

ASRによるケミカルプレストレスを受けたRC床版の変形・応力状態

長岡技術科学大学 大学院 工学研究科 建設工学専攻 ○仲澤 拓巳
長岡技術科学大学 正会員 博(工) 田中 泰司

Abstract : Expansion of the reactive aggregate due to alkali-silica reaction (ASR) induces chemical prestress in reinforced concrete (RC) members. Because initial stress state strongly influences on the structural performance of concrete members, it is necessary to evaluate the internal stress state of ASR suffered concrete members. In this paper, RC slabs were casted with reactive aggregate and accelerated test were conducted with them. The deformation due to ASR expansion was measured periodically. The deformation of ASR suffered RC slab was evaluated with numerical models which were proposed by Muranaka and Tsuji. As a result, it was verified that both models can predict the deformation of ASR suffered members. However, the resultant internal stress state was different between models.

Key words : Alkali-silica reaction , Chemical prestress , Reinforced concrete slab

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート（以下、RC）床版においてアルカリシリカ反応（以下、ASR）を伴う劣化損傷事例が報告¹⁾されており、その損傷メカニズムの解明に向けた研究が行われている²⁾。RC部材においてASRにより反応性骨材の膨張が発生すると、コンクリートの膨張を鉄筋が拘束するため、コンクリートにはケミカルプレストレスが導入される³⁾。初期応力状態は部材性能に大きな影響を与えるため⁴⁾、ASR劣化の生じたRC、PC部材の構造性能を評価するためには、ASR膨張によって導入される変形や内部応力状態を適切に把握する必要がある。そこで本研究では、ASRを意図的に発生・促進させたRC床版を作製し、ASR膨張による部材の変形状態を確認した。また、辻らや村中らが提案するASR膨張予測モデルにより、ASRによるRC床版の膨張挙動の予測を行い、その予測精度について実測値との比較から検討を行った。

2. 実験概要

反応性骨材を含有したコンクリートを用いて一軸拘束試験体とRC床版試験体を作製し、変形量の測定を行った。

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)					Na ₂ O _{eq} (kg/m ³)
			W	C	S	G	ad1	
25	55	41.0	170	309	738	1095	0.77	18

2.1 使用材料とコンクリート配合

各試験体に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。水セメント比は55%とし、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には非反応性骨材（信濃川産、表乾密度2.64g/cm³）を、粗骨材には反応性骨材（姫川産、表乾密度2.58g/cm³）を用いた。粗骨材の化学法（JIS A 1145）の試験結果は、アルカリ濃度減少量Rsが300mmol/l、溶解シリカ量Scが350mmol/lであり、無害でないと判定された。一方、モルタルバー法（JIS A 1146）による材齢6か月時点での膨張量は520μであり、無害と判定されたものの、アルカリ量をセメント重量の1.5%Na₂O_{eq}とした場合（JISの規定値は1.2%）には、膨張量は3300μとなり、高い反応性を示した。また、岩石薄片の偏光顕微鏡観察の結果、反応性鉱物として多量のクリストバライトとトリディマイト、少量のオパール、ガラスを含有していることが確認された。表-1に示すように、ASR反応を促進させるため、コンクリートには塩化ナトリウムをNa₂O_{eq}で

18kg/m³添加した。コンクリート打設後28日間以上封緘養生を行い、十分に硬化反応を進めたのちに、デンマーク法により膨張反応を促進させた。膨張促進は、大型水槽内の50℃飽和塩化ナトリウム水溶液に試験体を重ねて浸漬することにより行った。なお、膨張促進は最大で346日行ったが、塩分浸漬による鋼材の腐食は軽微であることを、研り調査により確認した。

2.2 膨張量測定用一軸拘束試験体

鋼材による拘束が、ASR膨張に及ぼす影響を確認するために、図-1に示すような一軸拘束試験体を作製し、膨張量の経時変化を測定した。膨張量測定は、試験体の側面の2か所に埋め込んだアングルの距離をノギスで測定することで行った。試験体の鋼材比は、3.4%、0.34%、0.85%の3水準とし、比較用として自由膨張試験体も作製した。アングルの距離はそれぞれ、160mm、220mm、280mm、360mmである。図-2に、一軸拘束試験体の膨張量測定結果を示す。事前実験により、封緘養生中はおおむね長さ変化が生じないことを確認していたため、ここでは促進養生開始時からの長さ変化を示した。塩分浸漬による促進養生開始後、約3か月間で膨張反応が急速に進行し、その後は時間の経過とともに膨張量が漸増する結果となった。促進養生225日時点での自由膨張量は約6500 μ であったのに対し、拘束試験体の膨張量は2000~3000 μ であり、既往の研究結果と同様に鋼材拘束によって膨張量は大幅に小さくなる結果となった。ただし、既往の実験結果と異なり、膨張量の測定結果は拘束量によらず同様の値となった。この原因としては、ノギスの計測精度に対して基長が短かったことにより、測定誤差が大きくなったことが挙げられる。

2.3 RC床版試験体

鉄筋コンクリート部材でのASR膨張挙動の検討を目的として、本研究ではRC床版試験体を作製し、膨張量の経時変化を測定した。配筋図を図-3に示す。試験体の寸法は1200mm×900mm×150mmである。長軸主鉄筋方向には上

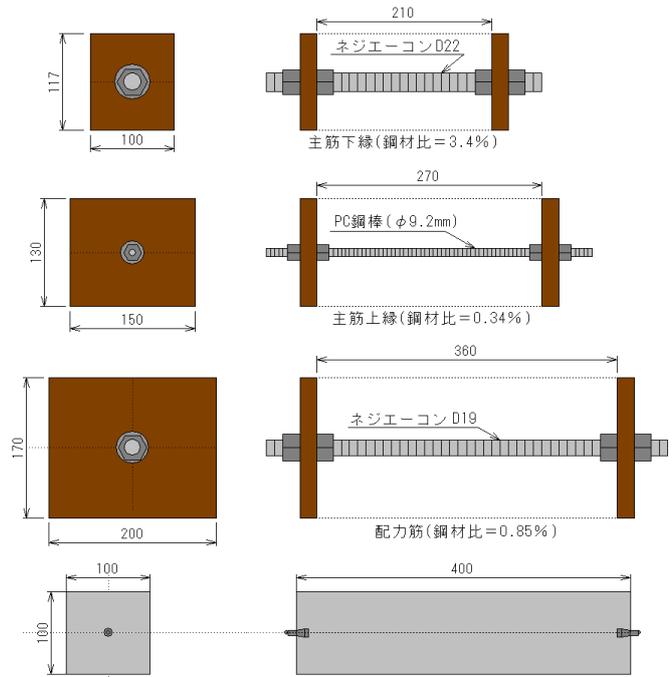


図-1 膨張量測定用一軸拘束試験体

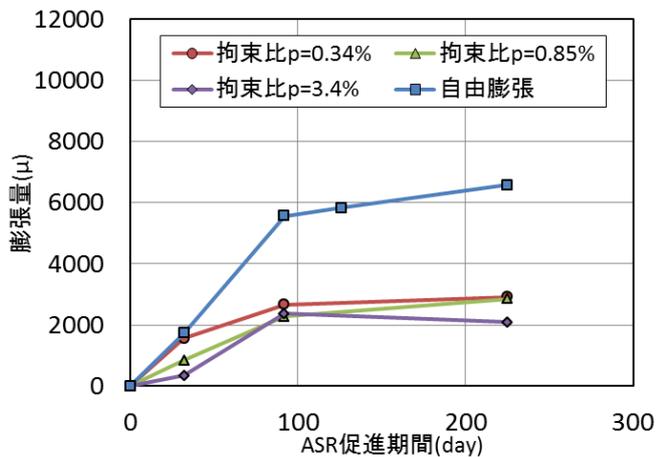


図-2 一軸拘束試験体の膨張量測定結果

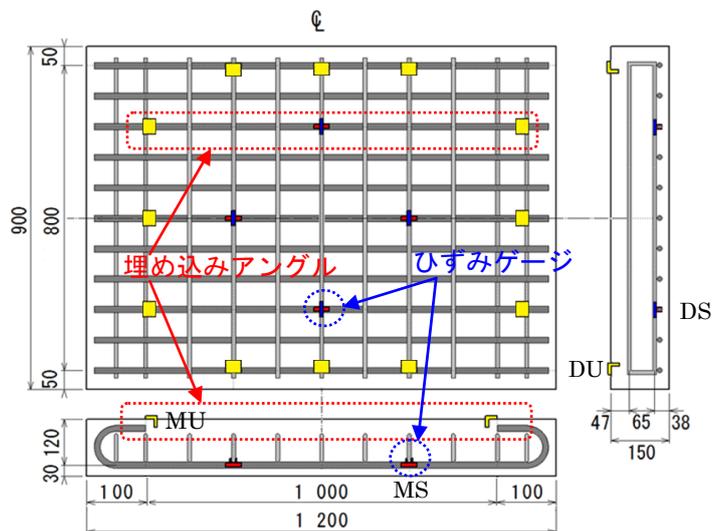


図-3 RC床版試験体・膨張量測定位置

縁から120mmの位置にD16の鉄筋を80mm間隔で配置した。短軸配力筋方向は、上縁から47mm, 112mmの位置にD10の鉄筋を112.5mm間隔で配置した。コンクリート断面に対する鋼材断面の割合は主鉄筋方向で1.62%, 配力筋方向で0.87%である。試験体は、計3体作製した。

ASRの進行により発生する床版の膨張量測定は表-2に示す位置・方向において測定した。床版上面における膨張量測定は、試験体表面に埋め込んだステンレス製アングルをノギスで測定することで行い、鉄筋位置における膨張量は鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより行った(膨張量測定位置の詳細は図-3を参照)。反り量については、各鉄筋方向で試験体中央の両縁に跨るようにスチール定規を垂直に立てた後、ノギスを中心部に立て、デプスパーにより試験体縁部と中心部の高低差を測定した。

RC床版試験体における膨張量の経時変化を図-4に示す。3体の試験体は同様のものであり、図中に示す膨張量測定位置の記号は表-2のとおりである。膨張量測定結果は、アングルは各3ヶ所、ひずみゲージは各4点での平均値である。封緘養生中は長さ変化はほとんど生じず、デンマーク法によるASR促進を開始した材齢44日から膨張が発生した。3体の試験体でいずれもほぼ同様の膨張量となっていたことから、計測精度が確保されていたと判断できる。主鉄筋方向については、床版の上面では、自由膨張ひずみよりも大きな10000 μ 程度のひずみが生じていた。一方、鉄筋位置では膨張ひずみが1000 μ 以下であり、断面内で膨張ひずみに大きな勾配が生じていた。その結果、床版全体には上反りする変形が生じていた。反り量は主鉄筋方向で10~13mm, 配力筋方向で0~2mmであった。

RC床版試験体に生じたひび割れのスケッチを図-5に示す。床版上面においては細かい亀甲状のひび割れが発生し、下面においては主鉄筋に沿うようにひび割れが発生していることがわかる。上面に生じたひび割れの幅はおおよそ0.02mm~2.0mmであったのに対し、下面に発生したひび割れの幅は0.01mm~0.8mmであった。これらの表面に見えるひび割れは、その深さが概ね10mm以内であった。RC床版試験体に生じたひび割れ幅・深さを考慮すると、平面保持の仮定による応力分布は圧縮側の分布が大きくなることから、大きなひずみの大部分は、多数のマイクロクラックの発生によって生じているようであり、曲げひび割れのような巨視的なひび割れは発生しなかったと考えられる。

表-2 膨張量測定位置

	主鉄筋方向	配力筋方向
床版上面(埋め込みアングル)	MU	DU
鉄筋位置(ひずみゲージ)	MS	DS

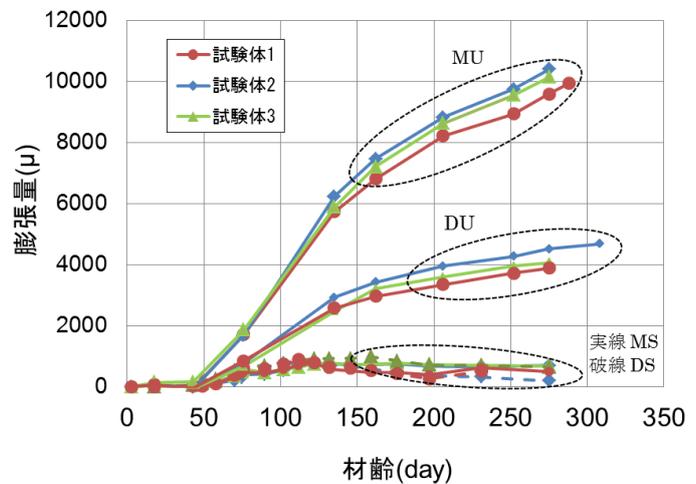


図-4 RC床版試験体の膨張量測定結果

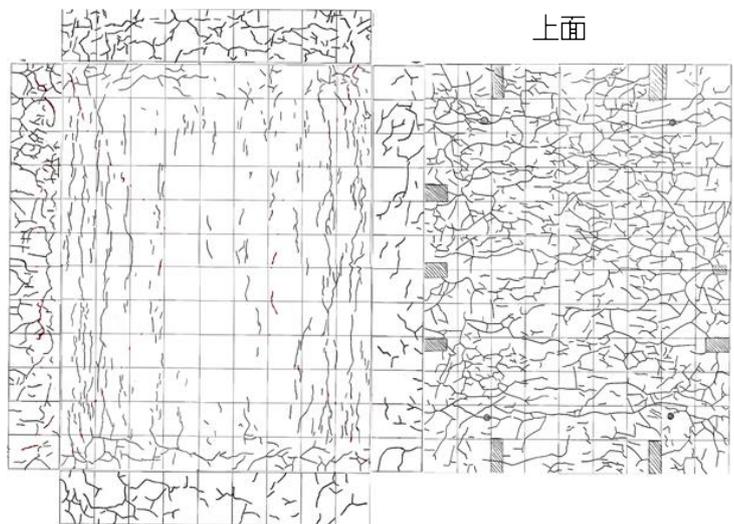


図-5 RC床版試験体のひび割れ状況

3. 仕事量一定則によるASR膨張挙動予測

3.1 仕事量一定則による膨張ひずみ分布の推定方法

辻ら⁵⁾は、膨張コンクリートの膨張挙動を予測する方法として、仕事量一定則を提案している。一方、ASRによるコンクリートの膨張挙動は、膨張コンクリートと同様であり、仕事量一定則が準用できることが確認されている⁶⁾。そこで本研究においても、仕事量一定則から床版部材の膨張分布の推定を行い、実験結果との比較を行うこととした。仕事量一定則を式(1)に示す。この式は、拘束鋼材比 p_0 と一軸拘束試験体の膨張量 ε_s の関係を、単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量 U を介して表したものである。仕事量 U はコンクリートの配合および養生方法が同一であれば、鉄筋量によらず一定値をとるとされる。鉄筋の配置が不均一の場合、断面のひずみ分布は、上記の仕事量一定則と平面保持仮定を用いて、力とモーメントの釣合い式を解くことによって求めることができる。

$$U = \frac{1}{2} \cdot \sigma_c \cdot \varepsilon_s = \frac{1}{2} \cdot p_0 \cdot E_s \cdot \varepsilon_s^2 \quad (1)$$

ここに、 σ_c : 膨張コンクリートのケミカルプレストレス、 E_s : 拘束鋼材の弾性係数、 ε_s : 膨張量、 p_0 : 拘束鋼材比である。

3.2 計算結果

図-6に、鋼材比の異なる一軸拘束試験体(図-1参照)で測定された膨張量測定結果より導いた仕事量による断面ひずみ分布の計算値と実験値との比較を示す。実験値はほぼ同等の結果であったため、ここでは試験体2の結果のみを示す。一軸拘束試験体の膨張量測定には精度に問題があるため、試験体によって推定されるひずみ分布は異なっているが、おおむね床版試験体のひずみ分布の実測値と整合する結果となった。

図-7に仕事量一定則より算出された断面応力分布を示す。鋼材が配置されている下側で圧縮度が大きく、鋼材から離れた上側でも数N/mm²程度の圧縮応力が導入されていると推定された。

4. 村中らのモデルによるASR膨張挙動

4.1 計算方法の概要

村中らによって提案されたモデル⁷⁾では、まず、反応速度論に基づきASRゲルの化学量 T_{pr} を求める。次に、式(2)により膨張に寄与するゲル量($T_{pr} - T_{er} - V_g$)から膨張量に変換することで膨張量を求める。

$$\varepsilon = \alpha \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\beta \cdot (T_{pr} - T_{er} - V_g) \right] \right\} \quad (2)$$

ここに、 ε : 膨張量 (%)、 T_{pr} : 反応生成物総量 (mol/l-concrete)、 T_{er} : 吸収領域の容量 (mol/l-concrete) であり、 T_{er} は圧力0でゲルが侵入する量のことである。本研究では $T_{pr} = 0.256$ (mol/l-concrete)、 $T_{er} = 0.017$ (mol/l-concrete)とした。 α 、 β : 骨材や使用材料に依存する係数である。これは、一軸拘束試験体の自由膨張量より α 、 β を回帰したもので、本研究では $\alpha = 1$ 、 $\beta = 7$ とした。

村中らのモデルでは、外部拘束がある場合、生成したASRゲルの一部は細孔に圧入され、膨張に寄与

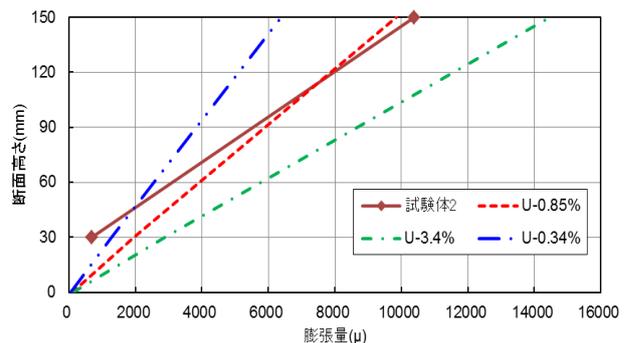


図-6 仕事量一定則による膨張挙動予測

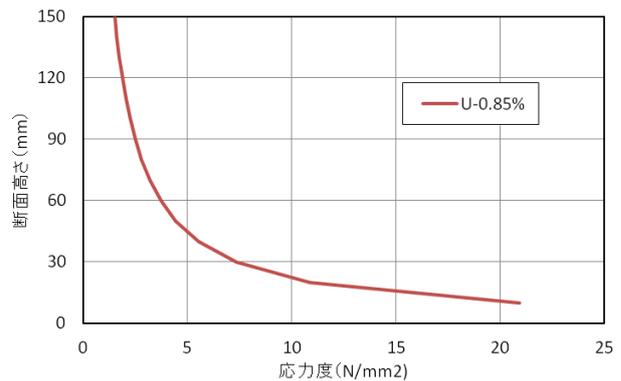


図-7 仕事量一定則による断面内応力分布

しないと考える点に特徴がある。圧入されるゲルの量 V_g は式(3)により計算される。

$$V_g = V_0 - V_l = V_0 - V_0 \cdot [1 - \exp(-B \cdot r_g^c)] \quad (3)$$

ここに、 V_0 ：総細孔容積 ($\text{m}^3/\text{m}^3\text{-concrete}$)、 V_l ：ASRゲルで満たされない細孔容積 ($\text{m}^3/\text{m}^3\text{-concrete}$)、 B 、 c ：細孔容積密度関数を表す定数、 r_g ：ASRゲルが浸入できる細孔の最小半径であり、拘束応力を用いて式(4)により求められる⁸⁾。

$$r_g = \frac{2 \cdot \tau_0 \cdot l_{\max}}{\Delta\sigma} \quad (4)$$

ここに、 $\Delta\sigma$ ：拘束コンクリートと無拘束コンクリートの応力差分 (N/mm^2)、 τ_0 ：細孔の壁面せん断応力 (=ASRゲルの降伏値)、 l_{\max} ：細孔の最大長さであり、本研究では $\tau_0 = 1 \times 10^{-6}$ (N/mm^2)、 $l_{\max} = 0.0024$ (m) とした。

このようにして求められる膨張ひずみと拘束応力の関係と平面ひずみ仮定を用いて、力とモーメントの釣り合い式から断面内の膨張ひずみ分布を算出することができる。

4.2 計算結果

村中らのモデルから求められた膨張量分布を図-8に示す。村中らのモデルから計算される膨張量分布は、図-6に示す辻らのモデルによる膨張量分布とはほぼ一致し、実験値と同様の結果となった。ただし、試験体下縁に近づくにつれて実験値と計算値が若干乖離していくが、この理由としては、鉄筋の引張ひずみの測定精度や鉄筋とコンクリートのすべりの影響などが考えられる。

村中らのモデルにより得られる断面内の応力度分布を図-9に示す。応力度分布を計算する際には、コンクリートの圧縮強度および引張強度を超える応力は作用しないと考え、圧縮強度・引張強度を応力度の制限値とした。引張強度は、コンクリート標準示方書の式⁹⁾よりコンクリートの圧縮強度から求めた。ASRコンクリートでは、多数の微細ひび割れが存在するため、軟化挙動は緩慢であると考えられるので、引張・圧縮ともに応力ひずみ曲線には弾塑性モデルを用いた。村中らのモデルの場合、下部では高い圧縮応力が生じている点は辻らのモデルと同様であるが、上部では引張応力が生じる点が、仕事量一定則により部材に引張力が作用する場合を表現できない辻らのモデルとは異なる。実際の試験体上面には図-5に示したように深さが概ね10mm以内の微細なひび割れが主鉄筋直交方向に多数発生していたが、村中らのモデルによる計算結果はこのひび割れ性状とは相違しない。辻らのモデルも、村中らのモデルも実際の変形状態をある程度予測できるものの、内部応力分布の妥当性については、今後も検討が必要である。

4.3 反り量の計算

図-8の膨張量分布から式(5)により計算される曲率を用いて、曲率とたわみの関係式である式(6)に代入することで床板の反り量を計算した。

$$\phi = (\varepsilon_u - \varepsilon_s) / d \quad (5)$$

ここに、 ϕ ：曲率、 ε_u ：上縁の膨張ひずみ、 ε_s ：鉄筋位置における膨張ひずみ、 d ：有効高さ(mm)である。

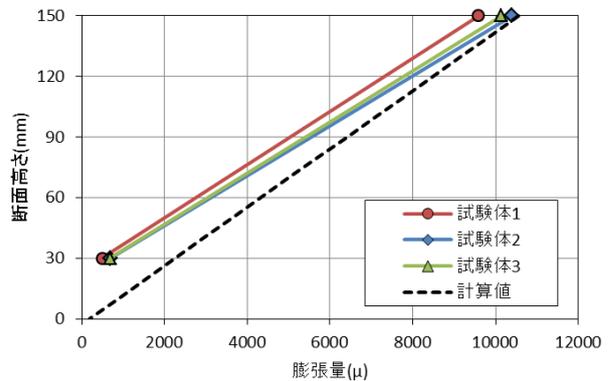


図-8 村中らのモデルによる膨張挙動予測

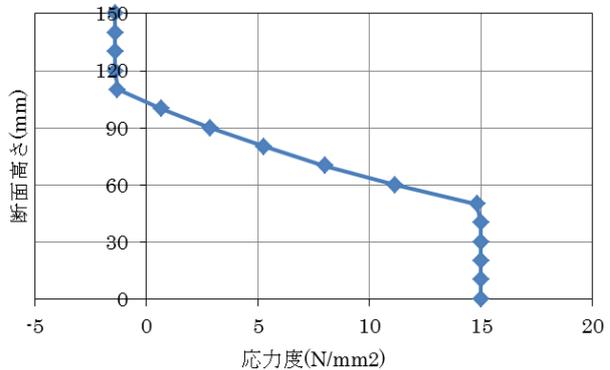


図-9 断面内の推定応力度分布

$$-\frac{d^2v}{dx^2} = \phi \quad (6)$$

ここに、 v : 反り量(mm), x : 床版試験体端部からの距離(mm)である。

実測値と比較したグラフを図-10に示す。主鉄筋方向の反り量については概ね表現できていることがわかる。配力筋方向については、鉄筋配置が断面对称であるので、理論的には反りは発生しないが、実際の試験体においては、主鉄筋方向の反り変形に引っ張られる形で若干の反り量が発生している。

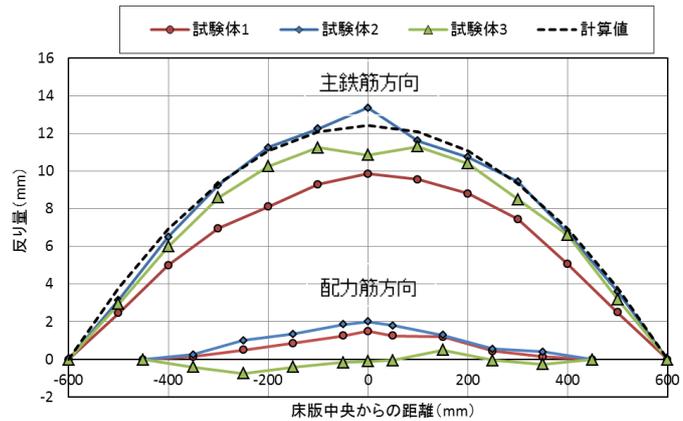


図-10 反り量の計算

5. 結論

既往のASR膨張挙動予測モデルである辻らのモデルと村中らのモデルを用いてASR膨張が生じた床板試験体の膨張量および内部応力の計算を行い、実験値との比較を行った。その結果、仕事量一定則を用いた辻らのモデルも、有効なASRゲルの量に着目した村中らのモデルも、床板試験体で測定された膨張量分布をおおむね評価できることが示された。また、計算されたひずみ分布から床板の反り変形量を計算したところ、実際の変形量とおおむね一致する結果となった。ただし、両モデルから得られる内部応力の分布には特に上面で大きな違いがあることから、推定される応力分布の妥当性については今後、検討が必要である。

謝辞

本論文の作成にあたり、長岡技術科学大学大学院修士修了生の小林孝元氏には、多大なる協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 大田孝二, 五島孝行, 柴田辰正: コンクリート研究室の開設と活動, 土木技術資料, 53-9, pp.62-65, 2011
- 2) 内田裕市, 斎藤保則, 六郷恵哲, 小柳治: アルカリ骨材反応により損傷を受けた RC スラブの性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp841-844, 1990.
- 3) 田附伸一, 津吉毅, 石橋忠良, 松田芳範, 今井勉: ASR により損傷した RC 部材の耐荷力に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63 No.1,166-177,2007.3
- 4) 田中泰司, 須藤卓哉: 鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷機構, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.889-897, 2013.3
- 5) 辻 幸和, 前山 光宏: 膨張コンクリートを用いた部材における膨張分布の推定方法, セメント技術年報 31, pp.231-233, 1977.12
- 6) 土木学会, アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, コンクリートライブラリー124, 2005.8
- 7) 村中 誠: 反応機構に立脚した ASR 膨張挙動に関する物理 - 化学モデルの構築, 長岡技術科学大学大学院修士論文, 2012.3
- 8) 下村 匠, 小沢 一雅, 前川 宏一: 細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 東京大学博士論文, 1993.3
- 9) 土木学会: 2012 年度制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3