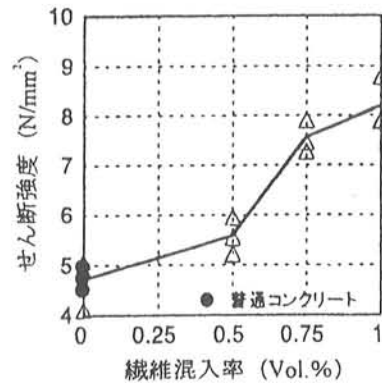


図-9.3 繊維混入率とせん断強度の関係(C種)

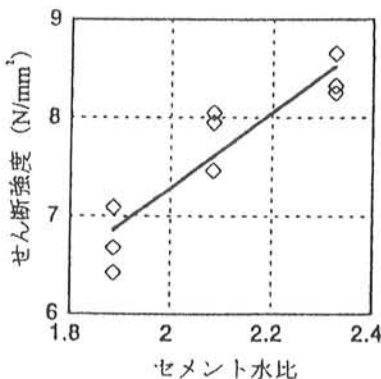


図-9.4 セメント水比とせん断強度の関係(A種)

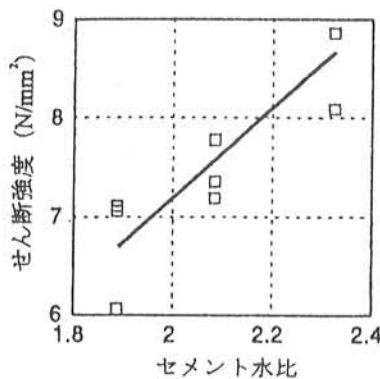


図-9.5 セメント水比とせん断強度の関係(B種)

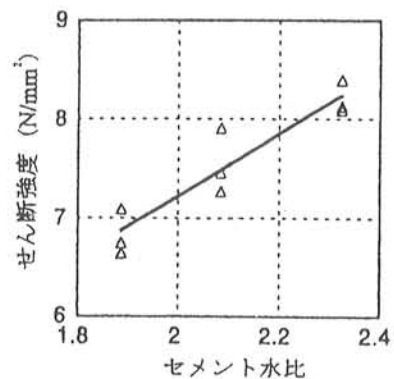


図-9.6 セメント水比とせん断強度の関係(C種)

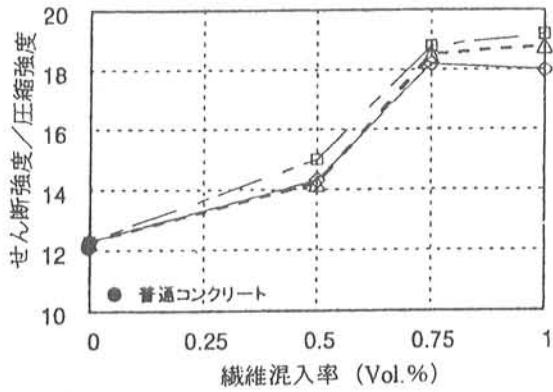


図-9.7 せん断強度と圧縮強度比の関係

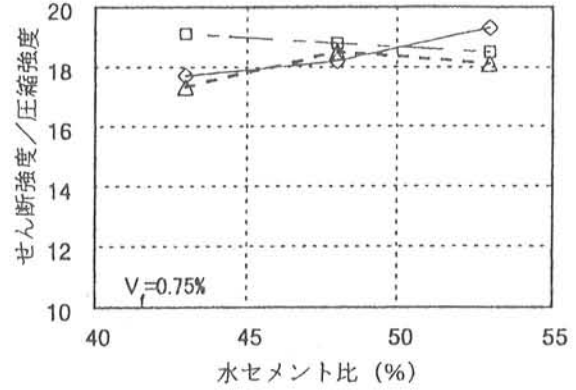


図-9.8 せん断強度と圧縮強度比の関係

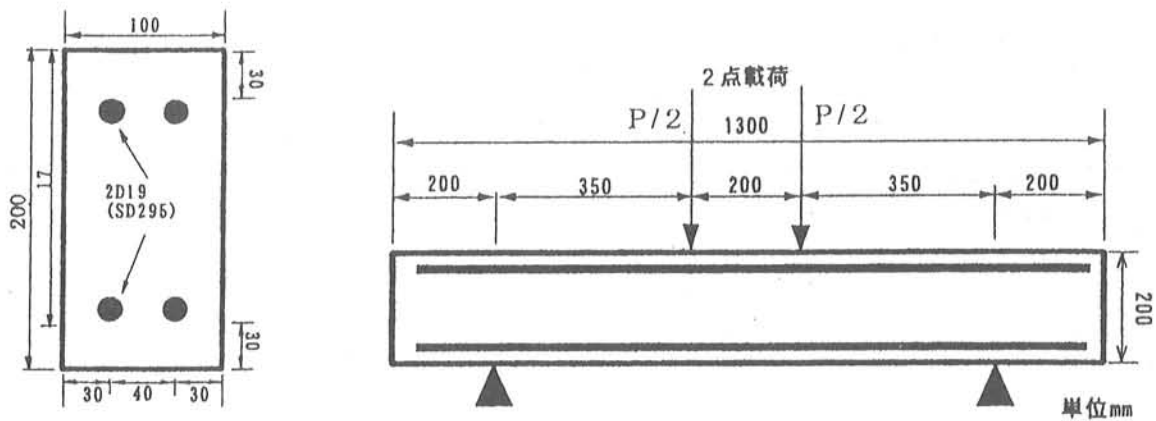


図-9.9 試験体の形状・寸法

(4) 試験結果

① 繊維混入率とせん断強度の関係

図9.1～9.3に繊維混入率とせん断強度の関係を示す。鋼繊維の増加により、せん断強度の増加が認められ、無混入に比べ倍、若しくはそれ以上の効果がある。ただし、繊維量に比例した増加とはならず、頭打ち現象がみられるようである。これは鋼繊維補強コンクリートにおいて一般的にみられる現象であり、この理由としては、繊維を混入することによる締め固め効果の低減によるものと説明されている。

② セメント水比とせん断強度の関係

図9.4～9.6にセメント水比とせん断強度の関係を示す。圧縮強度と同様に直線関係が得られており、繊維そのものはセメント水比に対する影響要素は変わらないものと判断でき、鋼繊維とマトリックスとの付着強度が強度増大の効果に及ぼす大きな因子であることが推測される。

③ せん断強度と圧縮強度比の関係

図9.7、9.8にせん断強度と圧縮強度比の関係を示す。図9.7では特に繊維混入率をパラメータとしているが、普

通コンクリートに対するその比は12%程度であり、せん断強度は圧縮強度の1/8程度と一般的な値といえる。また、今回の実験では鋼繊維無混入の軽量コンクリートにおいても12%程度と同様な数値が得られており、一般的に軽量骨材にいられているようなせん断強度の低下は明確に示されなかった。繊維を混入すると、せん断強度と圧縮強度の比は18%となり、圧縮強度の1/5近くにも上昇しており、数値的にも圧縮強度に対する比においても効果が認められた。

また、図9.8から、せん断強度と圧縮強度との比に水セメント比がほとんど影響していないことがわかる。

9.3 RCはり部材を用いた試験

(1) 使用材料

使用材料とその物性を表9.1に示す。

(2) RCはり試験体の種類と配合

RCはり試験体の種類とコンクリートの配合を表9.3に示す。コンクリートは軽量コンクリート1種とし、スランブは 18 ± 1.5 cm、空気量は 5 ± 1 %とした。全ての繊維で繊維混入率は0.75Vol%とし、配合は同じとした。

表-9.3 RCはり試験体の種類と配合

試験体種類	鋼繊維混入率	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	SF
普通 (NC)	0	48	48	180	375	824	912	0
(LC)	0					811	549	0
軽量 (SFLC-A)	0.75	48	56	180	375	949	463	60
(SFLC-B)								
(SFLC-C)								

(3)試験方法

図 9.9 に示す形状・寸法のRCはり試験体を作製した。

鉄筋は圧縮鉄筋比と引張鉄筋比が同一となるように配置し、せん断スパンは 350mm、せん断スパン比は 2.16 であり、せん断破壊となるようにスターラップは設けていない。RCはり試験体の荷重方法は、まず曲げひび割れ発生荷重まで荷重した後、一旦除荷し、再度破壊に至るまで一様漸増荷重を行い、各段階でたわみ、鉄筋ひずみなどを測定した。なお、試験体は鋼繊維補強軽量コンクリート(SFLC)を繊維種類(A、B、C)毎に各2体、計6体作製し、試験に供した。

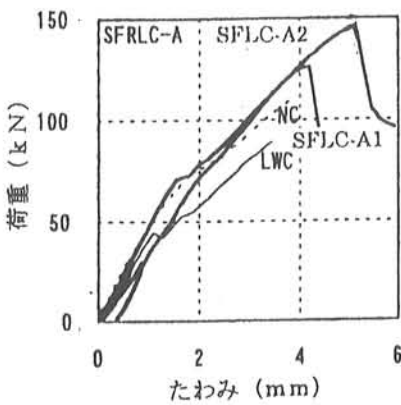


図-9.10 荷重-たわみ曲線(A種)

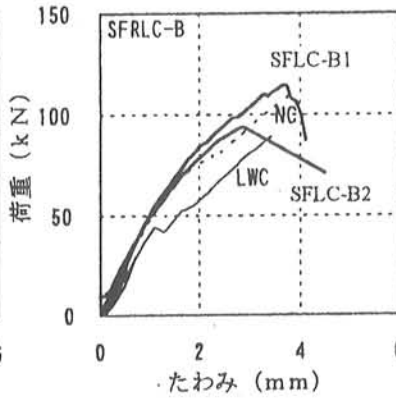


図-9.11 荷重-たわみ曲線(B種)

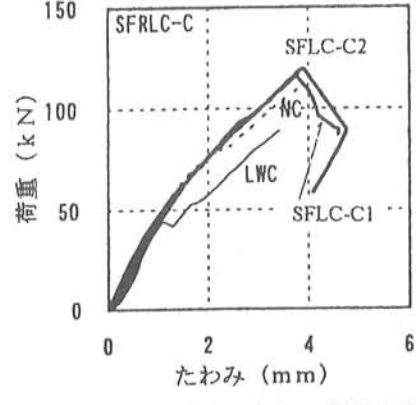


図-9.12 荷重-たわみ曲線(C種)

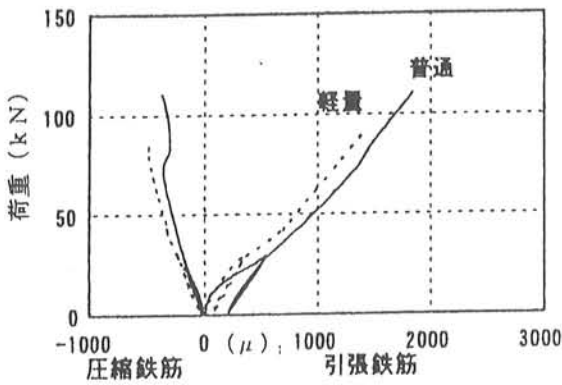


図-9.13 荷重-主鉄筋ひずみの関係(繊維無混入)

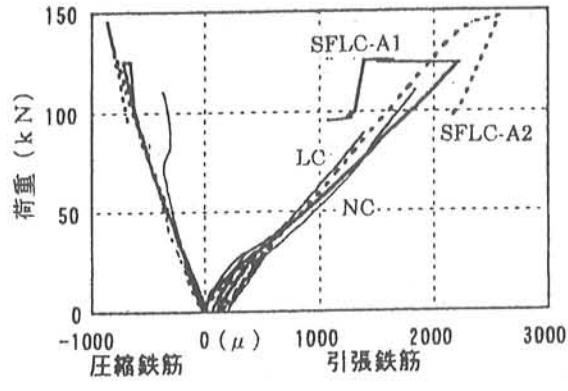


図-9.14 荷重-主鉄筋ひずみの関係(A種)

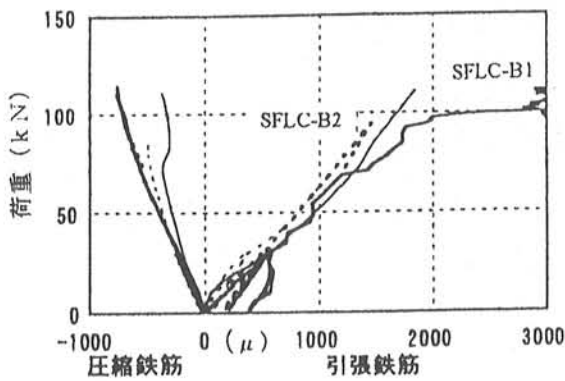


図-9.15 荷重-主鉄筋ひずみの関係(B種)

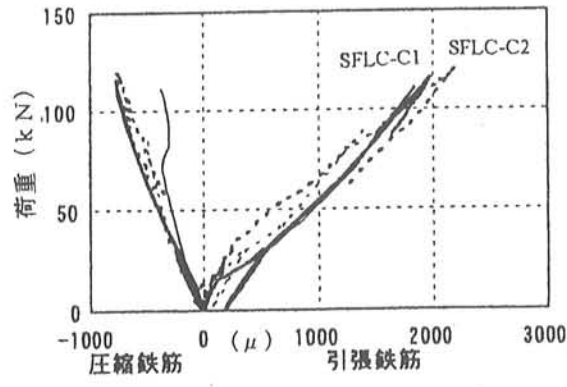


図-9.16 荷重-主鉄筋ひずみの関係(C種)

また、比較用の普通コンクリート(NC)、軽量コンクリート(LC)の繊維無混入RCはり試験体についても試験を実施した。

(4) 試験結果

①破壊までのプロセス

SFLC およびNC、LCの荷重-たわみ曲線を図9.10~9.12に、荷重-主鉄筋ひずみの関係を図9.13~9.16に示す。全ての試験体で荷重開始後まず曲げひび割れが発生し、それ以降さらに荷重を増加させると斜めひび割れが発生した。その後、荷重に伴いNC、LCでも荷重は増加するものの、引張側主鉄筋が降伏する前にLC、NCの順に脆性的な破壊を呈した。一方、繊維を混入したSFLCでは、さらに引張側主鉄筋ひずみが増加しても荷重は増加し、引張側主鉄筋のひずみが降伏ひずみに達したと考えられる1500~2000 μ 以上で急激に斜めひび割れ幅が増大し、最終的に破壊に至った。しかしながら、LC、NCが破壊した荷重以降においてもSFLCでは荷重が増加していることから、繊維混入による補強効果が窺える。

②荷重試験結果

表9.4および図9.17に荷重試験結果を示す。鋼繊維を混入しない場合、LCはNCに比べ、斜めひび割れ発生荷重およびせん断圧縮破壊荷重は小さいが、鋼繊維を混入することにより斜めひび割れ発生荷重およびせん断圧縮破壊荷重は増加した。また、その増加傾向は鋼繊維種類により異なり、鋼繊維の特性を受けているようである(A>C>B)が、いずれもNCと同等以上の結果が得られた。

表-9.4 はり試験体による荷重試験結果

	NC	LC	SFLC -A1	SFLC -A2	SFLC -B1	SFLC -B2	SFLC -C1	SFLC -C2
斜めひび割れ発生荷重(kN)	57.9	44.1	70.6	80.4	58.8	59.8	63.7	65.7
			75.5		59.3		64.7	
せん断圧縮破壊荷重(kN)	110.8	89.2	126.5	146.1	114.7	94.1	115.7	119.6
			136.3		104.4		117.7	

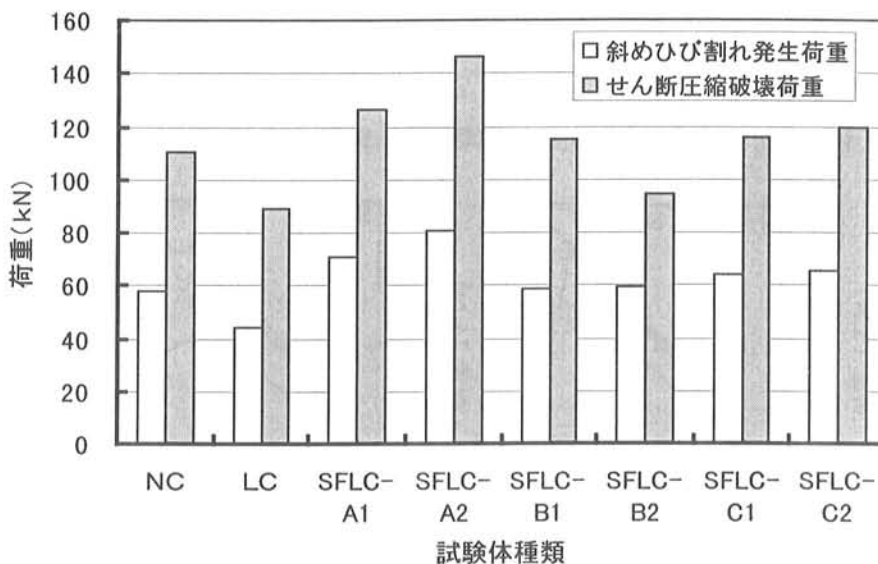


図-9.17 荷重試験結果



サザンヤードカントリークラブ・つり橋(床版に使用)

7. 10 曲げ疲労特性

10.1 はじめに

鋼繊維補強普通コンクリートの曲げ疲労試験は、数は少ないながらも実施されており、その結果ある程度の曲げ疲労特性が解明されている。しかし、人工軽量骨材を用いた鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労特性となると、既往の研究は全くと言ってよいほどない。そこで、本研究では、軽量鋼繊維補強コンクリート(以下、SFLCと記す。)の曲げ疲労特性を明らかにすることを目的として実験を行ったものである。

10.2 試験内容

(1) 使用材料

今回の曲げ疲労試験に使用した材料とその物性を表-10.1に示す。

表-10.1 使用材料

種類	記号	物性(値)
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)
水	W	上水道水
細骨材	S	大井川水系陸砂 表乾比重 2.60 FM=2.74
粗骨材	G	人工軽量骨材 最大寸法15mm 絶乾比重1.28 吸水率26.5%
混和剤	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
鋼繊維	SF	A 両端フック型 $\phi 0.8 \times 60(\text{mm})$
		B インデント型 $\phi 0.7 \times 50(\text{mm})$
		C 波型 $0.25 \times 2.0 \times 50(\text{mm})$

(2) 配合

今回の試験に使用したコンクリートの配合を表 10.2に示す。

(3) 試験方法

今回の曲げ疲労試験に使用した疲労試験機は電気油圧サーボ式の試験機(最大荷重 50tonf セメント協会・研究所所有)で材齢 77 日以降に実施した。荷重方法については、図-10.1 に示す曲げスパン 450mm の 3 等分点荷重とした。試験体の設置状況を写真-10.1 に示す。そ

他の試験条件については、表-10.3に示す。表-10.3 に示した通り、鋼繊維混入のものについては、初期曲げひび割れ強度(前項の試験結果より、鋼繊維3種の平均)の 85,75,65,55%を上限応力として荷重を行った。鋼繊維なしについては、曲げ強度の 85,75,65,55%を上限応力として荷重を行った。疲労試験中でも 200 万回(荷重速度 10Hz の試験体は 400 万回)までで破壊に至らない場合は疲労試験を途中打ち切りとした。ただし、A65-2,A65-3 の2つの供試体については、打ち切り回数をそれぞれ 421.5 万回、850 万回まで延長した。

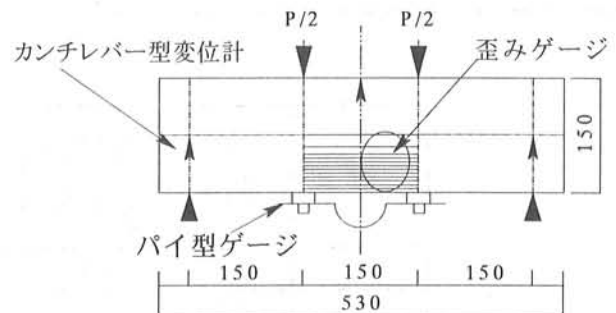


図-10.1 荷重及びゲージ位置

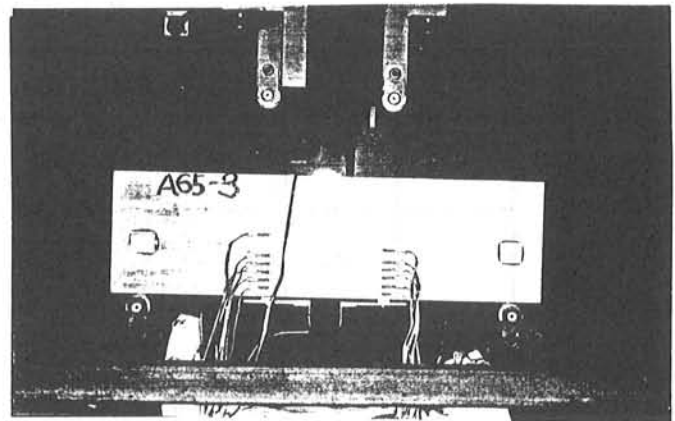


写真-10.1 ゲージ設置

表-10.2 コンクリートの配合

No.	SF混入率 (vol.%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(Kg/m^3)					スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G	SF		
1	0.75	48	56	180	375	949	463	60	18±1.5	5±1
2	0	48	48	180	375	811	549	0		

表-10.3 載荷条件

SF	A,B,C	無混入
曲げ強度 (N/mm ²)	5.86	3.92
初期曲げひび 割れ応力 (N/mm ²)	4.69	3.92
上限応力比 (%)	85, 75 65, 55	
下限応力比 (%)	7.7(一定)	
上限応力 (N/mm ²)	3.99, 3.52 3.05, 2.59	3.33, 2.95 2.55, 2.16
下限応力 (N/mm ²)	0.30(一定)	
載荷波形	正弦波	
載荷速度(Hz)	5 10(上限応力比55%のみ)	

(4) 測定項目

測定項目は次に挙げる4つの項目について測定した。

①たわみ

試験体の中央と左右の支点上に変位計を取り付け、試験体のたわみを測定した。

②底面ひび割れ幅

試験体底面にパイ型変位計を取り付け、試験体に発生したひび割れの幅を測定した。

③上縁歪み

試験体の上縁に歪みゲージを取り付け、試験体の上縁の歪みを測定した。

④歪み進展

試験体の側面に歪みゲージを取り付け、試験体に発生する歪みを測定した。

表-10.4 静的試験結果

単位:N/mm²

SF	4w		13w		17w	
	曲げ強度	曲げ靱性係数	曲げ強度	曲げ靱性係数	曲げ強度	曲げ靱性係数
A	7.01	測定せず	7.95	7.03	7.52	6.53
B	6.77	5.76	5.89	4.62	5.93	4.34
C	6.58	5.17	5.95	2.90	5.24	3.45
無混入	4.23	-	4.91	-	4.43	-

表-10.5 曲げ疲労試験結果

繊維	応力比 (%)	応力 (N/mm ²)	No.	疲労寿命(回)		繊維	応力比 (%)	応力 (N/mm ²)	No.	疲労寿命(回)	
A	85	3.99	1	111,100		C	85	3.99	1	18,600	
			2	22,400					2	1,600	ゲージ外
			3	57,200	スパン外				3	65,400	
	75	3.52	1	298,600			75	3.52	1	1,800	
			2	2,000,000	打切				2	13,800	
			3	508,800	ゲージ外				3	33,400	
	65	3.05	1	1,822,000			65	3.05	1	2,000,000	打切
			2	4,215,000	打切				2	25,200	
			3	8,500,000	打切				3	2,000,000	打切
	55	2.59	1	4,000,000	打切		55	2.59	1	1,186,800	
			2	4,000,000	打切				2	936,200	
			3	300,000	打切				3	406,400	
B	85	3.99	1	40,800		無混入	85	3.33	1	1,170	
			2	97,600					2	910	
			3	8,800	スパン外				3	870	
	75	3.52	1	1,784,000			75	2.95	1	1,070	
			2	448,400					2	4,610	
			3	135,200					3	2,780	
	65	3.05	1	496,200			65	2.55	1	26,400	
			2	1,614,800					2	10,250	
			3	2,000,000	打切				3	99,000	
	55	2.59	1	4,000,000	打切		55	2.15	1	1,657,700	
			2	2,515,600					2	953,410	打切
			3	2,670,150					3	745,570	打切

10.3 結果と考察

(1) 静的試験結果

表-10.4に静的試験結果を示す。前項と同様に、本試験でも繊維混入は繊維無混入の約 1.2~1.7 倍程度大きくなっている。

(2) 疲労試験結果

表-10.5 に曲げ疲労試験結果を示す。表中『スパン外』は曲げひび割れが破壊が最大曲げモーメントスパン外で

起こったもの、『ゲージ外』は最大曲げモーメントスパン内であるが、ひび割れ進展計測のためのゲージ外で破壊したものの、『打切』はそのサイクル数で破壊せず試験を途中で打切ったものを示す。

図-10.2に応力比と疲労サイクル数(疲労寿命)の関係を示す。写真-10.2に破壊状況の一例を示す。

図中→のプロットはその回数に達しても破壊に至らず、そのサイクル数で疲労試験を打ち切ったものを示す。

一般に繊維補強コンクリートの疲労試験では繊維の混

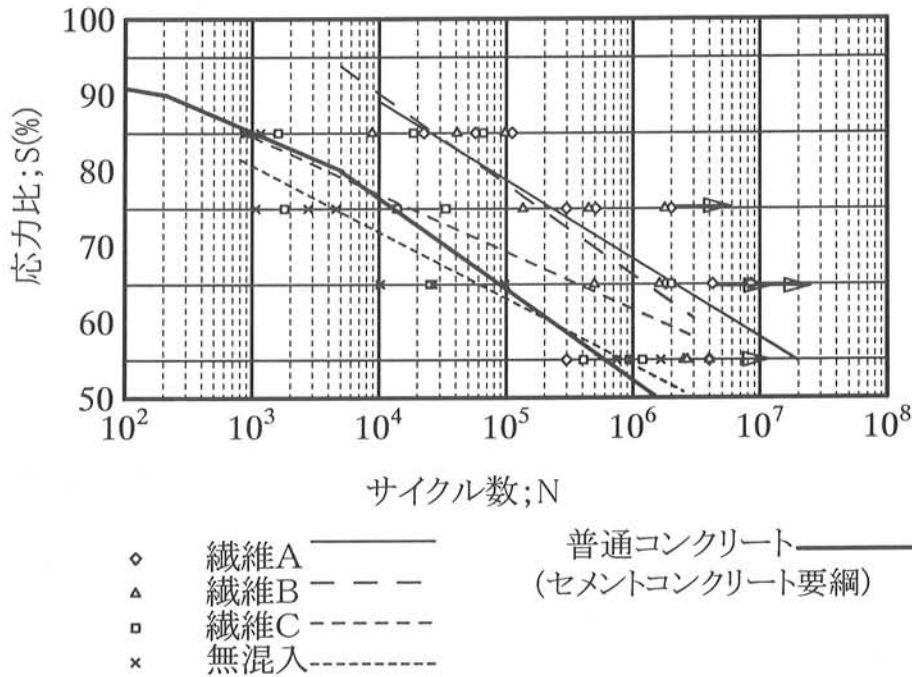


図-10.2 S-N線図

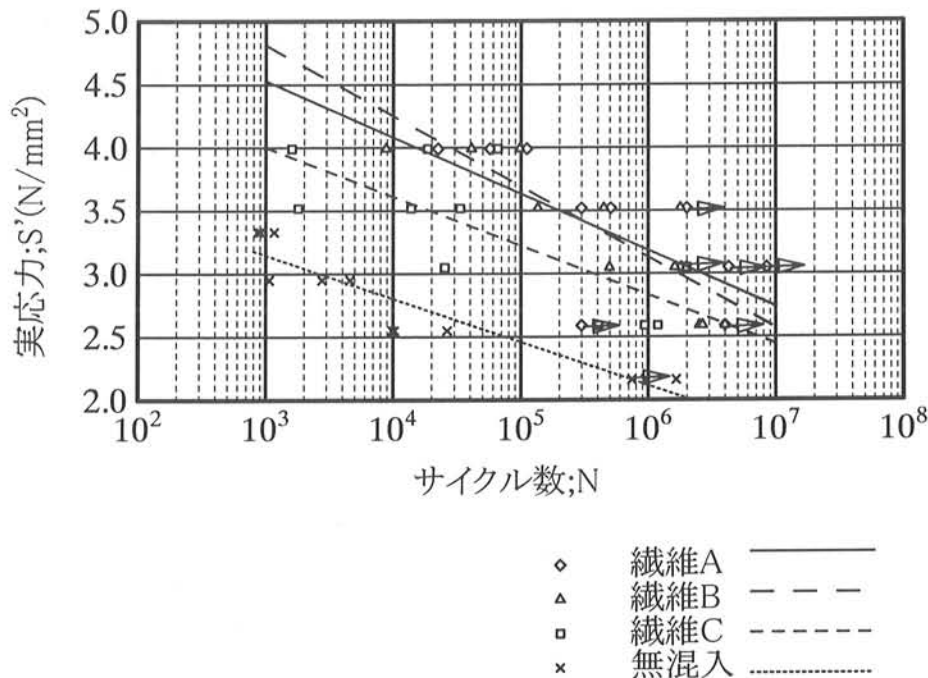


図-10.3 実応力と疲労寿命

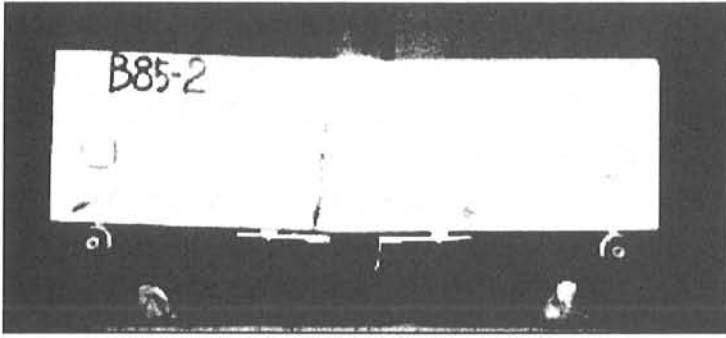


写真-10.2 試験体破壊状況

入のばらつきにより、疲労寿命の変動が大きくなるが、本試験においても疲労寿命のばらつきがみられたが、本試験ではSFLCの200万回疲労強度は繊維Aが上限応力の約65%、繊維Bが上限応力の約62.5%、繊維Cが上限応力の約60.0%となった。繊維無混入の200万回疲労強度が、上限応力の約52%であることから、SFを混入することで大幅な疲労強度の向上となった。これを上限応力と疲労寿命の関係で整理してみると図10.3のようになる。200万回疲労強度は繊維Aが 3.1N/mm^2 、繊維Bが 3.0N/mm^2 、繊維Cが 2.7N/mm^2 となり無混入の約 2.0N/mm^2 と比べると疲労強度は大幅に向上している。

(3) 繊維量と疲労寿命

一般に鋼繊維補強コンクリートの疲労強度は鋼繊維の混入のばらつきによって変動が大きくなるが、本試験でも大きな変動がみられた。そこで、疲労試験後の供試体の破断面における繊維量(本数)を数え、疲労寿命との相関を調べた。繊維量と疲労寿命の関係を図-10.4に示す。図に示すように繊維量が増えると、疲労寿命も延びる傾向にある。

(4) 歪みの進展

図-10.5は供試体側面の歪みゲージにより測定した歪み(引張歪み 200μ をひび割れとみて)の進展状況の一例を示したものである。図-10.5に示したように破壊に至らない試験体ではひび割れが40mmでとまっているものもあった。繊維無混入の試験体では、試験体底面にひび割れが発生すると一気に破壊に至るのに対して、SFLCでは図に示すように徐々に破壊に至る。これは、ひび割れの進展している断面に存在するSFがひび割れの発生に伴って引張応力を分担して抵抗し、コンクリートとの付着が限度に達したのから徐々にコンクリートからSFが抜けるためであると思われる。疲労試験後、試験体の断面を調べてみると破断した鋼繊維はほとんどなく、コン

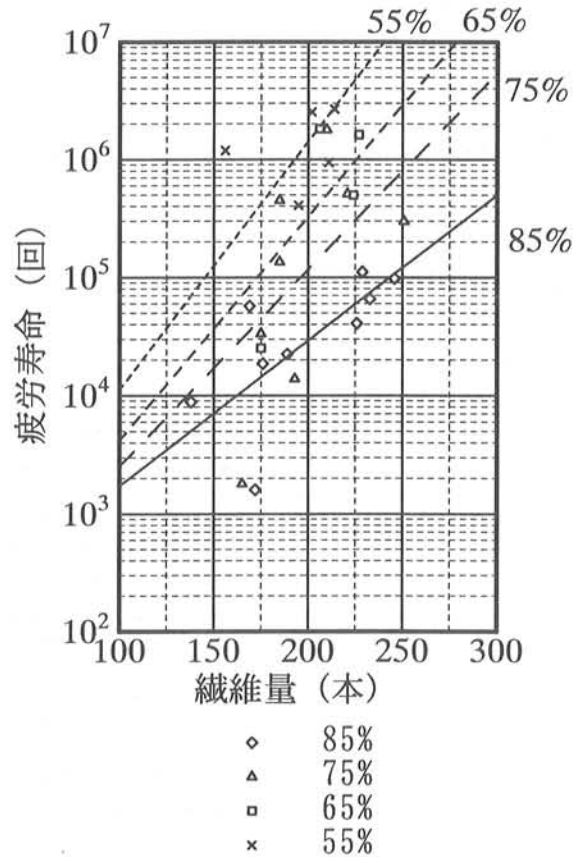


図-10.4 疲労寿命と繊維量の関係

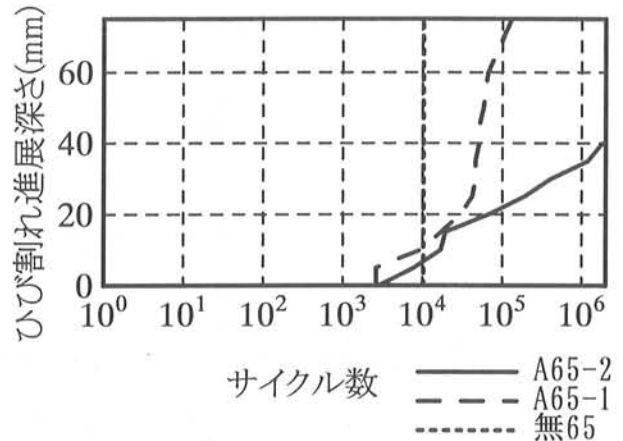


図-10.5 歪みの進展とサイクル数

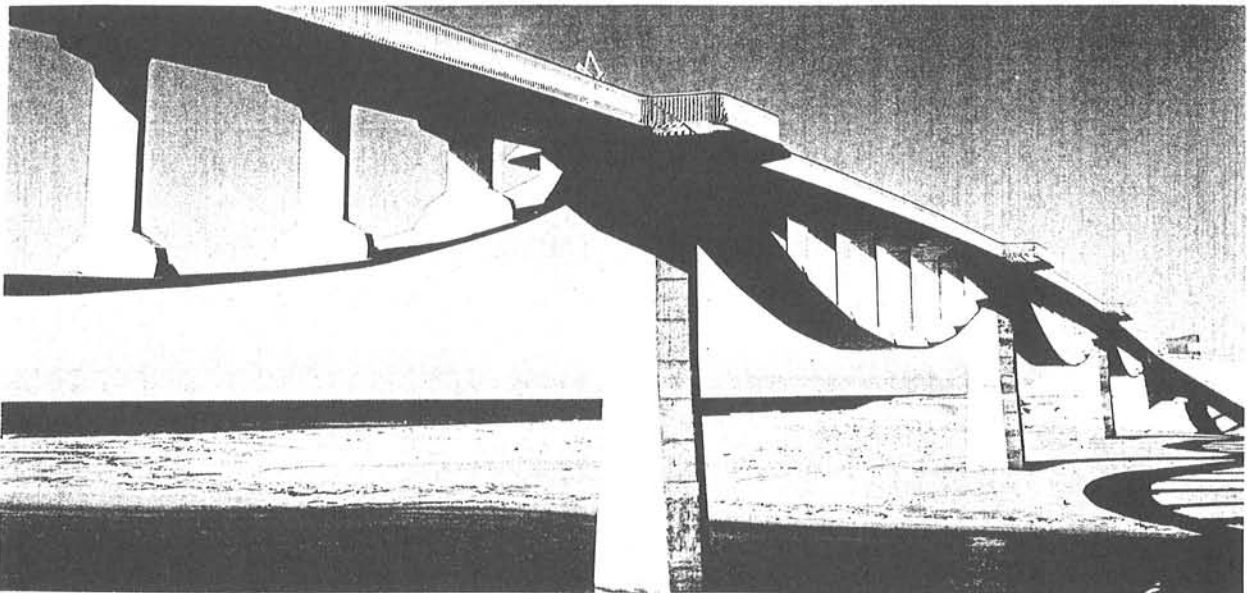
クリートから抜けたものが主であった。

10.4 まとめ

本実験から得られた結論をまとめると以下のようになる。

- LCの200万回疲労強度は静的強度の約52%、実応力で 2.0N/mm^2 である。
- 同一応力におけるSFLCの疲労強度は、繊維無混入に比べて大幅に向上する。
- SFLCの200万回疲労強度は静的強度の60~65%である。

- SFLRC の疲労寿命はひび割れの進展断面の繊維量(本数)との相関性が大きい。
- SFLRC における疲労破壊は繊維無混入のコンクリートのような急激破壊ではなく徐々に破壊に至った。なお、破壊していない試験体では、ひび割れの成長が止まっているものもあった。



浜松御前崎自転車道・潮騒橋（床版に使用）吉田賞受賞