論文　コンクリートの収縮に及ぼす骨材の影響に関する解析的研究

平岩　陸*

要旨：本研究は，コンクリートの乾燥収縮の再現を検討するために改良した粘弾塑性サスペンション要素法に対して，骨材の影響を考慮できるようにさらに改良を加え，コンクリートの収縮に及ぼす骨材の影響を解析的に検討したものである。本稿では，骨材の考慮に関する改良方法について説明するとともに，自由端および固定端を模擬した解析モデルを用いて，収縮に伴う変形およびひび割れ発生挙動について，骨材の有無，骨材の弾性係数，収縮量および骨材量の影響を検討した。

キーワード：収縮，骨材，ひび割れ，非連続体モデル，粘弾塑性サスペンション要素法

1. まえがき

セメントペースト硬化体の収縮は，主として乾燥収縮と自己収縮によっている。自己収縮は硬化体中の水和反応によるものであり，水セメント比が小さくなければ発生量が小さく実用上無視することができるが，乾燥収縮は硬化体中の水の散逸つまり乾燥によるものであるため，通常のセメントペースト硬化体であれば必ず発生し，コンクリートもそれに伴って収縮することになる。コンクリート構造物は周囲からの拘束を受けるため，これらの収縮による変形も拘束され応力が発生し，その応力がコンクリートの引張強度を上回るとひび割れが発生することになる。こうして発生したコンクリートのひび割れは，その程度にもよるが耐久性や美観上の問題となることが多く，その防止は重要な課題である[1)]。

セメントペースト単体の乾燥収縮ひずみは2000～5000×10^{-6}程度であるが，このセメントペーストに細骨材，粗骨材を混ぜて作られる普通コンクリートの乾燥収縮ひずみは500～1000×10^{-6}程度となり，セメントペーストに比較して非常に小さくできる。これは，骨材の収縮量そのものがセメントペーストに比較して非常に小さく，さらに弾性係数も高いためであり，このような骨材が体積割合として70～80％混入されることで，コンクリート全体の収縮量が抑制されることになる。このため，コンクリートの乾燥収縮を抑制する方法として，骨材の単位量をできるだけ多くすることが望ましいとされてきた。しかし，実際には骨材においても収縮はわずかながら生じており，また骨材の種類によっても収縮量に差がある[2)]ことが明らかとなっており，コンクリートの収縮に与える骨材の影響が無視できない要因として認識されてきている[3)]。

本研究では，既往の研究[4)]において収縮を考慮できるように改良した粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)の適用性をさらに広げるための検討を行う。本解析手法は非連続体モデルを用いており、ひび割れの発生に伴う内部構造の変化を表現しやすいという特徴を持つ。この解析手法に対して，モルタル要素とは入力データの異なる骨材要素を導入し，骨材の影響を考慮できるように改良した。そして，この改良した解析手法を用いて，まず収縮量を0とした骨材要素を与え，この骨材要素の有無がコンクリート全体の収縮ひずみ量および破壊状況にどのような影響を与えるか検討し、本解析手法の適用性を検討した。その後，骨材要素の弾性係数，収縮量および骨材量をそれぞれ変化させ，骨材要素の各要因の影響を解析的に検討し、これまでの骨材が収縮に与える影響に関する知見の再現性を検討した。

2. 解析方法

VEPSEMに対して，乾燥収縮を考慮できるように改良した点については，既往の研究[4)]で述べているので，今回は骨材要素の導入方法について述べる。

骨材要素については，破壊解析時においても行った手法[5)]であり，**図-1**に示すように，骨材の範囲を設定した上で，その範囲のサスペンション要素を骨材要素，境界の要素を界面要素，骨材範囲以外の要素をモルタル要素と定義し，それぞれに収縮および力学的な入力データを

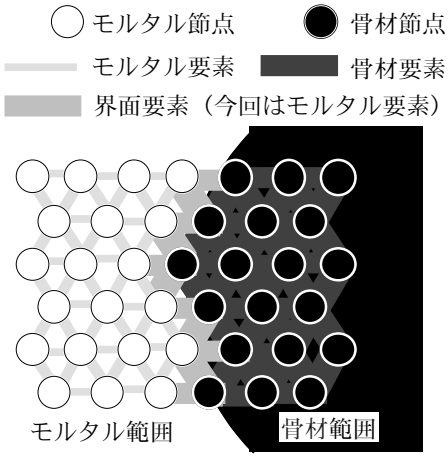


図-1　粗骨材要素の構成方法

＊名城大学理工学部建築学科准教授　　博士（工学）（正会員）

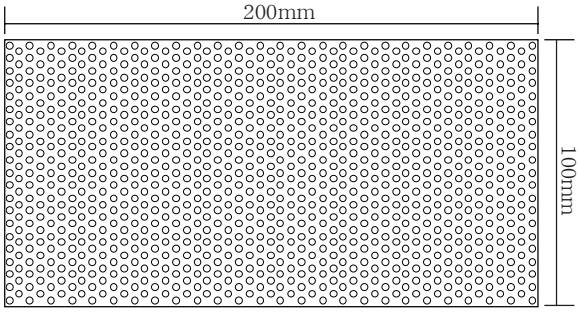
与えるものである。破壊解析時には，各要素に異なる力学性状のみを与えたが，今回の収縮解析においては，力学性状だけではなく，収縮性状を与える必要がある。骨材要素の収縮性状の値として，モルタル要素よりも小さい値を導入することによって，骨材の影響を検討することができる。なお今回は，界面要素についてはモルタル要素として扱っている。よって，モルタル要素と骨材要素の2種類の入力データをもとに検討している。

図−2は，今回の解析で用いた1046Bモデルであり，図に示すように節点が1046個あるモデルである。さらに，この1046Bモデルに16個の骨材を重ねて示したものが**図−3**である。このように重ねて，骨材の円の中に入った節点を骨材節点，入らなかったものをモルタル節点とし，骨材節点同士のサスペンション要素は骨材要素，モルタル節点同士の要素はモルタル要素としている。骨材節点とモルタル節点をつなぐ要素については，破壊解析では界面要素としたが，界面の収縮特性については力学性状よりもさらに不明な点が多いため，今回は影響要因を減らすため，モルタル要素として解析を行っている。また，今回の解析では，重力の影響を減少させるため横長のモデルを用いた。

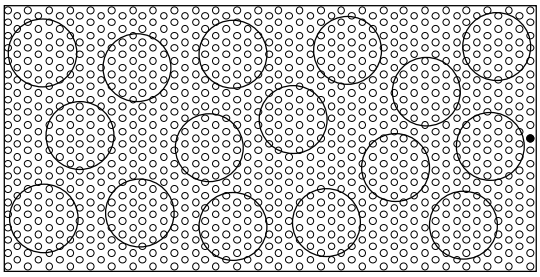
図−4は，今回の解析モデルで用いた境界条件2種を示したものであり，見やすくするために内部の1046個の節点を省いている。**図−4(1)**に示すように，壁が片方のみで，自由端となっている境界条件の解析モデルを用いてコンクリート全体の収縮量を検討する。この際には，**図−3**中にある黒点のX方向への収縮量を検討する。また，**図−4(2)**に示すように壁が両方にあり，固定端となっている境界条件の解析モデルを用いて，収縮時の破壊状況を検討する。

入力データを**表−1**に示す。まず，骨材の収縮量を示す最大ひずみ量εを0，骨材の弾性係数Eを42.0GPaとした条件を用いて，骨材の有無の影響を検討する。その後，骨材要素の弾性係数E，最大ひずみ量εおよび骨材量を変化させ，それぞれの影響を検討した。その他の入力データについては，これまでの破壊解析時および収縮解析時と同様である。収縮については，最大ひずみ量に達する時間Tに最大ひずみ量εに達するように線形的にひずみが増大する形で与えている。実際の収縮は長期にわたって進行するため、最大ひずみ量までに達する時間Tには大きな値を用いる必要があるが、解析時間の関係上、今回は0.1sとした。このため、本解析は、超高速収縮によるコンクリートの変形・破壊状況を検討していることになる。

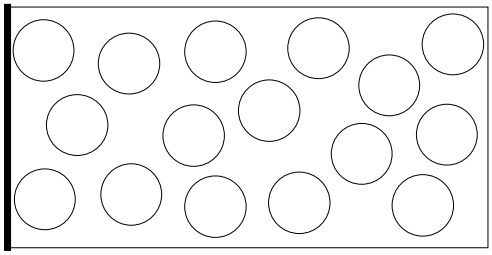
これらの解析モデルを用いて，骨材要素の有無およびその入力データの違いがコンクリートの収縮量およびひび割れ発生状況にどのような影響を与えるか検討した。



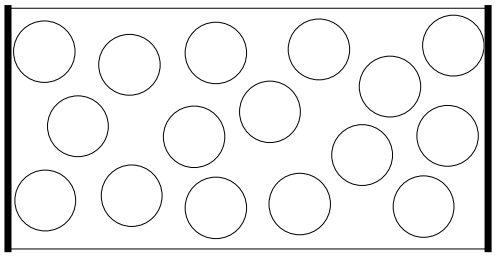
図−2　1046Bモデル



図−3　1046B+16Gモデル



(1) 自由端：収縮量の検討



(2) 固定端：破壊状況の検討

図−4　解析モデル（境界条件の違い）

表−1　解析の入力データ

	tanφ	Ft	E	η	ε	T
モルタル要素	0.5	2.0	21.0	0.5	1000	0.1
骨材要素		8.0	21.0 42.0 63.0		0 100 250 500	

[Notes] tanφ：内部摩擦角, Ft：純引張強度 (MPa), E：弾性係数 (GPa), η：塑性粘度 (MPa·s), ε：最大ひずみ量(μ), T：最大ひずみ量に達するまでの時間(s)

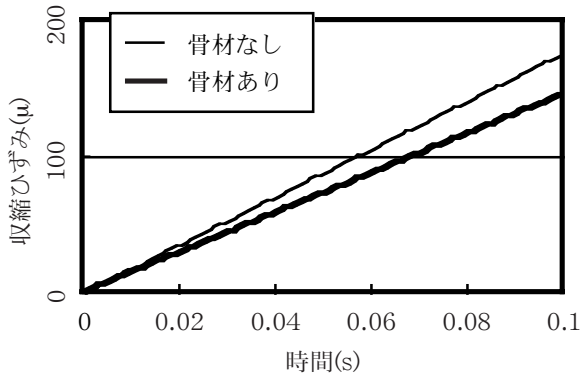


図-5　収縮ひずみと時間の関係

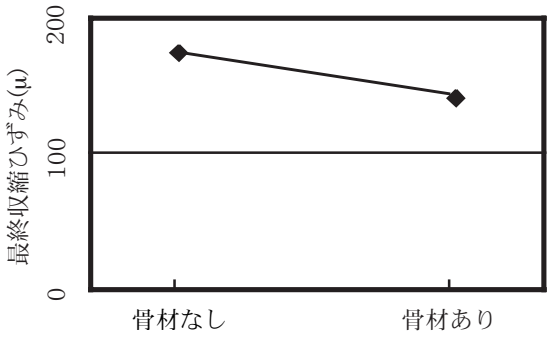
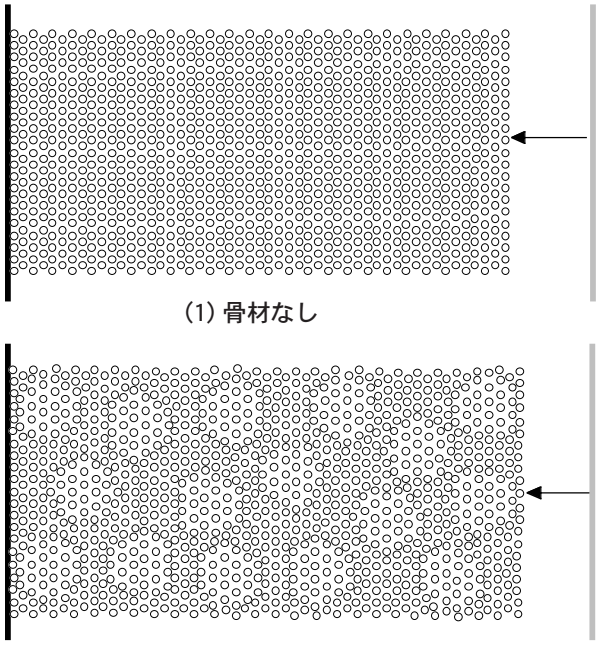


図-6　最終収縮ひずみ（骨材の有無の影響）



(1) 骨材なし

(2) 骨材あり

図-7　最終変形図：自由端
（変位量800倍）

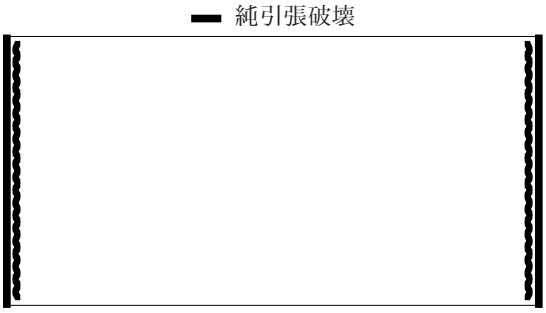


図-8　破壊状況（骨材なし）

3.解析結果

3.1骨材の有無の影響

(1) 自由端：収縮量の検討

図-5は，自由端の解析モデルにおいて，**図-3**に示した黒点の収縮ひずみを，骨材がない場合，骨材要素を入れた場合についてそれぞれ示したものである。収縮ひずみは，黒点の変位量を供試体長さで除して求めている。この図から，骨材がある場合に収縮ひずみが少なくなることがわかる。なお，収縮ひずみの増加割合が線形的であるのは，解析で与える収縮量の変化が線形的であるためと考えられる。**図-6**は，今回の解析における最終ひずみ量を骨材の有無で比較したものであり，骨材の考慮によって最終的な収縮ひずみが低減していることがわかる。今回のこれらの値は，実験で得られる値よりも小さく，骨材の考慮による差も小さいが，これは，今回モルタル要素に与えた最大収縮ひずみが1000μであるためと考えられる。この最大収縮ひずみ，つまりモルタル要素の収縮量が増せば，**図-6**の0.1s後もそれぞれが線形に収縮ひずみも増すと考えられ，コンクリート全体の収縮量も大きくなるとともに，骨材の有無による差も大きくなると考えられる。

この収縮による変形を図示したものが**図-7**である。変位量を800倍に拡大しており，ここまで拡大すると骨材の有無による収縮挙動の相違を観察することができる。**図-7(1)**の骨材を考慮していない場合には，全体が均一に収縮しているため，上下も縮まりつつ，左の壁に向かって収縮していることがわかる。これに対して，**図-7(2)**のように骨材を考慮すると，骨材範囲が収縮しないため，その部分だけ節点間隔が保たれたままの状態であることがわかる。一方でモルタル部分は収縮しており，全体としてコンクリートが左の壁に向かって収縮していく。収縮による右端部の変位が，骨材要素のない**図-7(1)**と比較して小さくなっていることもわかる。骨材がある場合の収縮挙動の変化を再現できていると考えられる。

(2)固定端：破壊状況

図-8は，骨材を考慮していない固定端の解析モデルにおいて，破壊状況を示したものである。この図では，供試体の両端部にそれぞれひび割れが入っている。通常は中央部付近に1本のひび割れが入ると考えられるが，解析では異なる結果となった。これは，今回の解析モデルの1046点の節点が整列配置であり，要素の構成が供試体内部は全て同一であるのに対し，端部ではこれと異なるため，ひずみが端部に集中し，両側に同時にひび割

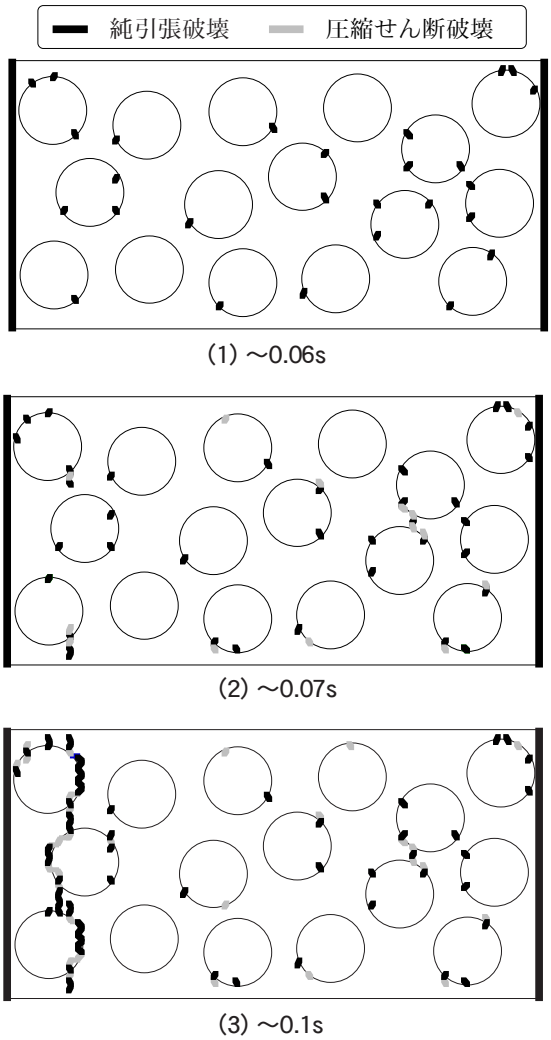


図-9　破壊の進展状況（骨材あり）

れが生じたのではないかと考えられる。

一方，骨材を考慮した固定端の解析モデルの破壊の進展状況を図-9に示す。こちらは，徐々に破壊が進展していくため，3つの図で示した。まず図-9(1)の収縮の初期は，モルタルと骨材の境界に破壊が生じていることがわかる。今回の解析では界面を考慮していないが，収縮条件の異なる境界面にひずみが生じ，ひび割れが生じたものと考えられる。その後，図-9(2)に示すように骨材の境界でのひび割れが進展するとともに，モルタル中にひび割れが徐々に進展していく。最終的には，図-9(3)に示すように，それらのひび割れが連結する形で縦に大きくひび割れが生じている。以上のことから，界面からひび割れが生じ，モルタル内部に進展し，その後ひび割れ同士が連結して最終破壊に至る通常の破壊現象と同じく，収縮による破壊も同様の形式で破壊が進展しているといえる。なお，ひび割れが供試体中央部に発生していないのは，骨材の配置によりもっとも界面同士の破壊が連結しやすいところにひび割れが発生したものと考えられる。図-10に示すように節点配置の異なる解析モデル

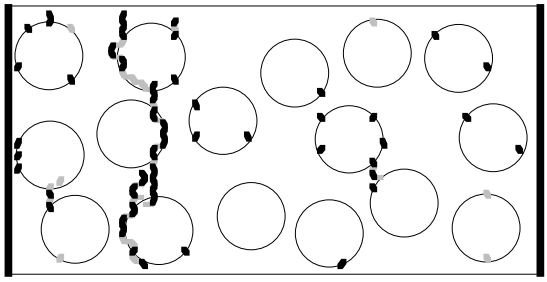


図-10　破壊状況（骨材の配置が異なる例）

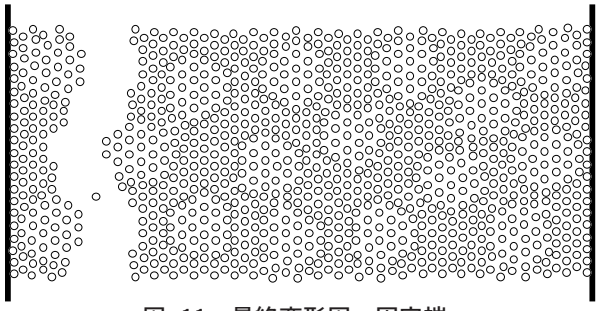


図-11　最終変形図：固定端
（変位量800倍）

では，他の位置に生じていることからもひび割れが生じる位置はこのような理由によって変化するものと考えられる。

また，図-11に，収縮による変形・破壊状況を節点の移動で示した変形図を示す。変位量は図-7と同じく800倍である。この図によれば，図-9で縦方向に一本大きくひび割れの入ったところで，節点同士の間隔が大きくなり，その部分にひび割れが生じていることが視覚的に確認できる。

3.2 骨材の弾性係数の影響

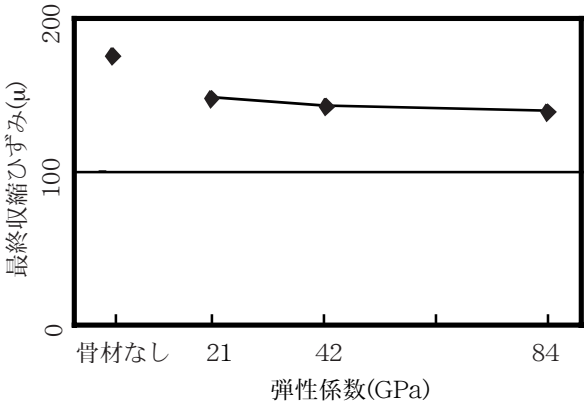
骨材の混入によりコンクリートの乾燥収縮量が減少する理由は，骨材そのものの収縮量が少ないことがまず挙げられる。また，他の理由として，骨材の高い弾性係数がモルタルの収縮を拘束することも理由として挙げられる。ここでは，このような骨材の弾性係数の影響を検討するために，収縮量を0とした骨材の弾性係数を21.0, 42.0, 63.0GPaと変化させて解析を行った。

(1) 自由端：収縮量の検討

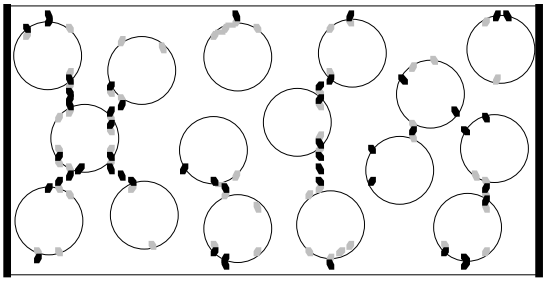
図-12は，骨材の弾性係数を変化させた場合の，それぞれの最終収縮ひずみ量を示したものである。この図によれば，弾性係数の上昇によって収縮量が小さくなっていることがわかる。骨材の混入による収縮低減効果の方が大きいとはいえるが，弾性係数が高い骨材を用いると収縮量が低減されることが示されている。

(2)固定端：破壊状況

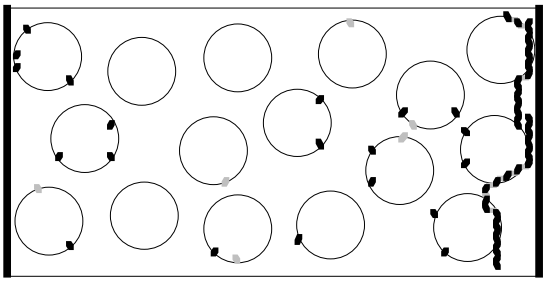
図-13は，骨材の弾性係数を変化させた場合の破壊状況を示したものである。図-13(1)に示すように，弾性係数が小さい場合，広い範囲にわたって界面の破壊が生じてている。さらに最終的にモルタル中に進展してつなが



図−12　最終収縮ひずみ（骨材の弾性係数の影響）



(1) E =21.0GPa



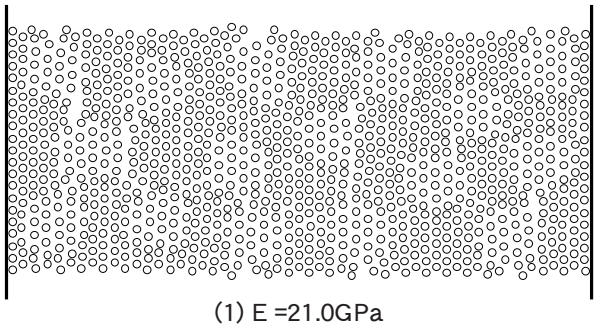
(2) E =63.0GPa

図−13　破壊状況（骨材の弾性係数の影響）

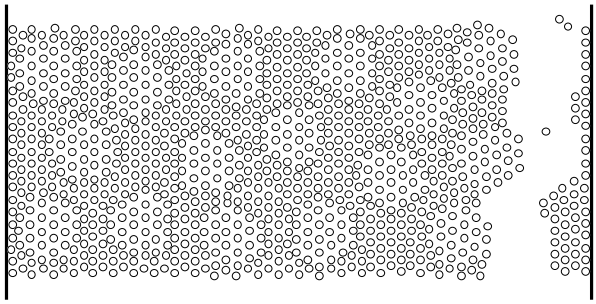
る破壊線もはっきりせず，数本が各場所に発生していることがわかる。この理由として，骨材の弾性係数が小さいと，モルタルに収縮が生じた場合に骨材にもひずみが生じやすく，収縮量の差がある界面でひび割れが生じるものの，ひずみが分散しやすく，それに伴ってひび割れも分散して生じやすくなるものと考えられる。

一方，図−13(2)に示すように，弾性係数が大きい場合，界面の破壊が少ない状態で最終的な破壊が生じている。この場合，モルタルとの弾性係数との差が大きくなるため，骨材に生じるひずみが少なく，破壊が生じるとその部分にひずみが集中し，破壊も集中することが考えられる。

これらの破壊状況の違いは，図−14に示す最終変形図からも説明できる。つまり，弾性係数が小さい図−14(1)の場合，界面部分で隙間の大きいところが各所にあり，収縮に伴って生じるひび割れが分散して生じているのに対して，図−11や図−14(2)のように，弾性係数が大きい



(1) E =21.0GPa



(2) E =63.0GPa

図−14　最終変形図：変位量800倍
（骨材の弾性係数の影響）

条件では，一部分に大きなひび割れが生じて破断している。骨材の弾性係数の差は，このような破壊性状の差も生じさせるものと考えられる。

3.3 骨材の収縮量の影響

これまでの検討では，骨材の収縮量を0として与えているが，実際には骨材も小さいながらも収縮し，コンクリートの収縮量に影響を与えることが明らかとなっている[2,3]。ここでは，骨材の収縮量の影響を検討するため，1000μの収縮量を持つモルタルに対して，骨材の収縮量を1/2である500μ，1/4である250μ，1/10である100μと変化させて与え，この収縮量の変化がコンクリートの収縮量にどのような影響を与えるか検討した。なお，これ以降，破壊状況に顕著な差が見られなかったため，自由端の解析モデルによる収縮量の検討のみを行った。

図−15は，骨材の収縮量を変化させた場合の，それぞれの最終収縮ひずみ量を示したものである。この図によれば，骨材の収縮量，つまり骨材の最大ひずみ量が大きくなると，コンクリート全体の収縮ひずみ量も大きくなっており，骨材の収縮量500μでは骨材なしの場合とほぼ変わらないことがわかる。この結果は，収縮量が大きい骨材を用いた場合，骨材による収縮低減効果が小さくなることを示しており，骨材の収縮量がコンクリート全体の収縮量に大きく影響することが再現できている。

3.4 骨材量の影響

ここでは，混入する骨材量の変化がコンクリートの収縮量に与える影響を検討するため，解析上骨材要素と見なす範囲を変化させて検討する。これまでは図−3に示

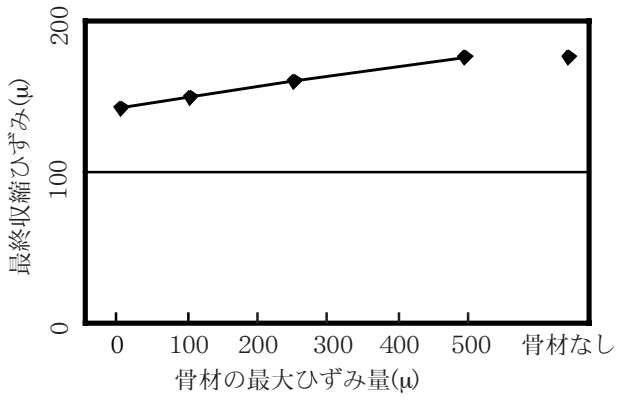


図-15　最終収縮ひずみ（骨材の収縮量の影響）

したように骨材数16個で骨材の面積率を40％としていたが，**図-16**に示すように骨材範囲とする面積を30, 20, 10％と変化させた解析モデルを作成し，収縮量に与える影響を検討した。

図-17は，骨材面積率を変化させた場合の，それぞれの最終収縮ひずみ量を示したものである。この図によれば，骨材面積率を少なくすると，つまり骨材量が減るとコンクリートの収縮量がほぼ線形的に小さくなっていることがわかる。コンクリートの収縮量が骨材量に比例して減少することが解析的に再現できている。

4. まとめ

本研究では，まず，収縮を考慮できる粘弾塑性サスペンション要素法に対して骨材要素を導入し，モルタル要素と異なる収縮特性を持つ骨材の影響を考慮できるようにした。その後，骨材要素の有無およびその収縮特性がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響を解析的に検討し，本解析手法の適用性を検討した。

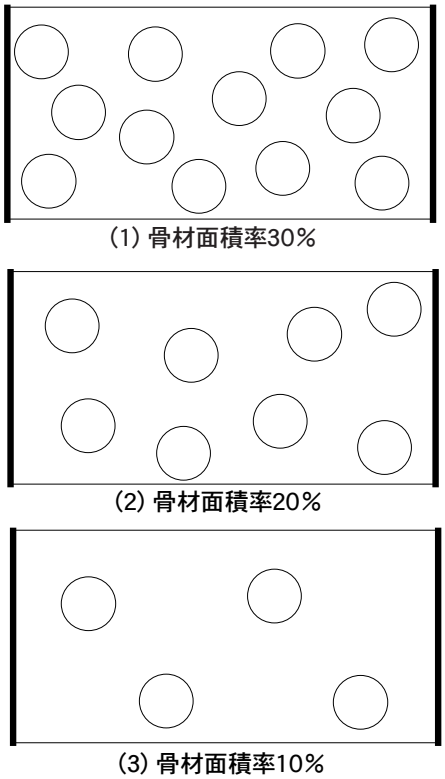
その結果，収縮量が0の骨材の存在を考慮することにより，骨材がない場合に比較してコンクリート全体の収縮量が低減することを解析的に再現できた。また，固定端のモデルで生じる収縮ひび割れは，まずモルタルと骨材の境界から生じ，それが連結する形で1本の大きなひび割れになっており，通常の破壊現象と同様であることを示した。

また，骨材の性質の影響を検討したところ，下記のように，実験的な結果をほぼ再現した結果が得られ，本解析手法の再現性が確認された。

1)骨材の弾性係数が大きくなると収縮量は低減する。
2)骨材の収縮量が大きくなると収縮量が大きくなる。
3)骨材量が多くなると収縮量が低下する。

【参考文献】

1)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2



(1) 骨材面積率30％

(2) 骨材面積率20％

(3) 骨材面積率10％

図-16　解析モデル（骨材面積率の変化）

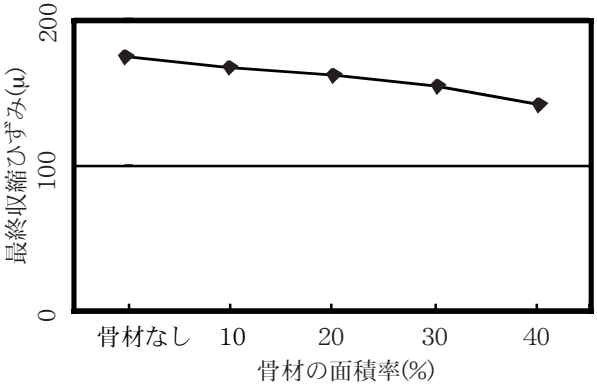


図-16　最終収縮ひずみ（骨材量の影響）

2)寺西浩司：コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす要因－骨材や単位水量などの影響をどのように考えるか－, コンクリート工学, Vol.46, No.12, pp.11-19, 2008.12
3)コンクリートの収縮問題検討委員会報告書, コンクリート工学協会, 2010.3
4)平岩陸・遠藤大樹：粘弾塑性サスペンション要素法によるコンクリートの収縮解析,コンクリート年次論文集,Vol.31, No.1, pp.401-406, 2010.7
5)朴相俊・谷川恭雄・森博嗣・平岩陸：コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響に関する解析的・実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.570, pp.1-6, 2003.8