

# 論文 有限要素解析に用いるコンクリートの粗骨材機能を明確化した二次元メゾモデルの提案

佐藤 あゆみ<sup>\*1</sup>・山田 寛次<sup>\*2</sup>・石山 智<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究では、粗骨材の機能を明確化した新しい二次元メゾモデルを提案した。コンクリートをモルタル、粗骨材、粗骨材周り遷移帯からなる非均質材料としてモデル化し、構成材料毎の引張軟化曲線を考慮した。粗骨材は粗粒率をもとに六角形の単一粒径に単純化し、遷移帯の物性値は粗骨材の機能を明確化するように定めたことが特徴である。当該モデルの有限要素解析結果は実験値と整合するものであった。

**キーワード**：有限要素解析, FEM, 二次元モデル, 非均質, 粗骨材, 靱性, 破壊メカニズム

## 1. はじめに

無筋コンクリートの引張や曲げ破壊では、微細な初期ひび割れが発生した後、ひび割れは周囲のひび割れと徐々に結合しながら成長し、最終的に局所化した一本のひび割れによって部材を破断することが知られている<sup>1)</sup>。従って、コンクリートの力学特性値の検討にあたって破壊メカニズムを考察すること、つまり、ひび割れの発生・成長過程と力学特性値との関係を考察する事が重要である。この時、ひび割れの形成過程を表すだけでなく、同時に力学特性値も予測出来る有限要素解析(以下、FEM解析)が有力な手段となる。

これまでに、無筋コンクリートの破壊メカニズムを対象としたFEM解析は多く見られる。例えば、Wittmann<sup>2)</sup>らは Numerical Concrete を提案し、大小様々な粗骨材を配置した二次元モデルを構築して、コンクリートの寸法効果や破壊性状を説明している。田嶋ら<sup>3)</sup>はリンク要素で表現した二次元や三次元のラチスモデルで無筋コンクリートの破壊進展解析を行った。また、長井ら<sup>4)</sup>はボロノイ分割した要素による三次元RBSMを開発し、コンクリートおよび鉄筋コンクリートの解析を行った。さらに、永井ら<sup>5)</sup>の実験体の粗骨材配置を忠実にモデル化した三次元粒子モデルの圧縮破壊解析などが挙げられる。

上述のモデルはいずれもメゾレベル<sup>6)</sup>に立脚し、コンクリートをセメントペースト(またはモルタル)、骨材、骨材周りの遷移帯と3つの構成要素に分けてモデル化を行ったものである。モデル化を行う際、出来るだけ忠実に実姿の再現を目指すのは自然な流れであり、骨材の形状、寸法、分布の再現を試みる努力がなされている。しかし、実姿を再現したモデルでは、現実に肉薄した結果が得られる一方で、得られるひび割れ分布が複雑であり、メゾレベルにおけるコンクリート中の各構成要素が果たす機能を明確に捉えることが難しい。

そこで本研究では、コンクリートの構成要素の機能、特に粗骨材の本質的な機能を明確化した二次元メゾモデルの提案を行った。さらに提案したモデルを用いて曲げ試験下におけるFEM解析を行い、モデルの適合範囲の確認と無筋コンクリートの破壊メカニズムを考察した。

## 2. 破壊靱性試験

モデル化に先立って、今回のモデル化の対象となる梁型試験体の破壊靱性試験を行った。

### 2.1 試験体作製

本研究では、表-1に示す4種類の調合を用いて梁型試験体を作製した。全ての調合でセメントは普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm<sup>3</sup>)を使用し、混和剤はメタクリル酸ポリマー高性能AE減水剤を使用した。また、表-2に骨材として使用した硬質砂岩砕石の物性値を示す。本研究の調合は、骨材の粗粒率FMを各調合で変えたことに特徴がある。粗粒率FMは細骨材と粗骨材全体の値であり、H494が標準的な骨材粒度分布を持つ調合である。H473は粗骨材H-GC(5~10mm)が多く粗骨材H-GD(10~20mm)が少ない調合である。H425はモルタル部が多く、粗骨材が少ない調合である。なお、H263は上記3調合に共通するモルタルである。

本実験では、これらの調合を用いて、梁型試験体を作製した。試験体寸法は、100×100×400mmの梁形とし、各水準3体ずつ作製した。打設は鋼製型枠に所定の材料を用いて行い、24時間後に脱型を行い、材齢28日まで水中養生を行った。なお、材齢28日における圧縮強度およびヤング係数の結果を表-1に示す。

### 2.2 破壊靱性試験と引張軟化解析

所定の水中養生後、3点曲げによる破壊靱性試験をスパン300mmで行い(図-1参照)、荷重およびクリップゲージによって開口変位(以下、CMOD)を測定した。本研究

\*1 熊本大学 自然科学研究科環境共生工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

\*2 秋田県立大学 システム科学技術学部建築環境システム学科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 秋田県立大学 システム科学技術学部建築環境システム学科助教 博士(工学) (正会員)

表-1 調合表

調合名	FM	W/C (%)	s/a (%)	S/C (%)	質量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)
					W	C	H-S	H-GC	H-GD	Ad				
H494	4.94	50.0	43.0	225	178	356	803	347	736	1.78	10.0	2.90	22.8	46.3
H473	4.73	50.0	43.0	225	178	356	803	736	347	1.78	6.0	2.10	24.3	46.5
H425	4.25	50.0	60.0	314	178	356	1119	244	517	2.14	1.5	3.70	23.5	43.0
H263	2.63	50.0	100	225	299	598	1347	-	-	0.00	19.5	2.45	18.8	47.5

では自重の影響を防ぐためカウンターウェイトを取付け、ひび割れを集中させるために載荷点下に高さ 50mm の切欠きを入れた状態で載荷した。

また、得られた荷重-CMOD 曲線をもとに JCI 推奨の解析プログラム<sup>7)</sup>を用いて引張軟化曲線(以下、TSD)を推定した。さらに、破壊靱性試験によって分離した試験体の破面を目視で観察した。

### 2.3 実験結果

#### (1) 荷重-変位曲線

表-3 に破壊靱性試験の結果を示す。表-3 中で、Fb は曲げ強度、GF<sub>(WOF)</sub> は荷重-CMOD 曲線下から求めた破壊エネルギーで、Ft は TSD 中のひび割れ発生応力である。これらの試験結果は、各種類 3 体の平均値および括弧内にその標準偏差として示した。

#### (2) 破壊状態の分類

本研究では、破壊靱性試験によって分離した試験体の破面を観察し、破壊状態によって 3 種類(モルタル、骨材割れ、遷移帯)に分類した。図-2 に破面の写真と破壊状態の分類例を示す。白味を帯び骨材が引抜けた跡を遷移帯と判断した。各種類の投影面積を求め、各面積が破面全体に占める割合を計算した結果が表-4 の通りである。

### 3. 二次元メゾモデルの提案

#### 3.1 二次元メゾモデルの概要

本章で提案する二次元メゾモデルは、前章の実験に即して 100mm 角で長さ 400mm の梁型試験体を対象とした。全体像は図-3(a)の通りである。試験体のリガメントを中心とする 38mm(W)×50mm(H)の部分は、図-3(b)および図-4 に示すように、コンクリートを粗骨材、モルタル、遷移帯の 3 種類に分けた。また中心部の要素は、1mm の底辺と高さをもつ三角形の要素で統一した(図-3(c)参照)。モデルの要素形状は次節の方法で決定した。

#### 3.2 二次元メゾモデルの要素形状と寸法

##### (1) 粗骨材

現実の粗骨材は混合粒径で立体的に配置されているが、本モデルでは二次元とし、1 種類の代表粒径が六角形をなして、単位粗骨材容積に相当する面積比を占めるように個数を決めた。

骨材の代表粒径は相加平均径や加重平均径など各種あるが、本研究では粗粒率 FM から計算できる呼び径 dF

表-2 使用骨材

記号名	種類	粒度範囲 (mm)	粗粒率 FM	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )
H-S	埼玉県秩父産硬質砂岩砕砂	0~5	2.63	2.64
H-GC	埼玉県秩父産硬質砂岩砕石	5~10	6.00	2.68
H-GD		10~20	7.00	

表-3 破壊靱性試験結果

調合名	Fb (MPa)	GF <sub>(WOF)</sub> (N/m)	Ft (MPa)
H494	6.11 (0.30)	125.4 (6.5)	7.50 (1.34)
H473	5.86 (0.43)	132.9 (28.9)	5.81 (0.70)
H425	5.01 (0.35)	111.1 (17.1)	5.10 (0.49)
H263	5.05 (0.08)	55.8 (4.8)	7.21 (1.38)

表-4 破面における破壊種類とその面積割合

調合名	モルタル φ <sub>M</sub> (%)	骨材 φ <sub>G</sub> (%)	遷移帯 φ <sub>I</sub> (%)
H494	50.3	1.5	48.2
H473	72.7	10.5	16.8
H425	65.8	6.9	27.3
H263	100.0	0.0	0.0

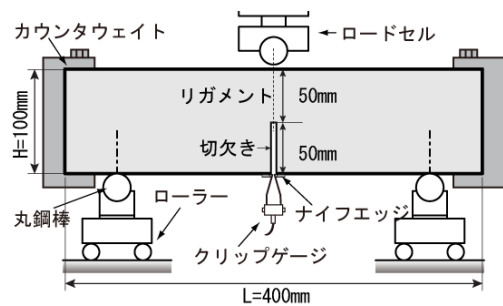
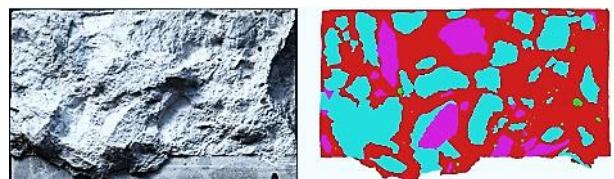
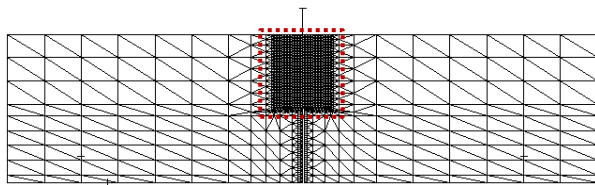


図-1 破壊靱性試験

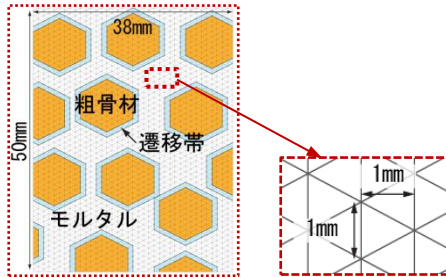


赤色：モルタル破壊，桃色：骨材破壊，青色：遷移帯破壊

図-2 分離した梁型試験体の破面



(a) 梁型試験体



(b) 要素形状 (c) 要素寸法

図-3 二次元メソモデルの概要

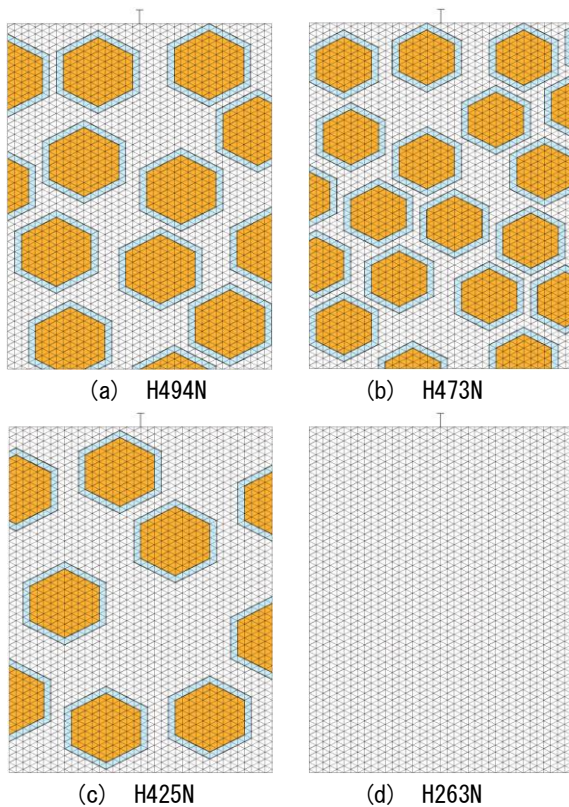


図-4 二次元メソモデルの配置例

表-5 採用した粗骨材モデルの寸法と個数

調合名	調合の粗骨材			モデル粗骨材	
	粗粒率 FM	呼び径 dF (mm)	容積比 (%)	直径 (mm)	個数* (個)
H494	6.68	10.9	40.4	10.0	10
H473	6.32	8.5	40.4	8.0	16
H425	6.68	10.9	28.4	10.0	7
H263	-	-	0.0	-	-

\*1900 (50 × 38) mm<sup>2</sup>あたりの個数

表-6 モデルに付与する物性値

要素	Ft (MPa)	GF <sub>(wof)</sub> (N/m)	Fc (MPa)	E (MPa)	ν (-)
モルタル	7.21	59.7	48.0	18700	0.2
骨材	15.00	109.5	80.0	39000	0.2
遷移帯	3.90	125.1	30.0	18700	0.2
コンクリート	7.50	126.0	48.0	24000	0.2

を採用した。呼び径 dF は式(1)として求められる<sup>8)</sup>。

$$d_F = 10 \frac{FM - 3.2237}{3.322} \quad (1)$$

ここで、dF は粒度分布をもつ骨材の呼び径(mm)、FM は当該粒度分布の粗粒率である。

表-5 に各調合の粗骨材の粗粒率、呼び径 dF および単位粗骨材容積に相当する面積比を示す。ここで、調合名の粗粒率は細骨材と粗骨材とを合わせた値であり、粗骨材の粗粒率とは異なることを補記しておく。以上の計算によって決定した調合毎の骨材モデルの寸法と個数を表-5 に示す。

本項のモデル化によって、立体的な破面形成が表現できず、粗骨材位置の変動による解析結果の変動は大きくなるが、粗骨材の役割は極めて明確になると考えた。

### (2) 遷移帯

粗骨材周りの遷移帯の厚さは 25<sup>9)</sup>~50μm<sup>10)</sup>程度であるが、メッシュの分割を変えず 1mm とした。本研究で使用した材料構成則は、次節 3.3 で詳述するように、破壊靱性試験結果を 1mm メッシュで逆解析した引張軟化解析の結果を元にしており、その要素の大きさに近い方が同様の平均値となると考慮したからである。なお、メッシュサイズの 1mm は著者が任意で決定した値である。

ただし遷移帯では、図-5 に示す試験体の破壊エネルギーが小さかったため、後述のように補正した後、実際の TSD の平均に近い形状である 1/4<sup>11)</sup>モデルに構成した。

### 3.3 材料の物性値

二次元メソモデルを FEM 解析に適用するため、各要素に物性値を付与する必要がある。本研究で採用したひび割れ特性(Ft, GF<sub>(wof)</sub>)、圧縮強度 Fc および弾性特性(ヤング係数 E, ポアソン比 ν)を表-6 に示す。なお、表中のコンクリートの物性値は、梁型試験体の中心部(38mm × 50mm 部分)以外に適用した値である。本研究では、ひび割れ特性を下記に示す実験と引張軟化解析から求めた。

#### (1) モルタルの物性値

モルタルの物性値は、2章で示した梁型試験体の H263 の実験と引張軟化解析結果を参考にした。Ft には TSD のひび割れ発生強度を、破壊エネルギーは荷重-CMOD 曲線から得られる GF<sub>(wof)</sub>を採用した。

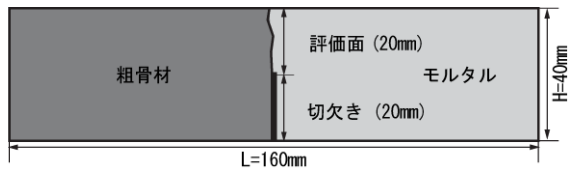


図-5 遷移帯試験体(物性値測定用)

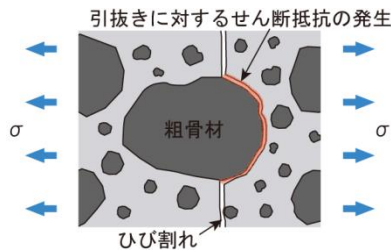


図-6 粗骨材まわりのひび割れとだぼのイメージ<sup>13)</sup>

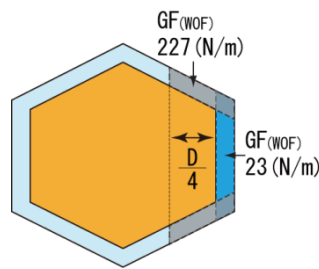


図-7 モデル化した粗骨材の  $GF_{(WOF)}$

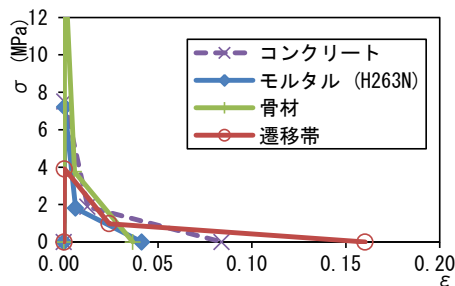


図-8 引張応力の軟化則(引張構成則)

## (2) 粗骨材の物性値

粗骨材の物性値を求めるために、硬質砂岩原石を  $40 \times 40 \times 160\text{mm}$  に切り出し、合計 25 体の破壊靱性試験を行った。骨材試験体も 2 章と同様の方法で荷重-CMOD 曲線と TSD を評価し、 $F_t$  と  $GF_{(WOF)}$  を算出した。ここでは上位 20 体の平均値を物性値として採用した。

## (3) 遷移帯の物性値

図-5 に示すように、前項(2)で破壊した骨材試験体に対してモルタル(調合 H263)を打継いで遷移帯試験体を作製し、骨材試験体と同様の方法で破壊靱性試験を行った。なお試験体の作製方法と破壊試験は前報<sup>12)</sup>に詳述した。試験の結果はばらつきが多かったことから、最も中間的

な試験体の実験結果を反映することにし、 $F_t : 3.9\text{MPa}$ 、 $GF_{(WOF)} : 23\text{N/m}$  となった。

しかし、本実験のように曲げ試験体の中に骨材が入っている場合、粗骨材周りの応力は複雑で、混合モード破壊が発生していると考えられる。そのため、ひび割れが粗骨材を横切った部分で、モード I 破壊が卓越している場合でも、図-6 のように、骨材周り遷移帯の破壊エネルギーは、骨材の引抜きに対するせん断抵抗を含んだ値を適用すべきである<sup>13)</sup>。従って、上述の比較的平坦な骨材とモルタル間との破壊エネルギーは過小だと考えられる。そこで、表-4 で求めた破面の 3 値化の面積比をもとに、式(2)を仮定した。この式では、各要素の破壊エネルギーと各破壊面積割合を乗じたものを合算することで、破面全体の破壊エネルギーとなる。

$$GF_{(WOF)} = \phi_M \cdot GF_M + \phi_G \cdot GF_G + \phi_I \cdot GF_I \quad (2)$$

ここで、 $\phi$  は各要素の破壊面積、 $GF$  は各要素の  $GF_{(WOF)}$ 、添え字は、 $M$ : モルタル、 $G$ : 骨材、 $I$ : 遷移帯を表す。

式(2)をもとに、複数の試験体から連立方程式をたて、 $GF_I$  を決定した。その結果、遷移帯の破壊エネルギーである  $GF_I$  は  $227\text{N/m}$  となった。この値は極めて大きい、田嶋ら<sup>3)</sup>と同程度である。

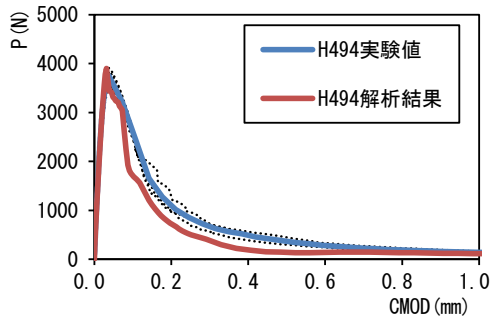
本研究では現実の骨材は直径の  $1/4$  だけ引抜けると仮定し、図-7 のように縦方向が遷移帯試験体より求めた  $23\text{N/m}$ 、引抜けを生じる斜め方向は破壊面積から求めた  $227\text{N/m}$  であるとモデル化した。煩雑さをさけるために、それらを平均した値  $125.1\text{N/m}$  を最終的な遷移帯の  $GF_{(WOF)}$  に採用した。

## 4. 二次元メゾモデルによる曲げ部材の FEM 解析

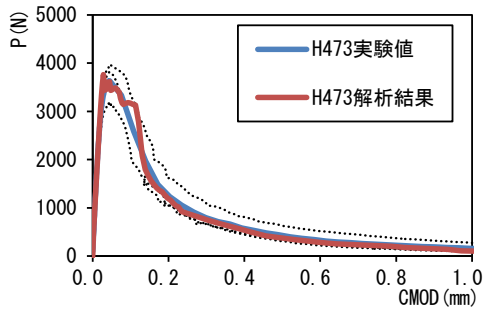
### 4.1 解析条件

二次元メゾモデルを対象に有限要素解析を行った。以下に本研究で用いた解析条件を説明する。

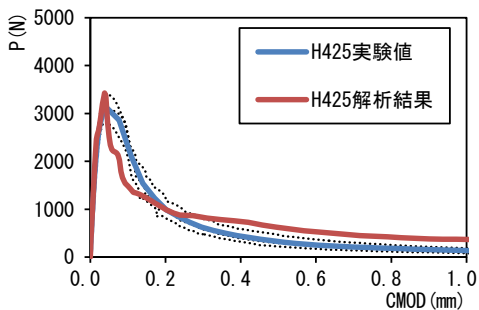
解析コードは汎用非線形構造解析ソフト DIANA を用いた。ひび割れ軟化特性として要素の応力-ひずみ関係を用いる分散ひび割れモデルに、ひび割れ面の剪断の影響を加味しなくても良い回転ひび割れモデルを適用して解析を行った。 $1\text{mm}$  の底辺と高さをもつ三角形は平面応力要素で統一した。平面歪み要素にしなかったのは、当解析では骨材周りの遷移帯が最初に剥離するため、コンクリート内部であっても幅方向にはポアソン比で自由に変形すると仮定したことによる。なお、ひび割れ後の要素の構成則には、歪みに換算した引張軟化曲線の  $1/4$  モデル<sup>11)</sup>を用いた(図-8 参照)。また解析ステップは変位増分によって進め、収束計算はエネルギーをノルムとしたニュートン・ラフソン法を用いた。



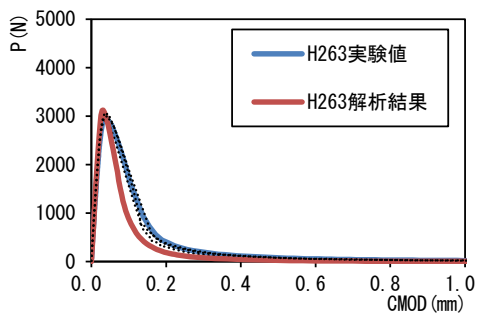
(a) H494N



(b) H473N



(c) H425N



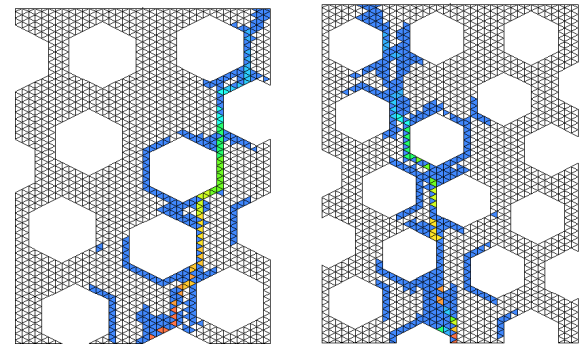
(d) H263N

図-9 実験値と解析値の荷重-CMOD 曲線

#### 4.2 解析結果

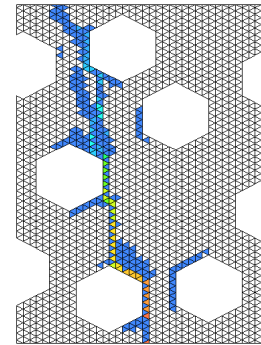
前述の条件のもと解析した荷重-CMOD 曲線を図-9 に示す。図中で、破線が3体の試験体の実験結果、青線の実線が3体の結果を平均化した曲線、赤色の実線が解析結果を示す。図-9 より、最大荷重および荷重-CMOD 曲線に関して、解析結果は実験結果を精度良く再現し、4種類の調合の差を明確に現したことが分かる。従って、本研究で提案したモデルの解析精度は良好と言える。

図-10 は破壊最終状態のひび割れ歪図である。この図に見るように、調合毎にひび割れ状態に明確な差が生じ、

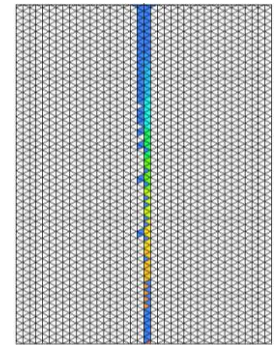


(a) H494N

(b) H473N



(c) H425N



(d) H263N

図-10 有限要素解析のひび割れ歪図

ひび割れ伸展の分岐状態も表現できていた。なお、本解析では局所化したひび割れ構成則を表せるリンク要素を配置せず、分散ひび割れモデルのみを用いたため、ひび割れ経路に沿う複数の要素がひび割れた結果となっているが、その中心線を最終的なひび割れ経路と見なした。

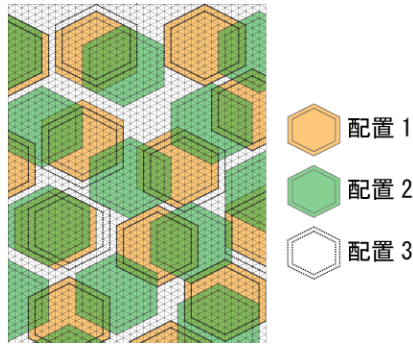
#### 5. 考察

##### 5.1 骨材配置の影響に関する考察

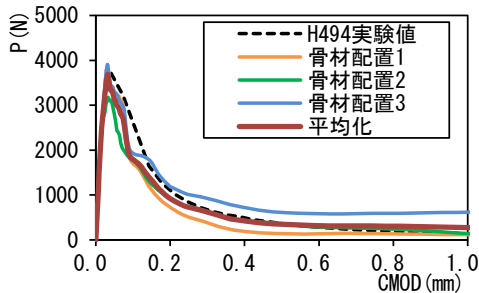
本研究の二次元メゾモデルは骨材を理想化したため、従来のメゾレベルの FEM 解析に比べれば極端に骨材の個数が少ないモデルである。またメッシュも 1mm と比較的粗いため、同物性値であっても骨材の配置が変わることによって、解析される荷重-CMOD 曲線および力学特性値は異なってくる。そこで、著者らは複数断面の結果を重ねることで、解析結果を実験値(三次元の状態)に近付けられると考えた。図-11(a)は、H494 を対象に3種類の骨材配置を重ね合わせたものである。異なる3種類の骨材配置で解析した荷重-CMOD を平均化したところ図-11(b)の赤線のように単断面の解析結果より実験値に近い結果が得られた。このように、本モデルでは複数断面による検討は有効と言える。

##### 5.2 粗骨材の機能の特定

本研究で提案した二次元メゾモデルでは細骨材はモルタルの一部として均質材料に含まれると見なし、粗骨材を単一粒径にモデル化して分散させている。また、実



(a) 3種類の骨材配置 (H494)



(b) 実験値と解析値の荷重-CMOD 曲線  
図-11 骨材配置の影響

験結果より求めた遷移帯の物性値は、 $F_t$  がモルタルより低く、 $GF_{(wof)}$  がモルタルより高いものである。従って、遷移帯がひび割れの発生源と伸展経路になるが、そこにおけるエネルギー消費が極めて大きい結果、最終的な力学特性を向上させるのである。これは、粗骨材が引抜げに抵抗してだばとして働くことを表現したものとと言える。以上のように、粗骨材とその周りの遷移帯が明確にクラックアレスターとして、つまりエネルギー吸収体としての機能を持つことが理想化できた。

力学モデルの観点から見れば、従来の構造解析を目的とした FEM 解析はコンクリートを均質と扱っており、一方で従来のメゾレベルモデルは実姿を再現した複雑すぎるものであるため、骨材やモルタルの機能が明確でなかった。それに対し本研究で提案した二次元メゾモデルは、粗骨材を単一粒径にモデル化し、構成材料毎の物性値を考慮することで、その機能を強調すると共に力学特性値と関連付けることを可能にしたと言える。

本研究で提案した二次元メゾモデルを活用することで、界面層をもつコンクリート部材の解析や異素材とコンクリートとの接着の解明など様々なシミュレーションが可能になると考えている。

## 6. まとめ

本研究では、粗骨材の機能を明確化した新しい二次元メゾモデルを提案した。当該モデルでは粗骨材は粗粒率をもとに六角形の単一粒径に単純化し、遷移帯の物性値は粗骨材の機能を明確化するように定めた。構成材料毎

の TSD を考慮して当該モデルを有限要素解析に適用した結果、解析結果は実験値と整合するものであった。

## 参考文献

- 1) 三橋博三：コンクリートの破壊力学研究委員会報告，コンクリート工学年次論文集，Vol.12，No.1，pp.1-8，1990
- 2) H. Sadouki and F. H. Wittmann: Numerical concrete applied to investigate size effect and stability of crack propagation, Proceedings of FRAMCOS-2, Aedificatio Publishers, Vol. I, pp. 619-634, 1995
- 3) 田嶋和樹，白井伸明：2次元粒子モデルを用いたコンクリートの破壊解析に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第571号 pp.7-14，2003.9
- 4) K. Nagai, Y. Sato and T. Ueda: Analytical study on influence of mortar-aggregate interface character on concrete strength by RBSM, コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.151-156，2004
- 5) 永井学志，山田貴博，和田章：三次元実画像データに基づくコンクリート材料の有限要素解析手法，日本建築学会構造系論文集，第509号 pp.77-82，1998.7
- 6) (社)コンクリート工学協会編：コンクリート工学，Vol. 43，No. 3，pp.64-69，2005.3
- 7) 日本コンクリート工学協会編：JCI 規準集 2004，日本コンクリート工学協会，pp.550-558，2004
- 8) 村田二郎，岩崎訓明，児玉和巳：コンクリートの科学と技術，山海堂，1996
- 9) 内川浩，羽原俊祐，沢木大介：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度の関係の検討，コンクリート工学論文集，Vol.4，No.2，pp.1-8，1993.7
- 10) H. F. W. Taylor: Cement Chemistry 2nd ed., pp.351-2, Thomas Telford, 1997
- 11) K. Rokugo, M. Iwasa, T. Suzuki and W. Koyanagi: Testing methods to determine tensile strain softening curve and fracture energy of concrete, in Proceedings of International Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy - Test Methods for Concrete and Rock, Sendai, 1988
- 12) 佐藤あゆみ，山田寛次，石山智：嵌合密度関数とラチスモデルによる骨材周り遷移帯の破壊に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 2，pp. 103-108，2011
- 13) 佐藤あゆみ，山田寛次，石山智：引張軟化曲線と引抜だばモデルによる新旧コンクリート界面の強度と靱性の関係についての考察，日本建築学会構造系論文集，Vol. 74，No. 637，pp.417-424，2009.3