

論文 Delaunay 三角分割による要素構成方法を用いた粘弾塑性サスペンション要素解析

平岩 陸^{*1}・谷川恭雄^{*2}・森博嗣^{*3}・川戸耕介^{*4}

要旨: 粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)による解析において, ランダムに配置された多数の節点を用いた場合に生じる問題点を, Delaunay三角分割による要素構成方法を採用することによって解決した。また, このVEPSEMを用いて, 粗骨材容積比および粗骨材寸法がコンクリートの圧縮破壊挙動に及ぼす影響に関する基礎的な検討を行った。その結果, 圧縮強度については実現象とほぼ同様の結果が得られ, このような粗骨材による影響が, 内部の応力集中によって生じることがわかった。

キーワード: Delaunay三角分割, 粘弾塑性サスペンション要素法, コンクリート, 粗骨材

1. まえがき

筆者らは, これまでに粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)を用いて, 硬化コンクリートの変形・破壊挙動のシミュレーションを行ってきた¹⁾。本解析手法は, コンクリートを粗骨材(=粗骨材節点)とマトリックスモルタル(=サスペンション要素)からなる2相材料として取り扱い, 非連続体モデルによる動的解析を行うため, 高い計算能力が要求されるが, 近年のコンピュータ技術の大幅な発展により, 計算時間を要する粗骨材節点の多い解析モデルに対しても解析が比較的手軽に行えるようになりつつある。

これまでの本解析手法を用いた結果によれば, 粗骨材節点の配置による影響が大きいことが明らかとなっている²⁾。このため, 節点数を多くして, 配置をランダムとした解析モデルを用いる必要がある。しかし, 従来のVEPSEMにおけるサスペンション要素(以下, 要素と略記)構成方法ではいくつかの問題点が生じ

る。

そこで, 本研究では, VEPSEMにおける要素構成方法を改良し, これらの問題点の解消を図るとともに, 粗骨材容積比および粗骨材寸法がコンクリートの1軸圧縮変形・破壊挙動に与える影響について解析的な検討を行った。

2. 要素構成方法の改良

2.1 従来の要素構成方法

VEPSEMでは, 従来, 各節点間のサスペンション要素の構成に際しては要素構成距離というパラメータを用いている。図-1(a)に示すよう

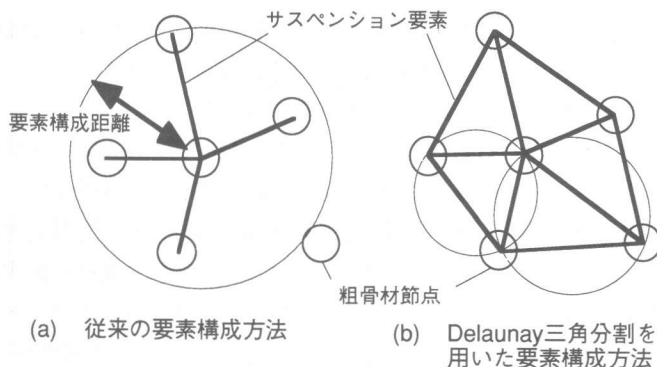


図-1 要素構成方法の比較

*1 豊田工業高等専門学校助手	建築学科	工修 (正会員)
*2 名古屋大学大学院教授	工学研究科建築学専攻	工博 (正会員)
*3 名古屋大学大学院助教授	工学研究科建築学専攻	工博 (正会員)
*4 名古屋大学大学院	工学研究科建築学専攻	

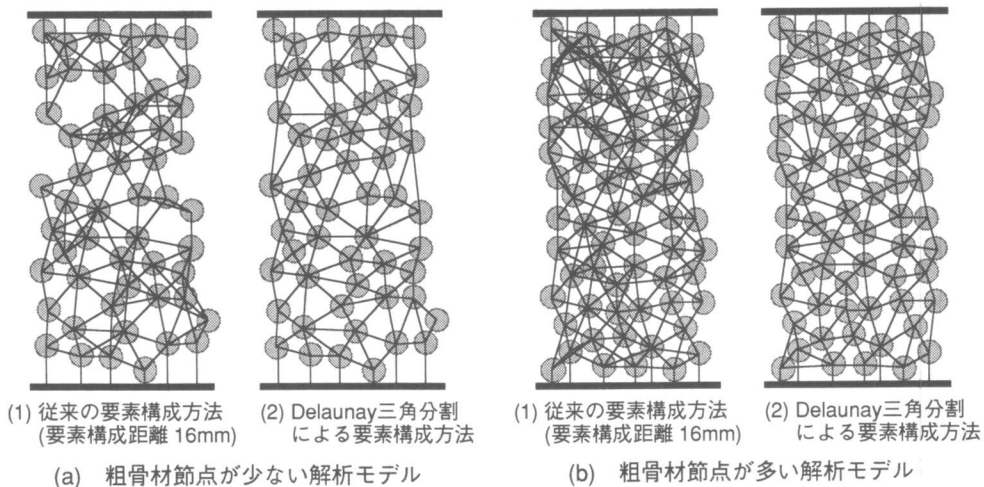


図-2 従来の要素構成方法とDelaunay三角分割による要素構成方法の比較

に、節点はこの要素構成距離内に存在する他のすべての節点との間に要素を構成する。

この方法では、図-2に示すように、粗骨材分布に粗密がある場合に、要素の構成に偏りが生じる。図-2(a)のような粗骨材節点が少ないモデルでは、要素が構成されない部分が現れ、一方、図-2(b)のような粗骨材節点が多いモデルでは、互いに交差する要素や粗骨材を貫通する要素が多数作成される。これらのことは、VEPSEMの要素が、コンクリートにおけるマトリックスモルタル部をモデル化したものであるという仮定と矛盾する。このため、従来のVEPSEM解析においては、解析モデルを作製する際に、粗骨材節点をできるだけ均等に配置し、要素構成距離もそれぞれの解析モデルに適した値を設定する必要があった。しかし、粗骨材の量および寸法の影響を検討する際には、多数の粗骨材節点を、ランダムに配置した解析モデルが必要であり、この要素構成方法では、上記の問題を回避して適切なシミュレーションを行うことが困難であった。

2.2 Delaunay三角分割を用いた要素構成方法

Delaunay三角分割は、平面内に与えられた節点を結び、平面を三角形のメッシュに分割する手法の1つである。幾何学的には、節点を結んで

得られる三角形内の最小角度が最も大きくなる分割手法であり、有限要素法(FEM)の要素分割にも用いられている。計算幾何学においては、図-1(b)に示すように、作成された各三角形の外接円の内部に、他の節点を含まないようなただ1つの三角形分割として定義される。

VEPSEMでは、Delaunay三角分割によって分割された三角形の各辺に、サスペンション要素が構成される。図-2に示されるように、Delaunay三角分割を用いた場合、従来の要素構成方法のような粗骨材節点の量および分布による問題は生じない。また、各解析モデルに対して要素構成距離を調整する必要がないという利点がある。

3. 解析の概要

本報では、粗骨材容積比および粗骨材寸法の影響を検討するために、Delaunay三角分割による要素構成方法を採用したVEPSEMを用いて、コンクリートの1軸圧縮試験のシミュレーションを2次元解析として行った。解析手法の詳細については既報¹⁾を参照されたい。

本解析では、供試体断面積に占める粗骨材節点の総面積の比である粗骨材容積比 V_g を30%と40%の2段階、粗骨材節点の直径 d を8, 10, 12, 14mmの4段階として検討を行った。また、節点

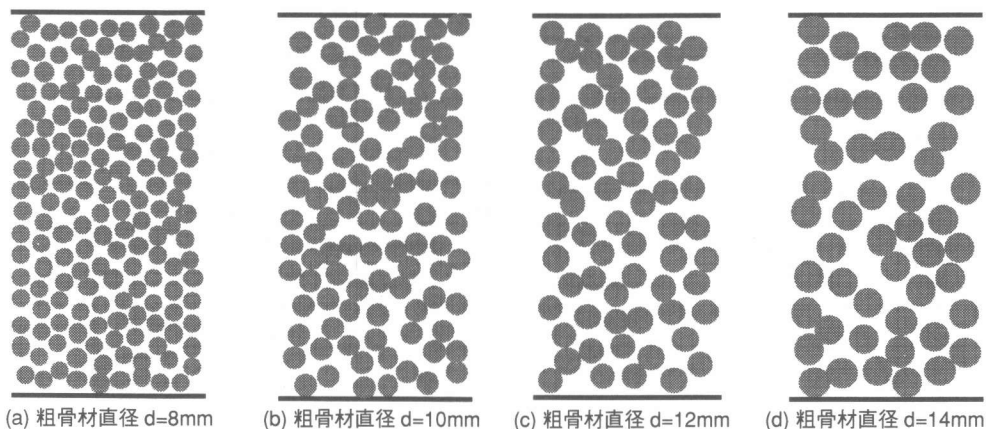


図-3 各解析モデルの一例 (粗骨材容積比 $V_g=40\%$)

については、供試体範囲内に一様乱数を発生させることによってランダムに配置した。図-3に、粗骨材容積比 V_g が40%で、粗骨材の直径を変化させた解析モデルの一例を示す。なお、本解析では、粗骨材容積比の差によって生じるモルタル量の変化を表現するために、各解析モデルにおいて構成される要素の総体積が、それぞれのモルタル量 (= 供試体体積 - 全粗骨材体積) と同等となるように要素の半径を調整した³⁾。

いずれの解析も、時間刻みを 2.5×10^{-6} 秒とし、縦ひずみが0.5%に達するまでの変形挙動について計算を行った。解析の入力データを表-1に示す。

4. 解析結果とその考察

4.1 応力-ひずみ曲線

図-4は、各解析モデルを用いて得られた圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線の解析結果である。同図からわかるように、粗骨材容積比および粗骨材直径の条件が同一であっても、応力下降域の形状にばらつきが生じる。一方、応力上昇域および圧縮強度に関してはほぼ等しい結果が得られた。

図-5は、各シリーズの平均

圧縮強度と粗骨材直径の関係を示したものである。同図によれば、いずれの粗骨材直径でも、粗骨材容積比の増大により圧縮強度が低下している。また、 $V_g=30\%$, $d=14\text{mm}$ の結果を除けば、粗骨材直径の増加に伴う圧縮強度の減少傾向も顕著であり、粗骨材容積比が大きいものほど顕著に強度が低下する。以上の解析結果は、既往の知見⁴⁾とほぼ一致するものである。一方、 $V_g=30\%$, $d=14\text{mm}$ の解析モデルの平均圧縮強度 F_c が、 $d=12\text{mm}$ のものよりも若干増加している理由については以下の2点が考えられる。

第一に、構成される要素数が少ないことによる解析結果の不安定性が挙げられる。 $V_g=30\%$, $d=14\text{mm}$ の解析モデルは、他のシリーズと比較し

表-1 解析の入力データ

V_g	d	N_g	$\tan \phi$	Ftm	Em	η	v	H	D
30%	8	120	0.2	3.0	13	1.0	0.8	100	50
	10	77							
	12	54							
	14	39							
40%	8	160	0.2	3.0	13	1.0	0.8	100	50
	10	102							
	12	71							
	14	52							

[Notes] V_g : Volumetric ratio of aggregate, d: Diameter of coarse aggregate (mm), N_g : Number of aggregate, $\tan \phi$: Coefficient of internal friction, Ftm: Pure tensile strength (MPa), Em: Elastic modulus (GPa), η : Viscosity (MPa·s), v: Loading rate (mm/s), H: Height of specimen (mm), D: Width of specimen (mm)

て節点数が最も少なく、したがって、構成される要素の数も最小となる。VEPSEMにおいて、要素数が少ないほど、個々の要素の破壊が

解析モデル全体の挙動に及ぼす影響は相対的に大きくなり、解析結果がばらつきやすい。このことは、図-4の節点数の多いシリーズで、ばら

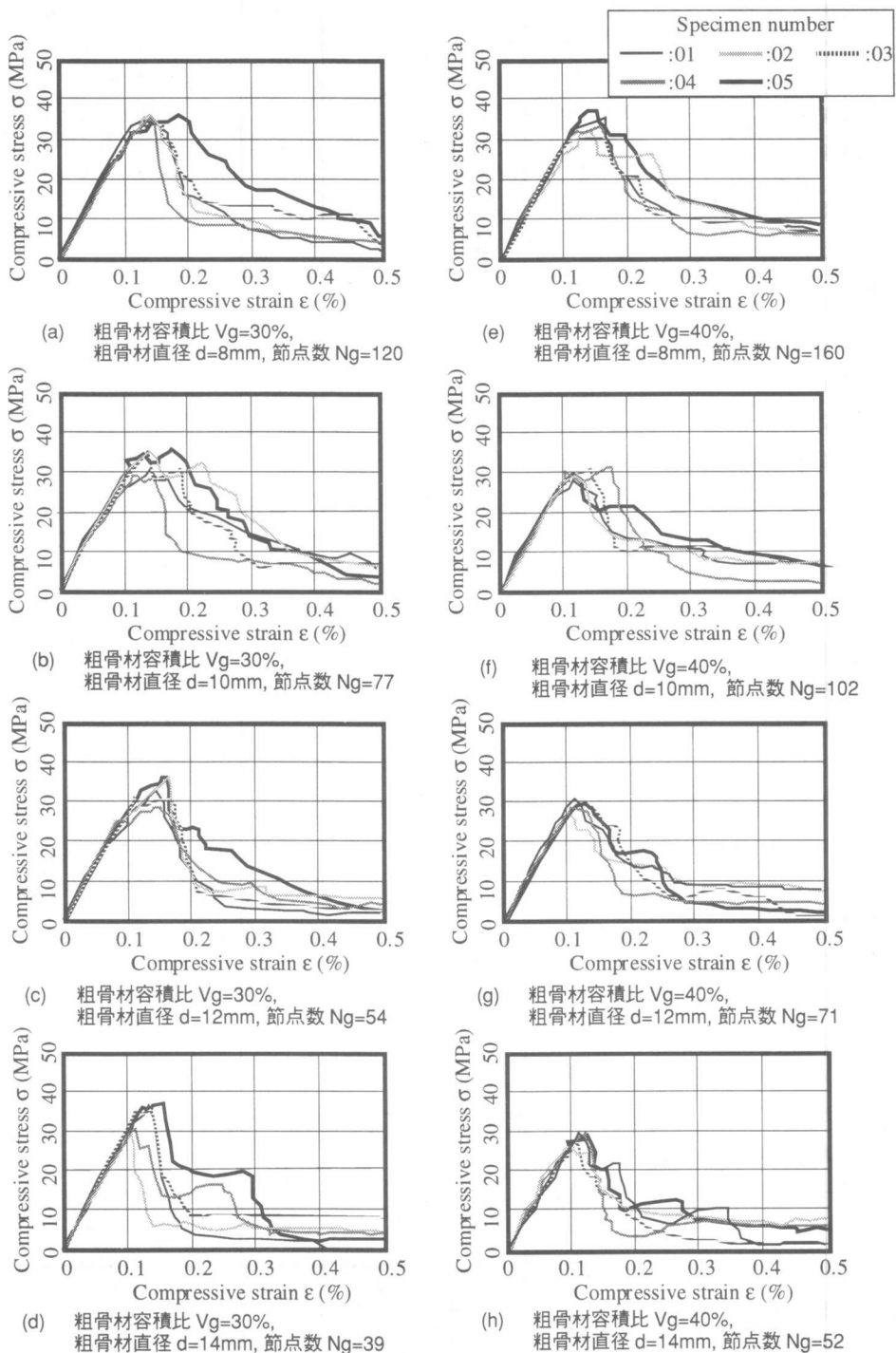


図-4 圧縮応力 σ -縦ひずみ ϵ 曲線

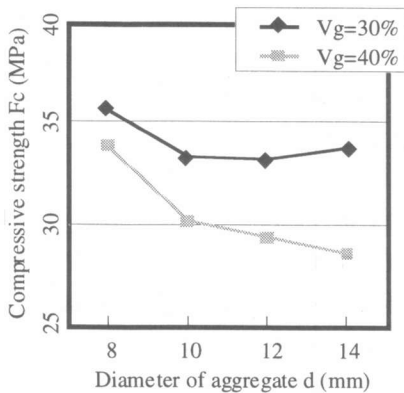


図-5 圧縮強度 F_c と粗骨材直径 d との関係

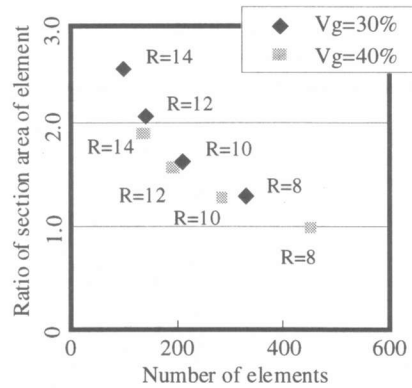


図-6 要素断面積比と要素数との関係

ときの少ない安定した結果が得られていることから明らかである。

第二に、補正による要素断面積の変化の影響が考えられる。本解析では、前述のように、各解析モデルにおけるサスペンション要素の総体積がモルタル部の総体積と同量となるように要素の断面積を調整している。図-6は、最も要素数の多い $V_g=40\%$ 、 $d=8\text{mm}$ の解析モデルにおける要素断面積の平均値を1とした場合の、各シリーズの平均要素断面積比と平均要素数の関係を示したものである。同図に示されるように、 $V_g=30\%$ では、要素数の減少(=粗骨材直径の増大)に伴う要素断面積の増加率が $V_g=40\%$ と比較して大きい。この断面積の増大による各要素の耐力増大の影響が、後述する応力集中による全体の強度低下よりも大きく現れたものと考えられる。このことは、図-5において、粗骨材直径の増加に伴う圧縮強度の低下傾向が、粗骨材容積比 $V_g=30\%$ のシリーズの方が小さいことからわかる。

4.2 破壊の進展状況

本解析では、サスペンション要素のレオロジーモデルが応力によって変化し、破壊を生じる。これをコンクリート内部のひび割れの進展と見なすことによって、粗骨材容積比および粗骨材寸法の変化が圧縮変形挙動に与える影響についてメカニズム的な検討を行った。

図-7は、各粗骨材条件の解析モデルにおける

内部の破壊進展状況の一例を示したものである。図中には、破壊した要素の直角方向に破壊マークを表示している。まず、(a)と(b)を比較することによって粗骨材容積比による内部の破壊状況の変化を考察する。ひずみ率が 0.08% の時点では、ポアソン効果によって横方向の要素に純引張破壊が生じているのは同様であるが、粗骨材容積比の大きい(b)では、供試体の左上部と中央右部に集中しているのに対し、粗骨材容積比の小さい(a)では全体に生じている。実現象における粗骨材量の増加に伴う圧縮強度の減少の理由としては、破壊の際に弱点となる粗骨材とモルタルの界面の増加と、全体の不均一化による応力集中の2点が挙げられる。(b)で見られる破壊の集中は、後者の応力集中によるものと考えられる。

その後、最大応力に至ると圧縮せん断破壊が生じ、破壊が進展するが、圧縮せん断破壊についても、(a)では全体に生じているのに対して、(b)ではある部分に集中しており、このことが強度の低下を引き起こす原因と考えられる。

次に、(b)と(c)を比較して、粗骨材寸法が全体の破壊挙動に与える影響を考察する。(c)においては、純引張破壊は供試体の各部分に見られるが、圧縮せん断破壊については、供試体中央下部に帯状に集中しており、(b)よりさらに破壊が集中して発生する。粗骨材寸法の増大による圧縮強度の低下の原因についても、全体の不均一化が挙げられており、粗骨材寸法の大きい(c)で

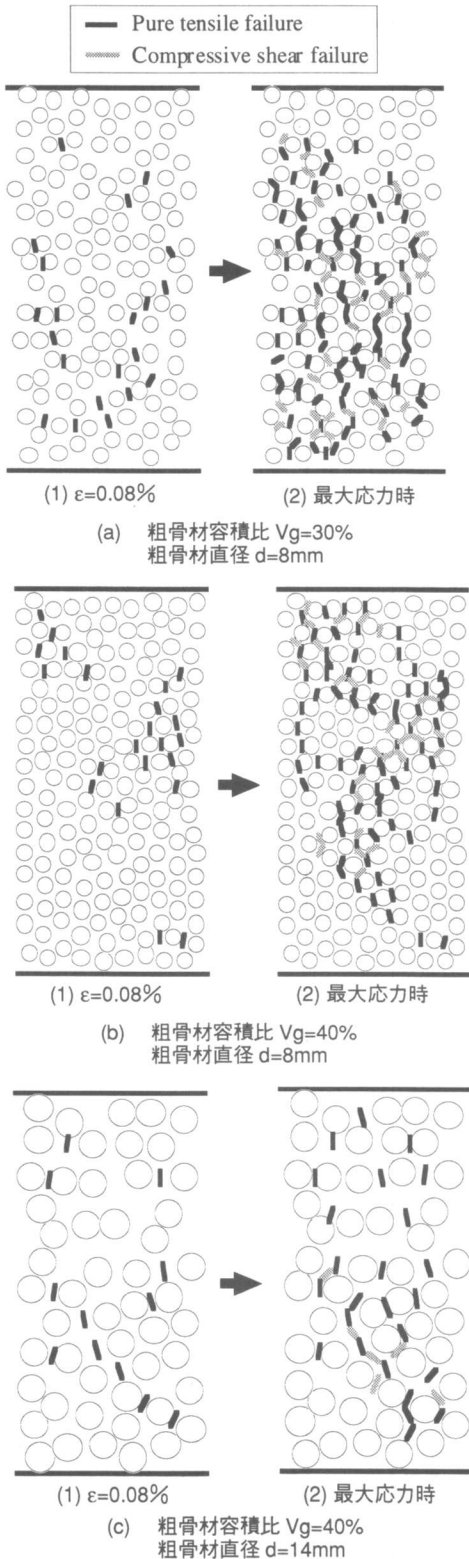


図-7 破壊の進展状況

は、破壊がより集中して発生するため、圧縮強度が低下するものと考えられる。なお、本解析では、界面の破壊は考慮していないため、界面の弱化層の影響を論じることはできない。

5. まとめ

本研究では、Delaunay三角分割を用いて、粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)解析の要素構成方法の改良を行い、コンクリートの1軸圧縮応力下における破壊性状に与える粗骨材容積比および粗骨材寸法の影響に関して基礎的な検討を行った。

以下に、得られた知見を示す。

- 1) Delaunay三角分割を用いることにより、節点配置による要素構成の偏りを改善できる。
- 2) 要素の総体積をモルタル部の総体積と同一になるように補正することにより、要素数がある程度以上であれば、粗骨材容積比および粗骨材寸法の影響を再現することができる。
- 3) 粗骨材容積比および粗骨材寸法が圧縮強度に与える影響は、内部の応力集中のために生じることが解析的に再現できる。

参考文献

- 1) 荒井正直・船見晃啓・黒川善幸・森博嗣・谷川恭雄：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
- 2) 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
- 3) 平岩陸・谷川恭雄・森博嗣・川戸耕介：粗骨材容積比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.21，No.2，pp.607-612，1999.7
- 4) 川上英男：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的実験（その1），日本建築学会論文報告集，No.166，pp.19-27，1969.12