

論文

[1206] 起泡剤を用いた鋼繊維補強コンクリートの混練改善方法に関する基礎的研究

小林 健^{*1}・山田 和夫^{*2}・山本 俊彦^{*3}・渡部 憲^{*4}

1. はじめに

繊維補強コンクリートの力学特性は、一般に繊維混入率を増大させることによって改善できるが、鋼繊維の場合、繊維混入率の上限は、実用的には容積比で2%程度とされている。これは、繊維混入率をこれ以上大きくすると、ミキサーでの混練が困難となり、ワーカビリティなどの所要の性能を得ることができなくなるからである[1]。そのため、本研究では、鋼繊維混入率を2%以上に設定した場合であっても、鋼繊維補強コンクリートの均質な混練を通常のみキサーで容易にできる方法を確認することを目的として一連の検討を行った。すなわち、本研究では、

- ①鋼繊維補強コンクリートの混練性能を向上させるために、起泡剤を使用してベースコンクリート中に空気を混入させることによって混練時の鋼繊維混入率を見掛け上減少させる、
- ②空気量の増大に伴う硬化鋼繊維補強コンクリートの性能低下を回復させるために、打設直前に消泡剤を使用して空気量を所定量に減少させる、

なる一連の混練方法の有用性を調べるための基礎的研究として、まずフレッシュおよび硬化鋼繊維補強コンクリートの諸性質に及ぼす起泡剤量、消泡剤量、鋼繊維混入量、混練時間、ミキサーの種類などの影響について実験的に検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本研究では、表-1に示す組合せ表に従って実験を実施し、鋼繊維補強コンクリートの混練性能および硬化コンクリートの力学特性に及ぼす起泡剤および消泡剤の影響を調べた。すなわち、本実験では、鋼繊維の体積混入率

(V_f : 0、0.5、1.0、1.5、2.0%および限界量(スランプ値が0cmとなる場合)の6種類(ただし、これらは空気量を4%と仮定した場合の数値であるが、以下では簡単のためにこれらの数値を単に鋼繊維体積混入率と呼ぶことにする))、鋼繊維混入後の混練時間(T_m : 1、5、10、15および20分間の5種類)、ミキサーの種類(M_t : 可傾式(容量100l)、パン型強制練り(容量

表-1 実験要因の組合せ表

	混練時間(分)	混練時間(分)				ミキサー種類				起泡剤量(%)				消泡剤量(%)						
		1	5	10	15	20	可傾	強1	強2	オム	無	5	10	15	20	無	1	5	10	
鋼 繊 維 混 入 量	0	●					●					●	●		●	●		●	●	
	0.5	●					●					●								●
	1.0	●					●					●								●
	1.5	●					●					●								●
	2.0	●					●					●	●		●	●		●	●	
	限界	●					●					●	●		●	●		●	●	
%	1.0*	●	◎	●	●	◎	●	●	●			●	◎	●				●	◎	●
	2.0*	●	◎	●	●	◎	●	●	●			●	◎	●				●	◎	●

[注]可傾: 可傾式ミキサー、強1: パン型強制練りミキサー、強2: 2軸強制練りミキサー、オム: オムニミキサー、起泡剤量および消泡剤量: 規定空気量にするのに必要な量、*印行中にある◎印: 他の要因が変動する(●印)時のその要因の固定値を示す。

*1 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻(正会員)
 *2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博(正会員)
 *3 東急建設(株)技術研究所建築研究部建築構造研究室室長、工博(正会員)
 *4 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻(正会員)

100 l)およびオムニ(容量 10 l)ミキサーの 4 種類)、起泡剤の混入量 (Wb : 無混入、ベースコンクリートの空気量が 5、10、15 および 20% となるような量の 5 種類(なお、以下ではこれらの数値を単に起泡剤混入量と呼ぶことにする))、並びに消泡剤の混入量 (Wa : 無混入、ベースコンクリートの空気量が 1、5 および 10% となるような量の 4 種類(なお、以下ではこれらの数値を単に消泡剤混入量と呼ぶことにする)) を実験要因として取り上げた。なお、起泡剤および消泡剤の混入量は、ベースコンクリートの目標空気量と実測空気量の差が 10% 以下となるように定めた。

2.2 試験体の製作および養生方法

(1) 使用材料：本実験では、使用材料として普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂 (最大寸法 = 5mm、表乾比重 = 2.60)、天竜川の川砂利 (最大寸法 = 15mm、表乾比重 = 2.65)、起泡剤 (エア

・セット A)、消泡剤 (AFK-2) および両端せん断型フック付きスチールファイバー (断面 : 0.5mm 角、長さ : 30mm) を使用した。ベースコンクリートの調合は、水セメント比 (W/C) を 60%、起泡剤混入量を 20% とした状態でのスランプが 20cm となるように設定して試し練りによって決定した。本実験で用いたベースコンクリートの調合表を表-2 に示す。

(2) 混練方法：鋼繊維補強コンクリートの製作に際しては、まずセメント、水、細骨材、粗骨材および起泡剤の所定量をミキサー内に同時投入後、一定時間混練してベースコンクリートを製作し、この状態でのフレッシュコンクリートの特性を調べた。次に、鋼繊維を混入して所定時間混練した後、消泡剤混入前の状態でのフレッシュコンクリートの特性を調べた。その後、消泡剤を混入して一定時間混練し、最終段階におけるフレッシュコンクリートの特性を調べた。なお、ベースコンクリートの混練時間は、起泡剤の効果がミキサーの種類および起泡剤量によって相違したため、試し練りの結果を踏まえて可傾式ミキサーの場合が起泡剤量に応じて 1~5 分間、パン型強制練りミキサーの場合が 14 分間、2 軸強制練りおよびオムニミキサーの場合が 3 分間とした。また、消泡剤混入後の混練時間は、いずれの場合も 3 分間とした。

(3) 試験体の製作および養生方法：本実験では、硬化鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度、圧縮強度および曲げ変形特性を調べるために、10x10x40cm の横打ち角柱試験体を用いた。打設に際しては、フレッシュコンクリートの各種特性を調べた後に材料を 2 層に分けて型枠内に投入し、棒状バイブレータを用いて十分に締固めを行った。試験体は、打設後 1 日目に脱型し、その後試験材令 (4 週) まで標準水中養生を行った。試験体は、同一要因毎に 3 個製作した。なお、硬化鋼繊維補強コンクリートの試験は、いずれの場合も湿試験とした。

2.3 測定項目および測定方法

(1) フレッシュコンクリート：混練時の特性を調べるために、鋼繊維混入直前、鋼繊維を混入して所定時間混練した後、並びに消泡剤を混入して一定時間混練した後における空気量 (圧力法および重量法の 2 種類)、スランプおよびフロー値を測定した。空気量およびスランプ試験は、それぞれ JIS A 1128 (ただし、重量法の場合は JIS A 1116) および JIS A 1101 の規定に準じて実施した。なお、空気量の測定値としては、圧力法で求めた結果が 10% 以下の場合には圧力法の結果を、その値が 10% を超えた場合には重量法の結果を採用した。

(2) 硬化コンクリート：材令 4 週の時点における比重、曲げ載荷時の荷重-変位関係、曲げ強度および圧縮強度の測定を行った。硬化コンクリートの試験は、まず試験体の寸法および重

表-2 ベースコンクリートの調合表

W/C (%)	s/a (%)	標準調合 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
60	39	200	333	694	1106

[注] W/C : 水セメント比、s/a : 細骨材率。

量を測定した後、JIS A 1106の規定に準じて曲げ載荷を行い、荷重-変位関係および曲げ強度の測定を行った。また、曲げ試験終了後、試験体切片の一方をJIS R 5201の規定に準じて圧縮載荷を行い、圧縮強度の測定を行った。ただし、曲げ載荷に際しては、加力点を一方がピンで他方がローラーとなるように、支持点を2点ともローラーとなるように設定し、最大曲げ耐力以降の中央たわみ速度を曲げスパンに対して1/1500/min.となるように載荷した[2]。なお、荷重および変位(中央たわみ)データは、動ひずみ計およびX-Yレコーダを用いて自記記録した。

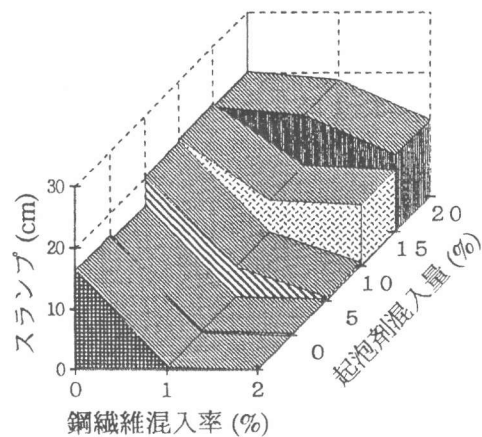


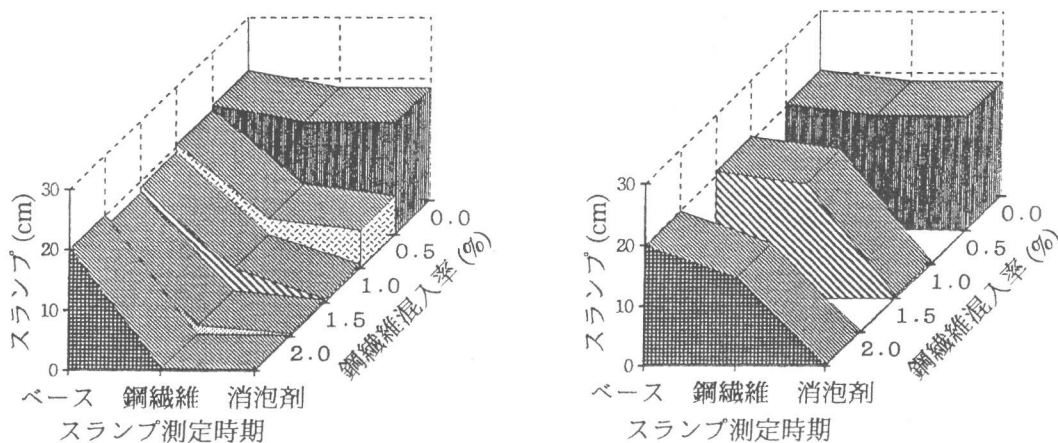
図-1 スランプに及ぼす起泡剤の影響 ($W_a=0\%$)

3. 実験結果とその考察

3.1 フレッシュコンクリートの特性

図-1は、消泡剤を混入していない場合の鋼繊維補強コンクリートの実測スランプと鋼繊維体積混入率 (V_f) および起泡剤混入量 (W_b) との関係を示したものである。図によれば、 W_b 値が5%以下の場合には、鋼繊維補強コンクリートのスランプに及ぼす起泡剤混入の効果は殆ど認められないが、 V_f 値が1%の場合には $W_b=10\%$ 以上、 V_f 値が2%の場合には $W_b=15\%$ 以上になると、鋼繊維補強コンクリートのスランプは著しく増大しており、起泡剤を混入することによって鋼繊維補強コンクリートの混練性能が改善されることがわかる。また、図-2(a)および(b)は、起泡剤混入量 (W_b) がそれぞれ10%および20%で、消泡剤混入量 (W_a) が5%の場合の鋼繊維補強コンクリートの実測スランプとスランプ測定時期および鋼繊維体積混入率 (V_f) との関係を示したものであるが、消泡剤を混入することによって、スランプは起泡剤を混入していない場合と同程度まで低下している。なお、鋼繊維体積混入率 (V_f) の限界値は、本実験の範囲では、起泡剤を混入しない ($W_b=0\%$) 場合が $V_f=2\%$ 、 $W_b=10\%$ の場合が $V_f=3\%$ 、 $W_b=20\%$ の場合が $V_f=5.5\%$ であった。

図-3は、消泡剤混入前の時点で実測した鋼繊維補強コンクリートのスランプに及ぼす使用ミ



(a) $W_b=10\%$ の場合

(b) $W_b=20\%$ の場合

図-2 スランプに及ぼすスランプ測定時期の影響 ($W_a=5\%$)

キサーの影響を示したものである。図によれば、鋼繊維補強コンクリートの実測スランプは、一般的に可傾式、オムニ、パン型強制練りおよび2軸強制練りミキサーの順に次第に増大しており、鋼繊維補強コンクリートの混練性能が使用ミキサーによってかなり相違する[3]ことを示している。このことは、鋼繊維補強コンクリートの混練性能を向上させるための最適起泡剤混入量がミキサーの種類によって変化することを意味しているが、本実験で使用したミキサーの容量が一部相違しているため、得られた結果を直接比較するには問題がある。したがって、鋼繊維補強コンクリートの混練性能に及ぼすミキサーの影響を定量的に明らかにするためには、今後更に詳細に検討を加える必要がある。

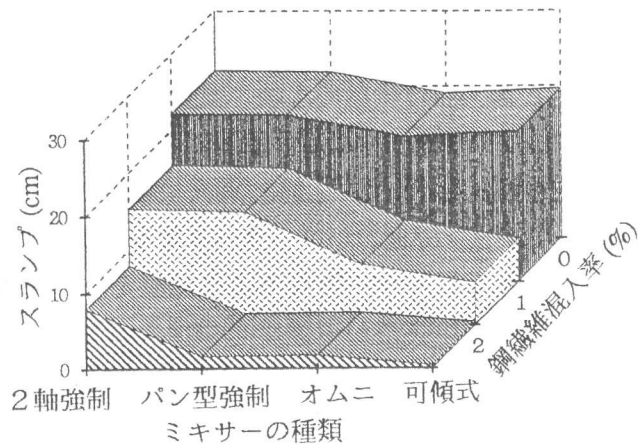


図-3 スランプに及ぼすミキサーの影響 (Wb=10%、Wa=5%)

3.2 硬化コンクリートの特性

(1) 強度特性：図-4は、起泡剤混入量 (Wb) を 10% とした場合の鋼繊維補強コンクリートの曲げおよび圧縮強度に及ぼす起泡剤および消泡剤の影響を鋼繊維体積混入率 (Vf) 別に示したものである。図によれば、鋼繊維体積混入率 (Vf) が 0、1 および 2% の鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度は、起泡剤の混入によってそれぞれ 18%、11% および 8% 低下し、Vf 値が小さいほど起泡剤の影響が顕著となっているが、圧縮強度の低下率は、それぞれ 17%、24% および 25% となっており、起泡剤の影響は曲げ強度の場合とは逆に Vf 値が大きいほど著しくなっている。これは、圧縮強度よりも曲げ強度の方が一般的に鋼繊維混入による強度増大が著しい[4]ため、空気などの欠陥の影響を受けにくいと思われる。また、起泡された鋼繊維補強コンクリートに消泡剤 (Wa) を混入して空気量を減少させる (ベースコンクリートの空気量で 5%) と、曲げおよび圧縮強度は、起泡剤を混入していない場合 (Wb=0%) 程度まで回復しているのがわかる。例えば、Vf=0、1 および 2% 試験体の Wb=0% に対する強度回復率は、曲げ強度がそれぞれ 97%、106% および 109%、圧縮強度がそれぞれ 89%、88% および 87% であり、一

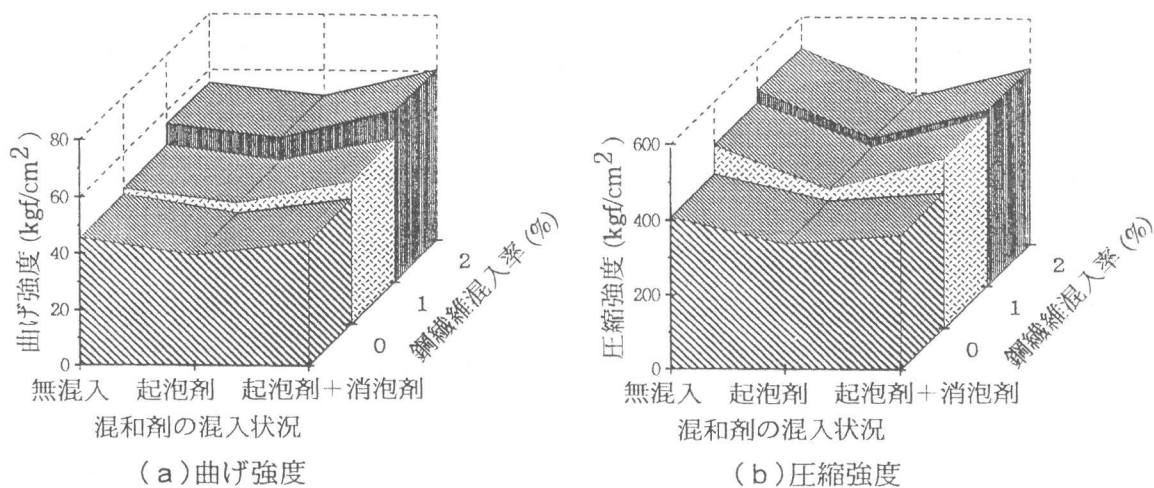


図-4 強度に及ぼす起泡剤・消泡剤の影響 (Wb=10%、Wa=5%)

一般的に曲げ強度の方が強度回復率が大きくなる傾向を示している。なお、紙数の関係で図には示していないが、 $W_b=20\%$ の場合には、鋼繊維混入の影響よりも空気量の影響の方が勝ったためか、 $V_f=0, 1$ および 2% に対する強度低下率は、曲げ強度の場合がそれぞれ 36% 、 42% および 34% 、圧縮強度の場合がそれぞれ 66% 、 77% および 66% となり、強度に及ぼす起泡剤の効果は鋼繊維体積混入率によって相違するという $W_b=10\%$ の場合のような現象は認められなかった。

図-5 (a) および (b) は、それぞれ起泡剤混入量 (W_b) が 10% で、消泡剤混入量 (W_a) が 5% の鋼繊維補強コンクリートの曲げおよび圧縮強度に及ぼすミキサー種類の影響を鋼繊維体積混入率 (V_f) 別に示したものである。これらの図によれば、曲げおよび圧縮強度ともに2軸強制練りミキサーを用いた場合の強度が最も大きく、オムニ、パン型強制練りおよび可傾式ミキサーという順に強度が次第に低下

していく傾向を示している。また、鋼繊維補強コンクリート強度に及ぼす使用ミキサーの影響は、一般的に鋼繊維混入量が多いほど著しくなっている。

(2) 変形特性：図-6は、起泡剤混入量 (W_b) を 10% に設定した場合の曲げ試験体によって得られた荷重 (P) - 変位 (δ) 関係を鋼繊維体積混入率 (V_f) および消泡剤混入量 (W_a)

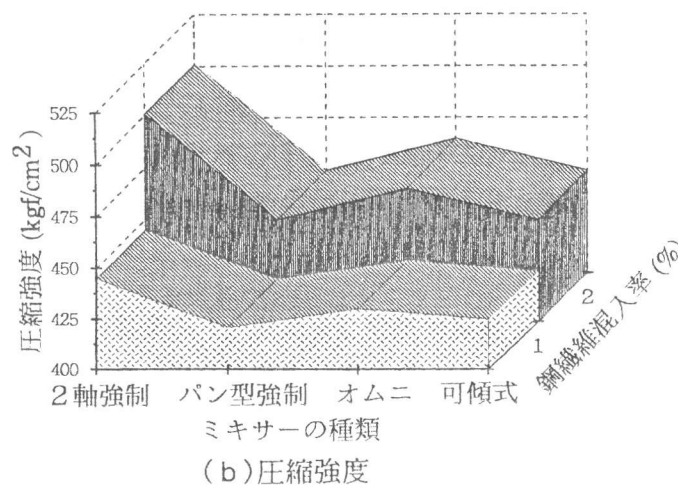
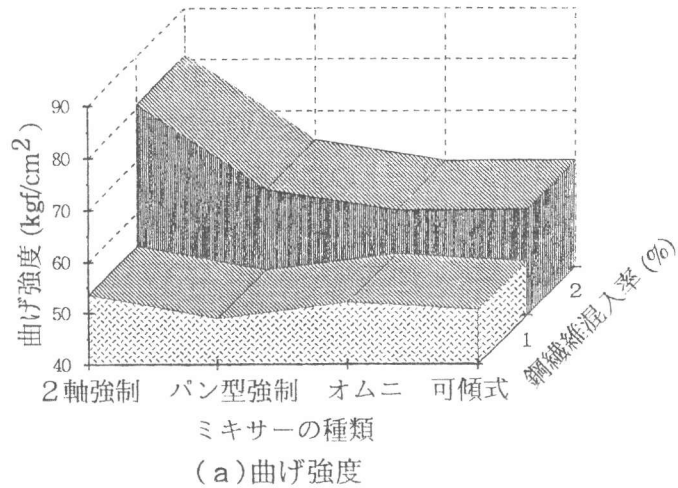


図-5 強度に及ぼすミキサーの影響 ($W_b=10\%$ 、 $W_a=5\%$)

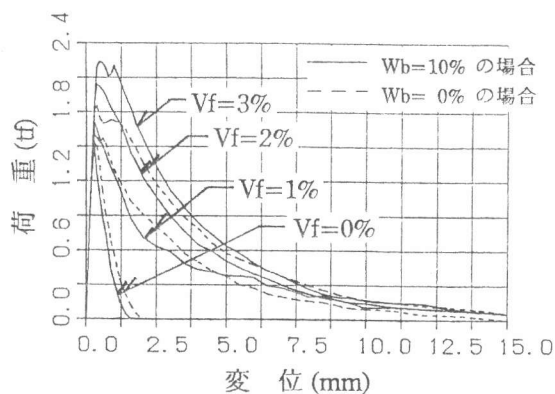
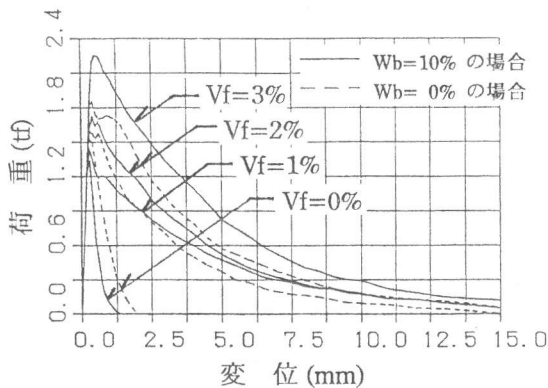


図-6 荷重-変位関係に及ぼす鋼繊維の影響 ($W_b=10\%$)

別に示したものである。なお、これらの図中には起泡剤を混入していない場合 ($W_b=0\%$) の結果も併示してある。図によれば、最大耐力が起泡剤の混入によって $W_b=0\%$ の場合と比較して若干低下しているためか、最大耐力以降の $P-\delta$ 関係は、図 (a) から明らかなように $W_b=0\%$ の場合と比べてかなり延性的な形状を示しているが、消泡剤を混入して空気量を減少させる (ベースコンクリートの空気量で 5%) と、図 (b) に示すように最大耐力は $W_b=0\%$ の場合と同等かまたはそれ以上に回復するため、全体的な $P-\delta$ 関係も $W_b=0\%$ の場合相当の形状となっている。特に、起泡剤を混入していない場合 ($W_b=0\%$) の限界鋼繊維体積混入率 (V_f) が 2% であったのに対して、起泡剤混入量 (W_b) を 10% とすることによって限界 V_f 値が 3% まで向上し、かつ消泡剤の混入によって最大耐力および全体的な $P-\delta$ 特性を著しく改善できるということは、起泡剤および消泡剤を用いた一連の鋼繊維補強コンクリートの混練方法の有用性を示唆しているものと考えられる。なお、 $W_b=20\%$ とした場合には、消泡剤による最大耐力および $P-\delta$ 関係の改善効果は、 $W_b=10\%$ とした場合ほどには認められなかった。これは、本実験では消泡剤混入量をベースコンクリートの空気量に基づいて決定しているため、 $W_b=20\%$ の場合、消泡剤の混入による鋼繊維補強コンクリートの空気量が設定通りに減少していなかったためではないかと思われる。この点については、消泡剤混入量を鋼繊維補強コンクリートの空気量で決定するなどの対策を講じることによってある程度解消できるものと考えられる。

4. 結論

本研究では、鋼繊維補強コンクリートの混練性能および硬化後の各種力学特性を向上させることを目的として、起泡剤および消泡剤を用いた一連の混練方法の可能性について実験的に検討を行った。本研究によって得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 起泡剤の混入によって、同一調合の鋼繊維補強コンクリートのスランプが著しく増大するため、限界鋼繊維混入量を起泡剤混入量に応じて増大させることができるとともに、鋼繊維補強コンクリートの混練性能も著しく改善できる。
- 2) 鋼繊維補強コンクリートの強度および全体的な $P-\delta$ 特性は、起泡剤の混入に伴う空気量の増大によって低下するが、起泡剤を混入した混練の最終段階で消泡剤を混入して空気量を減少させることによって、起泡剤無混入の鋼繊維補強コンクリートの場合と同等かもしくはそれ以上にまで各特性を回復させることが可能である。
- 3) 鋼繊維補強コンクリートの混練性能および硬化後の各種力学特性は、使用ミキサーおよび混練時間によってかなり相違するため、最適の起泡剤混入量および消泡剤混入量を決定するためには、これらの影響についても十分に検討しておく必要がある。

謝 辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た愛知工業大学学生の中田臣一君および中村敏幸君、並びに起泡剤および消泡剤を提供して頂いた竹本油脂(株)の下野氏に対して謝意を表します。

引用文献

- 1) 魚本健人：短繊維補強コンクリート、コンクリート工学、Vol.31、No.3、pp.83-87、1993.3
- 2) 繊維補強コンクリート研究小委員会：繊維補強コンクリートに関する試験方法の JCI 規準案、コンクリート工学、Vol.20、No.10、pp.4-7、1982.10
- 3) 魚本健人・西村次男：練り混ぜがコンクリートの品質に及ぼす影響、セメント技術年報、第 41 巻、pp.189-192、1987
- 4) 小林一輔：鋼繊維補強コンクリート -特性と応用-、オーム社、1981