

論文 粘弾塑性サスペンション要素法によるポーラスコンクリートの圧縮破壊解析

朴 相俊^{*1}・谷川恭雄^{*2}・森 博嗣^{*3}・平岩 陸^{*4}

要旨：本研究では、ポーラスコンクリートの力学特性について検討するため、筆者らが開発した粘弾塑性サスペンション要素法を用いて圧縮破壊解析を行った。3次元モデルを用いて、粗骨材粒径、ペースト強度および空隙率がポーラスコンクリートの圧縮変形挙動に及ぼす影響について検討した。また、検証実験を行い、解析結果と比較・検討した結果、定量的な差はあるものの、解析結果が実際の傾向をよく再現できることを確認した。

キーワード：ポーラスコンクリート、粘弾塑性サスペンション要素法、圧縮破壊解析

1.はじめに

ポーラスコンクリートは、多くの連続空隙を持つ多孔質なコンクリートである。内部の連続した空隙の存在により、透水性や吸音性に優れ、植生、水質浄化、生物の棲みかなどの用途に利用され、環境に与える負荷を低減することができる。このため、近年の環境保全に対する社会的な意識の向上に伴い、エココンクリートの1つとして実用化が進められている^{1),2)}。その中で、力学特性に関する研究も徐々に進められ、ポーラスコンクリートの強度特性は空隙率の影響を大きく受けることが報告されており、圧縮強度に及ぼす水セメント比および骨材粒径の影響に関しても研究が行われている^{3),4)}。

筆者らは、既に提案した粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)⁵⁾によるコンクリートの破壊シミュレーションを行い、その適用性を検討してきた。この解析手法を用いて、粗骨材半径とは独立にサスペンション要素半径を設定できるようにプログラムを変更し、まず、ポーラスコンクリートの2次元圧縮破壊解析を試行した⁶⁾。しかし、2次元破壊解析では、空隙率を実際に即した形で算定できないため、実験値との比較が困難であった。このため、本研究では、解析結果と実験結果をより近い条件で比較・検討するため、3次元破壊解析を実施した。また、

解析の再現性を確認するため、併行して検証実験も行った。

2. 解析の概要

ポーラスコンクリートの強度を決める主要因として、粗骨材寸法、ペースト強度、空隙率ないしペースト量が考えられる。これらの要因がポーラスコンクリートの1軸圧縮変形挙動に及ぼす影響を検討するため、VEPSEMによるシミュレーションを行った。

VEPSEMにおけるポーラスコンクリートのモデル化の概要を図-1に示す。本解析においては、粗骨材半径を節点半径 r によって、ペースト強度を入力データの純引張強度 F_t によって、また、空隙率 V_r をサスペンション要素半径 s_r によって、それぞれ考慮した。図-1(a)は空隙率が大きい場合、図-1(b)は空隙率が小さい場合を示しており、空隙率が小さくなるに従って、サスペンション要素半径が大きくなるようにモデル化した。

解析モデルを図-2に示す。直径50mm、高さ100mmの円柱体モデルとした。粗骨材半径 r を4, 5, 6, 7mmと変化させて、r4-model, r5-model, r6-model, r7-modelの4シリーズを設定した。粗骨材となる節点は、一般に用いられるポーラスコンクリートと同様に単一粒径の粗骨材とし、円柱体モデル空間内にランダムに配置した。

* 1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻・工修 (正会員)

* 2 名古屋大学環境学研究科都市環境学専攻教授・工博 (正会員)

* 3 名古屋大学環境学研究科都市環境学専攻助教授・工博 (正会員)

* 4 豊田工業高等専門学校建築学科助手・工博 (正会員)

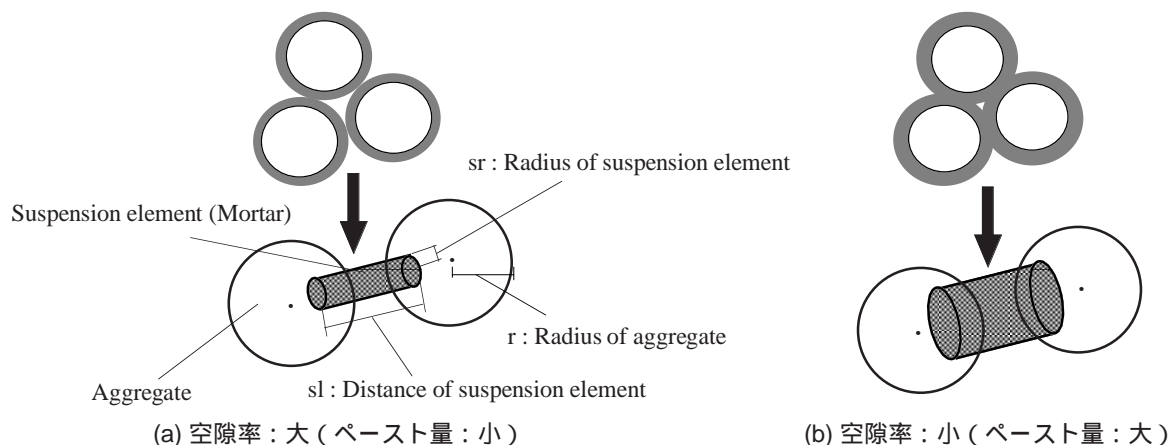
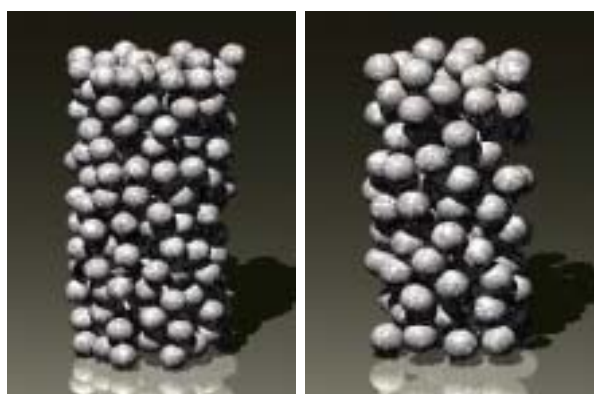
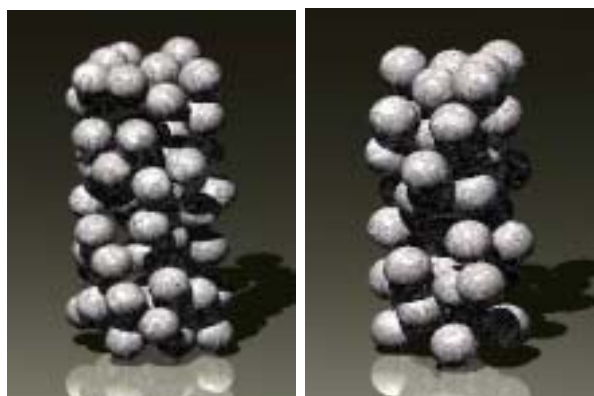


図-1 ポーラスコンクリートのモデル化



(a) r4-model (r=4mm)

(b) r5-model (r=5mm)



(c) r6-model (r=6mm)

(d) r7-model (r=7mm)

図-2 解析モデル

表-1は、解析の入力パラメータを示したものである。各シリーズにおいて、ペーストの純引張強度 F_t を3, 4, 5MPaの3水準に設定した。表-2は、各解析モデルの入力パラメータを示している。各シリーズの粗骨材数 N は、粗骨材の総体積 A_g が同等となるように調整した。節点と節点を結ぶサスペンション要素の限界長さであるサスペンション要素

表-1 解析の入力パラメータ

tan	F_t	E_m	ν	H	W
0.2	3, 4, 5	11	0.5	0.8	100

[Notes] tan : Coefficient of internal friction,
 F_t : Pure tensile strength (MPa),
 E_m : Elastic modulus (GPa),
 ν : Viscosity (MPa · s),
 v : Loading rate (mm/s),
 H : Height of specimen (mm),
 W : Width of specimen (mm)

表-2 解析モデルの入力パラメータ

	r	N	A_g	sd	sn	sl
r4-model	4.0	230	61660	8.0	1835	7389
r5-model	5.0	116	60740	8.0	643	2314
r6-model	6.0	69	62430	8.0	288	884
r7-model	7.0	42	60340	8.0	152	443

[Notes] r : Radius of aggregate (mm),
 N : Number of aggregates,
 A_g : Volume of aggregate (mm³),
 sd : Limitation distance of coarse aggregates for construction of suspension element (mm),
 sn : Number of suspension elements,
 sl : Total distance of suspension element (mm)

素構成距離 sd は、8.0mmとした。また、 sl は全サスペンション要素の長さの合計を示しており、この sl とサスペンション要素半径 sr により、サスペンション要素の全体積が決まる。表-3は、各空隙率におけるサスペンション要素半径の大きさを示したものである。各シリーズにおいて、空隙率 V_r を10, 20, 30, 40%の4水準とした。このように、本解析では、サスペンション要素半径を粗骨材半径

とは独立に設定することで空隙率を考慮した。

各シリーズの解析は、時間刻みを 5.0×10^{-7} sとし、縦ひずみが0.5%に達するまでの圧縮変形挙動について計算を行った。

3. 実験の概要

実験の要因を表-4に示す。実験要因は、ポーラスコンクリートに大きな影響を与えると考えられる粗骨材粒径、水セメント比W/C、および空隙率を取り上げた。粗骨材は、JIS 4号, JIS 5号, JIS 6号, JIS 7号の4水準、目標空隙率は10, 20, 30%の3水準とした。

供試体は、直径100mm、高さ200mmの円柱体を用いた。また、JIS 6号についてのみ、水セメント比を25, 30, 35%の3水準とし、ペースト強度の影響について検討した。混練には、揺動攪拌型ミキサを使用して、ペースト先練りとし、各水準について3本を作製した。これらの試験方法は、ポーラスコンクリートの物性試験方法(案)⁷⁾に準じている。使用材料を表-5に、調合を表-6に示す。ポーラスコンクリートの目標空隙率の決定には、単位粗骨材量を一定とし、粗骨材間の空隙をペーストで充填する方法を採用した。また、単位粗骨材量をもとに、目標空隙率が得られるように、必要なペースト量を計算した。高性能AE減水剤の添加率は、ペーストの目標フロー値が230mmになるように、セメント質量の0.08~0.7%の範囲で、事前の試し練りにより決定した。

円柱供試体は、2日後に脱型した後、室温 20 ± 3 ℃、湿度 $60 \pm 5\%$ の、恒室恒温養生室で水中養生を行った。養生中に、上面の研磨を行い、空隙率を測定した。目標空隙率10, 20および30%の供試体からは、この処理の結果、それぞれ25, 35および41%の空隙率が実測された。この研磨および空隙率測定時以外は、常に水中にて養生を行った。その後、材齢28日で両端面に硫黄キャッピングを行い、圧縮強度試験に供した。

表-3 各空隙率におけるサスペンション要素半径(mm)

	Vr=10%	Vr=20%	Vr=30%	Vr=40%
r4-model	2.23	2.03	1.81	1.55
r5-model	3.99	3.64	3.25	2.80
r6-model	6.41	5.83	5.19	4.46
r7-model	9.14	8.33	7.44	6.42

表-4 実験の要因

粗骨材	W/C	目標空隙率	測定項目
JIS 4号	25%	10% 20% 30%	空隙率 圧縮強度 応力 - ひずみ曲線
JIS 5号	25%		
JIS 6号	25%		
	30%		
JIS 7号	35%		
	25%		

表-5 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm ³)
粗骨材	JIS 4号砕石 (粒径: 20~30mm、密度: 2.75g/cm ³ 、実積率58.1%)
	JIS 5号砕石 (粒径: 13~20mm、密度: 2.75g/cm ³ 、実積率58.2%)
	JIS 6号砕石 (粒径: 5~13mm、密度: 2.74g/cm ³ 、実積率57.7%)
	JIS 7号砕石 (粒径: 2.5~5mm、密度: 2.72g/cm ³ 、実積率56.5%)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表-6 ポーラスコンクリートの調合表

	W/C (%)	HAE/C (%)	Vr (%)	P (lit./m ³)	G (lit./m ³)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	G (kg/m ³)
JIS 4号	25	0.7	10	319	581	563	137	1599
			20	219		387	93.9	1599
			30	119		210	51.0	1599
JIS 5号	25	0.7	10	318	582	561	136	1598
			20	218		385	93.5	1598
			30	118		208	50.6	1598
JIS 6号	25	0.7	10	323	577	570	138.6	1582
			20	223		394	95.7	1582
			30	123		217	52.8	1582
JIS 6号	30	0.3	10	323	577	524	155.6	1582
			20	223		362	107.4	1582
			30	123		199.5	59.3	1582
JIS 6号	35	0.08	10	323	577	485	169	1582
			20	223		335	116.8	1582
			30	123		185	64.4	1582
JIS 7号	25	0.7	10	335	565	591	143.7	1539
			20	235		414	100.8	1539
			30	135		238	57.9	1539

[Notes] W/C : Water-cement ratio,
HAE : Highrange water-reducing AE agent,
Vr : Void ratio, P : Paste, C : Cement,
W : Water, G : Aggregate

4. 解析結果と実験結果の考察

4.1 粗骨材径の影響

図-3は、各粒径の解析モデルにより計算された、空隙率 V_r が20%、純引張強度 F_t が4MPaの場合の圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線に与える粗骨材径 r の影響を示した解析結果である。この図によれば、粗骨材半径が増大するほど、弾性係数が増大し、破壊が脆性的となる。

図-4は、圧縮強度 F_c と粗骨材半径 r の関係を示したものである。この図によれば、 $r=7\text{mm}$ を除けば、粒径が大きくなると強度が増大する。表-2に示したように、本解析では、空隙率が同一であれば、粗骨材半径の大きいものほど、サスペンション要素の数は少なくなり、逆に、サスペンション要素半径が大きくなる。図-4に示される結果は、各要素の断面積が増加することによる高剛性化の影響が現れたものと考えられる。 $r=7\text{mm}$ のときに強度が減少しているのは、骨材数が少なくなり、構造が不安定になったためと考えられる。要素数が少ないモデルでは、節点配置が破壊性状を決める支配的な要因となるため、解析結果がばらつい

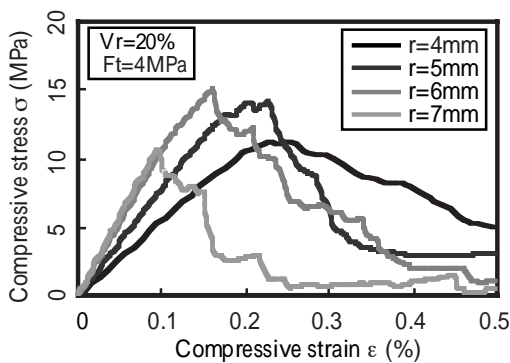


図-3 圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線 (粗骨材径 r の影響)

たものと思われる。

なお、骨材粒径を変えて行った実験では、粒径によって、目標空隙率と実測空隙率が大きく異なる結果が得られたため、本解析結果と比較することができなかった。今後、各粒径ごとに、空隙率を合わせた供試体を作製し、比較する必要があると考えられる。

4.2 ペースト強度の影響

図-5(a)は、空隙率 V_r が20%の場合の圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線の解析結果を、純引張強度 F_t ごとに示したものである。ペースト強度は、解析では純引張強度に相当する。この図によれば、弾性係数は同一であるが、純引張強度 F_t が増大すると、圧縮強度および最大応力時のひずみが増大し、応力下降域の勾配がやや急になる。すなわち、純引張強度が大きいものほど、高強度で、破壊がやや脆性的になるといえる。

一方、図-5(b)は、空隙率 V_r が35%の場合の実測空隙率の圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線の実験結果である。弾性係数はほぼ同一であり、ペースト強度

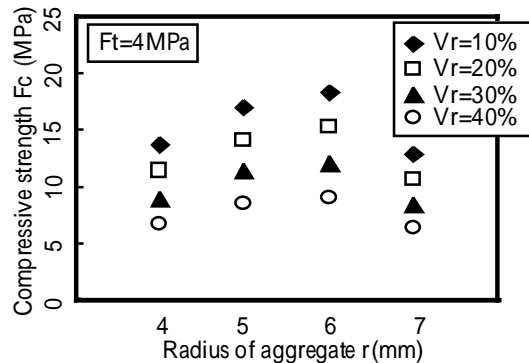
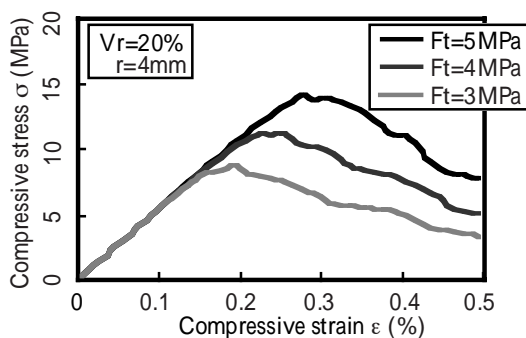
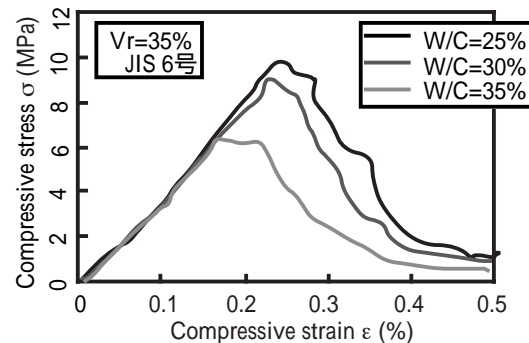


図-4 圧縮強度 F_c と粗骨材径 r の関係

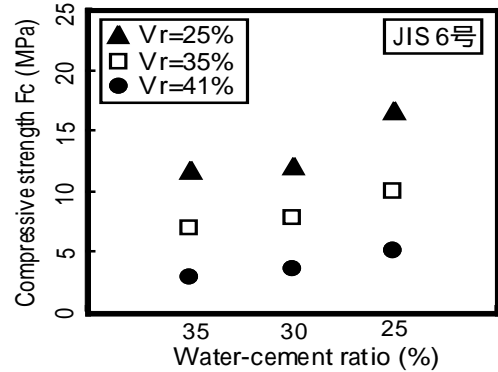
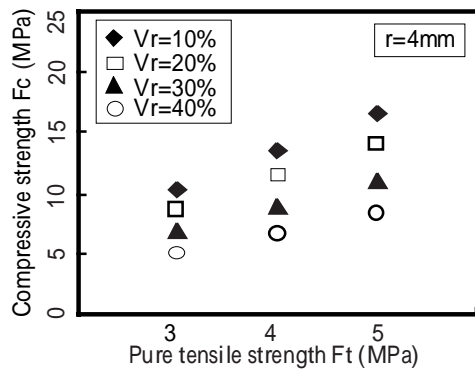


(a) 解析結果 (純引張強度 F_t の影響)



(b) 実験結果 (水セメント比 W/C の影響)

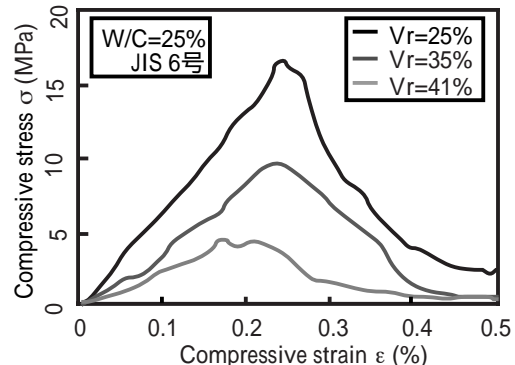
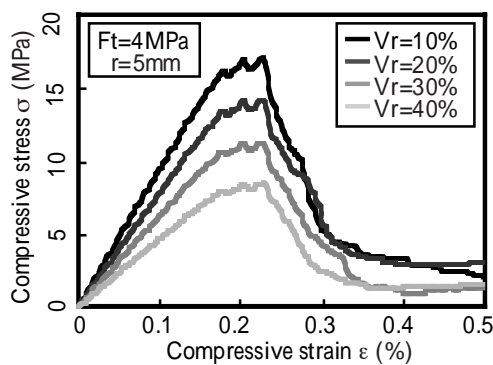
図-5 圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線



(a) 解析結果
(圧縮強度Fcと純引張強度Ftの関係)

(b) 実験結果
(圧縮強度Fcと水セメント比W/Cの関係)

図-6 圧縮強度Fcとペースト強度の関係



(a) 解析結果

(b) 実験結果

図-7 圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線に及ぼす空隙率Vrの影響

の増大に伴って圧縮強度も増加し、応力下降域の勾配も急になっている。強度の絶対値は異なるものの、これらは解析結果の傾向とよく一致している。

図-6(a)は、解析により求められた圧縮強度Fcと純引張強度Ftの関係を示したものである。解析においては、ペースト強度の増大により圧縮強度Fcがほぼ線形に増大する。また、空隙率が小さくなるほど、圧縮強度の増加傾向が顕著となる。

一方、図-6(b)は、実験による圧縮強度Fcと水セメント比W/Cの関係を示したものである。解析結果と同様に、ペースト強度が増大すると、圧縮強度は増加し、この傾向は空隙率が小さい場合の方が顕著である。このように、解析は実験の傾向をよく再現していると考えられる。

4.3 空隙率の影響

図-7(a)は、純引張強度Ftが4MPaの場合の圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線の解析結果を、空隙率Vrごと

に示したものである。いずれの解析モデルにおいても、最大応力時のひずみはほぼ同一であるが、空隙率の減少により、圧縮強度および弾性係数が増大し、応力下降域の下り勾配が急になり、破壊が脆性的となる。一方、図-7(b)は、実験によって得られた粗骨材がJIS 6号、水セメント比が25%の場合の圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線を、空隙率ごとに示したものである。この図においても、空隙率によらず最大応力時のひずみはほぼ同一である。また、空隙率の減少により、弾性係数は増大し、応力下降域の勾配が急になる。この傾向は解析とほぼ同様な結果といえる。

図-8(a)は、本解析により求められた粗骨材径 $r=5\text{mm}$ の場合の圧縮強度Fcと空隙率Vrの関係を示したものである。空隙率の増加に従って圧縮強度が直線的に減少する。また、純引張強度が高くなると、高い圧縮強度が得られるとともに、空隙率による圧縮強度の変化がやや大きくなる傾向にある。

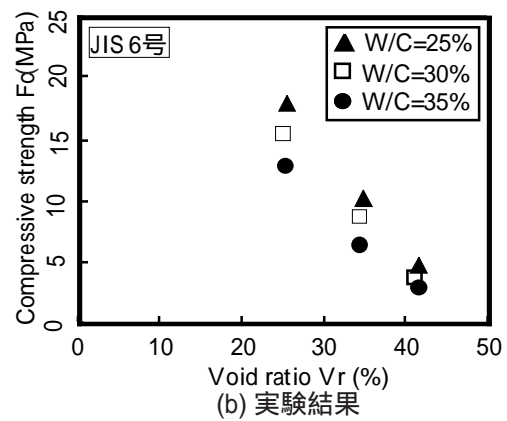
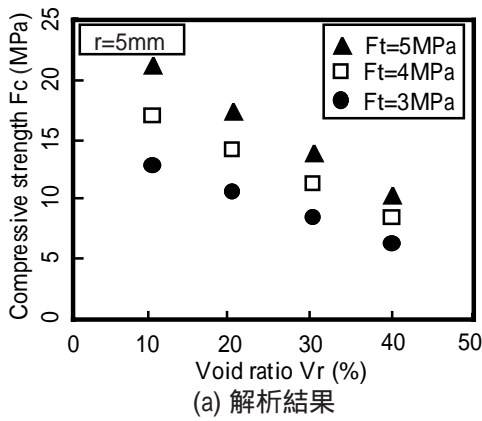


図-8 圧縮強度 F_c と空隙率 V_r の関係

一方、図-8(b)は、JIS 6号を用い、水セメント比を25、30、35%と変化させた場合の圧縮強度 F_c と実測空隙率 V_r の関係を示したものである。解析結果と同様に、空隙率の増加に伴って圧縮強度が減少する傾向にあるが、実験結果の方が減少傾向が若干顕著であった。

5. まとめ

本研究では、粘弾塑性サスペンション要素法を用いてポーラスコンクリートの3次元1軸圧縮破壊解析を行い、ポーラスコンクリートの圧縮変形挙動に及ぼす粗骨材寸法、ペースト強度および空隙率の影響について検討した。解析の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 骨材寸法が増大すると、破壊が脆性的となる。
- (2) ペースト強度が増大すると、圧縮強度は増大し、破壊が脆性的になる。また、この場合の圧縮強度の増加傾向は空隙率が小さいものほど顕著である。
- (3) 空隙率が増大すると、圧縮強度は減少し、この減少傾向は純引張強度が大きいものほど顕著である。

また、検証実験の結果によれば、骨材寸法の影響に関しては、目標空隙率と実測空隙率が大きく異なったため、解析結果と比較することはできなかったが、水セメント比や空隙率の影響に関しては、実験結果は解析結果の傾向をよく再現していることがわかった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、名古屋大学工学研

究科建築学専攻・大塚幸治君の御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 玉井元治，河合 章，来田秀雄：まぶしコンクリートの海中における性質と水質浄化の可能性，セメント・コンクリート論文集，No.46，pp.880-885，1992.1
- 2) 柳橋邦生，米澤敏男，佐久間護，池尾陽作：緑化コンクリートに関する研究および施工，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.871-876，1994.7
- 3) 田中博一，今井 実：緑化コンクリートの強度特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.1，pp.283-288，1999.7
- 4) 張 日紅，中澤隆雄，新西成男：ポーラスコンクリートの空隙率が圧縮強度と応力-ひずみ関係におよぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.864-869，1997.12
- 5) 荒井正直，船見晃啓，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸：非連続体モデルを用いたコンクリートの破壊解析手法，日本建築学会構造系論文集，No.471，pp.1-9，1995.5
- 6) 平岩 陸，谷川恭雄，森 博嗣，南部禎士：粗骨材の寸法および配置がコンクリートの圧縮破壊挙動に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.541-546，1998.7
- 7) 日本コンクリート工学協会・エココンクリート研究委員会編：エココンクリート研究委員会報告書，pp.53-58，1995