

論文 膨張コンクリートの非線形性およびテンションスティフニング効果向上のメカニズムに関する解析的検討

酒井 雄也*1・岸 利治*2

要旨: 曲げや引張変形において、膨張コンクリートが示す非線形性とテンションスティフニング効果向上のメカニズムの解明を目的として、剛体ばねモデルによる数値解析を実施した。膨張コンクリートは、膨張作用により載荷前から圧縮及び引張ひずみを有しており、低い荷重レベルでひび割れが発生するが、周囲はひび割れ発生ひずみに達していないため、ひび割れの発達が緩慢であることを確認した。これにより繰り返し引張試験においては非線形性や変形性能向上が生じ、また一軸引張試験においては、ひび割れ発生後もコンクリートが応力を負担し続けるため、テンションスティフニング効果が向上することを解析的に示した。

キーワード: 膨張コンクリート, ケミカルプレストレス, 非線形性, テンションスティフニング, RBSM

1. はじめに

膨張コンクリートは収縮補償及びケミカルプレストレスの導入を目的として、膨張材を添加したコンクリートである。収縮補償を目的とした使用では、これまでに実構造物でも有効性が確認されており¹⁾、最も効果的なひび割れ制御手法の1つとされている。

一方、ケミカルプレストレスの導入を目的とした膨張材の使用例は限られており、プレキャスト製品への適用に留まっている。原因として、膨張コンクリートの挙動を定量的に評価する手法が確立されていないことや、挙動のメカニズムが解明されていないことが挙げられる。膨張コンクリートは、曲げや引張変形において高い変形性能や非線形性を示すことが過去の研究により報告されている²⁾³⁾⁴⁾。岡村ら²⁾は膨張コンクリートの曲げ試験を実施し、普通コンクリートでは生じない非線形性が表れることを報告している。細田ら³⁾は膨張モルタルの繰り返し引張試験を実施し、荷重の増加に伴い剛性の低下と残留ひずみの増加といった非線形性が生じることを確認し、そのメカニズムとして、膨張により初期ひずみにばらつきが生じており、破壊が徐々に進行するために非線形性が発現するというコンセプトを提案している。また Raktipong⁴⁾は一軸引張試験を実施し、膨張コンクリートを用いた場合、普通コンクリートに比べてテンションスティフニング効果が向上することを報告している。以上のように、多くの研究者により膨張コンクリートの挙動が検討されてきた。しかし挙動のメカニズムに関しては、実験から得られる限られた情報に基づいた推察に留まっているのが現状であり、不明な点が多く残されている。

そこで本研究では膨張コンクリートの特徴的な挙動のメカニズムを明らかにすることを目的として、モルタルの繰り返し引張試験とコンクリートの一軸引張試験の

シミュレーションを実施した。離散解析手法の1つであるRBSM(剛体ばねモデル)を用いて、実験では観察が困難な応力、ひずみ場およびひび割れ進展等の観点から検討した。

2. 数値シミュレーション

2.1. 解析手法

川井⁵⁾により開発されたRBSM(剛体ばねモデル)を用いて膨張コンクリートの挙動のメカニズムを検討する。これは離散化された要素間に設定されたバネにより応力を伝達する解析手法であり、Nagaiら⁶⁾はこの手法をコンクリート材料の破壊シミュレーションへと適用した。第一著者はNagaiらが構築した解析システムを粒状体の解析へと拡張し、フレッシュコンクリートの鉄筋間流動解析に適用している⁷⁾。本研究では上記粒状体解析システムを用いて、シミュレーションを実施した。

2.2. 構成則

シミュレーションではコンクリートをモルタル要素、粗骨材要素の二相系とみなした。要素間には垂直バネとせん断バネが設置されている。図-1に垂直バネの構成則を示す。(a)はモルタル要素同士及びモルタル要素とそれ以外の要素との界面、(b)は鉄筋要素同士の構成則である。(a)では垂直バネは圧縮域で弾性挙動を示し、引張側では終局引張ひずみの半分を超えた時点でひび割れ発生とみなし、応力は減少に転じる。(b)では垂直バネは圧縮域で弾性挙動を示し、引張側では降伏ひずみを超えた場合、剛性を100分の1とするバイリニア型とした。100分の1としたのは解析の発散を防ぐ便宜上の設定である。せん断ばねには弾塑性挙動を導入し、降伏値はモールクーロン型の基準により決定される。図-2にせん断バネの構成則と降伏基準を示す。

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 工修 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 教授 博(工) (正会員)

入力定数は垂直バネ及びせん断バネのバネ定数 (k_n , k_s) と粒子間摩擦角 (ϕ), 粘着力 (c) およびモルタルの終局引張ひずみ ϵ_{tu} , 鉄筋の降伏ひずみ ϵ_y である。

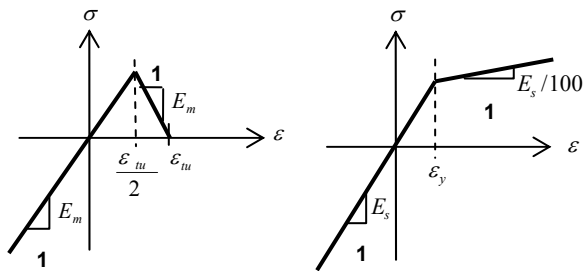
パラメータの決定にあたっては, Nagai ら⁶⁾の検討を参考にした。Nagai らはモルタルの圧縮強度からモルタルの弾性係数や骨材界面における粘着力等を算出する式を提案している。本研究では圧縮強度が 30MPa 相当のモルタルを想定してパラメータを設定した。圧縮強度や剛性は養生条件により変化する可能性がある。しかし, 以降の解析結果の比較に用いた実験においては, 脱型後, モルタル供試体では水中養生, コンクリート供試体では湿布養生が施されている。このため, 水分供給は十分になされていると考えられることから, 一般的なコンクリートの入力定数を使用することとした。解析に使用した入力定数の一覧を表-1 に示す。

厳密にはメソスケールの構成則は, 実験で得られるマクロな構成則と異なると考えられるが, 本研究ではマクロな弾性係数 E とポアソン比 ν から平面ひずみ条件に基づいて, 式(1)および式(2)により k_n , k_s を決定した。

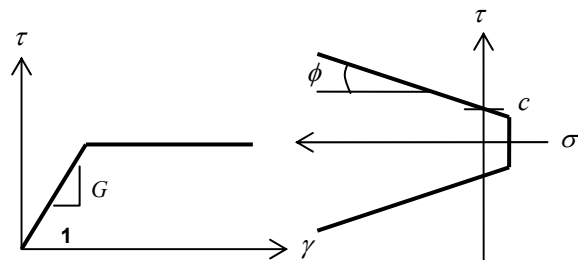
$$k_n = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{E}{1+\nu} \quad (2)$$

ここで, モルタル間では $E=E_m$, 異なる要素種類間においては両者の弾性係数の平均を E とした。 ν に関しても同様である。膨張はモルタル要素を膨張させることで表現しており, 膨張要素にはモルタルと同様の材料特性を与えている。



(a) モルタル要素 (b) 鉄筋要素
図-1 垂直バネの構成則



(a) 構成則 (b) 降伏基準
図-2 せん断バネの構成則と降伏基準

2.3. 水和と膨張の考慮について

膨張コンクリートでは, セメントの水和と膨張材の膨張が並行して進行するため, 生成される水和物には膨張によりひずみが生じ, また水和物に損傷が生じて水和により再生する。その結果, 膨張コンクリートは載荷前から複雑なひずみ分布を有するものと考えられる³⁾。そこで, 膨張材による初期ひずみのばらつきを解析に導入するため, 本検討では載荷前に, 水和と膨張を考慮するプロセスを導入した。膨張はモルタル要素をランダムに選択し, その径を増加することで, 水和はモルタル要素の剛性を増加, すなわち要素間に設置されたバネの剛性を増加することで表現した。水和と膨張挙動は線形的に推移すると仮定しており, 膨張は 10 ステップ, 水和は 30 ステップで完了し, 10 ステップ目でモルタル要素の膨張ひずみは 800μ , 30 ステップ目でモルタル要素の弾性係数は 20,000MPa となるものとした (図-3)。本研究では, 若材齢とある程度材齢の経過したケースを想定して検討を行っており, 前者では 11 ステップ目から, 後者では 31 ステップ目から載荷を開始している。今回用いた水和や膨張速度の妥当性や, 実際の材齢との対応に関しては今後検討する必要がある。また本検討では, 膨張以外の要因による体積変化 (乾燥収縮, 自己収縮等) は考慮していない。これは, 膨張コンクリートの非線形挙動の主原因は膨張作用によるものであると考えたためであるが, 今後収縮作用による影響も検討する必要があると考えられる。

表-1 入力定数

モルタル要素	
弾性係数 E_m	20,000MPa (30 ステップ目)
ポアソン比 ν_m	0.18
終局引張ひずみ ϵ_{tu}	0.0004
粗骨材要素	
弾性係数 E_g	50,000MPa
ポアソン比 ν_g	0.25
モルタル要素と他の要素の境界	
粘着力 C	3.0MPa
粒子間摩擦角 ϕ	35°
終局引張ひずみ ϵ_{tu}	0.0004
鉄筋, 境界要素	
弾性係数 E_s	200,000MPa
ポアソン比 ν_s	0.3
降伏ひずみ ϵ_y	0.002

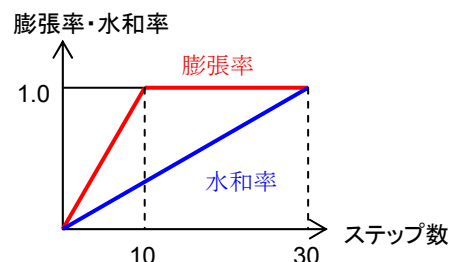
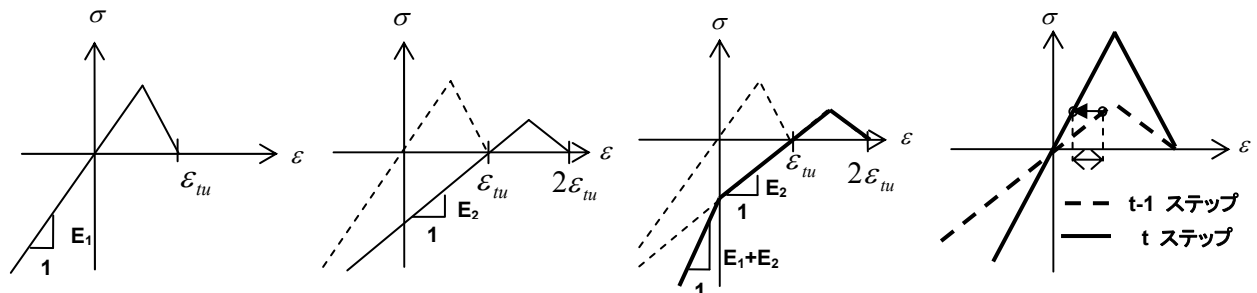


図-3 水和率と膨張率の変化



(a) 終局ひずみ到達前 (b) 終局ひずみ到達後再生 (c) 使用する構成則
図-4 破断したバネの再生による構成則の変化

図-5 剛性の増加による応力増大を防ぐための処理

上部境界要素(5stepまで固定, 荷重まで自由)
荷重: 強制変位(0.001mm/step)

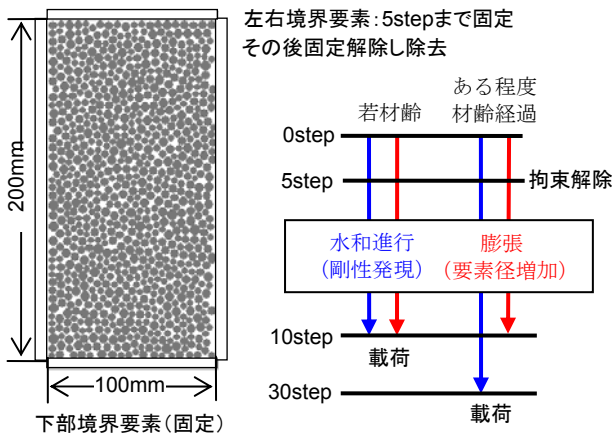


図-6 解析モデルとフローチャート

また中村ら⁸⁾が報告しているように、膨張材の粒子径によっては、膨張によりコンクリートに微小ひび割れが生じる。これはコンクリート中で膨張が生じた場合、膨張力作用部には圧縮応力が生じるが、その変形により周囲には引張応力が発生することによるものと考えられる。この場合、ひび割れが発生しても未水和セメントが残っていれば、水和物により修復するものと考えられる。そこで、垂直バネが終局引張ひずみに達した場合、水和進行中であれば、バネの剛性を再度0から増加させるという処理を行った(図-4)。図-4のE1とE2はEmに対応しており、破断前に発現していた剛性がE1、破断後に新たに発現した剛性がE2である。上記処理を行ったバネにおいて、ひずみが圧縮域に入った場合、破断後に発現した剛性E2(b)と、破断前の剛性E1の和で圧縮応力を計算している(c)。

解析上、バネに応力が生じている状態で剛性が増加すると応力が増加する。しかし実現象では、水和によりコンクリート中の応力が増加することは考えにくい。そこで、剛性増加前後での応力が一定となるように、バネのひずみを低減することとした(図-5)。これは、要素間に設置されたバネは並列な複数のバネ(内部バネ)から構成されるとみなすことと同等である。すなわち、水和による剛性の増加は内部バネの増加に対応する。この場合、新規の内部バネはひずみを有しない状態で追加され、その結果、内部ばねの平均的なひずみは減少する。

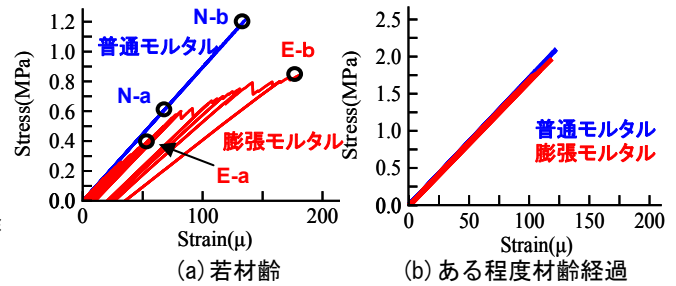


図-7 繰り返し引張シミュレーション結果

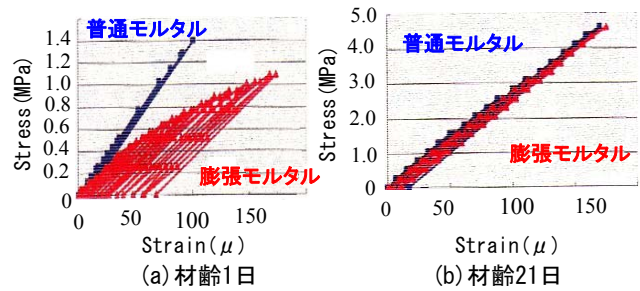


図-8 繰り返し引張試験結果³⁾

2.4. モルタルの繰り返し引張シミュレーション概要

長さ200mm、幅100mmの二次元モデルを用いた解析を行った。モルタル要素(要素数820、直径4-6mm)をランダムに配置することでモデルを作成した。図-6に解析モデルを示す。検討ケースは若材齢及びある程度材齢の経過した普通モルタル、膨張モルタルである。いずれのケースでも荷重前に水和・膨張プロセス考慮のために10ステップを使用しており、膨張モルタルでは要素数の1割にあたるモルタル要素82個の径を増加させている。若材齢を想定したケースでは、11ステップ目から荷重し、ある程度材齢の経過したモルタルを想定したケースでは、10ステップ経過後、さらに20ステップ水和のみを進行、すなわちバネの剛性のみを増加し、31ステップ目から荷重を開始した。養生中の拘束による影響を表現するため、5ステップまではモデルの四方を境界要素で拘束し、6ステップ目から拘束を解除している。10ステップ目における解析モデル全体の膨張ひずみは200μであった。解析のフローチャートを図-6に示す。荷重は上部の境界要素を0.001mm/stepで上昇、下降させることで繰り返し荷

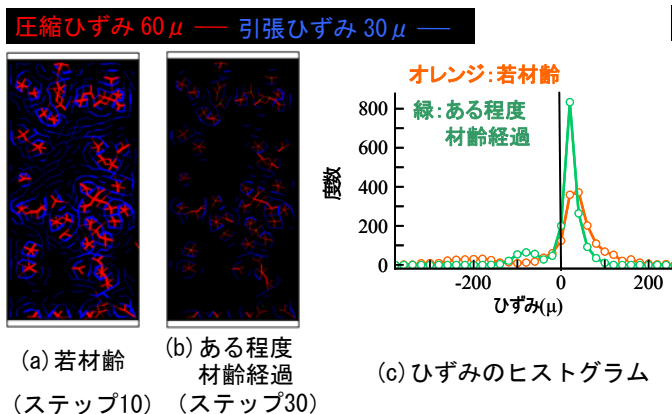


図-9 膨張モルタルの垂直バネひずみ

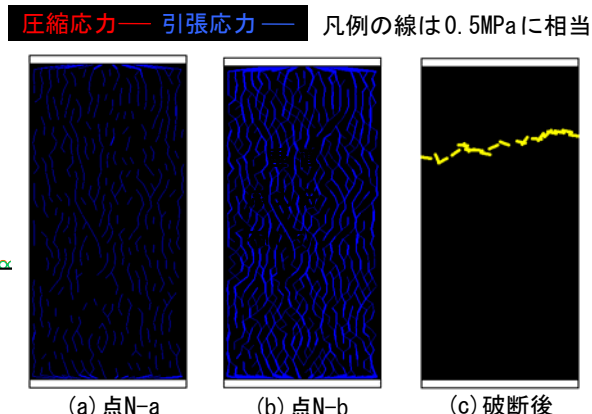


図-10 普通モルタルの垂直バネ応力とひび割れ表示

重を与え、徐々に最大荷重を増加した。

2.5. 解析結果

図-7 に普通モルタルと膨張モルタルの平均応力—平均ひずみ関係を示す。若材齢において、普通モルタルは最大荷重までほぼ弾性挙動を示しているが、膨張モルタルは荷重を繰り返すにつれて非線形性、すなわち剛性の低下および残留ひずみの増加が生じている。また、ある程度材齢が経過したケースでは、膨張モルタルの非線形性が減少しており、普通モルタルとほぼ同様の挙動を示している。図-8 は細田ら³⁾による普通モルタルおよび膨張モルタルの繰り返し引張試験の結果である。普通モルタルは弾性挙動を、膨張モルタルは非線形を示していること、材齢の経過により膨張モルタルの非線形性が減少していることなどから、解析が実験と同様の挙動を表現できていることが確認できる。

解析結果に基づいて普通モルタルと膨張モルタルの挙動に関するメカニズムを検証する。まず膨張モルタルの荷重前の垂直バネひずみ分布を図-9 に示す。ここで垂直バネひずみとは、要素間に設置された2本のバネのうち、垂直バネに生じるひずみとする。図-9(a)(b)の青と赤の線はそれぞれ引張、圧縮ひずみを表しており、線が太いほどひずみの絶対値が大きい。図中の最も細い線は、圧縮では 60μ の、引張では 30μ のひずみを表している。普通モルタルでは荷重前にはひずみは発生していない。膨張モルタルでは膨張材により圧縮ひずみが導入されるが、拘束によりその周囲に引張応力が発生する。膨張が2次元的に生じた場合、膨張要素を中心にして円周方向に引張ひずみが生じることが確認できる。これは、膨張により膨張材を中心とした放射状のひび割れが生じることを観察した中村ら⁸⁾の報告と一致しており、オーダーは異なるが同様の機構が存在しているものと考えられる。ある程度材齢の経過した膨張モルタルでは、ひずみが減少している。これは、水和による内部バネの増加により、ひずみを有しているバネの割合が相対的に減少したためである。図9(c)には荷重直前におけるひずみのヒストグ

凡例の線は1.0MPaに相当

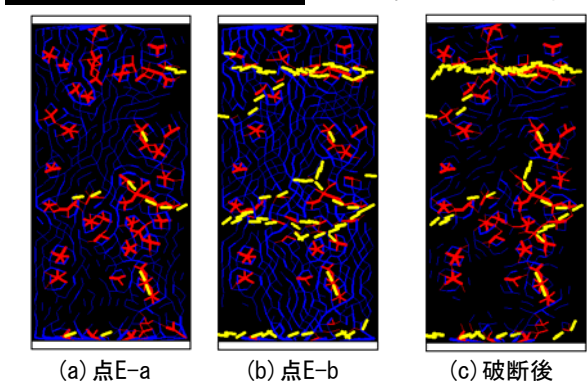


図-11 膨張モルタルの垂直バネ応力とひび割れ表示

ラムを示す。膨張作用によりひずみに分布が生じており、若材齢に比べて、ある程度材齢の経過したケースでは分布が0に近付いていることが確認できる。

破壊時の引張応力の半分の時点、破壊直前および破壊直後における垂直バネ応力分布とひび割れ状態を図-10、図-11 に示す。この時の応力とひずみは図-7 中の点に対応している。図中の青は引張、赤は圧縮応力を表しており、線が太いほど応力の絶対値が大きい。図中の最も細い線は 0.5MPa の応力を表している。ひび割れは黄色い線で表されている。普通モルタルでは、荷重方向に引張応力が比較的一様に生じ、ひび割れは発生と同時に急激に進展して破壊に至っている(図-10)。一方膨張モルタルでは初期ひずみのばらつきにより、応力分布は一様でない(図-11)。荷重の初期から微小なひび割れが比較的分散して発生しており、荷重が増加するにつれてひび割れの数は増加するが、ひび割れ進展は非常に緩慢である。破壊直前においても荷重方向に圧縮応力が残存している部分が確認できる。材齢の経過した膨張モルタルでは、普通モルタルと同様に、発生したひび割れが急激に進展して破壊に至った。

繰り返し引張シミュレーションの検討結果をまとめる。膨張モルタルでは膨張により、荷重前から複雑なひずみ分布が形成される。実際の膨張材は粉体であり、今

回用いた要素径とはサイズオーダーが異なるが、同様に圧縮と引張の混在したひずみ分布が形成されていると考えられる。荷重後は、膨張により引張ひずみの生じた部分から徐々にひび割れが発生するが、その周囲はひび割れ発生ひずみに至っていないため、ひび割れの進展が抑制される。これにより、膨張モルタルにおける非線形性及び変形性能の向上が生じているものと考えられる。

2.6. 一軸引張シミュレーション概要

長さ 1000mm、幅 100mm の二次元コンクリートモデルを用いた解析を行った。コンクリートモデルはモルタルと粗骨材の二相系として、モルタル要素（要素数 3400、径 4mm）を最密充填配置し、その一部を粗骨材要素（要素数 86、径 12~20mm）とランダムに置換することでコンクリートモデルとした。幅 3mm の鉄筋要素をモデルの中心に配置しており、鉄筋比は 3%である。また鉄筋に隣接したモルタル要素を 1つおきに鉄筋に剛結し、鉄筋要素と同様の剛性を与えて鉄筋の節とした（図-12）。鉄筋の節間隔及び節高さが実際よりやや大きく設定されており、また形状も異なるため、シミュレーションされる挙動は実際とやや異なる可能性がある。本検討では材齢の経過したケースのみを対象としたため、水和・膨張

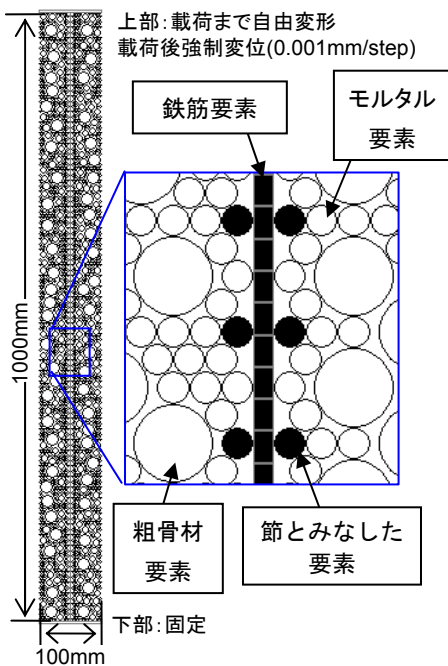


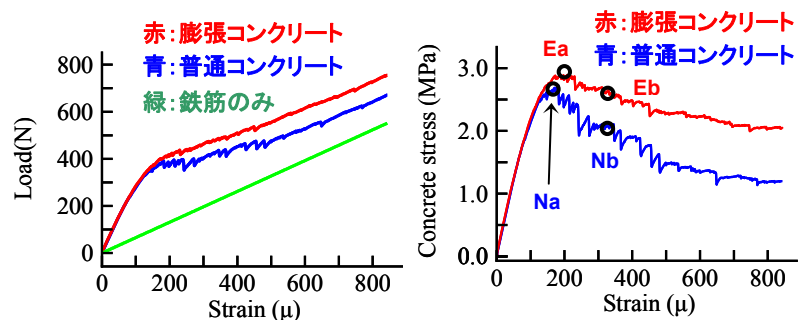
図-12 解析モデルと節の設置

後、31 ステップ目から荷重を開始した。鉄筋の最上部を 0.001mm/step で上昇させることで引張荷重を与えた。

2.7. 解析結果

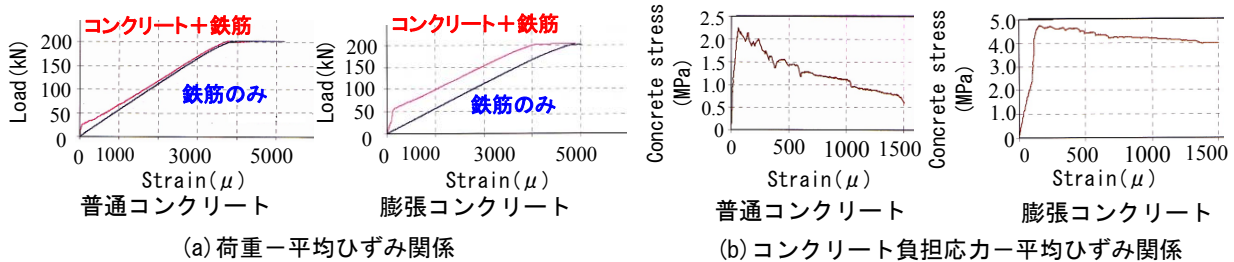
図-13 に荷重—平均ひずみ関係とコンクリート負担応力—平均ひずみ関係を示す。普通コンクリートに比べて、膨張コンクリートではテンションスティフニング効果が向上しており、ピーク経過後のコンクリート負担応力の減少が緩慢になっていることが確認できる。図-14 は Raktipong⁴⁾による一軸引張試験の結果である。解析における膨張コンクリートのピーク時の応力がやや小さくなっているが、これは導入されたプレストレスの違いが原因であると考えられる。実験では荷重までに 600 μ 程度の膨張ひずみが測定されているが、解析では約 150 μ である。しかし、解析において膨張ひずみを増加させるとひび割れが多数発生し、ピーク時の応力が減少する結果となった。これは、今回は 2 次元条件で検討を行っているが、実際にはコンクリートには 3 次元的な拘束が作用していることや、水和と膨張が線形的に推移すると簡易的に仮定したこと起因するものと考えられる。しかし膨張コンクリートにおいて、ピーク後の応力減少が抑制される傾向は捉えられており、テンションスティフニング効果改善のメカニズムの検討は可能であると判断した。

膨張の有無により挙動が異なるメカニズムを検討する。コンクリート負担応力のピーク時と、平均ひずみ 300 μ の時点での垂直パネ応力とひび割れ状態を図-15 に示す。図中の最も細い線は 1.0MPa の応力を表している。また、この時の応力とひずみは図-13 (b)中の点に対応している。まずピーク時の点 N_a と点 E_a を比較すると、前節の検討と同様、普通コンクリートにおいては軸方向の



(a) 荷重—ひずみ関係 (b) コンクリート負担応力—ひずみ関係

図-13 一軸引張シミュレーション結果



(a) 荷重—平均ひずみ関係

(b) コンクリート負担応力—平均ひずみ関係

図-14 一軸引張試験結果⁴⁾

圧縮応力 — 引張応力 —

凡例の線は 1.0MPa に相当

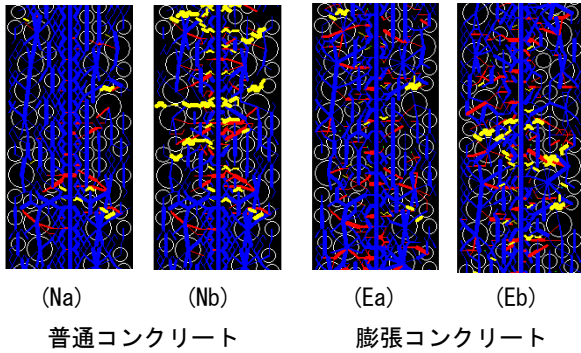


図-15 垂直パネ応力、ひび割れ表示

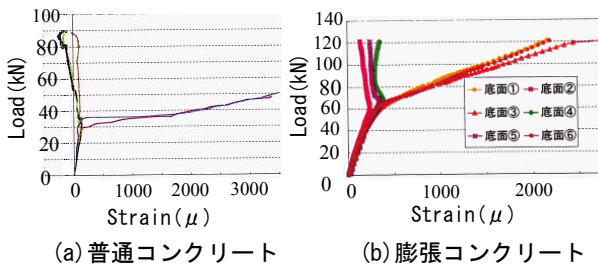


図-16 曲げ試験の引張縁底面のコンクリートの挙動⁹⁾

引張応力が卓越しているが、膨張コンクリートでは膨張による複雑な応力分布が保たれている。どちらにおいても多少ひび割れが発生しているが、顕著な差は見られない。平均ひずみ 300μ (点 N_b, E_b) においては、普通コンクリートでは鉄筋から外縁までひび割れが発達しており、ひび割れ周囲のコンクリート応力の消失が確認できる。一方、膨張コンクリートでは前節の検討と同様に、ひび割れは発生しているものの、発達は非常に緩慢である。またひび割れ発生後も、普通コンクリートに比べて、ひび割れ周囲のコンクリートが応力を保持している。これは古谷ら⁹⁾により実施された膨張コンクリート部材の曲げ試験において、ひび割れ発生後も引張縁コンクリート底面において引張ひずみが保持されていたという報告と一致している(図-16)。前節の検討において確認されたメカニズムと同様の機構でひび割れ発生後もコンクリートが応力を保持しているものと考えられる。

一軸引張シミュレーションの結果をまとめる。膨張コンクリートにおいては前節における膨張モルタルと同様のメカニズムで、ひび割れの発達が緩慢になる。その結果、ひび割れ発生後もコンクリートが応力を保持し続けるために、テンションスティフニング効果が向上しているものと考えられる。

3. 結論

本研究で得られた結論を以下に纏める。

1)モルタルの繰り返し引張試験における非線形性・変形性能向上について

- ・膨張材により膨張モルタル及び膨張コンクリートは複雑な初期ひずみを有する。載荷後、膨張により引張ひずみが生じた部分にひび割れが生じる。しかし、その周囲はひび割れ発生ひずみに達していないため、ひび割れの発達が妨げられ、その結果非線形性が生じる。
- ・材齢の経過により初期ひずみのばらつきが軽減され、非線形性が減少する。

2)RCのテンションスティフニング効果向上について

- ・初期ひずみのばらつきによりひび割れの発達が妨げられる。その結果、ひび割れ発生後もコンクリート部分が応力を負担し続けるためにテンションスティフニング効果が向上する。

参考文献

- 1) 膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化研究委員会：委員会報告集，膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム委員会報告集，pp.156-163，2003
- 2) 岡村甫，辻幸和：ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性，土木学会論文報告集，第225号，pp.101-108，1974
- 3) 細田暁，岸利治：膨張モルタルの非線形挙動とひび割れ抵抗性の機構について，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.13-29，2001.8
- 4) Raktipong SAHAMITMONGKOL：Microscopic Mechanism and Influencing Factors on Cracking Resistance of Chemically Prestressed Concrete Member，東京大学学位論文，2005
- 5) Tadahiko KAWAI：New Discrete Models and Their Application to Seismic Response Analysis of Structures，Nuclear Engineering Design，48，pp.207-229，1978
- 6) Kohei NAGAI，Yasuhiko SATO and Tamon UEDA：Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM，Journal of Advanced Concrete Technology，Vol. 2，No. 3，pp. 359-374，2004.10
- 7) 酒井雄也，長井宏平，大胡賢一，前川宏一：非均質流動体の力学相互作用に着目した閉塞作用の基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1411-1416，2009
- 8) 中村孝則，深谷泰文：膨張材によるセメント硬化体の膨張変形，セメント技術年報，26，pp.158-160，1972
- 9) 古谷明寿，細田暁，岸利治：膨張コンクリートの曲げ部材におけるひび割れ抵抗性に対する多軸拘束の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.589-594，2001