

論文 細骨材率がコンクリート円柱供試体の圧縮性状に及ぼす影響に関する検討

杉山 侑大*1・武田 健太*2

要旨: 本研究では、細骨材率の異なる (44.8~47.2%) コンクリート円柱供試体を作製し、一軸圧縮強度試験および静弾性係数試験を行うことで、圧縮性状についての実験的検討を行った。次に、実験結果を対象として、有限要素解析により、既往の圧縮側の応力-ひずみモデルの適用性の確認を行った。実験結果より、細骨材率の減少に伴い、応力-ひずみ曲線における応力ピーク時のひずみが大きくなることが示された。また、解析による検討を行った結果、細骨材率が大きくなるにつれて、解析で適用した既往の圧縮側の応力-ひずみモデルによっては、実験結果の応力ピーク時のひずみを表現できない可能性があることが示唆された。

キーワード: 細骨材率, 応力ピーク時のひずみ, 有限要素解析, コンクリートの圧縮側の応力-ひずみモデル

1. はじめに

細骨材率は、コンクリート構造物の性能を決定する上で重要な指標である。細骨材率が小さいほど、同じスランプを得るために必要な単位水量が減少し、単位セメント量を削減できるため、経済的なコンクリートが得られる。一方で、細骨材率が過度に小さくなると、コンクリートが粗粒化することで、材料分離が発生しやすくなり、ワーカビリティの低下につながる。そのため、所定の性能を満たすように、適切な細骨材率を定める必要がある。土木学会コンクリート標準示方書 (以下、示方書) [施工編]では、「細骨材率は、ワーカビリティが得られる範囲内で単位水量ができるだけ小さくなるように、試し練りによって定めるものとする。」と記載されている。また、示方書では、水結合剤比 55%およびスランプ約 8 cm を基準とした細骨材率および単位水量の概略値に基づき、個別条件に応じて補正する方法を示しており、これが広く適用されている。しかし、細骨材率の変化がコンクリートの性能に与える具体的な影響については十分に記載されていないのが現状である。

近年のわが国における大地震発生に伴い、高密度配筋の構造が増加し、粗骨材の最大寸法が 25 mm から 20 mm と徐々に小さくなり、スランプが大きいコンクリートの製造が求められている。上述の方法により単位水量を補正すると、示方書に記載される上限値の 175 kg/m³ を超過するため、AE 減水剤の使用量を増やすまたは高性能 AE 減水剤を用いて単位水量を低減するが、ペースト容積の低減分を骨材容積で充填することとなる。その際、単位水量が上限値を超える配 (調) 合で算出した単位細骨材量あるいは単位粗骨材量を固定し、単位粗骨材量あるいは単位粗骨材量を増加する方法、または細骨材率を一定として単位細骨材量および単位粗骨材量を一定割合で増加する方法の 3 ケースが考えられる。いずれのケースでも、骨材容積は一定となるため、細骨材率が変動することとなる。また、数値解析により、コンクリート構造物の構造性能評価を行う際、材料モデルとして、コンクリートの応力-ひずみモデル等が必要となるが、上述した骨材量の増加に伴い、ヤング係数も増加するなど、既往の応力-ひずみモデルの適用外となる可能性もある。

表-1 コンクリートの配 (調) 合

ケース	f'_{ck} (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(g/m ³)		備考		
				W	C	S	G	Ad1	Ad2			
No.0	30.0	55	45.9	180	327	789	985	—	—	—		
No.1			47.2			830	985	3708	25	Ad1:C×1.2% Ad2:C×0.008%		
No.2			45.9			170	309	808	1009	2472	12	Ad1:C×0.8% Ad2:C×0.004%
No.3			44.8					789	1028	3090	25	Ad1:C×1.0% Ad2:C×0.008%

※Ad1: 高性能 AE 減水剤, Ad2: AE 剤 (1%溶液)

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科工学専攻環境都市プログラム 学士(工学) (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科工学専攻環境都市プログラム助教 博士(工学) (正会員)

表-2 フレッシュ時の性能

ケース	空気量 (%)	スランブ (cm)	単位容積質量(kg/m ³)	
			理論値	練混ぜ時
No.1	3.9	18.0	2293	2297
No.2	5.0	11.0	2294	2330
No.3	4.9	15.5	2295	2287

そこで本研究では、細骨材率が異なる (44.8~47.2%) コンクリート円柱供試体を作製し、一軸圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。さらに、これらの試験結果を対象に有限要素解析による再現解析を行うことで、既往のコンクリートの圧縮側の応力-ひずみモデルが解析結果に与える影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 配(調)合条件および配(調)合修正

円柱供試体の作製に使用したコンクリートの配(調)合を表-1に示す。示方書に基づき、単位量を決定すると、表上部 (No.0) に示すように、単位水量 (W) が 180 kg/m^3 と示方書に記載される上限値 (175 kg/m^3) を超過する。この配(調)合をベースに、単位水量を上限値内に収め、骨材量を増加する。本研究では、No.1 (No.0 で算出した単位粗骨材量を採用し、単位細骨材量を増加した配(調)合)、No.2 (No.0 で算出した細骨材率を採用し、単位細骨材量および単位粗骨材量を一定割合で増加した配(調)合)、No.3 (No.0 で算出した単位細骨材量を採用し、単位粗骨材量を増加した配(調)合) の計3ケースで円柱供試体を作製した。単位水量は配(調)合によらず 170 kg/m^3 で一定とした。また、細骨材率の違いによるコンクリートの圧縮性状を検討するため、設計基準強度 f'_{ck} は配(調)合によらず 30.0 N/mm^2 で一定とした。セメント (C) は、普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm^3)、細骨材 (S) は、豊田産山砂 (密度 2.56 g/cm^3 , 粗粒率 2.75)、粗骨材 (G) は、瀬戸産硬質砂岩砕石 (最大寸法 20 mm , 密度 2.71 g/cm^3 , 粗粒率 6.74) を用いた。混和剤として、高性能 AE 減水剤 ($Ad1$; 標準形 I 種, ポリカルボン酸系), AE 剤 ($Ad2$; I 種) を用い、材料分離が生じず、かつ適正な空気量となるようにそれぞれ混合割合を決定し、単位水量に対する内割置換とした。高性能 AE 減水剤は、消泡剤を用いて、空気非連行とした。なお、配(調)合により混合割合が異なるため、No.0 の混和剤の値は記入していない。さらに、目標スランブ 12 cm , 目標空気量 4.5% とした。

2.2 フレッシュ時の性能

本研究では、空気量およびスランブを「コンクリートのスランブ試験方法 (JIS A 1101:2020)」および「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 (空気

表-3 硬化後の性能

ケース	供試体番号	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)		ポアソン比
			計算値	実測値	
No.1	①	36.5	30.0	34.2	0.177
	②	38.4	30.5	40.3	0.208
	③	38.9	30.7	37.2	0.218
No.2	①	38.2	30.5	40.0	0.207
	②	36.8	30.1	32.0	0.149
	③	37.1	30.1	38.3	0.161
No.3	①	40.8	31.2	35.2	0.203
	②	35.5	29.7	30.4	0.180
	③	36.5	30.0	37.1	0.185

室圧力方法) (JIS A 1128:2020)」にそれぞれ準じて測定を行った。さらに、空気量試験容器を用いて、単位容積質量を「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法 (JIS A 1116:2019)」に準じて求めた。その際の結果の一覧を表-2に示す。なお、単位容積質量の理論値は、表-1に示す各配(調)合の W, C, S, G の単位量をそれぞれ足し合わせたものである。

2.3 一軸圧縮強度試験・静弾性係数試験

一軸圧縮強度試験および静弾性係数試験は、「コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108:2018)」および「コンクリートの静弾性係数試験方法 (JIS A 1149:2017)」にそれぞれ準じて行った。円柱供試体は、各配(調)合で3本作製した。円柱供試体1本あたり、検長 60 mm のひずみゲージを供試体高さ $1/2$ 付近に、鉛直方向4か所、周方向2か所の計6枚を貼付した。なお、ひずみゲージは、鉛直方向4か所のうち、2か所は周方向のひずみゲージと重ねて貼付した。周方向のひずみゲージを貼付したのは、ポアソン比を算出するためである。

3. 実験結果および考察

本研究では、材齢35日、水中養生した円柱供試体を対象に、一軸圧縮強度試験および静弾性係数試験を行った。各配(調)合で作製した3本の円柱供試体の圧縮強度、静弾性係数 (計算値・実測値)、ポアソン比の一覧を表-3に示す。静弾性係数の計算値 E_0 は、示方書 [設計編]²⁾ に基づき、次式に示す圧縮強度の実測値 f'_c より求めた。

$$E_0 = \begin{cases} \left\{ 2.8 + \frac{f'_c - 30}{33} \right\} \times 10^4 & (30 \leq f'_c < 40 \text{ N/mm}^2) \\ \left\{ 3.1 + \frac{f'_c - 40}{50} \right\} \times 10^4 & (40 \leq f'_c < 70 \text{ N/mm}^2) \end{cases} \quad (1)$$

静弾性係数の実測値は、応力-ひずみ曲線のピーク応力の $1/3$ および、ひずみ 50μ に相当する応力の領域におけ

る端点の変化率として求めた。ポアソン比は、静弾性係数の実測値と同様に、上述の領域の端点における、円柱供試体の鉛直方向・周方向のひずみゲージが重なる点 2 点でそれぞれ計測されたひずみの比として求めた。表-3 に示すポアソン比は、上述の 2 点における平均値である。圧縮強度に着目すると、全供試体が設計基準強度 (30.0 N/mm²) を満たしていることが確認できる。また、図-1 には、静弾性係数および圧縮強度の関係を示した。なお、図中の黒の点線は式(1)の計算値を示している。静弾性係数は、全供試体で計算値を上回る値となった。骨材容積の増加に伴い、静弾性係数も増加するとの知見を得た文献³⁾もあるため、本実験の結果は妥当と考えられる。さらに、ポアソン比については、参考文献⁴⁾によると、「コンクリートの圧縮時のポアソン比は、一般に 1/5~1/7 (0.143~0.2) 程度である。」と明記されているが、本研

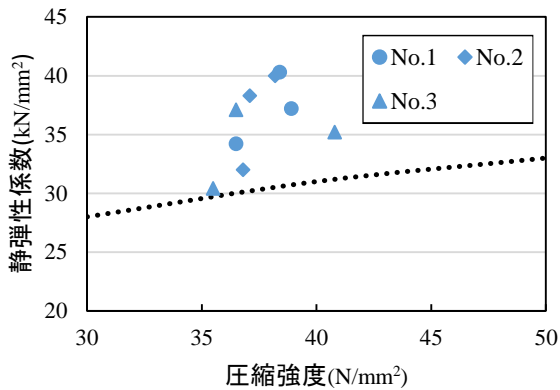


図-1 静弾性係数と圧縮強度の関係

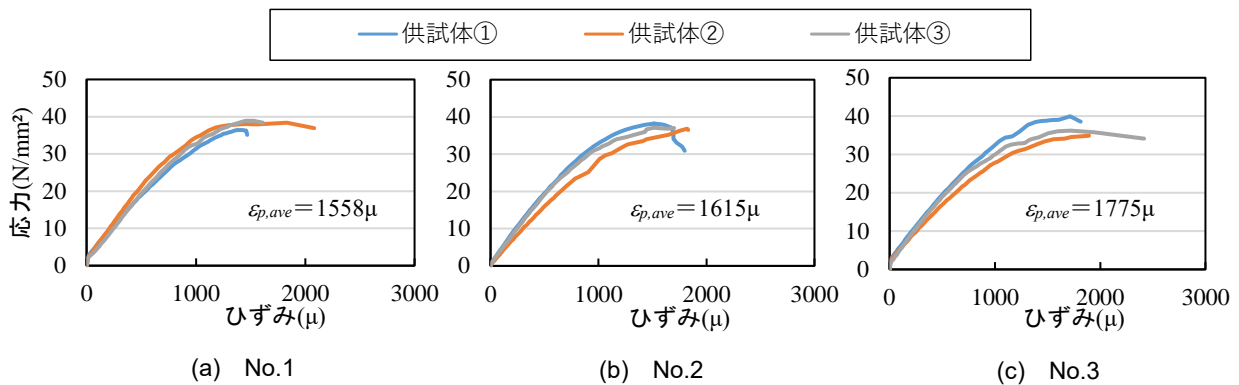


図-2 各配(調)合における応力-ひずみ関係の比較

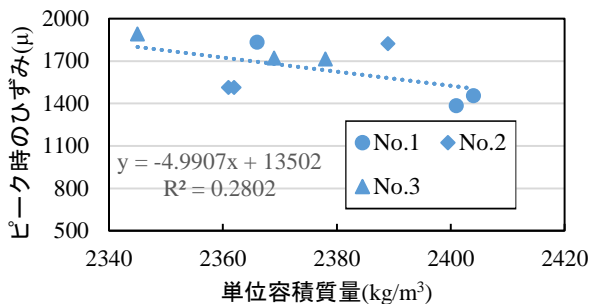


図-3 ピーク時のひずみと単位容積質量の関係

究では、概ねこの領域内あるいは上回る結果となった。

各配(調)合で作製した円柱供試体の圧縮強度試験により得られた応力-ひずみ関係を図-2 に示す。図中には、1 配(調)合あたりで得られた 3 本の円柱供試体(①, ②, ③)の応力ピーク時のひずみの平均値 ($\epsilon_{p,ave}$) を示している。最大応力に着目すると、各配(調)合で大きな差異は見られなかった。一方、ピーク時のひずみに着目すると、細骨材率の減少、すなわち単位粗骨材量の増加に伴い、ピーク時のひずみが大きくなる傾向が得られた。

ここで、ピーク時のひずみに関して考察するため、円柱供試体の単位容積質量とピーク時のひずみの関係、細骨材率とピーク時のひずみの関係をそれぞれ図-3、図-4 に示す。両図ともに、各プロットに対する近似直線を点線で、あわせて決定係数も示している。単位容積質量は試験前に測定した円柱供試体の直径、高さおよび質量をもとに、コンクリート硬化後の密度として求めた。両図より、単位体積質量の減少、細骨材率の減少に伴い、ピーク時のひずみは増加する傾向が得られた。この結果より、細骨材率が小さい供試体は、単位粗骨材量が多く、粗骨材間において細骨材が十分に充填されないことから、密実なコンクリートにならず、ひずみが大きくなったと推察される。ただし、この知見は、本研究の条件の場合に適用範囲が限定される。本研究における配(調)合では、2.1 で示したように、材料分離が生じず、かつ適正な空気量となるように混和剤の使用量を変えている。単位容積質量は、空気量に大きく支配されるため、AE 剤の使用量

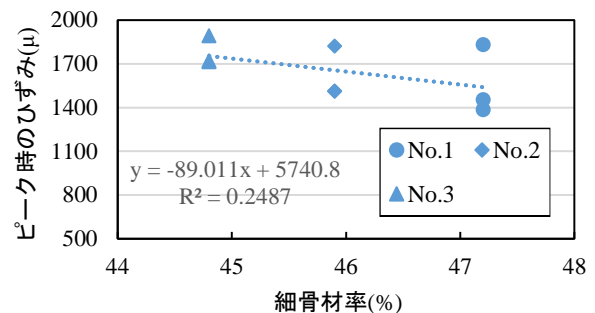


図-4 ピーク時のひずみと細骨材率の関係

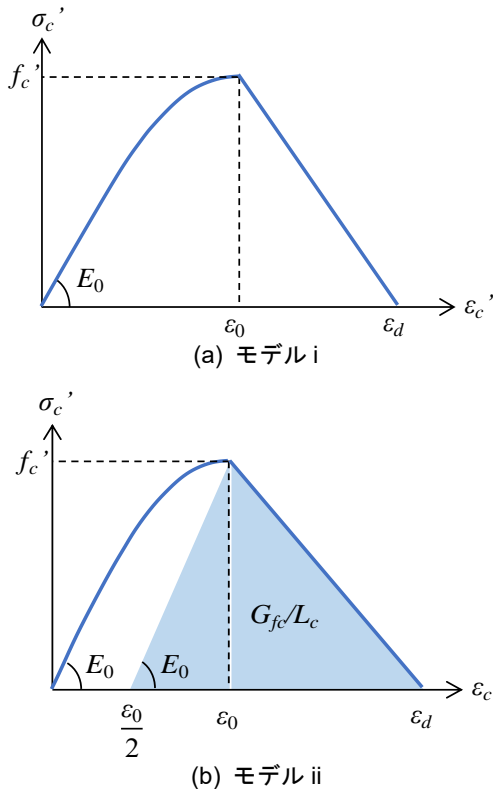


図-5 コンクリートの圧縮側の応力-ひずみモデル

を各配(調)合で統一して検討を行う必要がある。また、単位容積質量を基に、供試体における骨材の充填について推察を行ったが、走査型電子顕微鏡を用いて供試体を観察するなど、硬化後のコンクリートの内部構造を微視的な視点から検討する必要があると考えられる。

4. 解析概要

本研究では、各配(調)合で作製した計9本の円柱供試体の一軸圧縮試験結果(3. 参照)を対象に再現解析を行った。また、既往のコンクリートの圧縮側の応力-ひずみモデルの違いが解析結果に与える影響についても検討を行った。解析上、圧縮強度、初期弾性係数には表-3の値を用いた。

4.1 解析プログラムおよび収束計算

解析プログラムには、汎用有限要素解析ソフトウェアである DIANA10.8⁵⁾を用いた。収束計算には、Newton-Raphson 法を用い、収束条件として、エネルギーノルムは0.01%以下とし、収束計算の上限は40回とした。

4.2 円柱供試体のモデル化

本解析では、著者らの研究⁶⁾をもとに、円柱供試体は、底面を正三十六角形で直線近似し、角柱としてモデル化した。解析モデルは1辺25mmの四面体二次要素で要素分割を行った。モデルの1/2の高さの側面において、円周方向に計12点の計測点を設置し、加力方向の応力とひずみを計測した。また、モデル底面を三軸固定とし、モデル上面に強制変位を与えることで、加力を表現した。

4.3 コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ関係

コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ関係の違いによる影響を考察するため、CEB-FIP Model code 1990⁷⁾(以下、モデル i) を参考にしたものと同プレピーク域では示方書[設計編]²⁾、ポストピーク域では齊藤・Nakamura らのモデル^{8),9)}(以下、モデル ii) を参考にしたものを用いた。

モデル i は初期弾性係数に基づき最大応力時のひずみで決定する。たとえば、初期弾性係数が大きくなるほど最大応力時のひずみは小さくなる。また、ポストピーク域では応力が要素長さに基づき直線的に軟化するモデルである。このモデルは式(2)~(5)によって定式化され、概略図は図-5(a)のようになる。

$$\sigma'_c = \frac{kx - x^2}{1 + (k-2)x} f'_c \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (2)$$

$$x = \frac{\epsilon'_c}{\epsilon_0} \quad (3)$$

$$k = \frac{E_0}{E_c} (=2.0) \quad (4)$$

$$\epsilon_d = \epsilon_0 + \frac{w_d}{L} \quad (5)$$

ここに、圧縮強度を f'_c (N/mm²)、形状パラメータを k (=2.0)、初期弾性係数を E_0 (N/mm²)、割線弾性係数を E_c (N/mm²)、最大応力時のひずみを ϵ_0 (=2 f'_c / E_0)、終局ひずみを ϵ_d 、限界圧縮変位を w_d (=0.5mm)、要素長さを L (mm) とした。解析時の要素長さ L は要素寸法と等しくした。

モデル ii は圧縮強度および最大応力時のひずみに基づき初期弾性係数が決定するモデルである。たとえば、最大応力時のひずみを一定とし圧縮強度を大きくした場合、初期弾性係数は大きくなる。ポストピーク域においては、圧縮強度、圧縮破壊エネルギーおよび等価長さに基づき直線的に軟化するモデルである。このモデルは式(6)~(9)によって定式化され、概略図は図-5(b)のようになる。

$$\sigma'_c = \begin{cases} \left\{ \frac{2\epsilon'_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon'_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right\} f'_c & (0 \leq \epsilon'_c \leq \epsilon_0) \\ \frac{\epsilon_{cu} - \epsilon'_c}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} f'_c & (\epsilon_0 < \epsilon'_c \leq \epsilon_{cu}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\epsilon'_p = \epsilon_0 - \frac{f'_c}{E_0} \quad (7)$$

$$\epsilon_{cu} = \frac{2G_{fc}}{L_c f'_c} + \epsilon'_p \quad (8)$$

$$G_{fc} = 8.8 \sqrt{f'_c} \quad (9)$$

ここに、圧縮強度を f'_c (N/mm²)、初期弾性係数を E_0 (N/mm²)、最大応力時のひずみを ϵ_0 (=2000 μ)、終局ひずみを ϵ_{cu} 、等価長さを L_c (mm)、圧縮破壊エネルギーを G_{fc} (N/mm) とした。解析時の等価長さ L_c は要素寸法と等

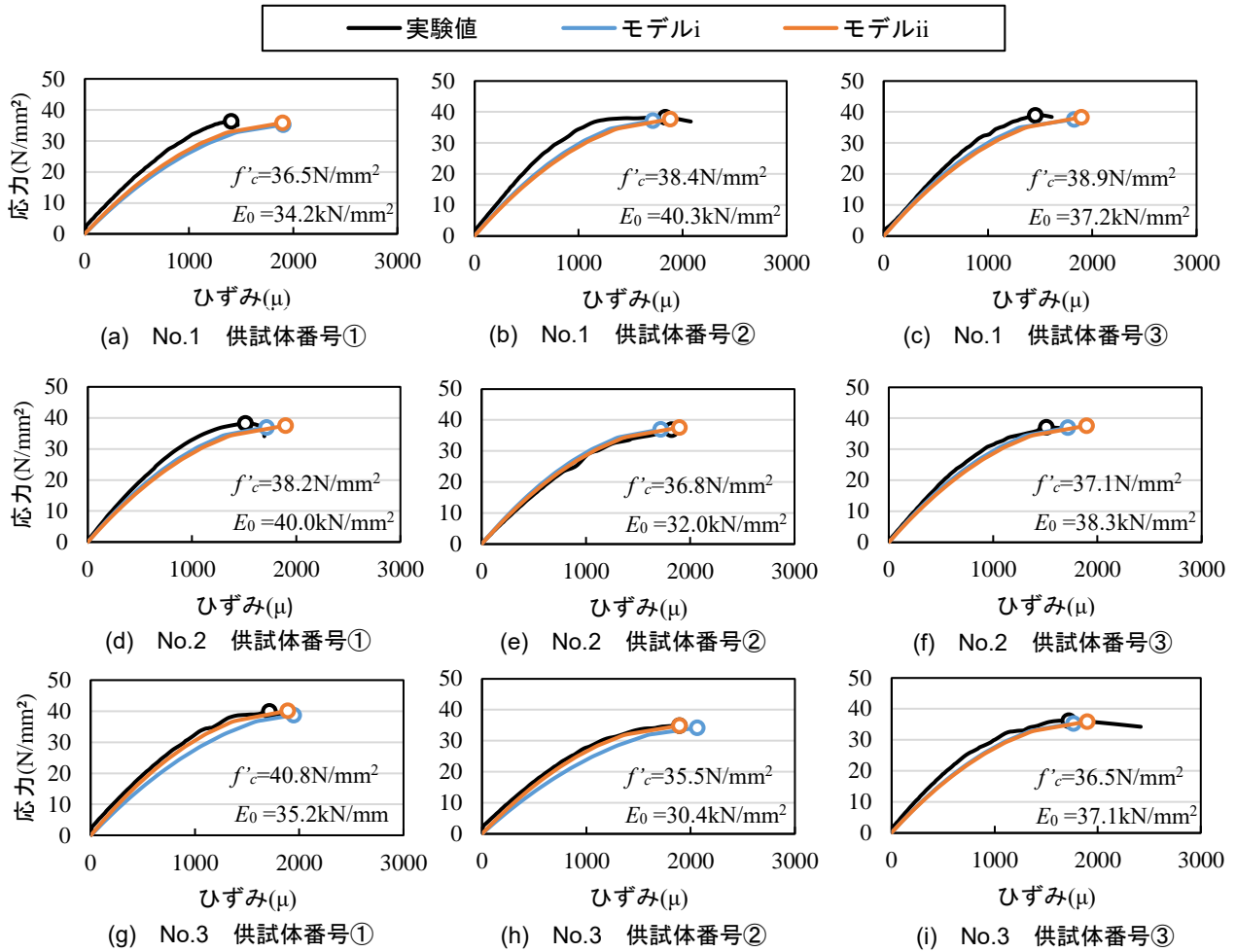


図-6 再現解析結果

しくした。

4.4 コンクリートの引張側の応力-ひずみ関係

引張側の応力-ひずみ関係は、応力が引張強度に至るまで、初期弾性係数に基づき応力が直線的に増加するものとし、到達後は指数関数に基づき軟化する Hordijk モデル¹⁰⁾を用いた。このモデルは、ひび割れ幅による引張破壊エネルギーに基づいたもので、引張破壊エネルギー、引張強度はそれぞれ示方書[設計編]²⁾より圧縮強度から算出した。

5. 再現解析結果および考察

本研究では、2種のコンクリートの圧縮側の応力-ひずみモデルを用いて、再現解析を行った。図-6に各配(調)合における応力-ひずみ関係の実験値と解析値の比較を示す。図中の解析値は、表-3のポアソン比の結果にばらつきがみられたため、コンクリートのポアソン比に0.2を適用した。また、図中のプロットは、応力ピーク時を示している。

まず図-6(a)~(c)に着目すると、コンクリートの圧縮側の応力-ひずみモデルによらず、解析値のピーク時のひずみが大きくなることが示された。この結果は、3.で述

べたとおり、実験値のピーク時のひずみが小さくなる傾向があるが、この傾向を解析では再現できず、実験結果との差異が生じたと考えられる。

次に、図-6(d)~(f)に着目すると、No.2の中で、ヤング係数が小さい供試体②では解析値と実験値は概ね一致するものの、供試体①、③のようにヤング係数が大きくなるにつれて、解析値と実験値の乖離も大きくなった。しかし、この乖離は、No.1と比較して小さくなった。

また、図-6(g)~(i)に着目すると、概ね解析によってピーク時のひずみを再現できているが、図-6(g)、(h)は、コンクリートの圧縮側の応力-ひずみモデルによる差異が見られ、モデルiiは実験値との挙動が概ね一致した。モデルiiの場合、ピーク時のひずみが2000μで一定であるが、細骨材率が小さいNo.3は、ピーク時のひずみが大きくなり、2000μに近づくため、モデルiiによって解析精度が高まったと示唆される。

ここで、ポアソン比による影響に着目するため、ポアソン比0.2と比較して差が大きく計測されたNo.2の供試体番号②・③を対象に、表-3に示すポアソン比(0.149および0.161)を適用した解析結果を、点線を用いて、図-7に示す。図中には、ポアソン比の実測値も示している。

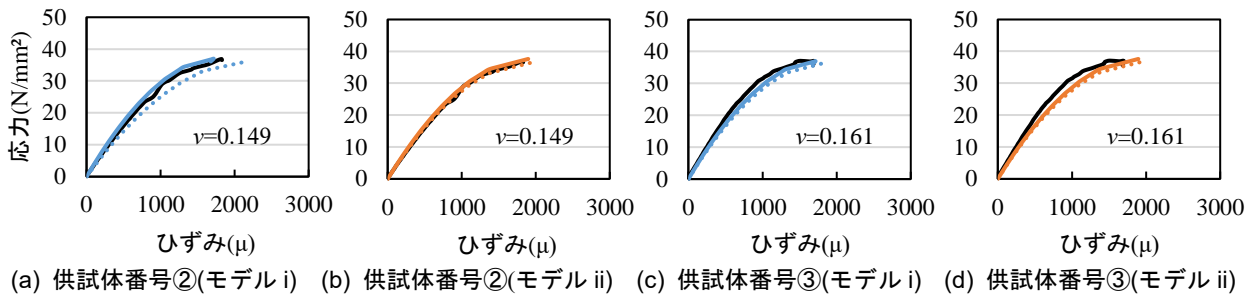


図-7 ポアソン比の違いによる応力-ひずみ関係の比較(黒：実験値，青・橙：解析値)

なお、青・橙の実線はそれぞれ、図-6(e), (f)の解析結果である。図より、供試体によらず、実測のポアソン比を用いた場合、最大応力をわずかに小さく評価する、すなわち安全な方向に評価することが示された。一方、ピーク時のひずみに着目すると、ひずみを大きく評価する傾向があり、解析精度が低下することが示された。特に、モデル i を用いた解析結果において、この影響が顕著に現れている。本実験から得られたポアソン比は、ピーク応力の 1/3 および、ひずみ 50μ に相当する応力の領域において求めたが、さらに応力が大きい範囲ではポアソン比が大きくなる傾向が得られた。しかし、解析結果に関して、ピーク応力の 1/3 以後の領域に関しても、解析で適用したポアソン比 (0.149, 0.161) の影響を受けることから、供試体が終局に至るまでの圧縮性状を表現するためには、解析で適用したポアソン比よりも大きな 0.2 を用いて解析を行うことが妥当であると考えられる。また、本解析で対象とした供試体は、一般的なコンクリートのポアソン比の下限の 1/7 (0.143) ⁴⁾ に近い値であるため、本知見の適用範囲は一般的なコンクリートに限られることが示唆される。

以上より、細骨材率の大きなコンクリート供試体は、既往の応力-ひずみモデルを用いると、解析によりピーク時のひずみを再現できないが、細骨材率が小さいコンクリート供試体では、ピーク時のひずみが 2000μ で一定となる示方書 [設計編] ²⁾ に記載されるモデルを使用すると、解析精度が向上することが示された。ただし、これらの知見は本研究の解析プログラムおよび材料モデルを用いた場合に範囲が限定されるため、高強度コンクリート等を研究対象とする場合は、別途検討が必要となる。

6. まとめ

本研究では、細骨材率の異なるコンクリート円柱供試体 (44.8~47.2%) を作製し、圧縮性状の違いに関する実験的検討を行った。次に、有限要素解析による再現解析を通して、既往のコンクリートの圧縮側の応力-ひずみモデルの適用性について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 本研究の配(調)合では、細骨材率の違いによる圧縮

強度への影響は見られなかったが、細骨材率の低下に伴い、応力ピーク時のひずみが大きくなることが確認された。

(2) 解析では、細骨材率の大きなコンクリート供試体は応力ピーク時のひずみを再現できないが、細骨材率の小さなコンクリート供試体は、応力ピーク時のひずみが 2000μ で一定のモデルを使用すると、実験結果を概ね再現できることが示された。

ただし、(1)に関して、細骨材の充填不足による影響を確認するため、供試体の内部構造について走査型電子顕微鏡を用いた微視的検討を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2023年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2023。
- 2) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2023。
- 3) 大林ら：粗骨材の容積比を変えたコンクリートの応力-ひずみ曲線に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.364-369，2014。
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'23，p.75，2023。
- 5) DIANA FEA B.V., User Manuals - DIANA FEA, 2025 (2025年1月7日取得 <https://dianafea.com/diana-manuals/>)
- 6) 杉山ら：コンクリート供試体および曲げ破壊先行RC部材の性能評価精度に及ぼす検討，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会，V-546，2024。
- 7) CEB: CEB-FIP Model code 1990, Thomas Telford, 1993。
- 8) 齊藤ら：剛体バネモデルを用いたRCパネルのせん断二次破壊に関する解析的研究，土木学会論文集，No.704，V-55，pp. 219-234，2002。
- 9) Nakamura, H. et al.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI, pp. 259-272, 1999。
- 10) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991。