

## 論文 断面修復材の寸法安定性に関する解析的検討

藤村 敏之<sup>\*1</sup>, 国枝 稔<sup>\*2</sup>, 中村 光<sup>\*3</sup>, 李 相勲<sup>\*4</sup>

要旨：断面修復材の収縮ひび割れは，収縮量や断面修復材の材料特性，境界条件等の複数の要因が複雑に絡み合っ発生するため，その発生メカニズムは定量的に解明されていない。本研究では，断面修復材に生じるひずみ（膨張，収縮）とヤング係数の発現の違いが断面修復材のひび割れ性状に及ぼす影響についてRBSMを用いて解析的に検討した。本研究の範囲内では，最終的な収縮ひずみの絶対値が大きいほうがひび割れ本数が増大し，その幅も大きい傾向にあるが，ヤング係数の発現の仕方によっては，膨張材により収縮補償されている場合においても，ひび割れが発生する可能性もあることを明らかにした。

キーワード：断面修復材，寸法安定性，収縮特性，ひび割れ性状，RBSM

## 1. はじめに

断面修復材の収縮に起因するひび割れは，補修されたコンクリート構造物の美観・景観を損なうばかりではなく，有害物質の構造物内部への進入経路となる。断面修復材の収縮ひび割れは，収縮が拘束された場合に発生するが，収縮量や断面修復材の材料特性，境界条件等の複数の要因が複雑に絡み合っ発生し，その発生メカニズムの定量的解明が困難であるのが現状である。

一般に収縮ひび割れを低減させる方法の一つとして膨張材が使用されている。初期材齢で膨張ひずみを与え，最終的な収縮ひずみを低減させるメカニズムを利用したものである。日本材料学会補修用樹脂小委員会において，セメント系，ポリマーセメント系を対象に10種類の断面修復材の寸法安定性に関する共通試験が行われた<sup>1)</sup>。土木学会によって規格化された「コンクリート構造物用断面修復材の試験方法(案)JSCE-K561-2003」により，断面修復材の内部に埋め込み型ひずみ計を設置して測定されたひずみから寸法安定性を評価する共通試験である。結果は，

膨張材の効果により打設直後から膨張ひずみが生じ，半日から一日程度で膨張ひずみがピークに達した後，緩やかに収縮ひずみが生じており，近年開発されている断面修復材の多くはこのような収縮特性を呈すものが多い。

断面修復材の収縮ひび割れを対象とした解析事例に関しては，Martinola<sup>2)</sup>，国枝<sup>3)</sup>やBolander<sup>4)</sup>などにより行われている。しかし，乾燥の程度の違いや母材コンクリートとの付着の違いなどを考慮した解析は行われているが，断面修復材が有する膨張特性などに着目した解析は行われていない。

本研究では，断面修復材に生じるひずみ（膨張，収縮）とヤング係数の発現の違いが断面修復材のひび割れ性状に及ぼす影響について解析的に検討した。

## 2. 解析概要

## 2.1 解析方法

解析は川井により開発された2次元剛体ばねモデル(RBSM)を改良したモデル<sup>5)</sup>を使用した。RBSMは要素を剛体と仮定し，図-1に示すよ

\*1 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻助教授 博士(工) (正会員)

\*3 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)

\*4 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻助手 博士(工) (正会員)

うにある各節点に囲まれた母点1つに水平変位，鉛直変位と回転変位の3自由度を設け，各要素境界辺上に垂直ばね，せん断ばね，回転ばねを配置する。隣接する要素間の相対変位を利用して，この相対変位とばねに蓄えられる表面力から得られる仕事を評価し，剛性方程式を解き，対象材料の構成則に従って非線形解析を行う解析手法である。なお，要素分割には，ランダムに配置された母点をもとに計算幾何学から由来するポロノイ分割を用いて要素依存性を低減させた。

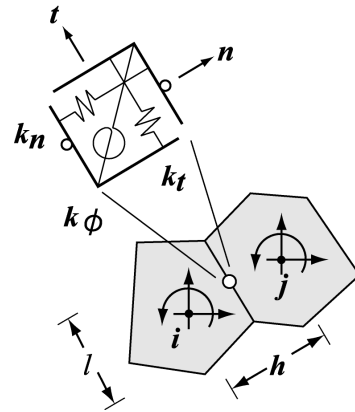


図 - 1 RBSM における要素

垂直ばねの構成モデルは，圧縮側は一般的な非線形応力 - ひずみ挙動とし，引張側は，引張強度に達するまで，応力 - ひずみ関係を直線とし，それ以降は図 - 2 に示すような1/4モデルの引張軟化曲線（引張応力とひび割れ幅関係）に対応する応力 - ひずみ関係を使用した。ひび割れは，垂直ばねの応力が引張強度に達した時点で生じるものとし，ひび割れ幅は垂直ばねに生じるひずみから要素に生じた弾性ひずみを差し引いたものに要素間長さ $h$ をかけたものとした。

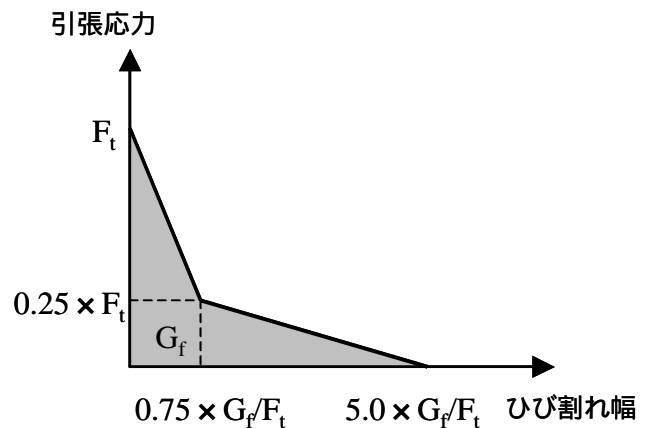


図 - 2 引張軟化曲線 (1/4 モデル)

せん断ばねの構成モデルは，コンクリートのせん断伝達機構のモデルを参考として，図 - 3 に示すようなMohr-Coulomb型破壊基準を用いた。コンクリートの破壊基準に用いられている値<sup>6)</sup>を参考に， $c=0.14f_c$ ， $\phi=37^\circ$ を設定した。降伏後は塑性流れ則に従い破壊面上を移動するものとした。

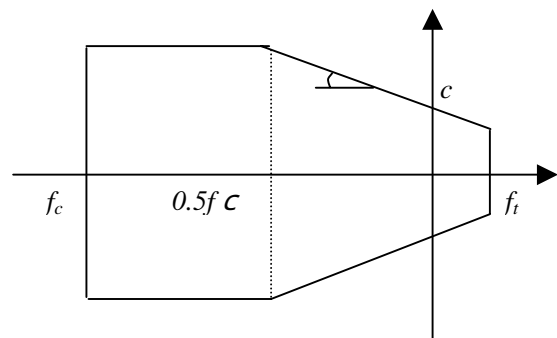


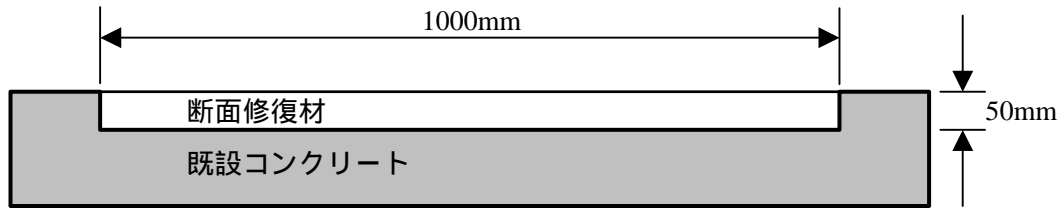
図 - 3 Mohr-Coulomb 型破壊基準

解析対象となる供試体は，厚さ 50 mm，長さ 1000mm の断面欠陥に断面修復する場合を想定し，図 - 4 に示すように既設コンクリートと断面修復材の境界面を完全付着・完全拘束と仮定し，断面修復材のみをモデル化した。なお，分割要素数は 2000 とし，境界条件は供試体の側面と底面の母点の水平，鉛直，回転の 3 自由度をすべて固定した。

## 2.2 解析に用いた断面修復材の特性

断面修復材の材料特性について，圧縮強度は 20.0MPa，引張強度は2.0MPa，引張破壊エネルギー $G_f$ は80.0 N/mとした。図 - 5 に示すように

本解析ではヤング係数の発現の程度が断面修復材のひび割れ性状に及ぼす影響について検討するため，ヤング係数が20GPaの一定の場合（ヤング係数1と呼ぶ）と材齢に従い増加していく2種類（早期に発現するヤング係数2と緩やかに発現するヤング係数3を仮定）の計3種類について検



(a) 想定した断面修復部とその寸法



(b) 断面修復部のみを対象とした要素分割図

図 - 4 解析対象

討した。なお、ヤング係数2, 3については, 土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] による算定式を参考に仮定した。なお, 断面修復材におけるクリープ特性については現状では不明な点も多いため考慮しないものとした。

断面修復材に与えるひずみ(膨張, 収縮)については, 日本材料学会補修用樹脂小委員会にて実施された共通試験の結果<sup>1)</sup>ならびに, コンクリート標準示方書[構造性能照査編]にて提案されている乾燥収縮ひずみの式を参考に図 - 6 に示す5種類のひずみ性状を仮定した。5種類のうち3種類が膨張ひずみを生じた後収縮するというモデルである。なお, これらの中で, 収縮5を除いて, 28日までに生じる収縮ひずみの絶対値(膨張ひずみの最大値と収縮ひずみの最大値のそれぞれの絶対値の和)を500 $\mu$ の一定とし, 膨張の有無に関わらず材齢28日での収縮ひずみを0 $\mu$ , 150 $\mu$ , 300 $\mu$ , 500 $\mu$ とした。なお, 膨張ありの場合はいずれも半日で膨張ひずみが最大になるものとし, かつ膨張ひずみがピークに至るまでは線形と仮定した。本研究で実施した解析ケースの一覧を表 - 1 にまとめる。

文献1に示される共通試験の手順によると, 計測されたひずみは, 乾燥収縮や自己収縮などをすべて含んだひずみの値であるが, 供試体の脱型後, 封緘を行うことから乾燥収縮ひずみが含まれる割合は小さいと考え, 断面修復材に生じるひずみの入力に関しては, 各時間(解析ステ

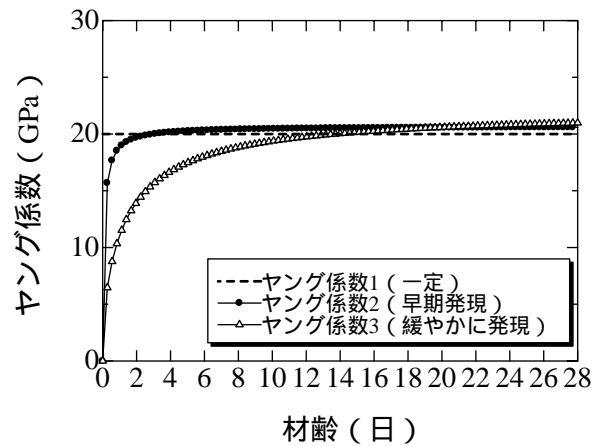


図 - 5 仮定したヤング係数モデル

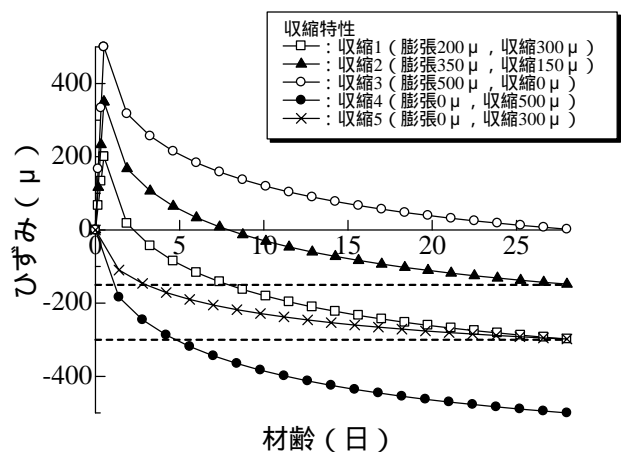


図 - 6 仮定した収縮モデル

ップ)において初期ひずみ問題として解き, 境界が拘束されることによって生じる増分応力から力のつり合いをとることとした。

表 - 1 解析ケース一覧

解析ケース	ヤング係数	収縮特性
1	一定=20GPa (図 - 5 中のヤング係数 1)	膨張 200 $\mu$ , 収縮 300 $\mu$ (図 - 6 の収縮 1)
2		膨張 350 $\mu$ , 収縮 150 $\mu$ (図 - 6 の収縮 2)
3		膨張 500 $\mu$ , 収縮 0 $\mu$ (図 - 6 の収縮 3)
4		膨張 0 $\mu$ , 収縮 500 $\mu$ (図 - 6 の収縮 4)
5		膨張 0 $\mu$ , 収縮 300 $\mu$ (図 - 6 の収縮 5)
6	早期発現 (図 - 5 中のヤング係数 2)	膨張 200 $\mu$ , 収縮 300 $\mu$ (図 - 6 の収縮 1)
7		膨張 350 $\mu$ , 収縮 150 $\mu$ (図 - 6 の収縮 2)
8		膨張 500 $\mu$ , 収縮 0 $\mu$ (図 - 6 の収縮 3)
9		膨張 0 $\mu$ , 収縮 500 $\mu$ (図 - 6 の収縮 4)
10		膨張 0 $\mu$ , 収縮 300 $\mu$ (図 - 6 の収縮 5)
11	緩やかに発現 (図 - 5 中のヤング係数 3)	膨張 200 $\mu$ , 収縮 300 $\mu$ (図 - 6 の収縮 1)
12		膨張 350 $\mu$ , 収縮 150 $\mu$ (図 - 6 の収縮 2)
13		膨張 500 $\mu$ , 収縮 0 $\mu$ (図 - 6 の収縮 3)
14		膨張 0 $\mu$ , 収縮 500 $\mu$ (図 - 6 の収縮 4)
15		膨張 0 $\mu$ , 収縮 300 $\mu$ (図 - 6 の収縮 5)

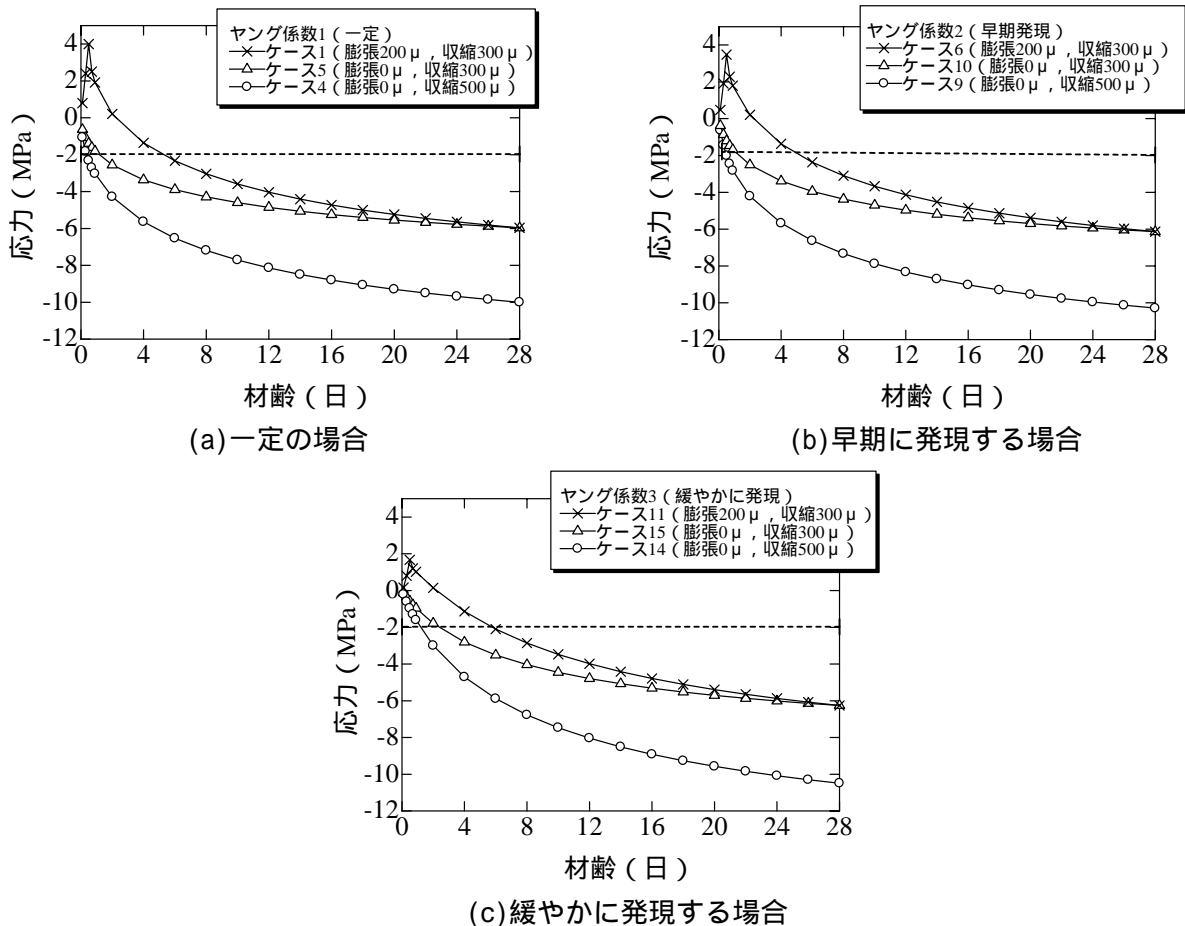


図 - 7 ヤング係数の異なる場合に発生する引張応力

### 3. 解析結果

#### 3.1 断面修復材内部の応力

断面修復材を弾性体と仮定し、ひずみの値に

ヤング係数を乗じて求めた応力の経時変化(材齢 28 日まで)を図 - 7 に示す。なお、参考までに今回の解析で想定している断面修復材の引張

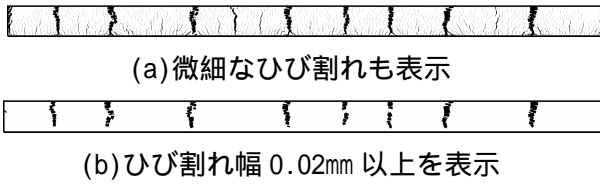


図 - 8 ひび割れの表示方法 ( ケース 4 )

強度 ( 2.0M Pa ) を破線にて併記する。クリープ特性などが考慮されていないこともあるが、いずれのケースにおいても比較的若材齢にて引張強度に達していることが分かる。図 - 7 より、ヤング係数が一定の場合あるいは早期に発現する場合には、緩やかに発現する場合に比べて、初期膨張によって生じる圧縮応力が大きいことが分かる。さらに、膨張  $0\mu$ 、収縮  $300\mu$  の場合と膨張  $200\mu$ 、収縮  $300\mu$  の場合の応力の差は、ヤング係数が緩やかに発現する場合 ( ケース 14 と 11 の差 ) のほうが、ヤング係数が一定の場合 ( ケース 4 と 1 の差 ) や早期に発現する場合 ( ケース 9 と 6 の差 ) のそれらと比較して、特に若材齢にて小さくなっており、ひび割れ発生以前の範囲における結果ではあるが、ヤング係数の発現が緩やかな場合には、膨張による収縮補償の効果が小さくなることを示している。

### 3.2 断面修復材のひび割れ性状

図 - 8 ~ 11 に、各ケースのうち材齢 28 日でのひび割れ図を示す。なお、図 - 8 に示すように、解析では極めて微細なひび割れも生じていることから、ここでは表示の目安として 0.02mm 以上のひび割れ幅に相当する結果のみを示すこととした。さらに、材齢 28 日における最大ひび割れ幅の範囲を表 - 2 に示す。

収縮特性の違いがひび割れ性状に及ぼす影響に関しては、材齢 28 日での収縮ひずみの絶対値が大きいほど、ひび割れの本数および各ひび割れの幅が大きい結果となった。なお、図では示していないが、ケース 3、8、13 ( 材齢 28 日での収縮ひずみが 0 ) ではひび割れは発生していない。さらに、図 - 10(a) と図 - 11(a)、図 - 10(b) と図 - 11(b) では、ほぼ同程度のひび割れ性状となつて

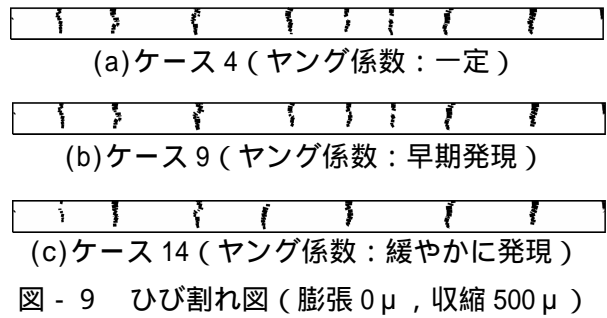


図 - 9 ひび割れ図 ( 膨張  $0\mu$  , 収縮  $500\mu$  )

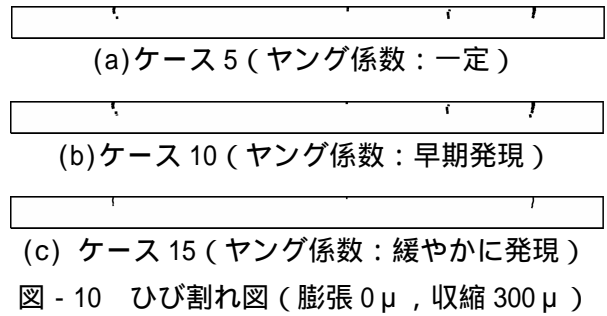


図 - 10 ひび割れ図 ( 膨張  $0\mu$  , 収縮  $300\mu$  )

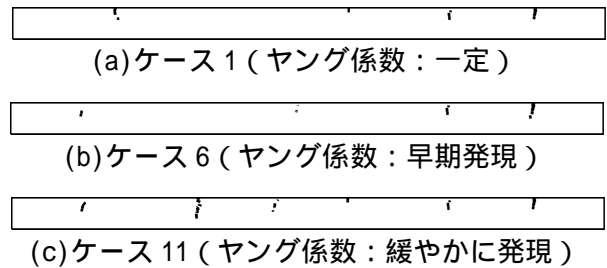


図 - 11 ひび割れ図 ( 膨張  $200\mu$  , 収縮  $300\mu$  )

表 - 2 最大ひび割れ幅の範囲

解析ケース	最大ひび割れ幅の範囲 ( mm )
1	0.02 ~ 0.03
2	0.01 以下
3	0
4	0.05 以上
5	0.02 ~ 0.03
6	0.01 ~ 0.02
7	0.01 以下
8	0
9	0.05 以上
10	0.02 ~ 0.03
11	0.03 ~ 0.04
12	0.01 以下
13	0
14	0.05 以上
15	0.03 ~ 0.04

いる。これは、弾性係数がほぼ一定の場合には最終的な収縮ひずみ量がひび割れ性状に大きく影響を及ぼすことを示している。すなわち、膨張ひずみによって生じた圧縮応力はその後の収縮によってキャンセルされることを示している。

ヤング係数の違いがひび割れ性状に及ぼす影響に関しては、膨張を生じないケースの中では、ヤング係数が緩やかに発現する場合(ケース 14, 15) にひび割れの発生本数が少なく、また各ひび割れの幅もやや小さい。一方、膨張を生じるケースの中では、緩やかにヤング係数が発現した場合(ケース 11)の方が、その他のヤング係数を用いた場合(ケース 1, 6) に比べてひび割れ本数がやや多く、また各ひび割れの幅が大きい傾向にあった。特にヤング係数が緩やかに発現する場合、ケース 11(膨張 200 $\mu$ , 収縮 300 $\mu$ )にみられるように、初期の膨張ひずみによって生じる応力が小さく、ヤング係数が発現した頃から収縮ひずみに転じるため、引張応力の発生に寄与する収縮ひずみが大きく評価されていることよると考えられる。一方、ケース 5(膨張 0 $\mu$ , 収縮 300 $\mu$ )では、ケース 11 と材齢 28 日における収縮ひずみの値は同じであるが、初期の収縮ひずみにより生じる引張応力が小さくなったことがひび割れ性状に影響を与えたものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 膨張を生じないケースの中では、ヤング係数が緩やかに発現する場合においてひび割れの発生本数が少なく、また各ひび割れの幅もやや小さい。また、弾性係数がほぼ一定の場合には最終的な収縮ひずみ量がひび割れ性状に大きく影響を及ぼすことが分かった。
- (2) 膨張を生じるケースの中では、緩やかにヤング係数が発現した場合の方が、その他のヤング係数を用いた場合に比べてひび割れ本数がやや多く、また各ひび割れの幅が大きい傾

向にあった。これは、ヤング係数が緩やかに発現する場合、初期の膨張ひずみによって生じる応力が小さく、ヤング係数が発現した頃から収縮ひずみに転じるため、引張応力の発生に寄与する収縮ひずみが大きく評価されていることによるものと考えられる。

なお、これらの検討には、引張強度の経時変化、クリープ特性、外的環境(温度、湿度など)、寸法などの影響が十分に考慮されていない為、引き続き検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 国枝稔, 江口和雄, 宮川豊章, 小柳治: 断面修復材の寸法安定性ならびに線膨張率の試験方法に関する共通試験, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.4, 2004
- 2) Martinola, G. and Wittmann, F. H.: Application of Fracture Mechanics to Optimize Repair Mortar Systems, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc. of FRAMCOS-3, AEDIFICATIO Publishers, pp.1481-1492, 1995
- 3) 国枝稔, 栗原哲彦, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: 引張軟化曲線による断面修復材の付着特性の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.407-412, 1998
- 4) Bolander, J.E. and Berton, S.: Simulation of Shrinkage Induced Cracking in Cement Composite Overlays, Cement & Concrete Composites, Vol. 26, pp.861-871, 2004
- 5) 野城良祐, 石川靖晃, 中村光, 田邊忠顕: 物質移動を考慮した RBSM によるひび割れ進展解析手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.467-472, 2003
- 6) 斉藤成彦, 彦坂熙: バネ系モデルを用いた鉄筋コンクリート構造物の破壊挙動の数値解析, 土木学会論文集, No.627/ V-44, pp. 289-303, 1999