

破壊エネルギーの局所化を考慮した骨材・セメントペースト・ 遷移帯の3連力学モデルの構築に関する研究

小野貴史* , 大下英吉*

Modeling of Mechanical Behaviour with Localized Fracture Energy on Interface of Aggregate, Cement Paste and Transition zone

Takashi Ono* and Hideki Oshita*

abstract

In the conventional fracture energy model, it is noted that the effects of material segregation, bridge phenomenon of aggregates and initial stress due to autogeneous shrinkage on a fracture energy are not taken into account. Because the definition of a fracture energy is based on macroscopic experiments. Therefore, it seems that the conventional fracture energy model will be not available for high-workable concrete and high-strength concrete. In these cases, it should be noted that the partial difference of stress and strain state in cement paste is taken into consideration. In this study, the microscopic fracture energy is defined as functions of distance from aggregate surface, degree of material segregation and degree of bridge effect, and then the macroscopic model is developed in which the above microscopic model is introduced.

1 はじめに

近年、コンクリート構造物の高強度化、高耐久化にともなって、高強度コンクリートや高流動コンクリートのような水結合材比が小さく単位結合材量が多いコンクリートが普及している。この種のコンクリートにおいては、水和発熱による温度応力は勿論のことであるが、初期欠陥として自己収縮が非常に重要な問題となっており、コンクリート標準示方書 [1] においてもその影響が考慮されている。従来、コンクリートの自己収縮は粗骨材も包含した部材レベルの巨視的なひずみとして考慮されているが、粗骨材間に存在するセメントペーストやモルタルの局所的な自己収縮に関しては議論されていない。勿論、セメントペーストやモルタル自体の自己収縮に関しては定量的に評価はなされているものの、コンクリート内に存在するセメントペーストやモルタルは粗骨材のかみ合わせ効果や Bridging 効果により自由な自己収縮が拘束され、局所的に異なる変形性状およびそれに起因する初期応力性状を示すことになるものと考えられる。したがって、セメントペーストやモルタル自体の性質はそのままの形でコンクリートには適用が困難と考えられる。

本研究では、骨材～セメントペースト～骨材からなるコントロールボリュームによりコンクリートが形成されるものとして捉え、粗骨材の拘束効果によるセメントペーストの初期変形性状の定性的かつ定量的評価をミクロレベルで行い、それをマクロレベルに拡張することによりコンクリートの変形性状に関する巨視的力学モ

*中央大学理工学研究所 東京都文京区春日 1-13-27

デルの構築を行った。そして、純引張試験結果との対比により、構築したモデルの適用性の検討を行った。また、骨材の Bridging 効果がモルタルやセメントペーストの自己収縮性状に及ぼす影響評価を細孔組織構造に関連付けて検討を行った。

2 骨材間セメントペーストの局所的初期変形状評価

本章では、コンクリートが骨材～セメントペースト～骨材というコントロールボリュームにより構成されているものとして捉え、骨材間に挟まれたセメントペーストに生じる自己収縮性状を空間毎に測定した。

2.1 実験概要

測定には、W/C30%、4 cm×4 cm× 骨材間距離 (5 cm, 3 cm) の形状寸法をしたセメントペースト供試体を用い、セメントは普通ポルトランドセメント (混和材無添加品、密度: 3.15 g/cm³) とした。練り混ぜはホバート型モルタルミキサを使用し、3 分間中速 (自転周期 120 ~ 130 rpm, 公転周期 37 ~ 38 rpm) で行った。なお、普通セメントの凝結開始時間はピカー針装置による測定を行い、275 分とした。

2.2 実験方法

実験環境は、20 ± 2°C, 40 ± 5% R.H. で行った。型枠の拘束を防ぐため発泡スチロール製の型枠を作製、セメントペーストを打設し、仕上げ面は打設直後に水分の逸散を防ぐためにアルミ箔によりシールした。自己収縮ひずみの測定には、セメントペーストの場所毎の変形挙動を詳細に評価する必要がある。本実験では、Fig. 1 に示すように骨材間セメントペースト内部において骨材から 1 cm 間隔で標点針を設置し、骨材が水平方向に配列されている状態での局所的な自己収縮測定を実施した。測定には、同図に示す複数点の変位測定を可能とするレーザー変位計を用いた。なお、骨材近傍区間である区間 および は、Fig. 2 に示すような骨材の回転

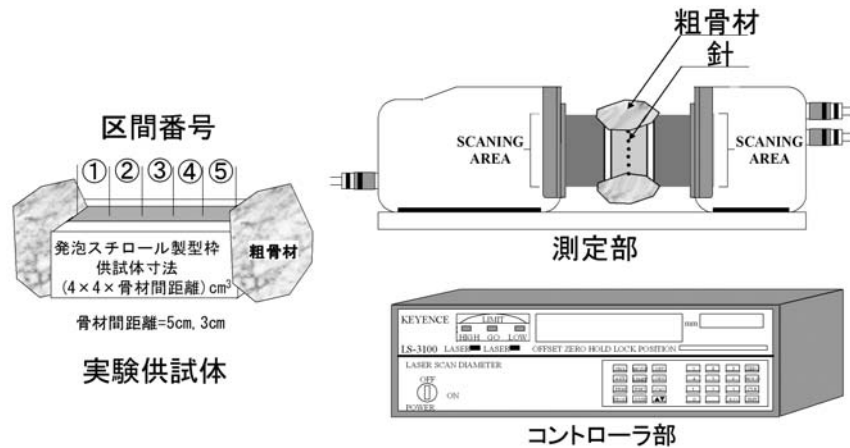


Fig. 1 Microscopic Autogeneous Shrinkage Measurement Apparatus

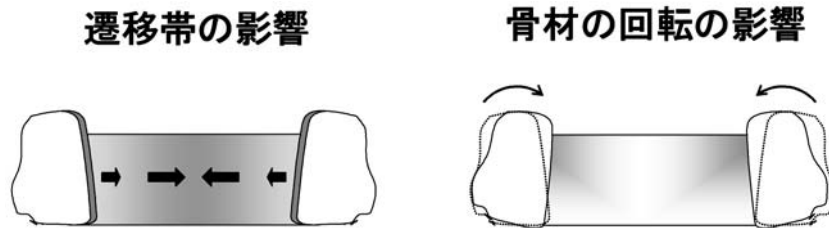


Fig. 2 Effect of Autogeneous Shrinkage on Aggregate Rotation

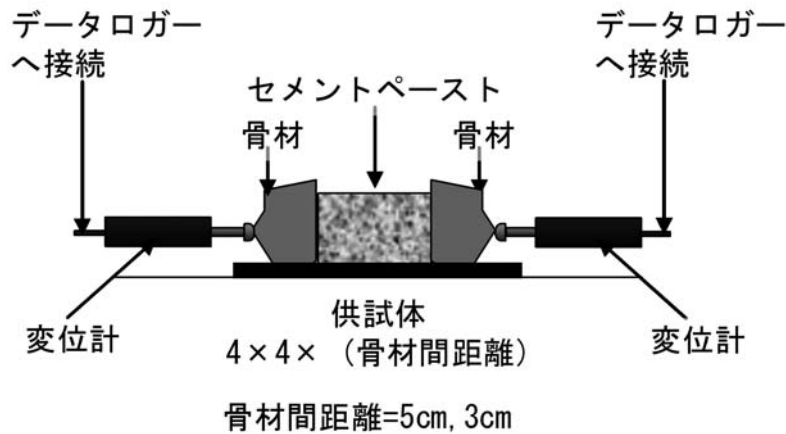


Fig. 3 Macroscopic Autogeneous Shrinkage Measurement Apparatus

や界面の付着性状の違いにより、両区間において不均一な変形状となることが想定される。したがって、これらの区間における自己収縮ひずみの測定は、Fig. 3 に示すような高性能変位計を用いることにより測定されたセメントペーストの巨視的な自己収縮ひずみから、中心部・中心付近部である、区間の各変位量を差し引くことにより測定を行なった。なお、自己収縮ひずみは、実測ひずみに対して供試体に埋設された熱電対によって計測された温度による補正を行なうことにより算出することとした。

2.3 局所的自己収縮ひずみの算出方法

セメントペースト供試体の各区間における温度履歴は Fig. 4 に示す通りである。図中に示す記号は骨材間距離 5 cm における骨材付近、区間の温度履歴の平均値、は骨材間距離 5 cm における中心付近部、区間の温度履歴の平均値、は骨材間距離 5 cm における中心部 区間の温度履歴である。また、記号、およびは、それぞれ骨材間距離 3 cm における骨材付近、区間、中心付近部、区間、中心部 区間の温度履歴の平均値を示している。自己収縮ひずみの算出に際しては、実測されるひずみ（自由収縮ひずみ）に対して温度補正を行わなければならない。本研究では、Fig. 4 に示した温度履歴の実測値およびセメントペーストの線膨張係数として一般的である $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の一定値を用いて温度補正を行った。

セメントペーストの各区間における自己収縮ひずみ増分は、実測ひずみ、温度ひずみから以下のように表わすことができる。

$$\Delta \varepsilon^{as}(x/l_0) = (\varepsilon_t^{tl}(x/l_0) - \varepsilon_{t-1}^{tl}(x/l_0)) - \alpha(T_t(x/l_0) - T_{t-1}(x/l_0)) \quad (1)$$

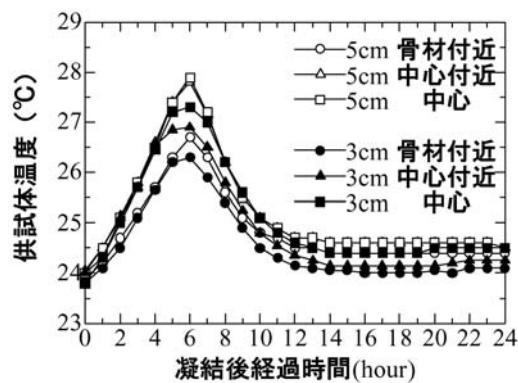


Fig. 4 Specimen's Temperature

ここで、 x は骨材からの距離、 l_0 は骨材間距離、 ε^{as} は自己収縮ひずみ、 ε^{tl} は実測ひずみ、 α は線膨張係数、 T は供試体温度、 t は材齢に対応するステップである。

そして、式 (1) を変形し、本研究における局所的な自己収縮ひずみは、

$$\varepsilon^{as}(x/l_0) = \sum \{(\varepsilon_t^{tl}(x/l_0) - \varepsilon_{t-1}^{tl}(x/l_0)) - \alpha(T_t(x/l_0) - T_{t-1}(x/l_0))\} \quad (2)$$

で表わすことができる。

式 (2) を用いることにより、実測値に基づいたセメントペーストの初期材齢において生じる微視的変形挙動評価を実施した。

2.4 局所的自己収縮ひずみによる初期変形状

各骨材間距離 (5 cm, 3 cm) を有する供試体の自己収縮ひずみ履歴は、Fig. 5 および Fig. 6 に示す通りである。各図は、それぞれ骨材間距離 5 cm および 3 cm に対応しており、図中に示す記号 \bullet 、 \circ 、 \triangle 、 \square は、それぞれ、 \bullet 、 \circ 、 \triangle 、 \square 区間の局所的自己収縮ひずみ、 \bullet はセメントペースト供試体全体の自己収縮ひずみである。

まず、Fig. 5 に示すように、骨材間距離 5 cm におけるセメントペースト中心部区間 および両骨材間距離における中心付近区間 \triangle 、 \square は、全体の自己収縮ひずみに比べて大きな自己収縮ひずみを生じており、骨材界面区間 \circ では、全体の自己収縮ひずみに対し小さな値を示していることが確認できる。また、Fig. 6 に示すように、骨材間距離 3 cm におけるセメントペースト中心部区間 においては極初期材齢においては小さな変形となっているものの、材齢の経過につれて全体の自己収縮ひずみに対して徐々に大きな自己収縮ひずみの値を示す傾向を示している。これらの値は、自己収縮委員会報告書 [2] 等に報告される自己収縮ひずみに比べ大きい値となっており、供試体形状寸法の違いにより間隙水の移動や絶対体積の体積変化の影響などが異なることによるものと考えられる。

Fig. 7 および Fig. 8 は、それぞれ骨材間距離 5 cm および 3 cm におけるセメントペーストの自己収縮ひずみ分布を示したものである。

両図に示すように、セメントペーストには不均一な自己収縮ひずみが生じている。すなわち、材齢 1 日では、骨材間距離によらずほぼ均一な自己収縮ひずみ分布となっているが、それ以降の材齢においては供試体中心部近傍において自己収縮ひずみの局所化が生じている。

上述の性状をより詳細に評価することとする。まず、骨材間距離 5 cm、材齢 3 日における自己収縮ひずみでは、骨材界面区間 \circ ではほとんど自己収縮ひずみ変化が生じていないことに対して、中心付近区間 \triangle 、および中心部区間 \square では骨材間距離 5 cm では約 2000 μ という大きな収縮ひずみを生じている。この現象は、骨材界面の遷移帯の影響および骨材による拘束効果が骨材近傍のセメントペーストに対して大きな影響を及ぼすことによるものである。このようなひずみ分布の傾向は、材齢 7 日においても顕著に生じているが、材齢 3

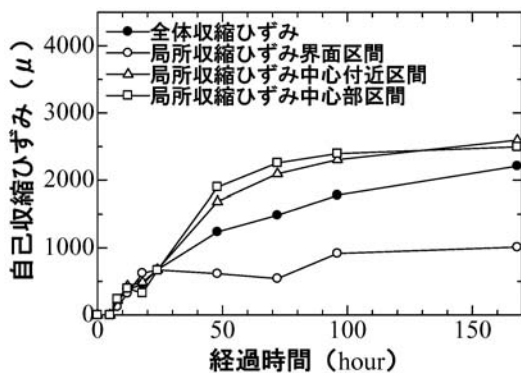


Fig. 5 Autogeneous Shrinkage History (Aggregate Interval 5 cm)

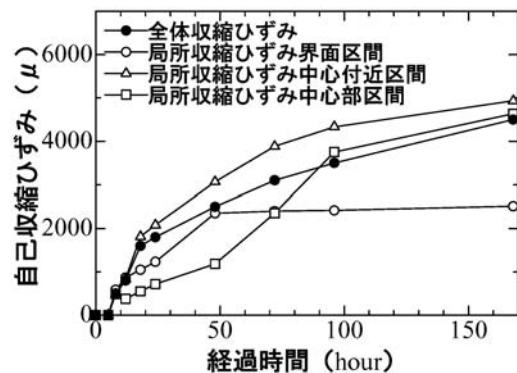


Fig. 6 Autogeneous Shrinkage History (Aggregate Interval 3 cm)

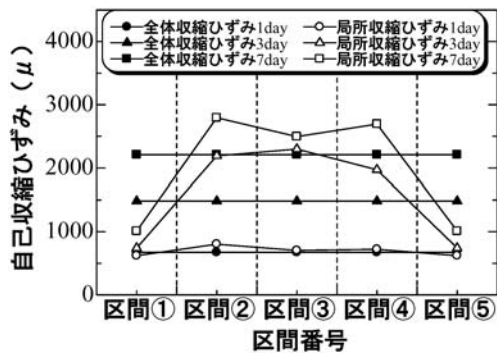


Fig. 7 Autogeneous Shrinkage Distribution (Aggregate Interval 5 cm)

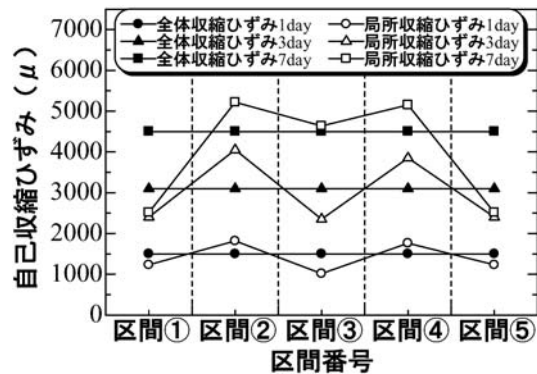


Fig. 8 Autogeneous Shrinkage Distribution (Aggregate Interval 3 cm)

日における自己収縮ひずみ分布との差異は、中心付近区間、に比べて中心部区間の値が僅かながら小さな値となっていることである。

次に、骨材間距離 3 cm, 材齢 3 日における自己収縮ひずみにおいては、中心付近区間 および においては約 4000 μ という大きな収縮ひずみを生じているが、中心部区間 においては小さな収縮ひずみとなっている。しかしながら、材齢 7 日においては骨材間距離 5 cm における傾向と類似する傾向となった。これには、骨材による拘束効果と骨材間距離すなわちセメントペーストのボリュームとの関連性が大きく関与しているものと考えられる。

2.5 初期変形により生じる局所的強度特性

2.4 に示したように、セメントペーストの局所的に異なる自己収縮ひずみにより不均一な初期変形状を生じるわけである。ここでは、初期変形状に起因する初期応力性状の概要および次章から論じる強度特性の概要に関しての簡単な説明を行なっておくことにする。

いま、Fig. 9 に示すようなセメントペーストにおける l_0 区間を考える。粗骨材からの距離 x 点に発生する自

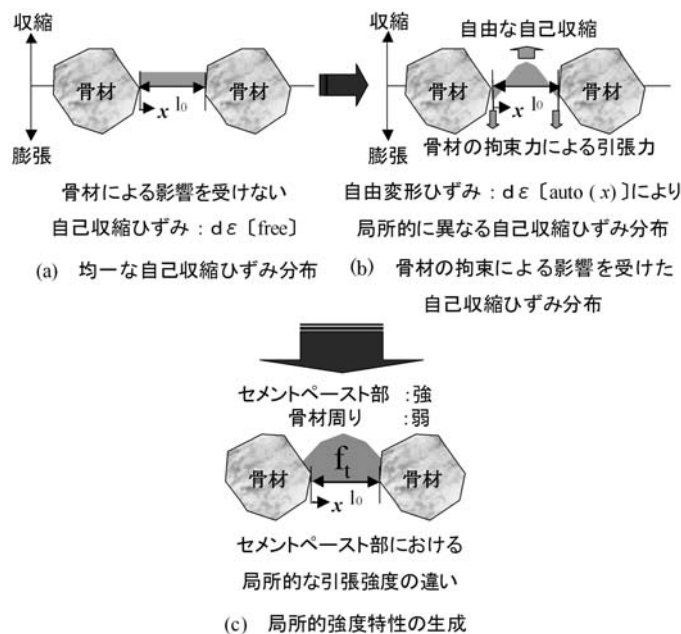


Fig. 9 Initial Deformation and Localized Strength

己収縮応力を $d\sigma_0(x)$ とし、同図 (a) に示すような自由な初期変形である全体の自己収縮ひずみ増分を $d\varepsilon_{free}$ として定義する。まず、骨材近傍からの距離ごとに生じる局所的自己収縮ひずみは、Fig. 7 および Fig. 8 に示すような全体収縮ひずみを基準とする変形性状： $d\varepsilon_{auto}(x) - d\varepsilon_{free}$ を考えると、同図 (b) に示すように骨材近傍区間においては骨材からの拘束効果に起因する引張変形、中心部区間および中心部近傍区間においては収縮に伴う圧縮変形性状を生じることとなる。この現象に伴い、全体的な自己収縮を基準とした局所の変形性状から生じる各区間の自己収縮応力： $d\sigma_0(x)$ は、骨材近傍では引張応力、中心部および中心部近傍では圧縮応力性状を呈することとなり、局所的に異なる初期変形および初期応力性状によって、同図 (c) に示すような不均一な引張強度を生じることと考えられる。すなわち初期変形に起因する細孔組織を形成し、位置により異なる強度特性を誘発するものと考えられる。なお、本研究においては、骨材間セメントペーストにおける変形を自由収縮状態として捉えている。しかしながら、構造物内部においては骨材間の自己収縮は拘束状態にあると考えられ、構造物の局所的初期応力の解明においてはさらなる定性的かつ定量的評価が必要であり、骨材固定状態における内部変形性状評価およびそれに伴う初期応力性状評価については今後の課題としたい。

2.6 骨材間セメントペーストにおける細孔径分布性状

自己収縮測定実験と同一条件下にあるセメントペーストに対して、水銀圧入式ポロシメータを用いることにより骨材間距離 5 cm および 3 cm における各区間の空隙容量～細孔直径関係および全細孔容積を測定した。なお、対象とした供試体の材齢は、3, 7, 14 日として。

骨材間距離 5 cm におけるセメントペーストの各区間の細孔径分布を Fig. 10, Fig. 11 および Fig. 12 に示す。各図は、骨材界面区間 および、中心付近区間 および、中心部区間 における細孔径分布を示したものである。空隙容量が最大となる細孔直径は、骨材界面区間、中心付近区間および中心部区間ではそれぞれ $0.663 \mu\text{m}$, $0.0018 \mu\text{m}$ および $0.003 \mu\text{m}$ であり、骨材界面区間では中心区間および中心付近区間に比べて大き

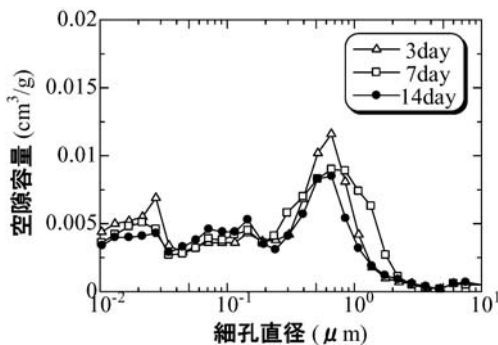


Fig. 10 Pore Distribution (Aggregate Interval 5 cm, Region)

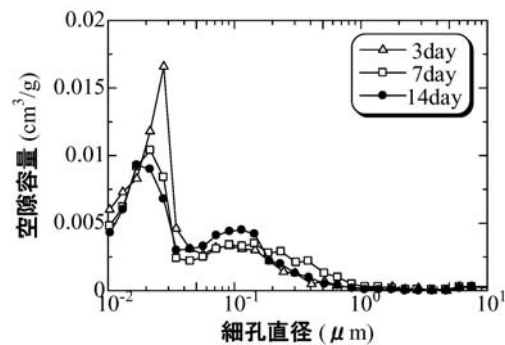


Fig. 11 Pore Distribution (Aggregate Interval 5 cm, Region)

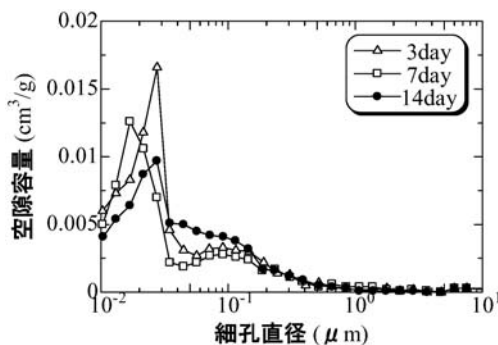


Fig. 12 Pore Distribution (Aggregate Interval 5 cm, Region)

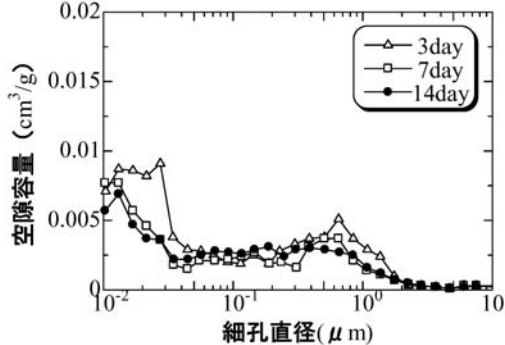


Fig. 13 Pore Distribution (Aggregate Interval 3 cm, Region)

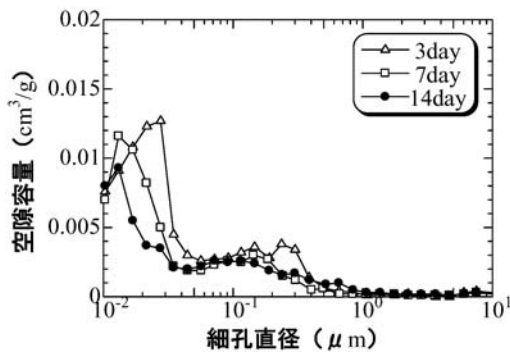


Fig. 14 Pore Distribution
(Aggregate Interval 3 cm, Region)

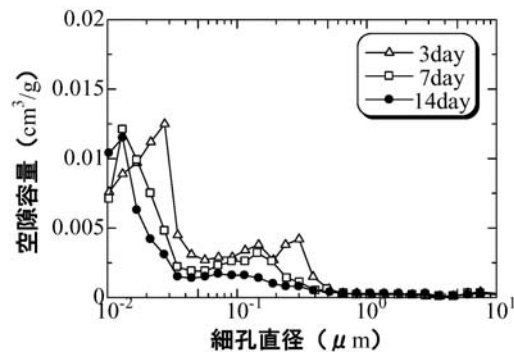


Fig. 15 Pore Distribution
(Aggregate Interval 3 cm, Region)

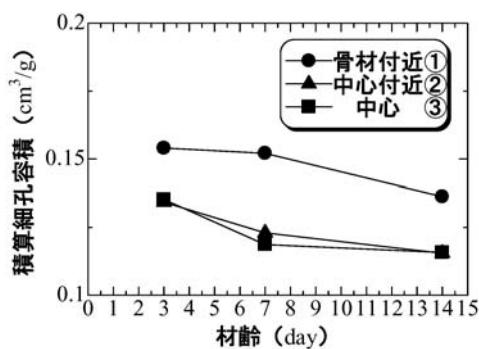


Fig. 16 Total Pore Volume History
(Aggregate Interval 5 cm)

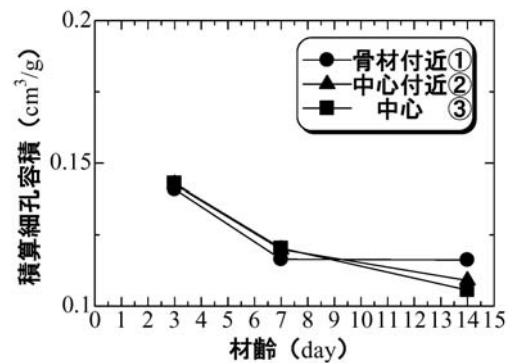


Fig. 17 Total Pore Volume History
(Aggregate Interval 3 cm)

な細孔直径となる。

また、骨材間距離 3 cm におけるセメントペーストの各区間の細孔径分布を Fig. 13, Fig. 14 および Fig. 15 に示す。各図は、骨材界面区間 および、中心付近区間 および、中心部区間 における細孔径分布を示したものである。空隙容量が最大となる細孔直径は、骨材界面区間、中心付近区間および中心部区間ではそれぞれ $0.3931 \mu\text{m}$ 、 $0.0131 \mu\text{m}$ および $0.0131 \mu\text{m}$ であり、骨材間距離 5 cm における細孔径分布と同様に骨材界面区間では中心区間および中心付近区間に比べて大きな細孔直径となる。また、空隙容量においては骨材間距離 5 cm の結果に比べ、若干ながら小さな値となっていることがわかる。これは、2.5 に示したように初期変形状の影響によるものであり、骨材による自己収縮の拘束効果により細孔組織が粗になるものと考えられる。一方、中心付近区間および中心部区間においては骨材による拘束力が殆ど無く、細孔組織が緻密であるわけである。以上のように、セメントペーストの初期変形状は細孔組織形成に大きな影響を及ぼすことが確認されたわけであり、また強度にも大きな影響を及ぼすことも確認された。そこで、以下においてはセメントペーストの初期変形状により生じる局所的強度特性と細孔組織構造との関連性を論じることとする。

Fig. 16 および Fig. 17 は、セメントペーストの各区間における積算細孔容積～材齢関係を示したものであり、それぞれ骨材間距離 5 cm および 3 cm に対応している。なお、図中に示す記号 は骨材界面区間、 は中心付近区間および は中心部区間である。

Fig. 16 に示す骨材間距離 5 cm では、セメント組織が緻密な領域である中心部区間および中心付近区間においては全体に占める細孔容積は小さくなり、これに対して骨材界面区間における全細孔容積は大きな値を示している。このことはすなわち、細孔組織性状が直接局所的な強度特性に影響を及ぼしていることを表わしている。細孔容積が多い骨材界面区間においては、骨材の影響により低い強度を生じることとなり、また細孔容積が少ない中心区間においてはセメントペースト組織が緻密なものとなり、初期変形に起因して高い強度を

有する結果を示している．すなわち，不均一な初期変形が生じるに伴い，それに起因する細孔組織構造に影響を及ぼすこととなり，結果として局所的に異なる強度特性を生じることになるのである．一方，Fig. 17 に示す骨材間距離 3 cm では，積算細孔容積に各区間の違いはほとんど見られない．しかしながら，Fig. 13～15 で示したように，骨材界面区間ではその他の区間に比べて比較的径の大きい $1\ \mu\text{m}$ 程度の細孔容積が多い．このことから判断すると，後述するように局所的強度特性と細孔組織構造との関連は，単に積算細孔容積のみに依存するのではなく，比較的径の大きい細孔容積がどの程度存在するかにもよるものであろう．

3 セメントペーストの微視的破壊エネルギーに基づく力学モデルの構築

セメントペーストの初期変形性状を考慮した力学的モデルを構築するにあたっては，微視的観点に基づいた変形性状や破壊エネルギー性状を考慮しなければならない．

3.1 本研究におけるコンクリートの構成則

骨材を完全弾性体，セメントペーストを弾塑性体として捉え，セメントペーストの塑性モデルにはひび割れ帯モデルを導入した．

まず，骨材とセメントペーストは直列に連結されているものと仮定し，間隙比を考慮した構成関係を導くこととする．骨材の応力～ひずみ増分関係は，次式で示す通りである．

$$d\sigma = [D_a^e] d\varepsilon_a \quad (3)$$

また，セメントペーストの応力～ひずみ増分関係は

$$d\sigma = [D_c^{ep}] d\varepsilon_c \quad (4)$$

間隙比を用いることによって，式 (3) および式 (4) は次式となる．

$$d\sigma = (1 - e) [D_a^e] d\varepsilon_a = (1 - e) [D_c^{ep}] d\varepsilon_c \quad (5)$$

式 (5) を変形すると，次式となる．

$$d\varepsilon_a = \frac{1}{1 - e} [D_a^e]^{-1} d\sigma, \quad d\varepsilon_c = \frac{1}{1 - e} [D_c^{ep}]^{-1} d\sigma \quad (6)$$

さらに，骨材およびセメントペーストの体積を考慮することにより，コンクリートの全ひずみ増分は次式で表すことができる．

$$\begin{aligned} d\varepsilon &= \frac{V_a}{V} d\varepsilon_a + \frac{V_c}{V} d\varepsilon_c \\ &= \frac{V_a}{V} \frac{1}{1 - e} [D_a^e]^{-1} d\sigma + \frac{V_c}{V} \frac{1}{1 - e} [D_c^{ep}]^{-1} d\sigma \end{aligned} \quad (7)$$

最終的に，応力～ひずみ関係は次式となる．

$$d\sigma = \left[\frac{V_a}{V} \frac{1}{1 - e} [D_a^e]^{-1} + \frac{V_c}{V} \frac{1}{1 - e} [D_c^{ep}]^{-1} \right]^{-1} d\varepsilon \quad (8)$$

ここで，コンクリートの $[D]$ マトリックスは，次式となる．

$$[D] = \left[\frac{V_a}{V} \frac{1}{1 - e} [D_a^e]^{-1} + \frac{V_c}{V} \frac{1}{1 - e} [D_c^{ep}]^{-1} \right]^{-1} \quad (9)$$

3.2 ひび割れ帯モデルの導入

本研究においては、ひび割れの進行を表わす上で前述したひび割れ帯モデルの導入を行うこととした。塑性ひずみ増分は、コンクリートの要素寸法 l_0 とひび割れ幅増分 dw により次式で表すことができる。

$$d\varepsilon^p = \frac{dw}{l_0} \quad (10)$$

また、ひび割れ帯モデルにおいて、コンクリートのひずみ増分 $d\varepsilon$ は次式のように表わすことができる。

$$d\varepsilon = d\varepsilon_a^e + d\varepsilon_c^e + [\beta]d\varepsilon^p \quad (11)$$

ここで、 $d\varepsilon_a^e$ および $d\varepsilon_c^e$ は、骨材およびセメントペーストの弾性ひずみ、 $d\varepsilon_c^p$ はセメントペーストの塑性ひずみであり、 $[\beta]$ は次式で示すマトリックスである。

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ & \eta & 0 \\ sym. & & \xi \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、 ε , η , ξ は各軸方向の微細ひび割れ領域の程度を表すパラメータであり、これにより一方向の主応力に直交する方向に大きなひび割れが発生するような問題に適用が可能である。また、ひび割れ幅増分においては、全変形量と弾性変形量との差を考慮することにより次式のようなになる。

$$dw = l_0 d\varepsilon^T - l_0 d\varepsilon_a^e - l_0 d\varepsilon_c^e \quad (13)$$

さらに、ひび割れ幅増分 dw は、破壊進行の幅と塑性ひずみ増分を用いることにより次式のように書き直すことができる。

$$dw = l_0 [\beta] d\varepsilon_c^p \quad (14)$$

ここで、コンクリートの要素寸法 l_0 は破壊進行領域幅 w_c に等しいと仮定することにより、式 (14) は次式のようなになる。

$$dw = w_c [\beta] d\varepsilon_c^p \quad (15)$$

式 (15) で示すように、ひび割れ幅増分が破壊進行領域幅とセメントペーストの塑性ひずみ増分で表されたわけであり、コンクリートの破壊エネルギーを定義することが可能となるわけである。

3.3 微視的破壊エネルギーに基づく軟化勾配の誘導

1) クラックを考慮した巨視的破壊エネルギーによる軟化勾配

骨材間の物性相違においてミクロ的に捉えた破壊エネルギーおよびひび割れ帯モデルを関連付けることにより、塑性域で軟化を引き起こす原因となるひび割れ発生開始からの応力～ひずみ関係の誘導を実施した。

破壊エネルギーはクラックで満たされる状態での単位体積当たりのエネルギー開放であり、引張強度～ひび割れ幅関係による面積に等しいことを考慮し、一直線モデルを仮定すると次式が定義される。

$$G_f = w_c \int_0^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} f_t w_c \quad (16)$$

式 (16) を変形することにより、ひび割れ幅は次式で表すことができる。

$$w_c = \frac{2G_f}{f_t} \quad (17)$$

また、軟化域勾配 E^T は、次式のように表わすことができる。

$$f_t = E^T w_c \quad (18)$$

そして、式 (18) を式 (17) に代入することにより、軟化域勾配 E^T は次式となる。

$$E^T = \frac{f_t^2}{2G_f} \quad (19)$$

2) 微視的破壊エネルギーに基づく局所的な軟化勾配の誘導

Fig. 9 に示すように、骨材間距離を l_0 として距離 x における微小区間 dx を考える。この区間における塑性ひずみ増分 $\Delta\varepsilon^p(x)$ は、次式で表わすことができる。

$$\Delta\varepsilon^p(x) = \frac{\Delta\sigma}{E^T(x)} = \frac{2G_f(x)}{f_t(x)^2} \Delta\sigma \quad (20)$$

また、 l_0 区間の平均的な塑性ひずみ増分 $\Delta\varepsilon$ は、

$$\Delta\varepsilon^p = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} \Delta\varepsilon^p(x) dx \quad (21)$$

そして、式 (20) を式 (21) を代入することにより、局所的に異なる引張強度 f_t および破壊エネルギー G_f を考慮した平均的な塑性ひずみ増分が次式のように導かれるわけである。

$$\Delta\varepsilon^p = \frac{\Delta w}{l_0} = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} \frac{2G_f(x)}{f_t(x)^2} dx \Delta\sigma \quad (22)$$

そして、塑性域の応力～ひび割れ幅増分関係により定義される軟化域弾性係数 E^T は、式 (23) に示す通りである。

$$E^T = \frac{l_0}{2 \int_0^{l_0} \frac{G_f(x)}{f_t(x)^2} dx} \quad (23)$$

ここで、ひび割れ帯モデルによって導くことのできるひび割れ幅増分と塑性ひずみ増分との関係は、次式である。

$$dw = w_c [\beta] d\varepsilon_c^p \quad (24)$$

また、応力～塑性ひずみ増分の関係式は、次式である。

$$d\sigma = [D_c^p] d\varepsilon^p \quad (25)$$

そして、式 (25) に式 (22) ~ 式 (24) を代入することにより、塑性域における応力～ひずみ関係が次式のように定義される。

$$d\sigma = \frac{w_c l_0}{2 \int_0^{l_0} \frac{G_f(x)}{f_t(x)^2} dx} [\beta] d\varepsilon^p \quad (26)$$

以上のことから、ひび割れが生じた際のセメントペーストの塑性マトリックス $[D_c^p]$ は、次式で表すことができる。

$$[D_c^p] = \left[\frac{w_c l_0}{2} \sum_{i=1}^{l_0} \frac{f_{ti}^2}{G_{fi}} \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ \eta & 0 & 0 \\ sym. & \xi & \end{bmatrix} \right] \quad (27)$$

式 (27) は骨材近傍からの距離の関数により局所的に異なる軟化勾配を表現したものであり、骨材間セメントペーストの塑性域における局所的に異なる変形挙動を詳細に評価可能なモデルである。実際の計算に際しては、要素内の積分点毎に骨材間セメントペーストの引張強度 f_t および破壊エネルギー G_f が位置により異なるという情報が適用されるわけである。

3.4 純引張試験と解析的検討

1) 純引張試験による引張強度

Fig. 18 に示すように、純引張試験においてはセメントペーストと治具を強力接着剤により固定し、セメントペースト各区間に切り欠きを設置した試験体を用いた。引張強度算出においては、区間毎に3体の試験を実施し、それらの平均値による結果とした。なお、実験の対象とした供試体は、骨材間距離 5 cm、材齢 7 日および 14 日であり、3 体の試験結果にバラツキはほとんど無かった。

セメントペーストの各区間における引張強度を Fig. 19 に示す。骨材界面区間 および中心部区間 において強度の違いを生じる。特に、材齢 14 日では中心部において約 1.2 倍程度大きな引張強度を生じている。また、材齢によらず中心部区間 に比べて、中心付近部区間 の方が僅かながら大きな引張強度を生じている。これには骨材近傍に形成される遷移帯の影響が考えられるが、本実験における水セメント比は比較的小さいためその影響は無視し得ると考えられる。すなわち、セメントペーストの初期変形性状或いは初期応力性状が骨材間の距離を変数としたセメントペーストの細孔組織構造の形成に大きな影響を及ぼしたことによるものと考えられる。この局所的な引張強度の相違を捉え、以下に示す数値シミュレーションへの導入を実施することとした。

2) 解析的検討

a) 解析モデルと解析条件

解析モデルは、Fig. 20 に示すように 4 cm×4 cm×2.5 cm の形状寸法をしたセメントペーストの 1/4 モデルであり、それを 20 要素 79 節点に分割した。解析は強制変位を与える変位制御手法とし、一軸引張状態を想定することによるモード I 型破壊を仮定した。なお、解析に用いたパラメータは Table 1 に示す通りである。

解析においては、局所的に異なる引張強度および破壊エネルギーを式 (27) に代入するわけであるが、本解析では Fig. 21 に示すように微視的引張強度を局所的物性値パラメータとし、破壊エネルギーは一定値と仮定した。引張強度に関しては Fig. 19 に示す骨材間距離 5 cm、材齢 14 日における純引張試験の結果を導入した。ここで、従来の破壊エネルギーに基づくモデルとは、局所的に異なる引張強度および破壊エネルギーを一定値とし、式 (17) に基づく引張軟化勾配によるものである。

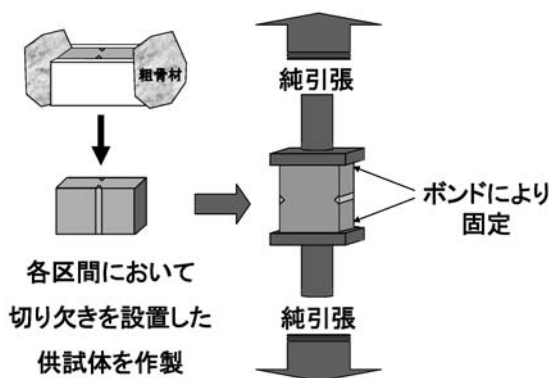


Fig. 18 Tensile Experiment Apparatus

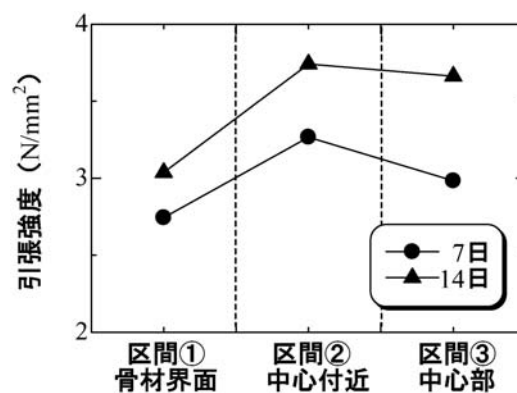


Fig. 19 Characteristics of Tensile Strength (Aggregate Interval 3 cm)

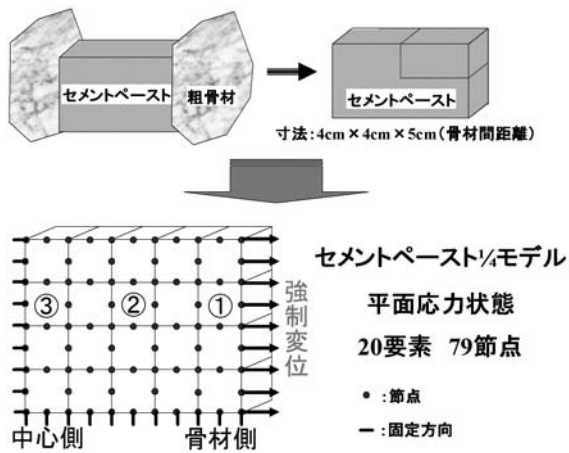


Fig. 20 Analytical Model

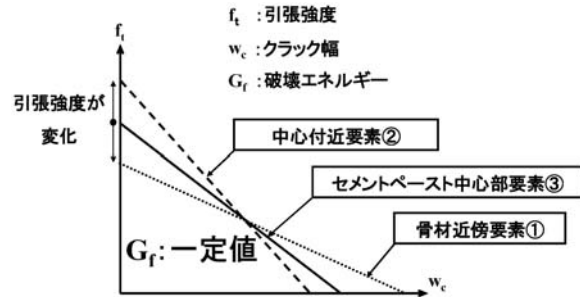


Fig. 21 Analytical Parameters

Table 1 Analytical Parameters

Young's Modulus (N/mm ²)	Poisson's ratio	Porosity	Aggregates interval (mm)	G _{MAX} (mm)	Crack band width (mm)	Fracture Energy G _f (N/mm)
2.0 × 10 ⁴	0.2	0.2	50.0	40.0	4.0	0.025

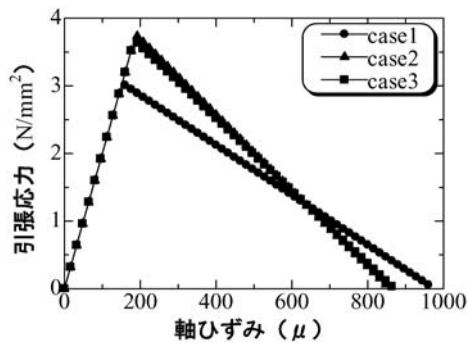


Fig. 22 Stress ~ Strain Relation (Conventional Model)

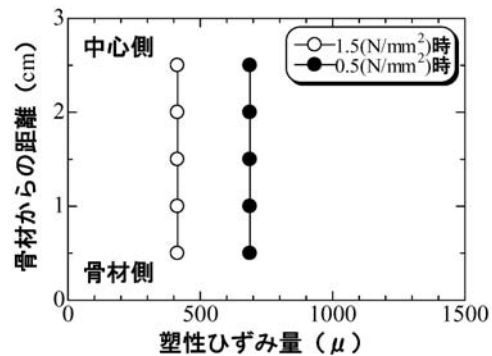


Fig. 23 Plastic Strain Distribution (Conventional Model)

b) 応力～ひずみ関係に対する検討

Fig. 22 は、従来モデルによる骨材近傍 (case 1 と称す), 中心付近 (case 2 と称す) および中心部 (case 3 と称す) における応力～ひずみ関係を示したものである。また, Fig. 23 は塑性ひずみ分布を示したものであり, 図中には応力レベル 1.5 N/mm² および 0.5 N/mm² を代表として示している。ここで, case 1~3 の解析にあたっては, 引張強度をパラメータとしてそれぞれ Table 2 に示すような骨材近傍, 中心部付近および中心部における引張強度を解析モデルの全要素に適用したものである。

まず, Fig. 22 に示すように, セメントペーストの引張強度の差異により, 当然のことであるが各要素の軟化勾配の違いを確認することができる。引張強度の大きい中心付近 case 2 および中心部 case 3 では, 軟化が急勾配となり, 骨材の影響を直に受けやすい骨材近傍 case 1 では引張強度が小さな値となり, クラックが進展しやすいという現象を表わしている。また, Fig. 23 に示すように, 従来モデルでは case 1 に代表する全ケースにおいてひずみの局所化現象を全く生じていない。

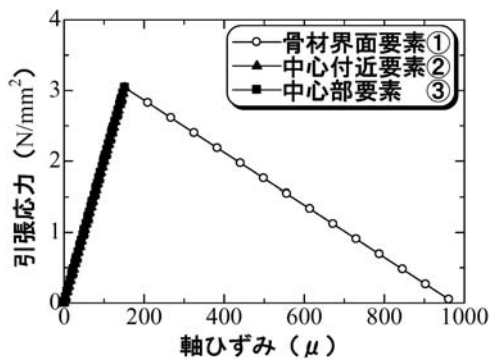


Fig. 24 Stress ~ Strain Relation (Developed Model)

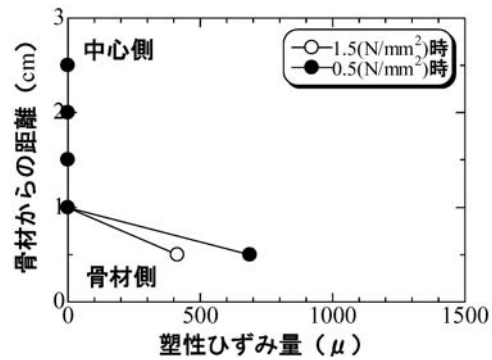


Fig. 25 Plastic Strain Distribution (Developed Model)

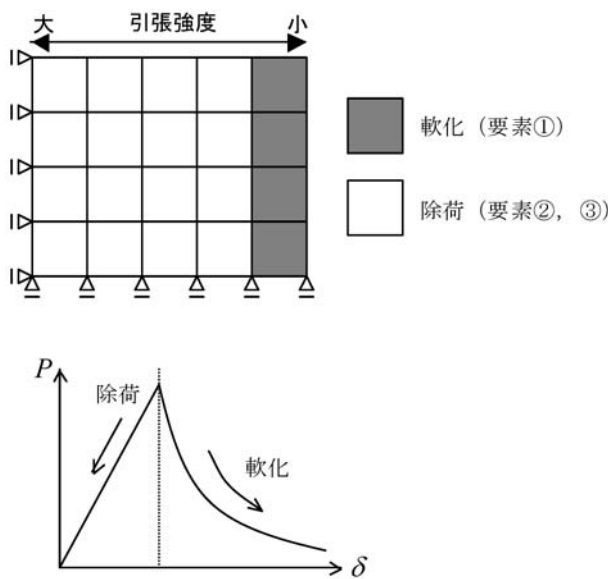


Fig. 26 Stress Path after Peak Load

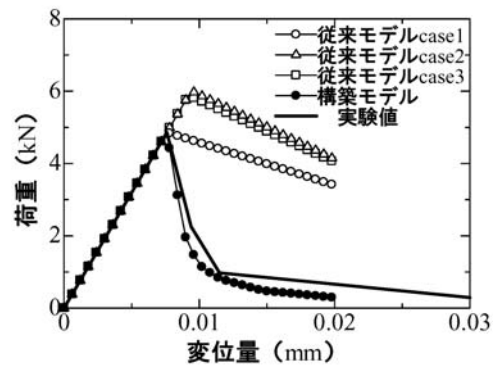


Fig. 27 Load ~ Displacement Relation

一方, Fig. 24 および Fig. 25 は, 本構築モデルによる解析結果であり, それぞれ Fig. 22 および Fig. 23 に対応している.

本構築モデルによれば, Fig. 24 に示すように骨材近傍である要素 においては変形の早い段階において引張強度に達した後に軟化挙動を示している. これは, 骨材近傍における遷移帯形成の影響も無視できないが, 本研究における低水セメント比ということから考えるとセメントペーストの初期変形性状或いは初期応力性状によってセメントペーストの細孔組織が粗となり引張強度が小さいことによるものである. すなわち, Fig. 26 に示すように, 骨材近傍の要素 が塑性軟化を生じると, この要素のみに破壊が進行することによって, 骨材から離れた位置である 要素および 要素では, 荷重の除荷現象によるひずみの回復現象を生じることとなる. したがって, Fig. 25 に示すように骨材近傍においてひずみの局所化が顕著に生じており, 従来モデルとは全く異なる傾向を示している.

c) 構築モデルによる荷重～変位関係評価

Fig. 27 に荷重～変位関係を示す. 図中に示す記号 , および は従来モデル, 記号 は構築モデルによる荷重～変位関係を表わしており, 純引張試験による実験値を実線で表わしている. なお, 従来モデルである , および は, Table 2 に示すように純引張試験より得られた局所的な引張強度を全要素に適用した結果を示している.

Table 2 Tensile Strength of Cement Paste

	引張強度 (N/mm ²)	
case1	3.04	(骨材近傍)
case2	3.74	(中心付近)
case3	3.66	(中心部)

まず、構築モデルに関しては実験結果を比較的精度良く評価しており、骨材間セメントペーストにおいて最も強度が小さい骨材近傍要素が引張強度に達すると荷重が急激に低下した後に緩やかに低下するという現象を示している。急激な荷重低下現象は、骨材近傍要素では引張強度に達した後に軟化現象を生じることに対して、骨材から離れた中心部近傍要素においては荷重の除荷現象すなわちひずみの回復現象が生じることによるものである。また、その後の緩やかな荷重低下現象は、骨材から離れた中心部近傍要素のひずみが殆ど回復し、骨材近傍要素のみの変形が生じることによるものである。

次に、従来モデルに関しては実験において破壊が生じる骨材近傍の引張強度を用いた case 1 では弾性領域内の挙動を精度良く評価していることに対して、case 2, 3 においては全く異なる挙動となっている。また、軟化域においてはいずれのケースにおいても実験結果とは全く異なる傾向を示している。これは、全要素が同一の引張強度であることから全ての要素が軟化を生じることにより大きな塑性変形を生じることとなるためである。

4 まとめ

本研究では、骨材間セメントペーストの材齢初期に形成されるセメントペーストの局所的初期変形評価を実施し、初期変形性状に起因する細孔組織性状を評価した。さらに、コンクリート内部の初期変形性状の局所的相違に着眼し、骨材間セメントペーストを骨材間距離の関数として捉えることにより、微視的な引張強度および破壊エネルギーを考慮した変形挙動モデルを構築し、局所化を考慮した純引張試験により得られた引張強度を本モデルに導入し、従来モデルにおける変形挙動解析との比較を行なった。本研究より得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 骨材間セメントペーストの自己収縮ひずみは、存在位置ごとに異なり、結果として不均一な初期変形分布を生じる。
- 2) 水銀圧入式ポロシメータを用いた区間ごとの全細孔容量測定試験を実施した結果、骨材間セメントペーストの細孔組織構造は、骨材からの距離によって異なり、局所的に異なる初期変形性状を生じさせる。
- 3) 純引張試験を実施した結果、骨材間セメントペーストの強度特性は、骨材からの距離において異なる。
- 4) 構築した変形挙動モデルは、載荷や除荷現象を詳細に評価可能なモデルである。
- 5) 純引張試験に対する変形挙動解析を実施した結果、構築した変形挙動モデルは実現象における局所化現象を詳細に評価しており、コンクリートのマイクロレベルにおける変形性状の重要性を示すものである。

参考文献

- [1] コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 土木学会, 2002.
- [2] 自己収縮研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1996.