

論文 鋼繊維によって内的拘束を受けるコンファインドモルタルの支圧特性に関する基礎的研究

関 俊力*1・瀬古 繁喜*2・山田 和夫*3

要旨：本研究では、鋼繊維によって内的拘束を受けるコンファインドモルタルの支圧特性に及ぼす母材強度および鋼繊維混入量の影響について実験的に検討を行った。その結果、全面加力時には鋼繊維混入量に関わらずコーン形せん断滑り面を形成して破壊するが、支圧加力時にはかぶり部に割裂ひび割れが発生した後、支圧部にコーン形せん断滑り面を形成して破壊すること、六車・岡本式による支圧強度推定値は、鋼繊維混入量が少ないと過大評価となり、多くなると過小評価となること、母材強度と鋼繊維混入量の交互作用の影響を考慮に入れた推定式を用いることによって支圧強度が合理的に評価できること、などが明らかとなった。
キーワード：支圧耐力、コンファインドモルタル、鋼繊維、内的拘束、支圧強度推定式、重回帰分析

1. はじめに

筆者らは、従来から鋼管形式による杭頭半剛接工法の確立を目的とした一連の基礎的研究^{1)~4)}を行っており、これまでに杭頭半剛接接合部の圧縮耐力は、断面を小さくさせた鋼管部の支圧により杭本体が割れ裂かれることによって決まる場合が多く、杭頭半剛接工法を確立するためには、杭頭部の支圧特性の向上を図ることが重要であることを指摘するとともに、鋼管や帯筋などによって外的拘束を受けるコンファインドコンクリートの支圧特性について、一連の実験的¹⁾²⁾および解析的³⁾⁴⁾な検討を行った。本研究では、引き続き、鋼繊維によって内的拘束を受けるコンファインドコンクリートの支圧特性および鋼管による外的拘束との違いを調べるために、実験的検討を行った。なお、本実験では、従来の実験と同様に1/10スケールモデルの1軸支圧特性に及ぼす幾何学的非均質性 (D/d : 試験体寸法と粗骨材寸法との比) の影響を取り除くために、粗骨材を含まないモルタルを使用した。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験では、表-1および図-1に示すように、何れの試験体も外形 (D) × 高さ (h) が $\phi 150 \times 300$ mm の円柱体を使用し、実験要因としては、水セメント比 (W/C : 65, 40

表-1 実験の概要

試験体記号	W/C (%)	鋼繊維混入率 Vf (%)	試験体外寸法		支圧径 B (mm)
			直径 D (mm)	高さ H (mm)	
W65-V00-B145	65	0.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W65-V00-B100					$\phi 100$
W65-V00-B075					$\phi 75$
W65-V00-B050					$\phi 50$
W65-V20-B145	65	2.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W65-V20-B100					$\phi 100$
W65-V20-B075					$\phi 75$
W65-V20-B050					$\phi 50$
W65-V40-B145	65	4.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W65-V40-B100					$\phi 100$
W65-V40-B075					$\phi 75$
W65-V40-B050					$\phi 50$
W40-V00-B145	40	0.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W40-V00-B100					$\phi 100$
W40-V00-B075					$\phi 75$
W40-V00-B050					$\phi 50$
W40-V20-B145	40	2.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W40-V20-B100					$\phi 100$
W40-V20-B075					$\phi 75$
W40-V20-B050					$\phi 50$
W40-V40-B145	40	4.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W40-V40-B100					$\phi 100$
W40-V40-B075					$\phi 75$
W40-V40-B050					$\phi 50$
W25-V00-B145	25	0.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W25-V00-B100					$\phi 100$
W25-V00-B075					$\phi 75$
W25-V00-B050					$\phi 50$
W25-V20-B145	25	2.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W25-V20-B100					$\phi 100$
W25-V20-B075					$\phi 75$
W25-V20-B050					$\phi 50$
W25-V40-B145	25	4.00	$\phi 150$	300	$\phi 145$
W25-V40-B100					$\phi 100$
W25-V40-B075					$\phi 75$
W25-V40-B050					$\phi 50$

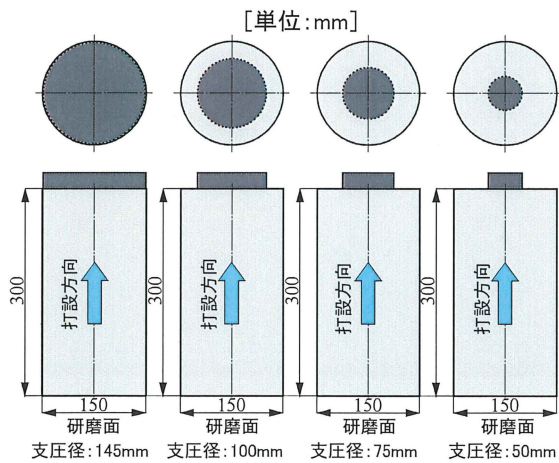


図-1 試験体の形状・寸法

*1 愛知工業大学大学院 工学研究科生産・建設工学専攻 修士(工学) (正会員)

*2 愛知工業大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 愛知工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

表-2 標準調合表

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)				減水剤 (kg/m ³)	消泡剤 (kg/m ³)	母材フロー値
		セメント	水	細骨材	鋼繊維			
65	2.3	525	342	1,209	0	1.05	—	220
		515	335	1,184	157	1.03	0.21	
		504	328	1,159	314	1.01	0.20	
40	1.5	752	301	1,129	0	5.27	—	230
		737	295	1,106	157	5.16	1.03	
		722	289	1,083	314	5.05	1.01	
25	1.1	984	246	1,082	0	16.72	—	232
		964	241	1,060	157	16.38	3.28	
		944	236	1,038	314	16.04	3.21	

[注] 減水剤：HP-11W(W/C=25%)、HP-11(W/C=40%)およびX20(W/C=65%)、消泡剤：AFK-2(100倍希釈)

表-3 母材ベースモルタルの材料試験結果
(a) W/C=65%

試験材 材 齢	養生方法	密度 (g/cm ³)	強度試験結果		ヤング係数 (GPa)
			引張 (MPa)	圧縮 (MPa)	
28日	水中	2.15	2.72	36.4	—
43日	封緘	2.11	2.92	33.4	2.45

[注]材齢43日は、支圧実験直後の結果。

(b) W/C=40%

試験材 材 齢	養生方法	密度 (g/cm ³)	強度試験結果		ヤング係数 (GPa)
			引張 (MPa)	圧縮 (MPa)	
28日	水中	2.15	3.53	55.2	—
43日	封緘	2.14	3.09	55.9	2.81

[注]材齢43日は、支圧実験直後の結果。

(c) W/C=25%

試験材 材 齢	養生方法	密度 (g/cm ³)	強度試験結果		ヤング係数 (GPa)
			引張 (MPa)	圧縮 (MPa)	
28日	水中	2.18	4.45	62.8	—
43日	封緘	2.18	3.30	78.9	3.42

[注]材齢43日は、支圧実験直後の結果。

および25%の3種類)、鋼繊維体積混入率 (V_f: 0.0, 2.0 および4.0%の3種類)、並びに支圧径 (B: 50, 75, 100 および145mmの4種類) を取り上げ一連の実験を行った。

2.2 試験体の作製および養生方法

試験体の作製に際しては、母材ベースモルタルの目標フロー値を230±10に設定し、普通ポルトランドセメント、多治見産の山砂(最大寸法: 2.5mm, 表乾密度: 2.60 g/cm³)、高張力鋼繊維(φ0.38×30mm, 引張強度: 2,610 N/mm²)、減水剤 (EX20(W/C=65%), HP-11(W/C=40%) およびHP-11W(W/C=25%)) および消泡剤 (AFK-2) を使用して試し練りにより調合を決定した。本実験で用い

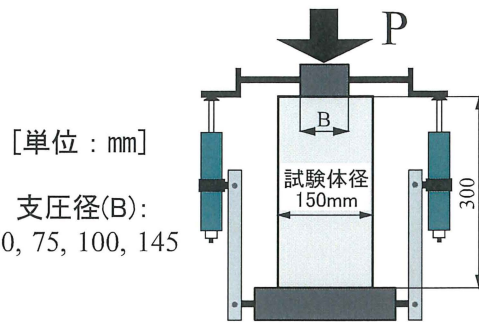


図-2 試験体の加力および軸変位の測定要領

たモルタルの標準調合表を表-2に示す。モルタルの打設は、何れもφ150×300mmの鋼製型枠に2層に分けて行い、棒状バイブレータを使用して締固めを十分に行った。試験体は、材齢3日で脱型した後28日目に研磨を行い、その後、実験実施まで実験室内でシート養生を行った。実験時の材齢は42~43日であった。また、母材ベースモルタルの力学的性質を調べるために、モルタル打設時にφ100×200mmの円柱供試体を同時に作製し、材齢28日(標準水中養生)および実験直後(封緘養生)の時点で圧縮強度および引張強度試験を行った。本実験で用いた母材ベースモルタルに関する材料試験結果を表-3に示す。

2.3 加力および測定方法

加力要領を図-2に示す。本実験では、杭頭半剛接合モデル試験体の1軸支圧加力に際して容量2,000kNの耐圧試験機を使用し、毎分約1.0mmの載荷スピードで単調漸増1軸支圧載荷を行って荷重-軸変位関係の測定および破壊状況を目視で観察するとともにデジタルカメラを用いて撮影・記録した。なお、1軸支圧載荷中の試験体の軸変位(載荷板間変位(前掲の図-2参照))の計測には、ストローク50mmの高感度ひずみゲージ式変位計を使用した。

3. 実験結果とその考察

3.1 破壊状況

写真-1~写真-3は、それぞれ支圧荷重を受けた水セメント比(W/C)が65, 40および25%の鋼繊維補強モルタルの最終破壊状況を鋼繊維体積混入率(V_f)別に示したものである。これらの写真によれば、W/Cに関わらずV_fが0.0%の試験体では、全面加力を行った場合は、上下2個のコーン形せん断滑り面を形成して破壊しているが、



(a) Vf=0.0%の場合
写真-1 最終破壊状況(W/C=65%) <各Vf毎の写真: 左から支圧径(B)=145, 100, 75および50mmの順>

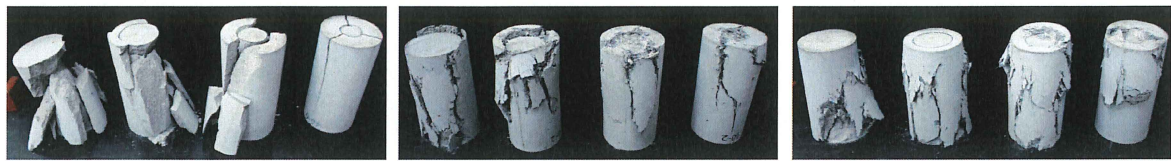


写真-2 最終破壊状況 (W/C=40%) <各Vf毎の写真：左から支圧径 (B)=145, 100, 75および50mmの順>

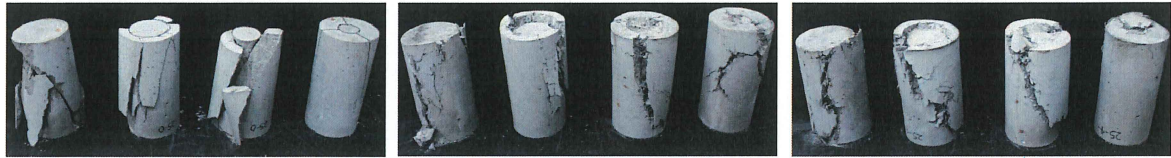


写真-3 最終破壊状況 (W/C=25%) <各Vf毎の写真：左から支圧径 (B)=145, 100, 75および50mmの順>

表-4 実験結果一覧

試験体記号	実験結果		解析結果			
	P_c (kN)	δc (mm)	mP_{cc}^{*1} (kN)	mP_{cc} / P_c	gP_{cc}^{*2} (kN)	gP_{cc} / P_c
W65-V00-B145	642	1.04	642	1.00	642	1.00
W65-V00-B100	294	0.62	423	1.44	401	1.36
W65-V00-B075	221	0.42	307	1.39	279	1.26
W65-V00-B050	162	0.66	195	1.20	167	1.03
W65-V20-B145	554	0.76	554	1.00	643	1.16
W65-V20-B100	397	0.79	365	0.92	450	1.13
W65-V20-B075	299	0.66	264	0.88	342	1.14
W65-V20-B050	201	1.68	168	0.83	232	1.15
W65-V40-B145	510	0.79	510	1.00	643	1.26
W65-V40-B100	363	0.74	336	0.93	478	1.32
W65-V40-B075	309	1.26	243	0.79	379	1.23
W65-V40-B050	206	2.15	154	0.75	274	1.33
W40-V00-B145	1,040	1.12	1,040	1.00	1,040	1.00
W40-V00-B100	579	0.84	685	1.18	638	1.10
W40-V00-B075	376	0.78	496	1.32	438	1.17
W40-V00-B050	260	0.51	315	1.21	257	0.99
W40-V20-B145	1,128	1.25	1,128	1.00	1,087	0.96
W40-V20-B100	726	0.95	743	1.02	753	1.04
W40-V20-B075	549	0.89	538	0.98	566	1.03
W40-V20-B050	402	1.23	342	0.85	379	0.94
W40-V40-B145	1,079	1.32	1,079	1.00	1,113	1.03
W40-V40-B100	814	1.30	711	0.87	819	1.01
W40-V40-B075	745	1.82	515	0.69	646	0.87
W40-V40-B050	471	1.70	327	0.69	463	0.98
W25-V00-B145	1,265	1.08	1,265	1.00	1,265	1.00
W25-V00-B100	731	0.83	834	1.14	769	1.05
W25-V00-B075	464	0.84	604	1.30	523	1.13
W25-V00-B050	309	0.46	383	1.24	304	0.98
W25-V20-B145	1,594	1.28	1,594	1.00	1,539	0.97
W25-V20-B100	1,089	1.10	1,050	0.96	1,058	0.97
W25-V20-B075	819	0.94	761	0.93	791	0.97
W25-V20-B050	530	0.96	483	0.91	526	0.99
W25-V40-B145	1,623	1.42	1,623	1.00	1,694	1.04
W25-V40-B100	1,216	1.33	1,070	0.88	1,239	1.02
W25-V40-B075	922	1.22	775	0.84	972	1.05
W25-V40-B050	642	1.47	491	0.77	691	1.08

[注] P_c : 最大圧縮耐力実験結果、 δc : 最大圧縮耐力時の軸変位、 mP_{cc}^{*1} : 六車・岡本式による圧縮耐力の計算結果、 gP_{cc}^{*2} : 重回帰分析による圧縮耐力の計算結果。

支圧加力を行った場合は、かぶり部に数本の割裂ひび割れが発生した後に、支圧部にコーン形せん断滑り面を形成することによって破壊した。これに対して、鋼繊維体

積混入率 (V_f) が2.0および4.0%の試験体では、全体的な破壊パターンは、 V_f が0.0%の試験体と類似しているが、鋼繊維が混入されることによって、上記のコーン形せん断滑り面の形成およびかぶり部に発生した割裂ひび割れの進展・拡大が妨げられている様子が読み取れる。

3.2 圧縮耐力

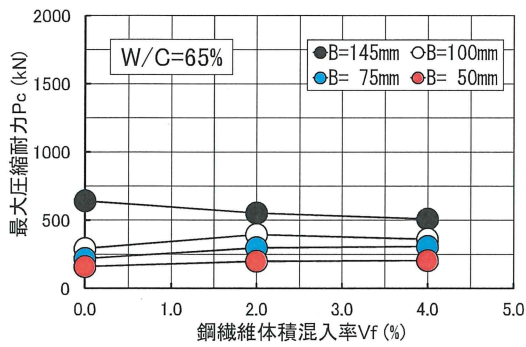
表-4は、本実験によって得られた各種試験体の圧縮耐力 (P_c) および圧縮耐力時の荷重板間軸変位 (δc) の一覧を、図-3は、圧縮耐力と鋼繊維体積混入率 (V_f) との関係に及ぼす支圧径 (B) の影響を水セメント比別に示したものである。これらの表および図によれば、鋼繊維補強モルタルの圧縮耐力 (P_c) は、一般的に母材ベースモルタルの水セメント比 (W/C) が小さく圧縮強度が大きいほど、鋼繊維混入率 (V_f) の増加に伴う圧縮耐力 (P_c) の増大が著しくなっているのがわかる。また、圧縮耐力に及ぼす支圧径 (B) の影響も、母材ベースモルタルの圧縮強度が大きいものほど顕著となっている。

前掲の表-4中には、次の式(1)で表される六車・岡本が提案したコンクリートの支圧強度推定式⁵⁾による圧縮耐力の計算値 ($mP_{cc}=F_B \times A_l$) および支圧強度推定式の推定精度 (計算値/実験値 (mP_{cc}/P_c)) も併示してある。

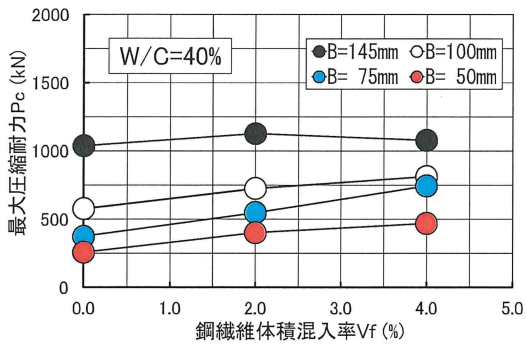
$$F_B = F \cdot (A/A_l)^{0.439} \quad (1)$$

ここに、 F_B : 支圧強度 (N/mm^2)、 F : 全面圧縮強度 (N/mm^2)、 A : 支承面積 (mm^2)、 A_l : 支圧面積 (mm^2)。

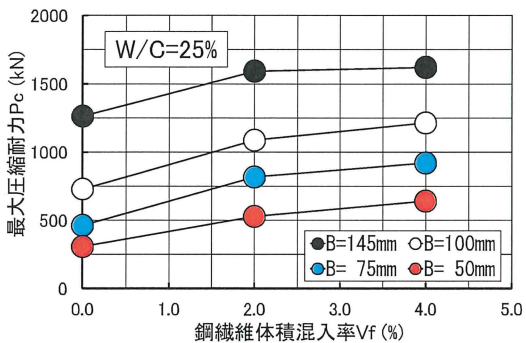
また、図-4は、本実験によって得られた支圧強度と支圧径との関係に関する実験結果 (図中の●、○および●) と式(1)による支圧強度の推定結果 (赤色の破線) とを比較したものである。これらの図および表によれば、六車・岡本式による支圧強度推定値は、鋼繊維体積混入率 (V_f) が2.0%の試験体では、水セメント比 (W/C) に関わらず実験結果と良く一致しているが、 V_f が0.0および4.0%で支圧径 (B) が75mm以下の場合には、それぞれ過大評価および過小評価となり、その差は母材ベースモルタルの強度が大きいほど増大している。以上のことから、鋼繊維によって内的拘束を受けるコンファインドモルタル



(a) 水セメント比 (W/C)=65%の場合



(b) 水セメント比 (W/C)=40%の場合



(c) 水セメント比 (W/C)=25%の場合

図-3 最大圧縮耐力とVfとの関係

ルの支圧強度と支圧径との関係は、鋼管や帯筋などの外的拘束を受ける場合^{1)~4)}と同様に、鋼繊維による内的コンファインド効果によって影響を受け、一般的に母材ベースモルタルの強度が大きく、かつ鋼繊維による内的コンファインド効果が大きいほど、全面加力時の強度に対する支圧強度の増大が著しくなる傾向にあるといえる。

3.3 内的コンファインド効果を考慮した支圧強度推定式

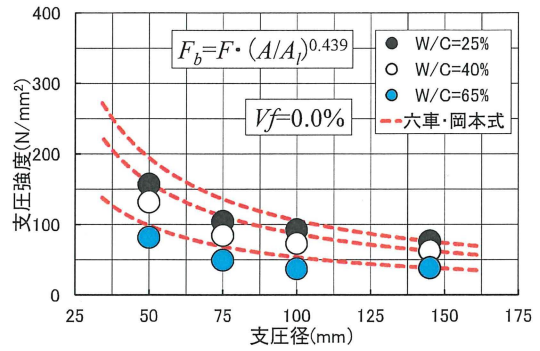
本研究では、鋼繊維の混入によって内的拘束を受けるコンファインドモルタルの支圧強度推定式として、

$$F_b = F \cdot (A/A_0)^C \quad (2)$$

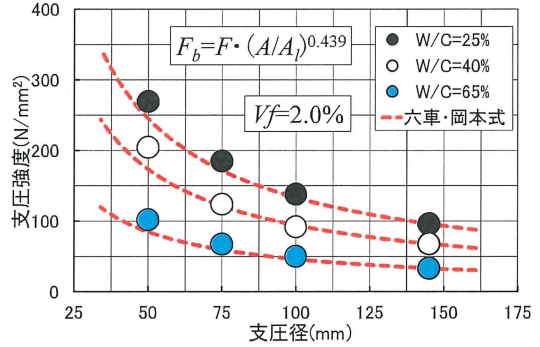
を使用した場合の係数であるF値（コンファインドモルタルの全面圧縮強度）およびC値の定量化を試みる。

(1) F値の定式化

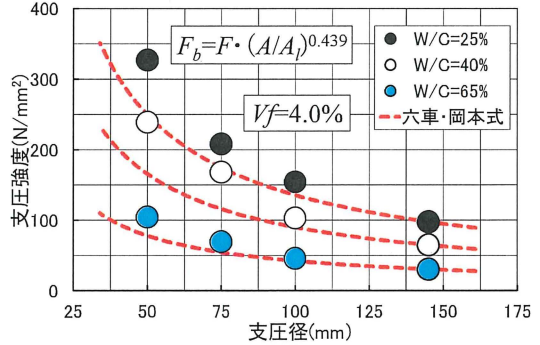
本研究では、鋼繊維によって内的拘束を受けるコンファインドモルタルの全面圧縮強度 (F) を母材ベースモル



(a) 鋼繊維混入率 (Vf)=0.0%の場合



(b) 鋼繊維混入率 (Vf)=2.0%の場合



(c) 鋼繊維混入率 (Vf)=4.0%の場合

図-4 支圧強度と支圧径との関係 (六車・岡本式との比較)

タルの全面圧縮強度 (F_0) と鋼繊維の混入によって生じるモルタルの強度増分 (ΔF) との和として定義した。

$$F = F_0 + \Delta F \quad (3)$$

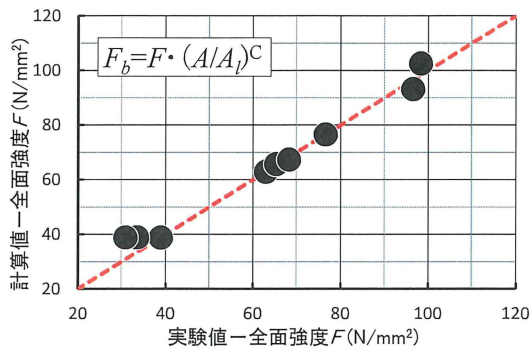
上式中の ΔF については、実験で得られた全面加力を受けるコンファインドモルタルの圧縮強度に及ぼす各種要因影響を踏まえて、次の式(4)を用いて評価した。

$$\Delta F = a \cdot F_0^b \cdot Vf^c \quad (4)$$

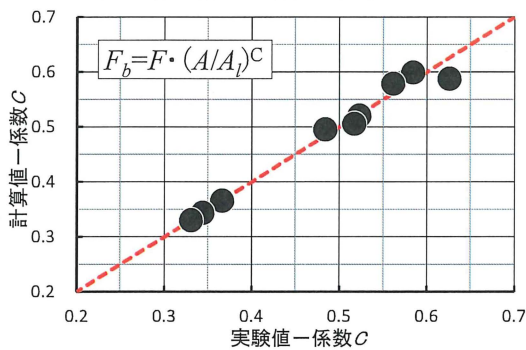
ここに、 F_0 : 母材ベースモルタルの全面圧縮強度 (N/mm^2)、 Vf : 鋼繊維体積混入率 (%), a , b および c : 実験定数。

(2) C値の定式化

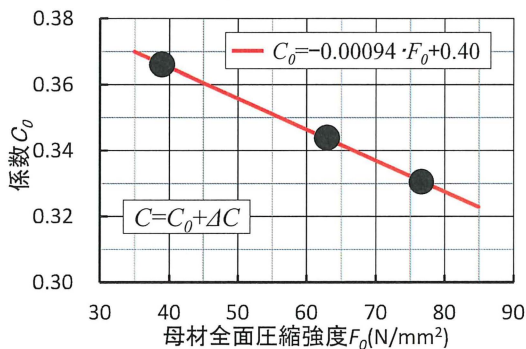
本研究では、上記のF値と同様に、鋼繊維によって内的拘束を受けるコンファインドモルタルのC値を母材ベースモルタルのC値 (C_0) と鋼繊維の混入に起因して生じるC値の増分 (ΔC) との和として定義した。



(a) 全面圧縮強度Fの計算値と実験値との比較



(b) 係数Cの計算値と実験値との比較



(c) 母材の係数 C_0 と母材全面圧縮強度 F_0 との関係
図-5 重回帰分析結果

$$C = C_0 + \Delta C \quad (5)$$

上式中の ΔC についても、上記の ΔF 値と同様に次の式(6)を用いて評価した。

$$\Delta C = d \cdot F_0^e \cdot V_f^f \quad (6)$$

ここに、 d 、 e および f ：実験定数。

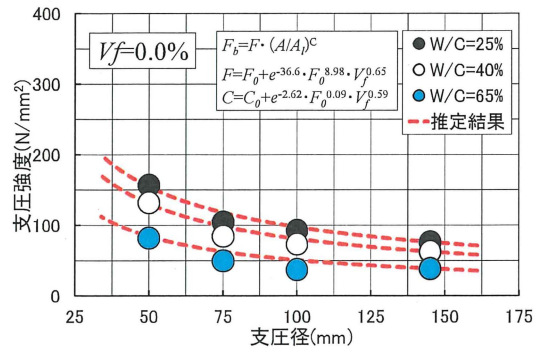
(3) F値およびC値の定量化

W/Cおよび V_f を実験要因として取り上げた鋼繊維補強モルタルに関する支圧実験結果を用いて式(4)および式(6)中の実験定数を重回帰分析によって定量化した結果、F値およびC値として次の式(7)および式(8)が得られた。

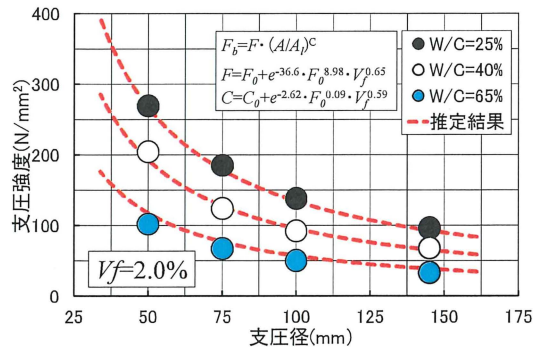
$$F = F_0 + \Delta F = F_0 + e^{-36.6} \cdot F_0^{8.98} \cdot V_f^{0.65} \quad (7)$$

$$C = C_0 + \Delta C = C_0 + e^{-2.62} \cdot F_0^{0.09} \cdot V_f^{0.59} \quad (8)$$

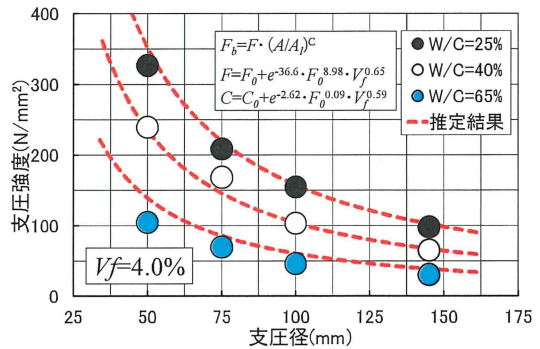
図-5(a)および(b)は、それぞれF値およびC値に関する実験値と式(7)および式(8)による計算値とを比較したものであるが、F値およびC値の実験値と計算値は、良



(a) 鋼繊維混入率(V_f)=0.0%の場合



(b) 鋼繊維混入率(V_f)=2.0%の場合



(c) 鋼繊維混入率(V_f)=4.0%の場合

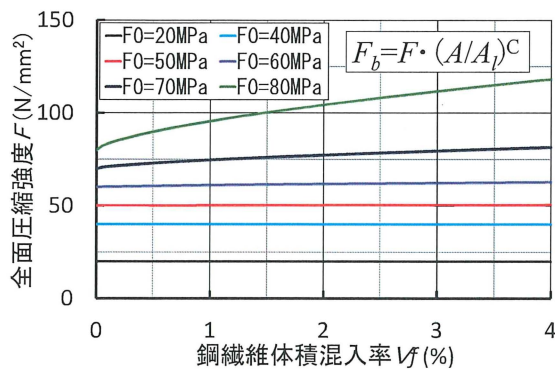
図-6 支圧強度と支圧径との関係(重回帰分析結果)

く一致していることがわかる。また、図-5(c)は、母材ベースモルタルのC値(C_0)と全面圧縮強度(F_0)との関係を示したものである。図によれば、 C_0 値は、 F_0 値と次の式(9)で表される線形関係にあることがわかる。

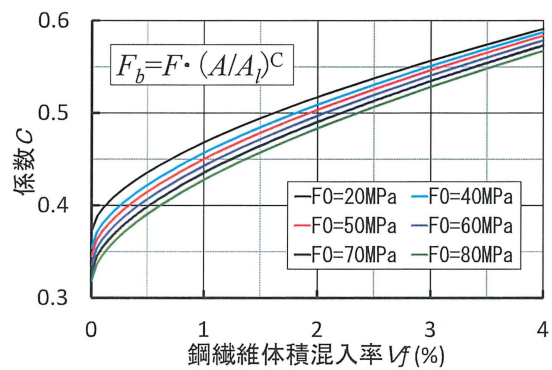
$$C_0 = -0.00094 F_0 + 0.40 \quad (9)$$

(4) 支圧強度推定式の適用性

図-6(a)、(b)および(c)は、前掲の式(2)中のF値およびC値を、それぞれ式(7)、式(8)および式(9)で評価した場合の実験結果と推定結果とを比較したものである。これらの図によれば、実験結果と推定結果は、鋼繊維体積混入率(V_f)および水セメント比(W/C)に関わらず良く一致しており、支圧強度と支圧径との関係に及ぼす母材強度(F_0)および鋼繊維混入量(V_f)の影響は、 F_0 と V_f の相互作用の影響を考慮した式(7)、式(8)および式(9)を用いることによって合理的に評価できるといえる。



(a) 全面圧縮強度Fに及ぼす各種要因の影響



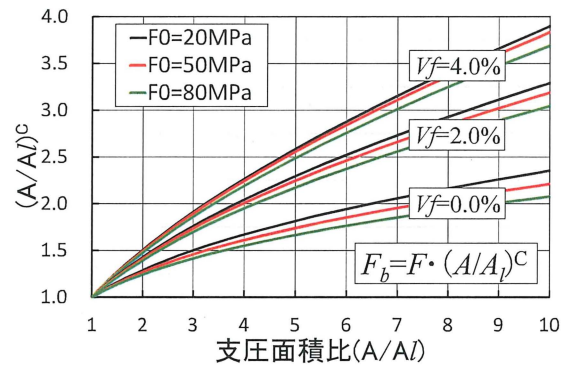
(b) 係数Cに及ぼす各種要因の影響

3.4 本提案支圧強度推定式の特徴

図-7(a)～(c)は、それぞれ本研究で提案した鋼繊維によって内的拘束を受けるコンファインドモルタルの支圧強度推定式中のF値およびC値と鋼繊維体積混入率(Vf)との関係および(A/A_l)^Cと支圧面積比(A/A_l)との関係に及ぼす母材ベースモルタルの全面圧縮強度(F₀)の影響を数値解析によって示したものである。これらの図によれば、F値は、図(a)から明らかなように、母材強度(F₀)が小さい範囲では、鋼繊維混入量(Vf)によって殆ど影響を受けていないが、母材強度が大きくなるとともにVf量の影響を受けるようになり、鋼繊維混入量の増加とともに増大する傾向が顕著となる。一方、C値の計算結果を示した図(b)によれば、支圧強度に及ぼす支圧径の影響は、鋼繊維混入量(Vf)の増大とともに著しくなるため、C値は、Vf量の増加とともに増大する傾向を示している。また、図(c)に示した(A/A_l)^C値と支圧面積比(A/A_l)との関係によれば、(A/A_l)^C値は、A/A_l値が増大して支圧径が小さくなるほど、かつVf量が多くなるほど増大する傾向を示すが、(A/A_l)^C値に及ぼす母材強度(F₀)の影響は、Vf量が多いと鋼繊維混入の効果が支配的となるため、Vf量の増加に従って小さくなる傾向を示している。

4. 結論

- 1) 全面加力時には、鋼繊維混入の有無に関わらずコーン形せん断滑り面を形成して破壊するが、支圧加力を行った場合には、かぶり部に数本の割裂ひび割れが発生した後、支圧部にコーン形せん断滑り面を形成して破壊する。ただし、鋼繊維の混入によって、コーン形せん断滑り面の形成およびかぶり部に発生する割裂ひび割れの進展・拡大が妨げられる。
- 2) 六車・岡本式による支圧強度の推定値は、鋼繊維混入量が2.0%の場合には実験結果と良く一致するが、鋼繊維体積混入率が0.0および4.0%の場合で、支圧径が75mm以下(支圧径比が2.0以上)になると、それぞれ過大評価および過小評価となる。



(c) (A/A_l)^Cに及ぼす各種要因の影響

図-7 提案支圧強度推定式に及ぼす各種要因の影響

- 3) 支圧強度と支圧径との関係に及ぼす母材強度および鋼繊維混入量の影響は、母材強度と鋼繊維混入量の相互作用の影響を考慮に入れた式(7)、式(8)および式(9)を用いることによって合理的に評価できる。

謝辞

実験に際してご助力を得た愛知工業大学の小栗寛生君、可児裕也君、坂田朋徳君、藤井優樹君、吉川耀司、立松季己君に対して謝意を表します。また、本研究の実施に際しては、愛知工業大学耐震実験センターの実験施設と研究助成費を使用したことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 山田和夫、関俊力、山本俊彦、伴幸雄：鋼管形式による杭頭半剛接合部の1軸圧縮特性に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.62、pp.240-247、2009.2
- 2) 小野晃、関俊力、瀬古繁喜、山田和夫：コンクリートの支圧特性に及ぼす横拘束形式の影響に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.1、pp.401-406、2011.7
- 3) 小野晃、関俊力、山田和夫：支圧荷重を受けるコンファインドコンクリートの変形特性に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.319-324、2013.7
- 4) 関俊力、山田和夫：支圧荷重を受けるコンファインドコンクリートの多軸効果成分およびせん断抵抗成分に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.1、pp.340-345、2014.7
- 5) 六車照、岡本伸：局部荷重を受けるコンクリートの支圧強度に関する研究、プレストレストコンクリート、第5巻、第5号、pp.22-29、1963.10