

論文 モルタルに鋼棒を配した疑似コンクリート供試体のき裂進展と破壊現象

吉原 毅*1, 大谷 恭弘*2, 三谷 勲*3

要旨: モルタルに鋼棒を埋め込んだ2次元疑似コンクリート供試体を作製し, 一軸圧縮載荷実験を行った. 載荷前の初期き裂と初期間隙及び載荷に伴うき裂進展の観察により, 初期状況及びき裂の進展傾向を見出し, 最終破壊状況に及ぼす影響を検討した. 実験において観察された載荷途中段階でのき裂進展傾向、最終破壊状況はブリージングによる初期間隙の有無が大きく影響した. 載荷途中段階でのき裂進展傾向を弾性範囲における有限要素解析によって確認した. 鋼棒下部に初期間隙が存在すると初期き裂を基点とした鉛直方向のき裂が進展しやすいという傾向を見出した.

キーワード: 微視的破壊現象, 初期き裂, 初期間隙, 付着, 実験, 有限要素解析

1. はじめに

コンクリート材料の圧縮応力下における挙動は, 不均質性ゆえに複雑であり, そのような材料挙動を解明するため, 近年, 微視的破壊現象に焦点を当てた研究が行われている. 一般に, コンクリート中には, 供用前から剛性の異なる骨材とモルタルの界面近傍においてマイクロクラック等の初期欠陥が存在していることが明らかになっている^{1), 2), 3)}. 本研究では, 粗骨材の代わりに鋼棒を用いた疑似コンクリート供試体を作製し圧縮載荷実験を行った. 微視的破壊現象の観察によって, 載荷前の初期状況, 載荷に伴うき裂の進展傾向, 初期状況が最終破壊に及ぼす影響について検討し, 代表的な供試体について, 弾性範囲におけるき裂の進展傾向を解析結果と比較した. 本研究は, 載荷初期段階における一様な破壊から最終的な局所破壊への移行を解明する上での基礎的資料となるものである.

2. 疑似コンクリートによる実験

き裂の進展を観察しやすくするために, 磨き角鋼棒(算術平均粗さ $R_a=6.3 \mu m$)をモルタル中に2次元的に配した疑似コンクリート供試体を用いて

一軸圧縮載荷実験を行った. 載荷前及び載荷中における観察により, 初期状況, 載荷に伴うき裂の進展傾向を見出し, 初期状況と最終破壊状況の関係を検討した.

2.1 実験方法

(1) 疑似コンクリート供試体

基本的な供試体の形状をFig. 1に示す. Fig. 2のように, 16mm角鋼棒を中心間隔28mmで9本配置した供試体(S16-9A)を基準飽和状態とし, 鋼棒の配置角度や本数, 配置方法, 打設方向を変えてTable 1に示すように17種類, 合計27体作製した. 基準飽和状態における鋼棒寸法と中心間隔は, 通常のコンクリートに占める粗骨材体積率を基に選定したものである. 各供試体とも, 鋼棒を型枠に固定し, モルタルを流し込んだ. モルタルの調合

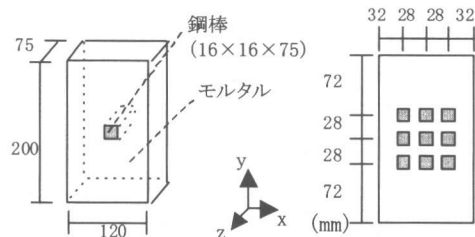


Fig. 1 供試体形状 (S16-1) Fig. 2 基準飽和状態 (S16-9A)

*1 神戸大学自然科学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 神戸大学助教授 工学部建設学科 Ph.D. (正会員)

*3 神戸大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

Table1 供試体シリーズ

供試体名	1)配置角度パターン	2)配置方法 鋼棒本数	打設方向	3) 端面条件		最大荷重 (kN)			
				モルタルのバッチ	テフロン鋼板				
P16-1(1)	P	1	y	A		160			
P16-1(2)					○	241			
P16-2V		2		V	B		262		
P16-2H				H		170			
P16-2D		3		D	C		179		
P16-3V				V		○	211		
P16-3H		4		H	○	100			
P16-3D				D	○	108			
P16-4A		9		A	A		172		
P16-4B				B			142		
P16-9A(1)		S		1	y	D		107	
P16-9A(2)							○	119	
P16-9A(3)	○		107						
S16-1(1)	S	1	y	A		236			
S16-1(2)					○	249			
S16-1(3)					○	478			
S16-1(4)				○	363				
S16-1(5)				○	389				
4) RS16-1				2	V	z	D	○	266
S16-2V		○	243						
S16-2H		○	178						
S16-2D		○	192						
S16-9A(1)		9	A		z		E	○	188
S16-9A(2)								○	537
S16-9A(4)				○		421			
M(1)	y			B				346	
M(2)		C	○		322				

- 1)配置角度パターン:S... 正方形配置, P...Sを45°傾けた菱形配置
- 2)配置方法:A... 配置した鋼棒の外周が正方形の状態, B... 外周が菱形の状態, V... 垂直に配置, H... 水平に配置, D... 斜めに配置
- 3)端面条件:供試体と加力板の間にテフロンシート又は鋼板を使用
- 4)供試体RS16-1:表面に溝を付けた鋼棒を使用

Table2 モルタルの調合及び材料試験結果

バッチ	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	W/C (%)	f _c (MPa)	f _t (MPa)	E (GPa)	ν
A	369	659	1186	56	18.1	—	—	—
B	369	738	1186	50	31.2	2.68	—	—
C	369	738	1186	50	33.2	2.58	—	—
D	330	659	1423	50	29.9	1.77	—	—
E	369	659	1423	56	42.4	2.83	22.3	0.22
F	369	615	1423	60	33.0	3.20	25.0	0.22

- 1). W:水, C:セメント, S:砂, W/C:水セメント比, f_c:圧縮強度, f_t:引張強度, E:ヤング係数, ν:ポアソン比
- 2). シリンダー寸法: φ 100 × 200 (mm)

及び試験結果を Table2 に示す. なお, モルタルのブリージング率と空気量は, それぞれ4%前後と1%前後である. 早強ポルトランドセメントを使用し, 打設3日後に脱型を行い, 以後水中養生を行った.

(2) 観察・載荷

載荷実験に先立ち, 鋼棒周辺の初期き裂及び間隙を, マイクロスコープを用いて観察した(観察倍率: ~×200). 一軸載荷は, Fig.1のy軸負の向きに圧縮力を負荷した. 載荷に伴い, き裂が進展した時点で数回荷重を止め, スコープ及び目視によるき裂の観察を行った(同: ~×200).

2.2 実験結果

(1) 初期状況

スコープによる観察で, 載荷前の初期状況から, 供試体中の鋼棒周辺における初期き裂等の存在を確認した. 主に, Fig.3のように鋼棒角部における初期き裂と鋼棒下部におけるブリージングに起因した初期間隙の存在が挙げられる. 初期き裂は, z軸方向に打設した供試体の場合, 鋼棒の角部において, 鋼棒の対角線を延長した方向に存在した. y軸方向に打設した場合, ブリージングの影響により, 鋼棒左右の角から斜め上45°方向に存在した. 鋼棒が隣接していると, 単一配置の場合の組合せ模様となっていた. 初期き裂幅のオーダーは10⁻³~10⁻²mmであった. 初期間隙は, y軸方向に打設した場合, 鋼棒の配置角度に関わらず存在した. 複数の鋼棒を鉛直に配置した供試体においては, 最下層の鋼棒の間隙が顕著であっ

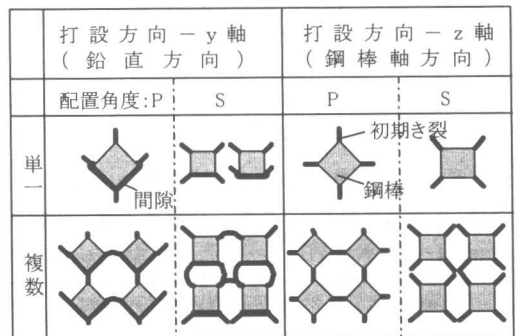


Fig.3 初期き裂模様

た. 初期間隙幅のオーダーは 10^{-1}mm であった. z 軸方向に打設した場合, 鋼棒周辺にはブリージングの影響がなく, 間隙は観察されなかった.

(2) き裂進展傾向

載荷に伴うき裂の観察によって, き裂進展の傾向を見出した. y 軸方向に打設した供試体は, 載荷初期段階から途中において, Fig. 4のような各供試体に同様のき裂進展傾向を示した. 鉛直方向(載荷と平行)の初期き裂はそのまま鉛直方向に進展していくが, 水平方向(載荷に垂直)の初期き裂は閉口する. 45° 方向の初期き裂も向きを鉛直方向に変え進展していく. 鋼棒が上下に隣接しているパターンSの鋼棒間の初期き裂や, 最下層の鋼棒下部の初期き裂は閉口し, 新たな鉛直方向のき裂が進展するなどの傾向が見られた. 鋼棒が複数配置の場合のき裂進展傾向は, 単一配置の場合の単なる組合せではないが, 最下層の鋼棒周辺の模

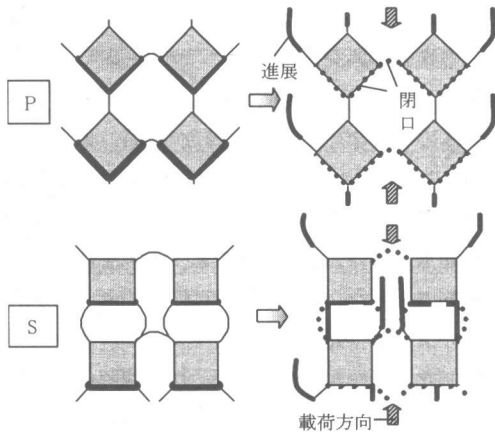


Fig. 4 き裂進展傾向

様が単一の場合の傾向に極めて類似していた. z 軸方向に打設した供試体は, 最大強度近傍までき裂の進展は観察されなかった.

(3) 最終破壊状況

Fig. 5に代表的な供試体のき裂進展傾向及び最終破壊状況を示す. 左から, 初期状況・載荷途中・最終状況の順で図示した. 図中の数字は観察時の荷重を表し, ()内の数字は最大荷重に対する割合を示している. y 軸方向に打設した供試体P16-

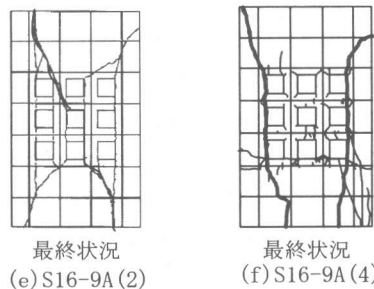
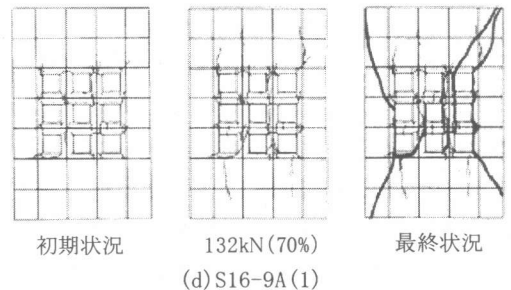
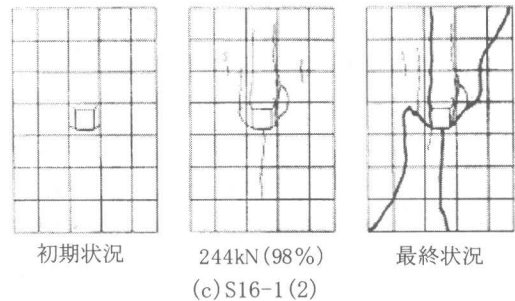
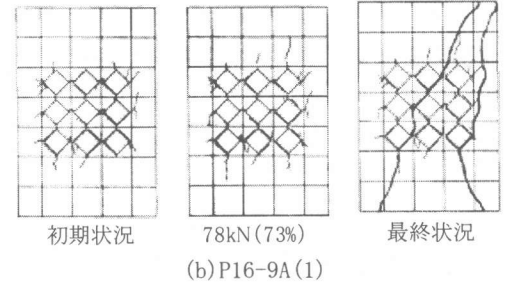
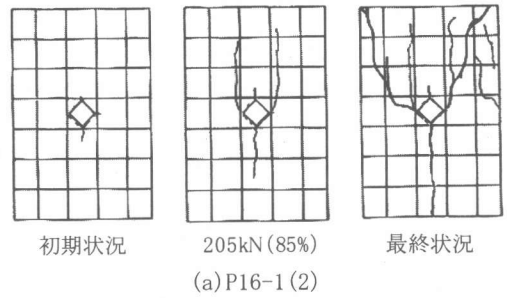


Fig. 5 き裂進展過程及び最終破壊状況

1(2), P16-9A(1), S16-1(2), S16-9A(1)は、鉛直方向に進展していたき裂がそのまま端面に到達し縦割れのような最終破壊に至るのではなく、鉛直方向のき裂進展は停止し、他の箇所から新たな鉛直き裂が進展した。最大強度後、各供試体に共通して、斜め方向のせん断帯を形成し、最終破壊に至った。鋼棒を9本配してz軸方向に打設した供試体S16-9A(2), S16-9A(4)は、最大強度近傍までき裂の進展は観察されず、最大強度近傍において、鋼棒上部及び下部での階段状の鉛直き裂の存在が確認された。バッチEのモルタルを用いた供試体S16-9A(2)ではせん断帯を形成し、バッチFを用いたS16-9A(4)では縦割れに近い最終破壊状況を形成した。鋼棒を1本配しz軸方向に打設した供試体S16-1(3), S16-1(5), および鋼棒を配しなかった供試体M(1), M(2)は表裏同様の2次元的な最終破壊状況は形成されなかった。

2.3 き裂進展に及ぼす影響

初期状況は、鋼棒の配置角度や本数、配置方法、打設方向によって異なるが、y軸方向に打設した場合、荷重に伴い、各供試体同様に、初期き裂を基点として鉛直方向にき裂が進展する。最大強度後、斜め方向のせん断帯を形成し、最終破壊に至る。ただし、荷重前に存在していた初期き裂がそのまま進展し、せん断帯を形成するわけではない。z軸方向に打設した供試体は、荷重初期段階におけるき裂の進展は観察されず、鋼棒を1本のみ配した場合、鋼棒位置を中心とする上下対の角錐を形成する3次元的な破壊が生じ、鋼棒を9本配した場合は2次元的な破壊が生じたもののバッチによって最終破壊状況が異なるという結果になった。z軸方向打設で鋼棒1本の供試体が、鋼棒なしの供試体同様3次元的破壊を生じた原因として、鋼棒が供試体中心に配されていることに加え、鋼棒とモルタル間の付着が大きく、連続体に近い状態であったと考えられる。なぜなら、打設方向の相違により鋼棒周辺に間隙の有無が生じ、鋼棒とモルタル間の付着状況が異なると考えられ、付着が小さいy軸方向打設の方が、荷重途中段階で、初期き裂を基点として鉛直方向にき裂が

進展しやすいという傾向となったからである。以上より、初期状況及びき裂の進展傾向、最終破壊状況にはモルタル中に粗骨材等を混入することによって生じる初期き裂や間隙の影響が大きく、特に間隙は初期状況だけでなく荷重に伴うき裂の進展から最終状況に至るまで、多大な影響を及ぼしていると考えられる。

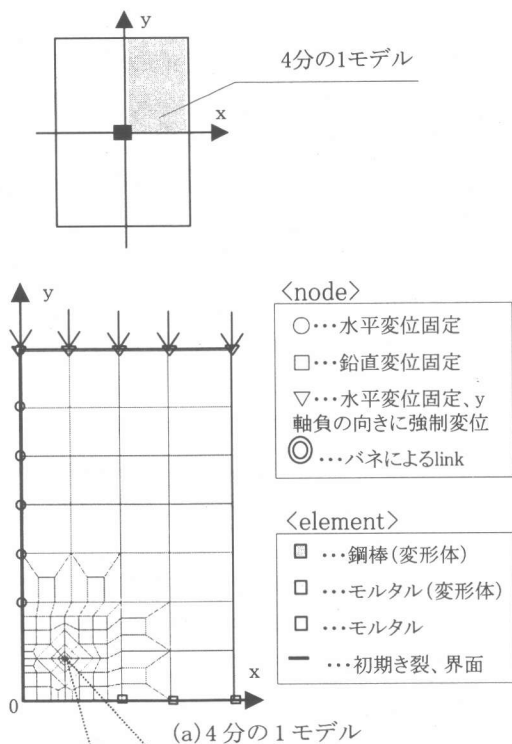
3. 有限要素解析

圧縮荷重実験で観察された打設方向の相違による鉛直方向のき裂の進展傾向の相違を検討するため、汎用型有限要素解析プログラムMARCを用いて初期き裂、初期間隙を考慮した接触解析を行った。

3.1 解析手法

(1) 解析モデル

実験でy軸方向及びz軸方向に打設した供試体S16-1, 2体を解析対象モデルとし、それぞれS16-1(y), S16-1(z)と名付けた。実験において、表裏同様のき裂進展が観察されたため、平面応力状態を仮定した。対称性を考慮して、Fig. 6のように供試体の中心を原点とした場合の、第一象限のみの4分の1モデルとした。図(b)のように、鋼棒の角部に45°上方向の初期き裂を与え、き裂面を二重点とした。同様に鋼棒とモルタルの界面も二重点とした。応力分布が幾何学的形状に依存しないように、初期き裂の先端を中心にメッシュ分割した。打設方向の違いは、初期間隙の有無によるモルタルと鋼棒の付着に置き換え、顕著な間隙が存在したS16-1(y)においては付着が限りなく小さいと仮定し、界面での摩擦力を0とした。間隙がほとんど存在しなかったS16-1(z)においては、弾性範囲では界面での滑りが生じない摩擦力を与え、付着を仮定した。鋼棒とモルタル及びモルタル相互間の摩擦係数はそれぞれ0.5とした。要素タイプは4節点四辺形アイソパラメトリック平面応力要素とし、Table3のような材料定数を与えた。モルタル要素にはバッチFの材料試験で得られた値を用いた。界面及び初期き裂に接する要素には、鋼棒とモルタル及びモルタル相互



(b) 鋼棒周辺拡大
Fig. 6 解析モデル

Table 3 材料定数

要素	ヤング係数(GPa)	ポアソン比
モルタル	25	0.2
鋼棒	210	0.3

の接触が生じるため、幾何学的非線形を考慮した変形体を定義し、荷重に伴う材料相互の貫通を回避した。接触判定距離は 10^{-2} mmとした。変形体の

剛体変位を防ぐため、Fig. 6のように、鋼棒とモルタルの節点を剛性 $k=10^3$ (kN/mm) のバネでつないだ。バネ剛性については、摩擦力を0とした場合、値を $10 \sim 10^4$ まで変化させた解析結果に大きな相違はなく、いずれの結果においても界面での滑りを生じることの確認ができたので、便宜上、上記の値を採用した。

(2) 境界条件

Fig. 6のように、x, y軸上の節点はそれぞれ鉛直、水平方向の変位を拘束した。供試体端面は水平方向の変位を拘束した。荷重は、実験で弾性繰り返し荷重を行った範囲における最大応力からひずみを算定し、供試体寸法から得られる変位量を強制変位として increment : 0 ~ 10 まで y 軸負の向きに比例的に与えた。

3.2 解析結果

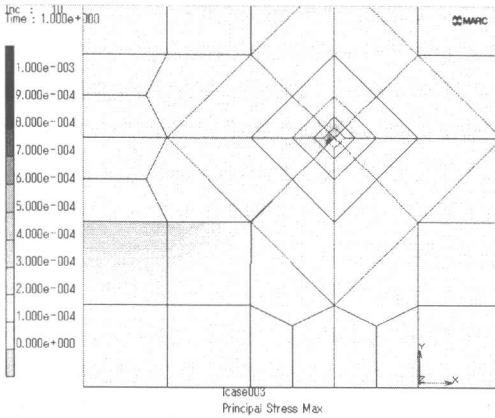
解析結果として inc. 10 における最大主応力のスカラー値を出力し、2つの供試体について比較検討を行った。Fig. 7は最大主応力の顕著な領域を濃く表している。図から初期き裂先端近傍において、鉛直き裂進展の兆候となる最大主応力の集中が見られる。界面での摩擦力を0とした供試体 S16-1(y)の方が、き裂先端部の上側要素への応力集中が大きく、鉛直き裂進展傾向が顕著であることを示唆している。Fig. 8は変形倍率を $\times 500$ とした、変形過程を示しており、S16-1(y)において鋼棒上部の界面での滑りが生じている。

3.3 き裂進展に及ぼす打設方向の影響

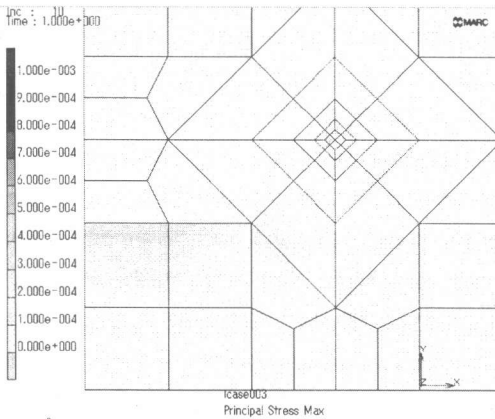
弾性範囲での有限要素解析により、荷重初期段階で、初期き裂先端近傍での鉛直き裂進展の傾向を確認し、打設方向の異なる2つの供試体を比較して、y軸方向打設の方が、鉛直き裂進展傾向が顕著であるという実験と同様の結果が得られた。以上より、鉛直方向へのき裂進展は、鋼棒とモルタル間の付着の大きさに依存することが確認できた。

4. まとめ

本研究では、疑似コンクリート供試体の圧縮荷重実験において、鋼棒の配置角度や本数、配置方法、モルタルの打設方向をパラメーターとして、初

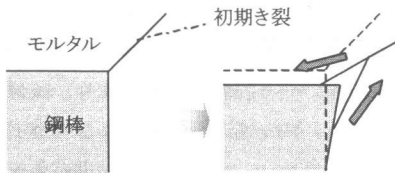


(a) S16-1(y)

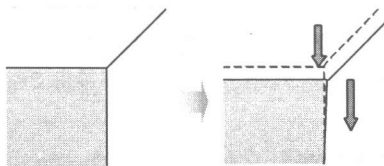


(b) S16-1(z)

Fig. 7 解析結果



(a) S16-1(y)



(b) S16-1(z)

Fig. 8 初期き裂及び界面の挙動

期状況、き裂の進展、最終破壊状況に及ぼす影響について検討した。本研究における知見を以下に記す。

- 初期き裂模様は鋼棒の配置角度に依存する。
- 鋼棒が複数配置の場合、単一配置の場合の組合せ模様となる。
- 打設方向の相違によって鋼棒下部の初期間隙の有無が生じ、空隙の存在しないz軸方向打設の場合、鋼棒とモルタル間の付着が大きいと考えられる。
- y軸方向に打設した場合、荷重に伴い初期き裂を基点として鉛直方向にき裂が進展し、最大強度後、せん断帯を形成するなどの最終破壊に至る。
- z軸方向に打設した場合、最大強度近傍までき裂は進展しない傾向にあり、最終破壊状況は供試体によって異なる。
- 荷重に伴うき裂の進展や最終破壊状況は初期き裂模様に支配されるものではなく、鋼棒とモルタル間の付着の影響が大きい。したがって、荷重に伴うき裂進展傾向や最終破壊状況は鋼棒の配置角度や本数、配置方法には依存せず、打設方向によって異なる。

参考文献

- 1) Mier, Jan. G. van. :Fracture Processes of Concrete, CRC Press, Inc. , pp. 55-156, 1997
- 2) 村上 雅英, 大谷 恭弘 : 3軸圧縮軟化域におけるコンクリートの破壊現象と損傷領域の同定, コンクリート工学論文集, Vol. 6, No. 2, pp. 47-60, 1995. 7
- 3) 村上 雅英, 大谷 恭弘, 西野 和弥, 窪田敏行 : 圧縮軟化域におけるせん断帯の損傷機構モデルとその検証, コンクリート工学論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 43-52, 1995. 1
- 4) 吉原 毅, 永山 浩三, 大谷 恭弘, 三谷 勲 : モルタルに鋼棒を埋め込んだ疑似コンクリート供試体の初期亀裂と亀裂進展過程, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 1380, pp759-760, 1999. 9