

論文 コンクリートの強度および種類が RC パネルのせん断性状に及ぼす影響

伊藤 正通*1・加藤 佑介*2・金久保 利之*3

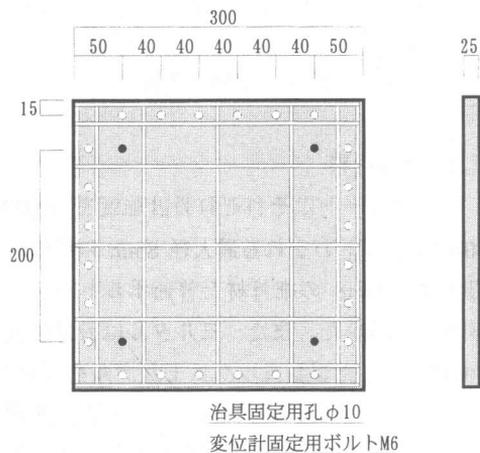
要旨: Collins 等の鉄筋コンクリートパネルに関する研究では、コンクリートの引張力を受ける際の圧縮特性、引張応力-歪関係での軟化域、ひび割れ面での骨材の噛み合わせによるせん断応力伝達の 3 点を考慮にいれ、パネルのせん断性状を把握する方法を提案している。本報ではこの研究について、さらに異なる強度および種類のコンクリートを用いた検証実験を行いその評価方法について検討した。その結果から 50MPa クラスのモルタルを用いた場合についての引張歪-圧縮強度の関係式を提案した。

キーワード: RC パネル, 二軸性状, 純せん断, 応力-歪関係, 軟化域

1.はじめに

補強材（鉄筋）とコンクリートを組み合わせた鉄筋コンクリート（以下 RC）パネルのせん断性状に関する研究の 1 つに Collins 等の Modified Compression-Field Theory¹⁾（以下 MCFT）が挙げられる。この研究では、引張力を受けるコンクリートの圧縮特性、引張応力-歪関係での軟化域、ひび割れ面での骨材の噛み合わせによるせん断応力伝達の 3 点を考慮に入れた RC パネルのせん断性状を把握する方法を提案している。しかし、この研究では、実験が一種類のコンクリートについてのみ行われており、コンクリートの差異による影響を考慮しているとは言い難い。そこで、本研究では、Collins 等の研究で用いられたコンクリートとともに、より高強度のコンクリートおよびモルタルを用いた RC パネル試験体を作製し、同様の実験、解析を行うことによって、Collins 等の評価方法の妥当性を検討することを主な目的としている。

加力装置固定用孔を 24 カ所、変位計固定用ボルトを 4 カ所に設け、試験体辺に対して平行に縦、横補強筋を 75mm 間隔に配した。また、端部には試験体の掴み部破壊を防ぐため、各辺ともに辺から 5mm と 25mm の位置に異形鉄筋 D4 を配した。図-1 に試験体を示す。変動因子はコンクリート 3 種（コンクリート 2 種、モルタル 1 種）と縦、横補強筋として用いた異形鉄筋 3 種（D3, D4, D6）である。表-1 に試験体一覧を示す。また、図-2 に試験体名称の詳細を示す。



治具固定用孔φ10
変位計固定用ボルトM6
図-1 試験体図

2.実験概要

2.1 試験体

試験体は 300×300×25mm の RC パネルで、

*1 筑波大学大学院（正会員）

*2 筑波大学

*3 筑波大学講師 機能工学系 博士（工学）（正会員）

表-1 試験体一覧

試験体名	圧縮 目標強度 (MPa)	補強材(@75)					
		横筋	ρ_x^* ($\times 10^{-3}$)	縦筋	ρ_y^* ($\times 10^{-3}$)		
C2-D33	20	D3	2.83	D3	2.83		
C2-D34		D4	5.02				
C2-D36		D6	11.3				
C2-D44		D4	5.02	D4		5.02	
C2-D46		D6	11.3				
C2-D66				D6		11.3	D6
M5-D33		50	D3	2.83		D3	2.83
M5-D34	D4		5.02				
M5-D36	D6		11.3				
M5-D44	D4		5.02	D4	5.02		
M5-D46	D6		11.3				
M5-D66				D6	11.3	D6	
C5-D33	D3		2.83	D3	2.83		
C5-D34	D4		5.02				
C5-D36	D6		11.3				
C5-D44	D4		5.02	D4		5.02	
C5-D46	D6		11.3				
C5-D66				D6		11.3	

*鉄筋比 $\Sigma a/(b \cdot t)$ a:鉄筋断面積 b:パネル幅 t:板厚

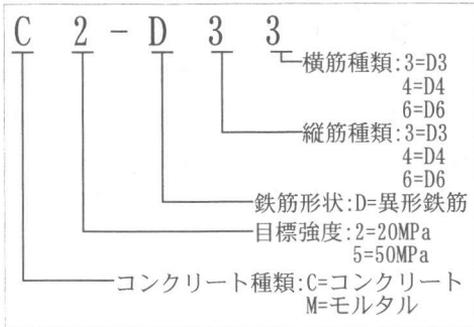


図-2 試験体名称

2.2 使用材料

コンクリートはそれぞれ設計強度を 20MPa, 50MPa とし、いずれも最大径 8mm の粗骨材, 最大径 2.5mm の細骨材と普通ポルトランドセメントを用いた。また、モルタルは設計強度を 50MPa としたプレミックスモルタルを用いた。コンクリートとモルタルの力学的特性を表-2 に示す。また補強筋として用いた鉄筋は、異形鉄筋 D3, D4, D6 である。鉄筋の力学的特性を表-3 に示す。

2.3 加力・計測方法

加力には写真-1 に示す加力装置を用いて、24

表-2 コンクリート・モルタルの力学的特性

コンクリート名称	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
C2	23.0	21.4	2.60
M5	48.5	20.5	3.09
C5	48.1	35.4	3.59

注)加力時材齢は C2 が 28~29 日, M5 が 29~31 日, C5 が 31~32 日である。

表-3 鉄筋の力学的特性

鉄筋種類	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
D3	222	225
D4	290	200
D6	412	186

本の油圧ジャッキを使用し、試験体の対角方向にそれぞれ引張力と圧縮力を加え、その合力によって純せん断力を与える方式を用いた。加力はジャッキの油圧系統を引張側と圧縮側の 2 系統に分け、引張力、圧縮力が同一になるよう荷重制御で行った。計測項目はジャッキ 1 本あたりの荷重値、試験体標点間の変形量、主な位置での鉄筋歪である。図-3 に変位計設置位置、図-4 に歪ゲージ位置を示す。両図中の矢印はジャッキによる加力の方向を表す。変位計は試験体の表面(西側面)、裏面(東側面)に設置し、両面の各辺に対し平行な位置(辺から 50mm)に 4 箇所、引張方向の対角線上に 1 箇所設置した。また歪ゲージはゲージ長 1mm のものを使用した。

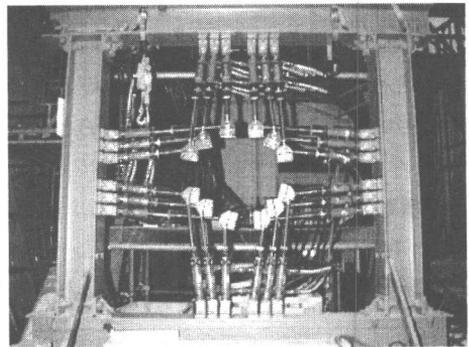


写真-1 加力装置

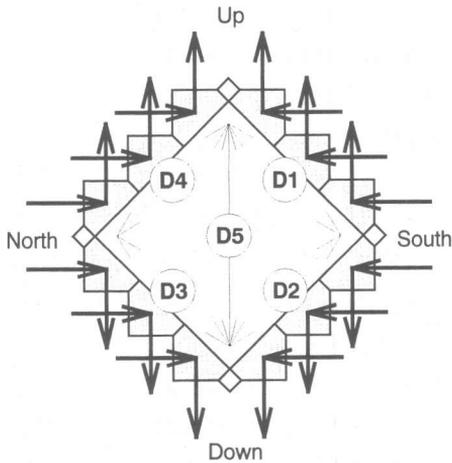


図-3 変位計測定位置

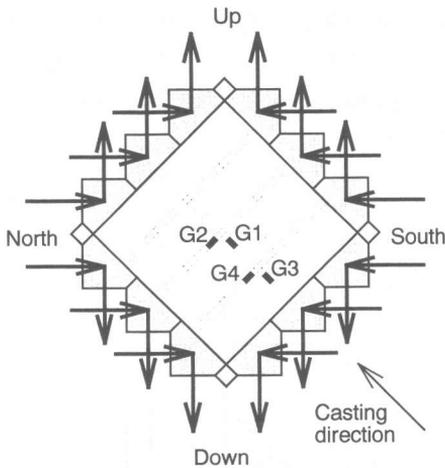


図-4 歪ゲージ配置図

3 実験結果

3.1 破壊経過

実験で得られたデータから次式を用いてパネルのせん断応力、せん断歪を算出した。

$$\tau_{xy} = 3\sqrt{2} \cdot P / (t \cdot b) \quad (1)$$

$$\gamma_{xy} = (\sqrt{2} \cdot \delta_5 - (\delta_1 + \delta_3)/2 - (\delta_2 + \delta_4)/2) / l_0 \quad (2)$$

ここで、

τ_{xy} : パネルのせん断応力

γ_{xy} : パネルのせん断歪

P : ジャッキ1本あたりの荷重

t : パネルの厚

b : パネルの幅

δ_i : 変位計の伸び量 (図-3 と対応)

l_0 : 評点間距離

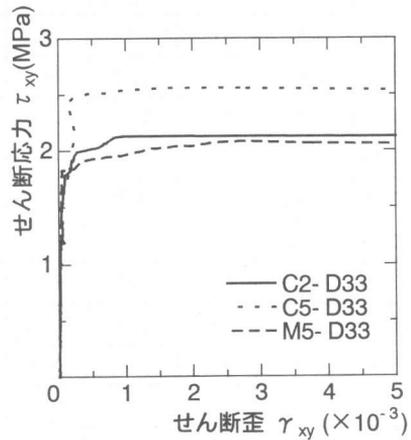


図-5 せん断応力-せん断ひずみ関係

せん断応力-せん断歪関係の実験結果の例を図-5に示す。同図は縦筋、横筋ともにD3を使用した3体の試験体を示している。最終的に端部破壊を起こした試験体も見られたが、ほぼすべての試験体においてトリリニア型のグラフを得ることができた。これは破壊過程が、コンクリートのひび割れ、鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊の順に発生するためである。表-4に実験結果の一覧(試験体ひび割れ発生時せん断応力、歪、最大荷重時せん断応力、終局せん断歪、最終破壊形式)を示す。なお試験体の破壊形式は鉄筋破断、端部破壊、コンクリートの圧縮破壊の3種類である。D33, D34, D44試験体では、破壊前までに全ての歪測定位置で補強筋の降伏がみられた。

3.2 最大せん断応力の比較

コンクリートの圧縮強度と各試験体の最大せん断応力の関係を図-6に示す。図中のプロット右の矢印は端部破壊した試験体で、応力がさらに大きい可能性のあるものについて示した。

4. コンクリートの主応力-主歪関係の検証

本研究では実験で得られた変位計による歪

表-4 実験結果一覧

試験体名	ひび割れ発生時せん断応力 (MPa)	ひび割れ発生時歪 ($\times 10^{-3}$)	最大せん断応力 (MPa)	終局せん断歪 ($\times 10^{-3}$)	最終破壊形式
C2-D33	1.81	0.03	2.16	24.9	破断
C2-D34	1.66	0.37	2.34	78.6	圧壊
C2-D36	0.76	0.02	2.75	0.68	端部
C2-D44	1.37	0.06	2.71	0.91	圧壊
C2-D46	1.86	0.13	2.72	1.92	端部
C2-D66	1.42	0.26	3.04	2.69	破断
M5-D33	1.83	0.04	2.08	6.56	圧壊
M5-D34	1.03	0.30	2.58	9.54	端部
M5-D36	1.07	0.04	2.68	10.8	端部
M5-D44	1.26	0.05	2.73	50.6	圧壊
M5-D46	1.39	0.14	3.21	2.67	端部
M5-D66	1.12	0.11	4.91	3.17	端部
C5-D33	1.67	0.12	2.56	4.02	端部
C5-D34	2.03	1.33	2.57	37.8	端部
C5-D36	1.89	0.07	2.83	2.14	端部
C5-D44	1.57	0.36	2.93	46.1	圧壊
C5-D46	1.41	0.16	2.93	15.6	端部
C5-D66	1.66	0.16	4.03	1.53	端部

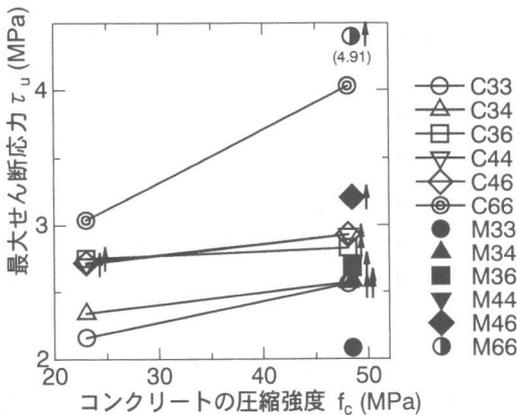


図-6 コンクリートの圧縮強度
-最大せん断応力の関係

から、モールの応力円を用いてコンクリートの引張、圧縮主応力-主歪の関係および引張主応

力-ひび割れコンクリートの圧縮強度の関係を導き出し、MCFTで提案されている関係式と比較検討を行った。

4.1 算出方法

コンクリートの主応力-主歪関係の導出は以下の手順による。図-7にパネルの応力、歪状態を示す。まず、変位計の値から、 x 方向の歪 (ϵ_x) と y 方向の歪 (ϵ_y) が得られる。ここでモールの歪円を考えることによって、パネルの平均引張主歪 (ϵ_1)、圧縮主歪 (ϵ_2) を得る。コンクリートと鉄筋の平均歪は同一と考え、鉄筋の応力-歪関係を考えることによって、鉄筋が負担する引張応力、圧縮応力が求められる。コンクリートの応力は試験体に作用している全応力から鉄筋の負担する応力を差し引いたものなので、この関係からコンクリートの引張主応力と圧縮主応力が得られる。図-8にモールの歪円を示す。

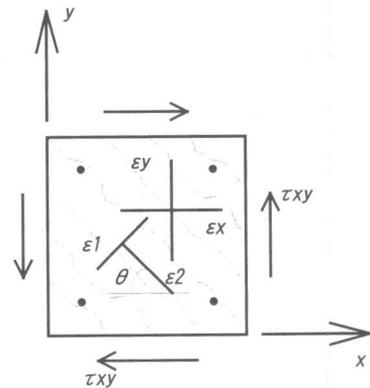


図-7 パネルの応力と歪の状態

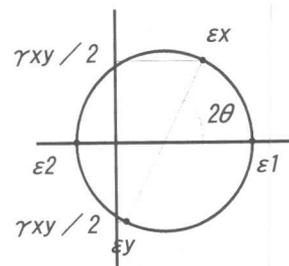


図-8 モールの歪円

4.2 引張主応力-主歪関係

MCFT では、コンクリートの引張主応力と引張主歪の関係を表式で提案している。

$$\begin{cases} f_{c1} = E_c \cdot \varepsilon_1 \quad (\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr}) \\ f_{c1} = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{200 \cdot \varepsilon_1}} \quad (\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{cr}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、

f_{c1} : コンクリートの引張主応力

E_c : コンクリートのヤング係数

ε_{cr} : コンクリートのひび割れ時の歪

これらの関係式では、ひび割れが入る前では引張応力は引張歪に比例し、ひび割れが入った後では引張歪の増加にともない徐々に引張応力が低下すると仮定している。なお f_{cr} はコンクリートのひび割れ強度で、以下の式で得る。

$$f_{cr} = 0.33\sqrt{-f_c} \quad (4)$$

ここで、

f_c : コンクリートの圧縮強度 (負) (MPa)

C2 試験体について、(3),(4)式から得られた計算結果と実験結果の比較を、図-9 に示す。圧縮強度が 50MPa のコンクリートを使用した試験体やモルタルを使用した試験体で、実験結果が解析結果を下回るものがみられたが、おおむね実験結果は計算結果に適合していた。

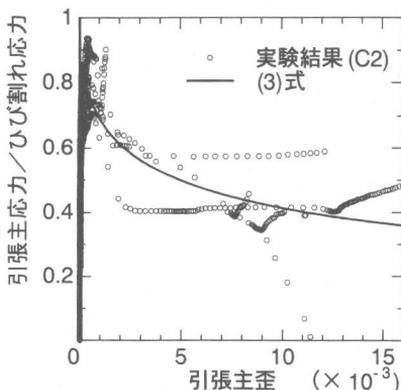


図-9 引張主応力-引張主歪関係 (C2)

4.3 圧縮主応力-主歪関係

MCFT では、コンクリートの圧縮主応力-圧縮主歪関係を次式で提案している。

$$f_{c2} = f_{c2max} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$\frac{f_{c2max}}{f_c} = \frac{1}{0.8 - 0.34 \cdot \varepsilon_1 / \varepsilon_c} \leq 1.0 \quad (6)$$

ここで

f_{c2} : コンクリートの圧縮主応力 (負)

f_{c2max} : ひび割れコンクリートの圧縮強度 (負)

ε_c : コンクリートの圧縮強度時歪 (負)

(5)式は $f_{c2max}=f_c$ のときの純圧縮状態でのコンクリートの圧縮主応力-圧縮主歪関係について表したものであり、(6)式は引張力が作用するコンクリートのひび割れに伴う圧縮強度の低下を表したものである。C2-D33 試験体について、(5),(6)式から得られた計算結果と実験結果の比較を図-10 に示す。

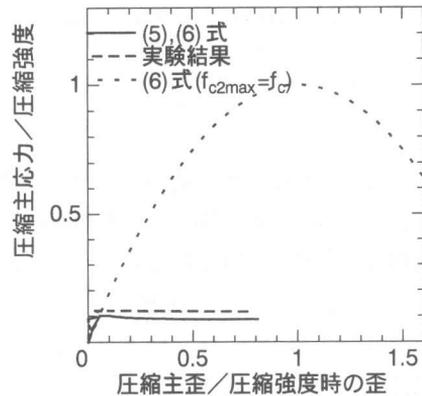


図-10 圧縮主応力-圧縮主歪み関係

4.4 引張主歪-圧縮強度関係

実験より得られた f_{c2max}/f_c と $\varepsilon_1/\varepsilon_c$ の関係を図-11 に示す。また(6)式による計算値を破線を示す。なお図-11 において図-8 で示したモールの歪円が y 軸に交わず、 f_{c2max} を計算することができなかった試験体は除外した。C2,C5 試験体では、コンクリートの強度にかかわらずお

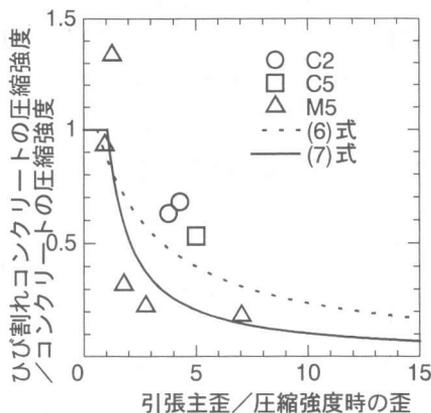


図-11 引張主歪-ひび割れコンクリート関係

むね MCFT による結果に近い値が得られた。しかしモルタルを用いた試験体では、実験結果が提案式よりも下回る傾向が見られる。これはモルタルがコンクリートと比べて骨材による影響がないために、 f_{c2max} が早く低下するためであると考えられる。モルタル試験体について最小二乗法による回帰計算を行った結果、次式を得た(二乗残差 0.28)。なお本実験により得られた横軸の値の範囲は 0.926 から 7.033 である。

$$\frac{f_{c2max}}{f_c} = -\frac{1}{0.95 \cdot \varepsilon_1 / \varepsilon_c} \leq 1.0 \quad (7)$$

M5-D44 試験体のせん断応力-せん断歪関係を例にとって、(6)式と(7)式による解析結果の差異を図-12 に示す。せん断応力-せん断歪関係の形状は変化しないが、せん断歪が増大すると、(7)式による場合の f_{c2max} が低下し、圧縮破壊が早期に生ずることになる。

5.まとめ

MCFT の提案式によるコンクリートの引張、圧縮主応力-主歪関係の計算結果と実験結果を比較した結果、モルタルを用いた試験体の引張主歪-圧縮強度の関係において若干の相違が見られ、モルタルの場合の引張主歪-圧縮強度関係については新たな関係式を提案した。一軸圧縮強度が 20MPa および 50MPa クラスのコンク

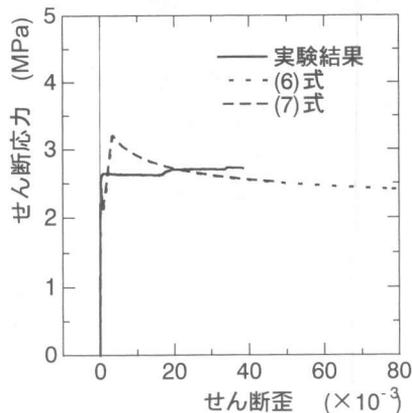


図-12 M5-D44 のせん断応力-せん断歪関係

リートを用いた試験体については計算結果が実験結果に適合しており Collins 等の提案式はおおむね妥当なものであるといえる。

参考文献

- 1) Vecchio, F.J and Collins, M.P: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal, pp.219-231, March-April 1986