

正会員 柴田 拓二 城 攻
田中 道治 (北海道大学)

1. 目的

モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮亀裂を制御する方法としては、調合、打設、養生条件などの改善によって収縮量の絶対値を小さくすることが本質的な対策であるが、現在建築構造物に一般に用いられているような軟練りの調合では亀裂の発生を避けることはできない。一つの対策として、適当な配筋を施して鉄筋の内部拘束によって亀裂幅が有害でない程度に亀裂を分散させることが行なわれる。同様に、鋼繊維の混入が収縮亀裂の制御に有効であろう。しかし、鋼繊維補強モルタル、コンクリートの力学性状に関する研究報告が既に内外に多数行なわれている中で、収縮拘束効果に関するものは比較的少数である。本報では既往の実験資料で直接対象とされていない鋼繊維のアスペクト比が収縮拘束に及ぼす効果についてモルタルを用いて検討した結果(実験Ⅰ)と鋼繊維の収縮拘束効果と鉄筋の効果を対比して検討した結果(実験Ⅱ)について報告する。

2. 既往の研究資料の概要

鋼繊維による収縮亀裂制御の効果を直接計測したものとしては、R. H. Elvery 他(1975)¹⁾と中西他(1977)²⁾の報告がある。前者は、RC部材の加力試験前の乾燥期間をパラメータとして加力試験時における一定亀裂幅に対応する見掛けの鉄筋応力と鋼繊維混入率の関係を検討したもので、容積混入率($\rho_v = V_f / (V_m + V_f)$) 0.8%、2.0%の場合の有効性を確かめている。後者は、スランプ15cmの建築用コンクリートについて、 $\rho_v \geq 1.0\%$ で鋼繊維の収縮拘束効果が明瞭であること、1.5%で明らかな亀裂分散効果が得られることを報告している。

国内における他の研究は、モルタルおよびコンクリートについて鋼繊維の混入率と供試体の長さ変化率との関係を検討したもので、大凡表-1のようである。岸谷と高木はマトリックス自身の自由収縮率も計測しているが、向井、大浜の実験では軟度を大凡一定とするために混入率によってマトリックスの調合を変えたものを無混入の場合の自由収縮と対比しているので資料の意味に若干の相違がある。この差異を無視して、表-1の諸家の実験結果を $\rho_v = 0$ のときの自由収縮率に対する比で整理すると図-1のようである。これによれば、コンクリートに関する高木と大浜の実験結果は、アスペクト比の差異にかかわらず、混入率と収縮拘束効果の関係がよく一致している。モルタ

表-1 既往の研究の概要

発表者	供試体	鋼繊維 d mm	l/d	調 合 w/c (%)	sl (cm) 7mm	C : S : G	混入率 ρ_v (%)	摘 要
岸谷 ³⁾ 1975	モルタル	100		60		1 : 2	0 ~ 0.9	$\rho_v > 0.6$ では拘束効果の増分小
向井 ⁴⁾ 1976	モルタル 40×40 ×160mm ³	0.5	60	60	170	1 : 2.00 S	0 ~ 5.0	・フロー値を大凡一定として混入率によりC:Sと調正 ・鋼繊維混入は大幅な収縮低減効果を示す
		0.25	100			1 : 2.09 S 1 : 3.45	0 ~ 4.0	
高木 ⁵⁾ 1977	コンクリート 100×100 ×400mm ³	0.3	100	50	15	1 : 2.55 : 1.13 S 1 : 1.77 : 0.79	0 ~ 2.0	・各混入率のマトリックスコンクリートの自由収縮も計測 ・ $\rho_v \geq 1\%$ で収縮拘束効果あり
大浜 ⁶⁾ 1978	コンクリート 100×100 ×400mm ³	0.5	60	54 S	10	1 : 2.59 : 1.68 S	0 ~ 2.0	C = 400g/m ³ 一定として調 合を調正 ・混入率増大とともに収縮率小となり低減効果を認む C = 500g/m ³ 一定として調 合を調正
				61 S 43 S 47		1 : 2.38 : 1.58 S 1 : 1.96 : 1.28 S 1 : 1.84 : 1.20		

方が大きいもの ($l/d=100$) よりも拘束効果が大きい結果となっている。

3. 実験 I

(1) 材料

セメント N社普通ポルトランドセメント
 砂 豊浦産標準砂
 鋼繊維 $0.4\text{ mm } \phi$, $l=8, 17, 34\text{ mm}$
 ($l/d=20, 42, 85$)

(2) 調合および混練

水セメント比 0.6
 重量調合比 $C:S=1:1.49$ (乾燥砂)
 フロー 260 mm

全供試体のモルタルは同一調合とし、モルタル混練後、撈拌しながら鋼繊維と所要量まで少量づつ加えて練上げる。

(3) 供試体 供試体寸法は $60 \times 60 \times 300\text{ mm}^3$ で、鋼繊維混入率は各アスペクト比につき、それぞれ 1, 2, 3% とし、 $p_v=0$ を含めて 10 種である。供試体は打込後、 $18 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $58 \pm 5\%$ R.H. の室内に静置し、杖令 3 日で脱型した。

(4) 計測 供試体上面に検長 200 mm の標尺を設定し、コンパレータを用いて長さ変化を計測した。

(5) 実験結果 杖令 3 日を基準とする各試験体の収縮率の推移を図-2 (a) ~ (f) に示す。

(a) ~ (c) は、同一アスペクト比における鋼繊維混入率毎の収縮曲線の対比である。いずれも混入率の増大とともに収縮率の低減が見られるが、アスペクト比によって拘束効果に差が見受けられる。(d) ~ (f) は、同一鋼繊維混入率における各アスペクト比の収縮曲線の対比を示す。 $p_v=1\%$ では、アスペクト比の大小にかかわらず収縮拘束効果が僅小である。 $p_v=2\%$ では収縮拘束効果が明瞭に認められるが、アスペクト比による差は僅小である。 $p_v=3\%$ においては、収縮拘束効果が一層明瞭であるとともに、アスペクト比 20, 40 に比べて

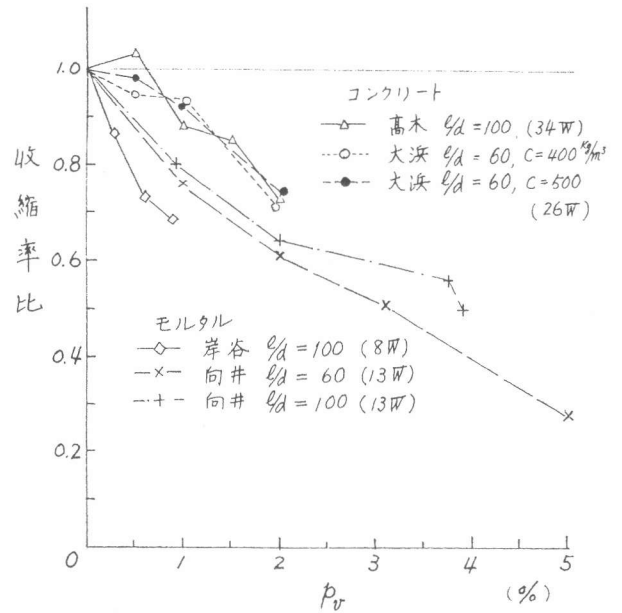
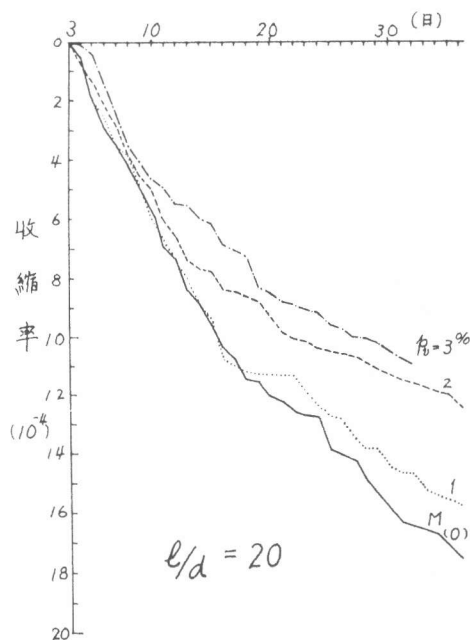
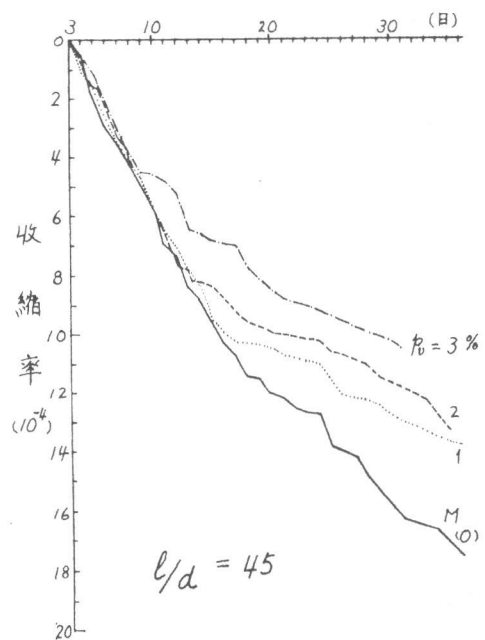


図 - 1



(a)



(b)

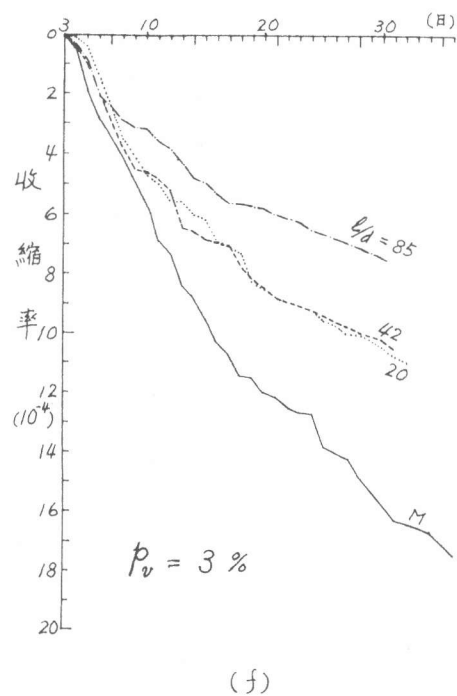
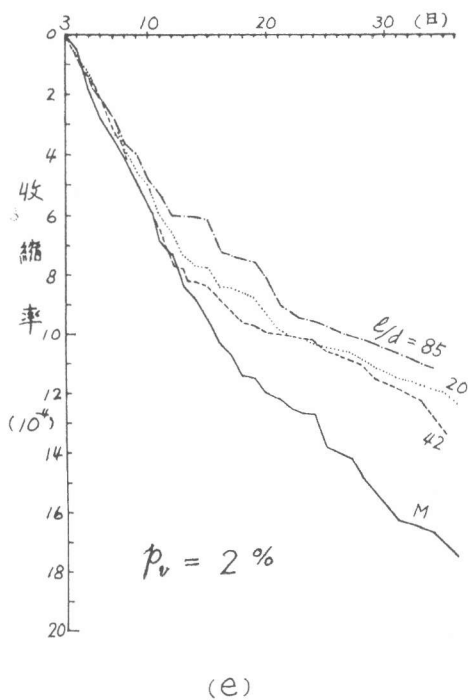
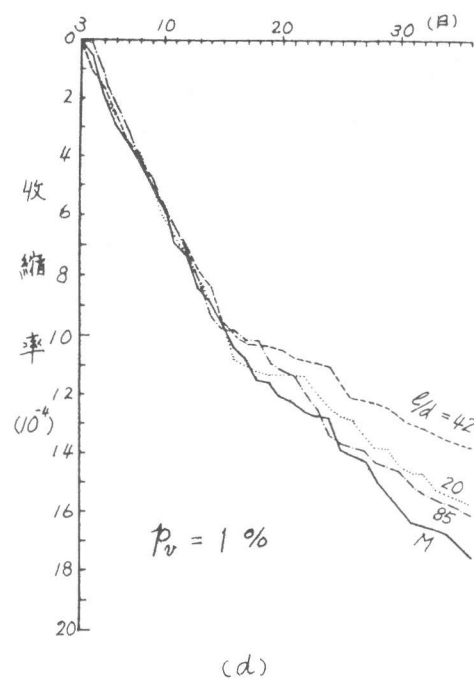
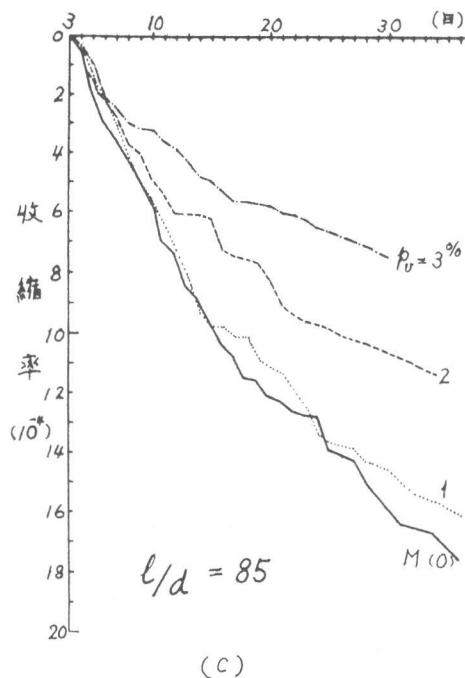


図 - 2

アスペクト比 85 における収縮低減が著しく顕著である。これに対してアスペクト比 20 と 40 の差異はほとんど認められない。アスペクト比の効果と論ずる場合、供試体の断面寸度と繊維素実長との関連で、断面周辺部における繊維素の配向拘束を考慮しなければならないが、著者が先に提示した略算式⁷⁾によって配向拘束係数(完全ランダム配向に対する補正係数)を求めると、断面 $60 \times 60 \text{ mm}^2$ に対しアスペクト比 20 (8 mm) で 1.04, 42 (17 mm) で 1.09, 85 (34 mm) で 1.19 となる。実験結果は概ねこれらの数値に相当する程度に収縮拘束効果がランダム配向時よりも高まっているものと考えなければならないが、 $p_v = 3\%$ におけるアスペクト比 85 の収縮拘束効果はこのような補正を行ってもなお顕著である。

4. 実験 II

(1) 材料

セメント N社普通ポルトランドセメント

砂 北海道産 F.M. = 2.78, 比重 2.57

銅繊維 $0.4\text{mm}\phi$, $l = 34\text{mm}$, ($l/d = 85$)

(2) 調合および混練

水セメント比 0.6

重量調合比 C : S = 1 : 2.5 (乾燥砂)

フロー 260mm

銅繊維補強モルタルの混練は実験Iと同様の要領で行った。

(3) 供試体 供試体寸法は $60 \times 60 \times 300\text{mm}^3$ で、銅繊維混入率は 0, 1.45, 2.9 % の3種。他に、銅繊維による収縮拘束効果を鉄筋の効果と比較するため、断面中心に異形筋 1-D10 (2.0%), 1-D13 (3.7%) を配した2種を加え、計5種の供試体を作製した。

(4) 計測 モルタル打設30分後から材令9時間までの特異収縮³⁾ (初期収縮) による長さ変化を標長200mmについてコンパレータによって計測した。

(5) 実験結果 計測結果を図-3に示す。

このモルタルの特異収縮は9時間後には約 35×10^{-4} に達して大凡停止しはじめているが、銅繊維または鉄筋で拘束されているものは更に1~2時間早く停止している。特異収縮はモルタルの剛性がほとんど0に近い極めてプラスチックな状態で生ずるので、一般の乾燥収縮より拘束効果が顕著に現われるものと考えられるが、材令9時においてグリーンモルタルの収縮率に対する補強モルタルの収縮率の比は $p_0 = 1.45\%$ で大凡0.4、 $p_0 = 2.9\%$ で約0.1である。これに対して鉄筋による拘束の結果はD10 (2.0%) で0.45、D13 (3.7%) で約0.3で、同等の鋼材量についてランダム配向の銅繊維の方が鉄筋を用いるよりも有効であることが判る。

5. 結 語

本実験のモルタルの自由収縮率に対する銅繊維補強モルタルの収縮率の比を取纏めて図-4に掲げる。

銅繊維の収縮拘束におけるアスペクト比の影響は $p_0 \leq 2\%$ では明瞭ではないが、 $p_0 = 3\%$ においては $l/d \leq 42$ ならば拘束効果に影響がなく、 $l/d = 85$ の場合に著しい拘束効果を示した。また、銅繊維による収縮拘束は同等の容積比の鉄筋による拘束よりも効果的であることを確かめた。

文 献

- 1) Elvery, R.H., Samari, M.A.: Reduction of Shrinkage Cracking in R.C. due to the Inclusion of Steel Fibres, RILEM Symp., '75.
- 2) 中西正俊, 高木卓二, 奈良裕徳: 銅繊維補強コンクリートの容積変化による収縮ひびわれ抵抗性の検討, 日本コンクリート工学協会シンポジウム, '77.
- 3) 岸谷孝一, 橋 高幸: 金属繊維強化モルタルの物理的性状, 日本建築学会大会, '75.
- 4) 向井 毅, 比佐直雄: 銅繊維と混入したモルタルおよびコンクリートの基礎的性質に関する検討, セメント技術年報, XXX, '76.
- 5) 高木卓二, 奈良裕徳, 中西正俊: スランフ15cmの銅繊維補強コンクリート, 日本建築学会大会, '77.
- 6) 大沢嘉彦, 西村正, 蜂須賀裕嗣: 銅繊維補強コンクリートの基礎的性状, 日本建築学会大会, '78.
- 7) 大野和男, 柴田拓二, 小西秀利: 銅繊維補強コンクリートの引張強度および曲げ強度理論式, 日本コンクリート工学協会シンポジウム '77.
- 8) 大野和男: モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究, 北工学会研究報告, No.9, '53.

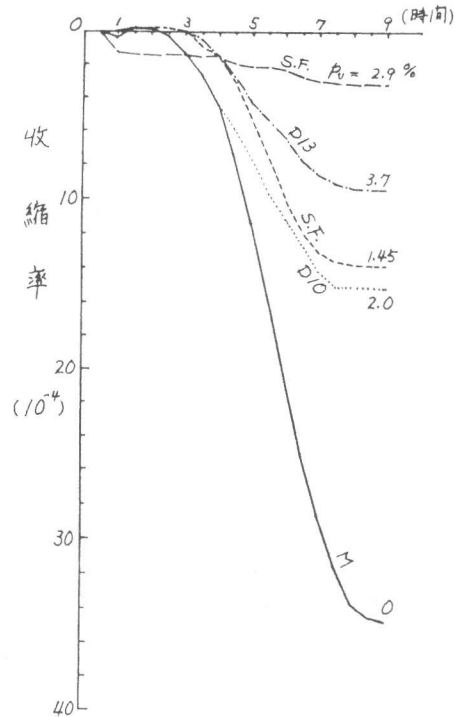


図 - 3

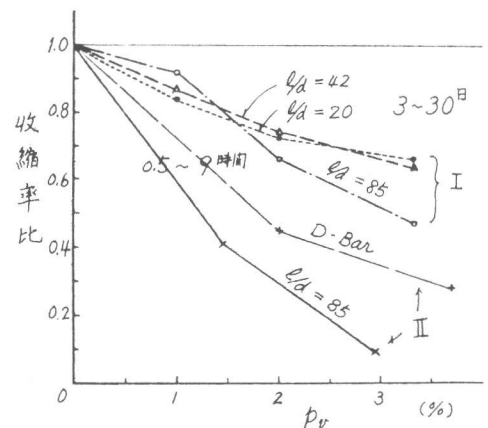


図 - 4

1. 目的

モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮亀裂を制御する方法としては、調合、打設、養生条件などの改善によって収縮量の絶対値を小さくすることが本質的な対策であるが、現在建築構造物に一般に用いられているような軟練りの調合では亀裂の発生を避けることはできない。一つの対策として、適当な配筋を施して鉄筋の内部拘束によって亀裂幅が有害でない程度に亀裂を分散させることが行なわれる。同様に、銅繊維の混入が収縮亀裂の制御に有効であろう。しかし、銅繊維補強モルタル、コンクリートの力学性状に関する研究報告が既に内外に多数行なわれている中で、収縮拘束効果に関するものは比較的少数である。本報では既往の実験資料で直接対象とされていない銅繊維のアスペクト比が収縮拘束に及ぼす効果についてモルタルを用いて検討した結果(実験Ⅰ)と銅繊維の収縮拘束効果と鉄筋の効果を対比して検討した結果(実験Ⅱ)について報告する。

2. 既往の研究資料の概要

銅繊維による収縮亀裂制御の効果を直接計測したものとしては、R. H. Ehlury 他(1975)¹⁾と中西他(1977)²⁾の報告がある。前者は、RC部材の加力試験前の乾燥期間をパラメータとして加力試験時における一定亀裂幅に対応する見掛けの鉄筋応力と銅繊維混入率の関係を検討したもので、容積混入率($P_v = V_f / (V_m + V_f)$) 0.8%, 2.0%の場合の有効性を確かめている。後者は、スランプ15^{cm}の建築用コンクリートについて、 $P_v \geq 1.0\%$ で銅繊維の収縮拘束効果が明瞭であること、1.5%で明らかな収縮分散効果が得られることを報告している。

国内における他の研究は、モルタルおよびコンクリートについて銅繊維の混入率と供試体の長さ変化率との関係を検討したもので、大凡表-1のようである。岸谷と高木はマトリックス自身の自由収縮率も計測しているが、向井、大浜の実験では繊維混入率にかかわらず軟度を大凡一定とし、混入率によってマトリックスの調合を変えたときの収縮率を混入率0の場合の自由収縮率と対比しているので資料の意味に若干の相違がある。この差異を無視して、表-1の諸家の実験結果を $P_v = 0$ のときの自由収縮率に対する比で整理すると図-1のようである。これによれば、コンクリートに関する高木と大浜の実験結果は、アスペクト比の差異にかかわらず、混入率と収縮拘束効果の関係がよく一致している。モルタルについては、岸谷の実験では $P_v \geq 0.6\%$ で収縮拘束効果の増分が小さくなっ

表-1 既往の研究の概要

発表者	供試体	銅繊維 d mm	l/d	調 合 W/C (%)	dl ($\frac{cm}{mm}$)	$C : S : G$	混入率 P_v (%)	摘 要
岸谷 ³⁾ 1975	モルタル		100	60		1 : 2	0 ~ 0.9	$P_v > 0.6$ では拘束効果の増分小
向井 ⁴⁾ 1976	モルタル 40×40 ×160 ^{mm}	0.5	60	60	170	1 : 2.00 S	0 ~ 5.0	・フロー値を大凡一定として混入率によりC:Sを調整 ・銅繊維混入は大幅な収縮低減効果を示す
		0.25	100			1 : 2.09 S 1 : 3.45	0 ~ 4.0	
高木 ⁵⁾ 1977	コンクリート 100×100 ×400 ^{mm}	0.3	100	50	15	1 : 2.55 : 1.13 S 1 : 1.77 : 0.79	0 ~ 2.0	・各混入率のマトリックスコンクリートの自由収縮も計測 ・ $P_v \geq 1\%$ で収縮拘束効果あり
大浜 ⁶⁾ 1978	コンクリート 100×100 ×400 ^{mm}	0.5	60	54 S		1 : 2.59 : 1.68 S	0 ~ 2.0	・混入率増大とともに収縮率小となり低減効果を認む ・ $C = 400 \text{ kg/m}^3$ 一定として調合を調整 ・ $C = 500 \text{ kg/m}^3$ 一定として調合を調整
				61 S 43 S 47		1 : 2.38 : 1.58 1 : 1.96 : 1.28 S 1 : 1.84 : 1.20		

ているのに対し、向井の実験では $P_v \leq 5.0\%$ まで収縮率がほぼ直線的に低減している。また、向井によれば、繊維径が異なっているがアスペクト比の小さい($l/d = 60$)、方が大きいもの($l/d = 100$)よりも拘束効果が大きい結果となっている。

3. 実験 I

(1) 材料

セメント N社製普通ポルトランドセメント
 砂 豊浦産標準砂
 鋼繊維 $0.4\text{ mm}\phi$, $l=8, 17, 34\text{ mm}$
 ($l/d=20, 42, 85$)

(2) 調合および混練

水セメント比 0.6
 重量調合比 $C:S=1:1.49$ (乾燥砂)
 フロー 260 mm

全供試体のモルタルは同一調合とし、モルタル混練後、撈拌しながら鋼繊維を所要量まで少量づつ加えて練上げる。

(3) 供試体

供試体寸法は $60 \times 60 \times 300\text{ mm}^3$ で、鋼繊維混入率は

各アスペクト比につき、それぞれ 1, 2, 3 % とし、 $P_v=0$ を含めて 10 種である。供試体は打込後、 $18 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $58 \pm 5\%$ の室内に静置し、材令 3 日で脱型した。

(4) 計測

供試体上面に検長 200 mm の標点を設定し、コンパレータを用いて長さ変化を計測した。

(5) 実験結果 材令 3 日を基準とする各試験体の収縮率の 14 週までの推移を図-2 (a)~(f) に示す。

(a)~(c) は、同一アスペクト比における鋼繊維混入率毎の収縮曲線の対比である。いずれも混入率の増大とともに収縮率の低減が見られるが、アスペクト比によって拘束効果に差が見受けられる。(d)~(f) は、同一鋼繊維混入率における各アスペクト比の収縮曲線の対比を示す。 $P_v=1\%$ では、アスペクト比の大小にかかわらず収縮拘束効果が僅少である。 $P_v=2\%$ では収縮拘束効果が明瞭に認められるが、アスペクト比による差は僅小である。 $P_v=3\%$ においては、収縮拘束効果が一層明瞭であるとともに、アスペクト比 20, 42 に比べて

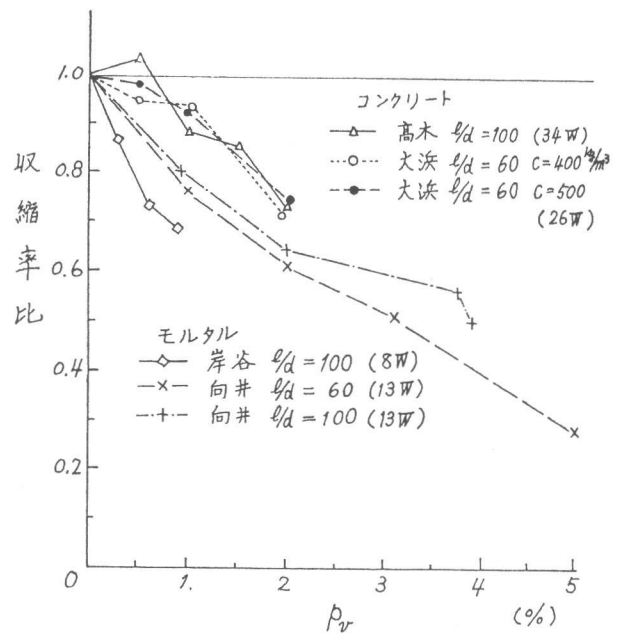
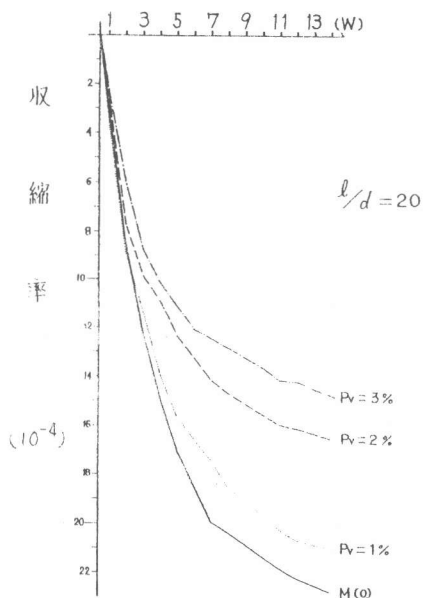
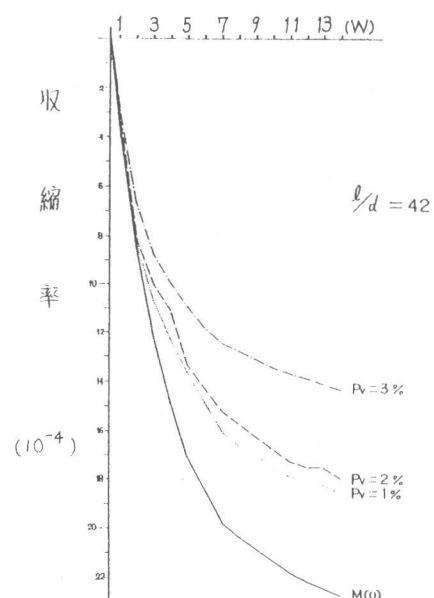


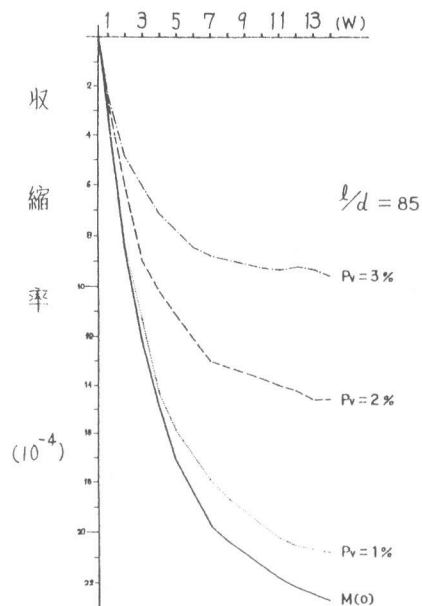
図 - 1



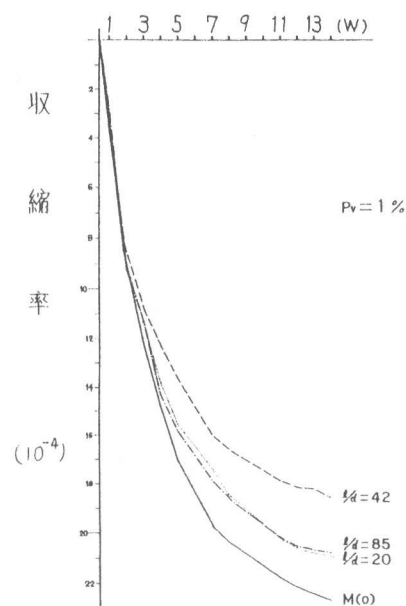
(a)



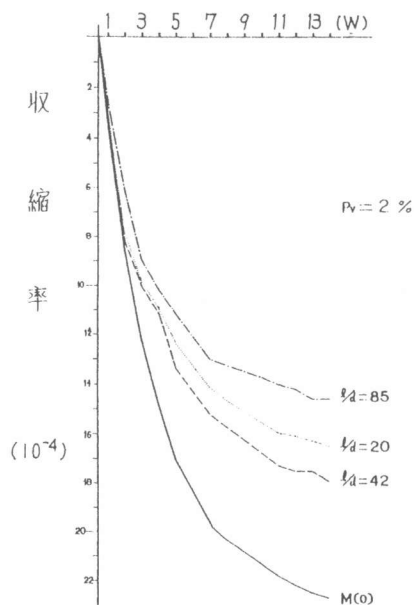
(b)



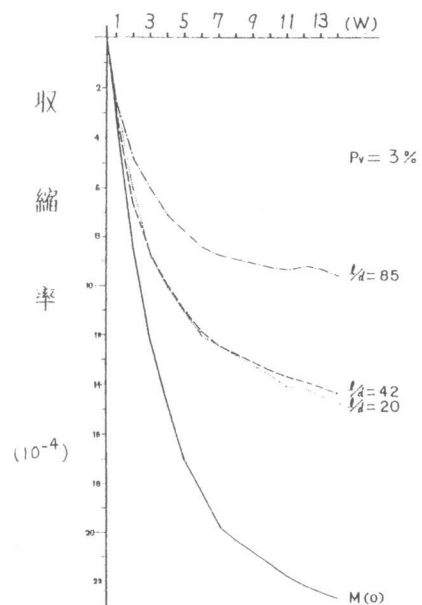
(c)



(d)



(e)



(f)

図-2

アスペクト比 85 における収縮低減が著しく顕著である。これに対してアスペクト比 20 と 42 の差異はほとんど認められない。アスペクト比の効果を論ずる場合、供試体の断面寸度と繊維素実長との関連で、断面周辺部における繊維素の配向拘束を考えなければならないが、著者が先に提示した略算式⁷⁾によって配向拘束係数(完全ランダム配向に対する補正係数)を求めると、断面 $60 \times 60 \text{ mm}^2$ に対しアスペクト比 20 (8 mm) で 1.04, 42 (17 mm) で 1.09, 85 (34 mm) で 1.19 となる。実験結果は概ねこれらの数値に相当する程度に収縮拘束効果がランダム配向時よりも高まっているものと考えなければならないが、 $P_v = 3\%$ におけるアスペクト比 85 の収縮拘束効果はこのような補正を行なってもなお顕著である。

4. 実験 II

(1) 材料

セメント N社製普通ポルトランドセメント
 砂 北海道広島産 F.M. = 2.78, 比重 2.57
 鋼繊維 $0.4\text{ mm}\phi$, $l = 34\text{ mm}$ ($l/d = 85$)

(2) 調合および混練

水セメント比 0.6
 重量調合比 $C:S = 1:2.5$ (乾燥砂)
 フロー 260 mm

鋼繊維補強モルタルの混練は実験Iと同様の要領で行った。

(3) 供試体 供試体寸法は $60 \times 60 \times 300\text{ mm}^3$ で、鋼繊維混入率は 0, 1.45, 2.9 % の3種。他に、鋼繊維による収縮拘束効果を鉄筋の効果と比較するため、断面中心に異型筋 1-D10 (2.0 %), 1-D13 (3.7 %) を配した2種を加え、計5種の供試体を作製した。

(4) 計測 モルタル打設 30 分後から材令 9 時間までの特異収縮¹⁾ (初期収縮) による長さ変化を検長 200 mm についてコンパレーターによって計測した。

(5) 実験結果 計測結果を図-3に示す。

このモルタルの特異収縮は 9 時間後には約 35×10^{-6} に達して大凡停止しはじめているが、鋼繊維または鉄筋で拘束されているものは更に 1~2 時間早く停止している。特異収縮はモルタルの剛性がほとんど 0 に近い極めてプラスチックな状態で生ずるので、一般の乾燥収縮より拘束効果が顕著に現われるものと考えられるが、材令 9 時間においてプレーンモルタルの収縮率に対する補強モルタルの収縮率の比は $P_r = 1.45\%$ で大凡 0.4, $P_r = 2.9\%$ で約 0.1 である。これに対して鉄筋による拘束の結果は D10 (2.0 %) で 0.45, D13 (3.7 %) で約 0.3 % で、同等の鋼材量についてランダム配向の鋼繊維の方が鉄筋を用いるよりも有効であることが判る。

5. 結 語

本実験のモルタルの自由収縮率に対する鋼繊維補強モルタルの収縮率の比を取纏めて図-4に掲げる。

鋼繊維の収縮拘束におけるアスペクト比の影響は $P_r \leq 2\%$ では明瞭ではないが、 $P_r = 3\%$ においては $l/d \leq 42$ ならば拘束効果に影響がなく、 $l/d = 85$ の場合に著しい拘束効果を示した。また、鋼繊維による収縮拘束は同等の容積比の鉄筋による拘束よりも効果的であることを確かめた。

文 献

- 1) Elveng, R.H., Somari, M.A.: Reduction of Shrinkage Cracking in R.C. due to the Inclusion of Steel Fibers, RILEM symp., '75.
- 2) 中西正俊, 高木準二, 奈良橋徳: 鋼繊維補強コンクリートの容積変化による収縮ひびわれ抵抗性の検討, 日本コンクリート工学協会シンポジウム, '77.
- 3) 岸谷孝一, 橋本幸: 金属繊維強化モルタルの物理的性状, 日本建築学会大会, '75.
- 4) 向井毅, 比佐道雄: 鋼繊維を混入したモルタルおよびコンクリートの基礎的性質に関する検討, セメント技術年報, XXX, '76.
- 5) 高木準二, 奈良橋徳, 中西正俊: スランプ 15 cm の鋼繊維補強コンクリート, 日本建築学会大会, '77.
- 6) 大森嘉彦, 西村正, 蜂須賀裕嗣: 鋼繊維補強コンクリートの基礎的性状, 日本建築学会大会, '78.
- 7) 大野和男, 柴田拓二, 小西秀利: 鋼繊維補強コンクリートの引張強度および曲げ強度理論式, 日本コンクリート工学協会シンポジウム, '77.
- 8) 大野和男: モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究, 北工学部研究報告, No. 9, '53.

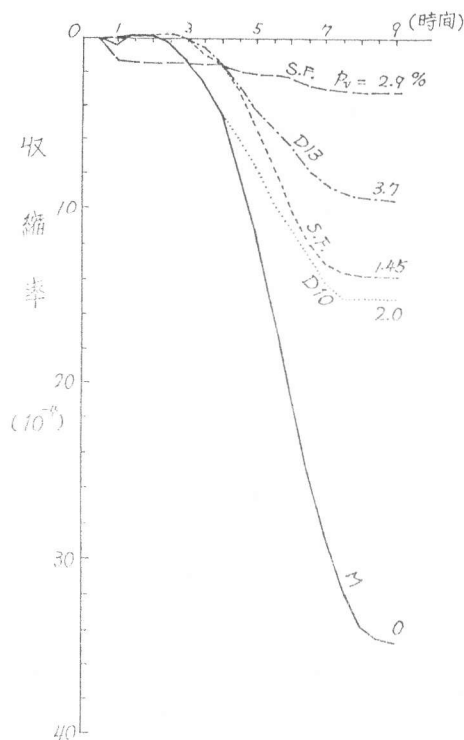


図 - 3

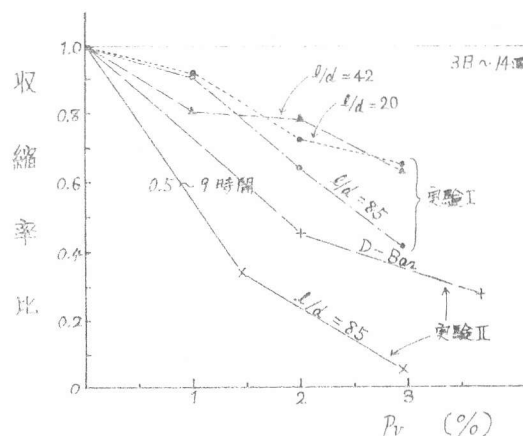


図 - 4