

論文 セメント系材料の中性化・変形連成解析による変形挙動に関する研究

稲岡 利秀*1・大下 英吉*2

要旨：本研究では、中性化を引き起こす物質の拡散現象と中性化による中性化領域および非中性化領域の変形性状を統一的に解明することのできるモデルの確立を目的として、中性化・変形連成解析手法の構築を行った。その結果、応力性状に及ぼす炭酸化反応の影響は、非常に大きいことが明らかになった。

キーワード：中性化、物性変化、二酸化炭素

1. はじめに

近年、50年以上の耐久性があると考えられていたコンクリート構造物の早期劣化が社会的問題となっている。コンクリート構造物の早期劣化の要因には様々なものがあるが、その要因の一つに、コンクリートの炭酸化が挙げられる。

炭酸化とは、コンクリート内部の水酸化カルシウムと炭酸ガスが反応して、炭酸カルシウムを生成することによって、コンクリートのpHが8.5～10とほぼ中性を示す値となり、鉄筋腐食が起こり易くなる。鉄筋は腐食すると膨張するため、これによってコンクリートにひび割れが生じ、コンクリート構造物の耐久性、強度に大きな影響を与えるということが指摘されている。しかし、既存の実験室レベルでの研究では、炭酸化によって内部空隙組織が緻密化し、コンクリート自体の強度が増加するという報告も見られ、炭酸ガスを積極的に取り入れて、強度を上げようという研究も行われている。

また、炭酸化反応は収縮を伴うが、このメカニズムはPowersによって仮説が立てられている¹⁾が、未だ解明されておらず、不明な点が多い。しかし、貧配合の場合では、クラックが発生することもあり、これを無視することはできないと考えられる。

このような観点から諸外国では実用に供する前に炭酸ガス養生をし、炭酸化収縮が落ち着くのを待ってから設置を行うという試み²⁾が行われてお

り、炭酸化による変形の影響は少なくないと考えられる。即ち炭酸化による初期応力性状或いは変形性状はセメント系材料の耐久性を議論する上で非常に重要なものと考えられる。しかしながら、炭酸化によるコンクリートの変形を解析的に取り扱った事例はほとんどなく、コンクリートの炭酸化と変形を統一的に表現可能なモデルは皆無である。

本研究では、炭酸化に関する化学種を炭酸ガス、炭酸イオンに限定し、コンクリートの炭酸化と変形を統一的に表わすことのできるモデルの構築を行うことを目的とした。このことはすなわち、コンクリートの炭酸化と変形の連成モデルを意味しており、炭酸ガス濃度の変化、炭酸化反応によるコンクリートの空隙の変化、体積収縮、有効応力を包含するものである。

2. 炭酸化と変形連成モデルの構築

2. 1 変形特性に関する定式化

まず、コンクリートの有効応力増分は、次のように表わすことができる。

$$\frac{d\sigma'}{dt} = D_T \left(\frac{d\varepsilon^T}{dt} - \frac{d\varepsilon^{hyd}}{dt} \right) \quad (1)$$

ここで、 $d\sigma'$ は有効応力増分、 D_T は空隙を考慮したセメントペーストの弾性マトリックス、 $d\varepsilon^T$ は全ひずみ増分、 $d\varepsilon^{hyd}$ は中性化反応による体積収縮ひずみ増分を表す。

*1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*2 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

(1)式中の空隙を考慮したセメントペーストの弾性係数 D_T は、セメントペーストの固体相のみの弾性係数 D_s に炭酸化反応による空隙率の変化 $\xi_{(h)}$ を考慮した実質部分を乗ずることにより次式のように表わすことができる。

$$D_T = (1 - \xi_{(h)}) D_s \quad (2)$$

こうすることにより、炭酸化の進行とともに空隙部分が炭酸カルシウムにより埋められ空隙が減少することによる強度増進を表現可能である。

そして、炭酸化と変形との連成に関して重要なことは、炭酸化反応による体積収縮ひずみ増分 $d\varepsilon^{hyd}/dt$ をいかに表すかである。本研究では、次式に示すように体積収縮ひずみ増分 $d\varepsilon^{hyd}/dt$ を炭酸化反応率 h の関数として表すことにした。

$$\frac{d\varepsilon^{hyd}}{dt} = \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

ここで、中性化反応率 h は、炭酸ガス濃度 ϕ と時間 t の関数とすると、(3)式は次式のように表すことができる。

$$\frac{d\varepsilon^{hyd}}{dt} = \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \left(\frac{\partial h}{\partial \phi} \frac{d\phi}{dt} + \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (4)$$

最終的に、(4)式を(1)式に代入し、仮想仕事の原理を適用し、有限要素法によって離散化すると力の釣り合い式は次式のように表わすことができる。

$$k_T \frac{d\bar{u}}{dt} - L \frac{d\bar{\phi}}{dt} - \frac{df}{dt} = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\bar{u}$ 、 $\bar{\phi}$ は、それぞれ節点変位ベクトルおよび節点濃度であり、マトリックス K_T 、 L は、それぞれ剛性マトリックス、炭酸化反応による体積変化の影響に関するマトリックスであり、それぞれ次式のように定義される。

$$k_T = (1 - \xi_{(h)}) \int_{\Omega} B^T D_s B d\Omega$$

$$L = (1 - \xi_{(h)}) \int_{\Omega} B^T D_s \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \phi} d\Omega$$

$$df = (1 - \xi_{(h)}) \int_{\Omega} B^T D_s m \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \phi} d\Omega$$

2. 2 拡散（濃度保存則、Fick の第二則）に関する定式化

本解析では、炭酸ガスは次式に示す Fick の法則

に従って拡散するものと仮定した。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \text{div}(D_i \text{grad} \phi) + Ri \quad (6)$$

ここで、 ϕ は炭酸ガス濃度、 D_i はコンクリートにおける炭酸ガスの拡散係数、 Ri は反応項、 t は時間を示す。

いま、炭酸ガスの濃度保存則は、単位時間当たりにコントロールボリューム内に蓄積される濃度 ϕ が、流入量 ϕ_a と流出量 ϕ_b の差に等しいと仮定すると、(6)式の左辺の要因は以下のとおりである。

1) 全ひずみの変化

$$\rho \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \rho m^T \frac{\partial \varepsilon^T}{\partial t} \quad (7)$$

ここで、 ρ, ε は、それぞれ炭酸ガス密度、全ひずみを表しており、 m はクロネッカーのデルタである。

2) 有効応力変化による固体粒子の変化

$$-\rho m^T D_s^{-1} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (8)$$

ここで、 σ' は有効応力を表わしている。

3) 炭酸化反応による体積収縮変化

$$\rho \frac{d\varepsilon^{hyd}}{dt} \quad (9)$$

そして、(7)～(9)式を(6)式に代入して、Galerkin 法を用いて有限要素法により離散化すると次式のようなになる。

$$-H \bar{\phi} - W \frac{d\bar{u}}{dt} - S \frac{d\bar{\phi}}{dt} - df' = 0 \quad (10)$$

ここで、マトリックス H 、 W 、 S は、それぞれ炭酸ガスの拡散移動に関するマトリックス、固体相の変形の影響に関するマトリックス、炭酸化反応による変形の影響に関するマトリックスであり、それぞれ次式のように定義される。

$$H = \int_{\Omega} (\nabla N)^T \lambda \nabla N d\Omega$$

$$W = \zeta_{(h)} \int_{\Omega} N^T m^T B d\Omega$$

$$S = \int_{\Omega} N^T m^T \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \phi} m N d\Omega + \int_{\Omega} N^T N d\Omega$$

$$df' = \int N^T m^T \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega$$

2. 3 支配方程式

節点変位ベクトル $\bar{u}$ 、節点濃度 $\bar{\phi}$ を未知数として中性化による変形挙動を理論的に表現する支配方程式は、(5)式と(10)式を連成させることにより次式のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} K & -L \\ -W & -S - \Delta t H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \bar{u} \\ \Delta \bar{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta t f \\ \Delta t H \bar{\phi}_n + \Delta t df \end{Bmatrix} \quad (11)$$

このように、セメント・コンクリートの炭酸ガスによる拡散と変形を統一的に表すことのできるモデルが提案されたわけである。ここで重要なことは、炭酸化反応による体積収縮ひずみ ε^{hyd} と炭酸化反応率 h の関係および炭酸化反応率 h と炭酸ガス濃度 ϕ 、時間 t の関係をどのように評価するかである。

2. 4 炭酸化反応率と炭酸化収縮

現在までの炭酸化に関する研究のほとんどが、その深さあるいは拡散係数に関するものであり、炭酸化収縮に関する詳細なものはない。したがって、炭酸化反応による体積収縮ひずみ ε^{hyd} と炭酸化反応率 h の関係あるいは炭酸化反応率 h と炭酸ガス濃度 ϕ や時間 t の関係などは、大幅な仮定をせざるを得ない。

まず、炭酸化による空隙率 ξ の変化は佐伯らの研究⁽³⁾に基づいて次式とした。

$$\begin{aligned} \xi(h) &= \xi_0(C-0.1) & 0.6 < C < 1.0 \\ \xi(h) &= 0.5 \cdot \xi_0 & C \leq 0.6 \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 ξ_0 は初期空隙率であり、 C は全水酸化カルシウムに対する残存水酸化カルシウムの割合であり、これを炭酸化未反応率とすると炭酸化反応率 h は、次式で表わすことができる。

$$h(\phi, t) = 1.0 - C \quad (13)$$

いま、炭酸化未反応率 C を濃度 ϕ と時間 t の関数として次式のように仮定する。

$$C(\phi, t) = C_1 \cdot e^{-C_2 \phi(t) \frac{t}{t_0}} \quad (14)$$

ここで、係数 C_1, C_2 は反応速度定数であり、 t_0 は反応完了時の日数である。

そして、(14)式を(13)式に代入することにより、

炭酸化反応率 h は最終的に次式のようなになる。

$$h(\phi, t) = 1.0 - C_1 \cdot e^{-C_2 \phi(t) \frac{t}{t_0}} \quad (15)$$

(15)式に示す炭酸化反応率 h を炭酸ガス濃度の関数として表したものを図-1 に示す。同図は反応速度定数 C_1, C_2 がそれぞれ 1.0, 20.0 において炭酸ガス濃度 10%, 5% および 1% における炭酸化反応率と経過時間との関係を表したものであり、仮定した炭酸化反応率は炭酸ガス濃度が高いほど初期に反応が急激に進行し、時間の経過とともに徐々に反応が緩やかになるという放物線的な特性を示している。また、炭酸ガス濃度が 5% において反応速度定数 C_2 が 1.0, 10.0, 20.0 と変化した場合の炭酸化反応率 h と経過時間との表したものが図-2 であり、反応速度定数 C_2 が大きいほど、放物線的に反応率が大きくなる特性を示している。すなわち、本研究で仮定した炭酸化反応率は、初期に大きく、時間の経過とともに緩やかになるという放物線的な特性を持っており、中性化深さの経過時間に関する実験結果から判断すると反応速度定数 C_1, C_2 を的確に評価することにより、実現象を詳細に評価可能なものと考えられる。なお、その実験的同定に関しては今後の課題としたい。

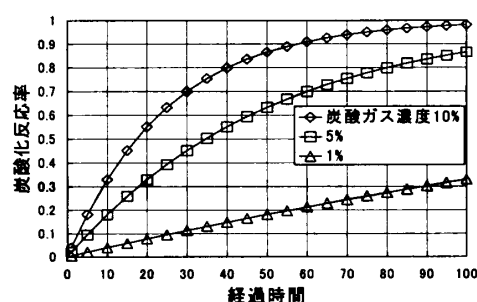


図-1 炭酸化反応率に及ぼす炭酸ガス濃度

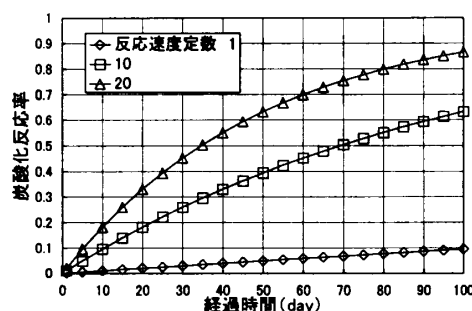


図-2 炭酸化反応率に及ぼす反応速度定数

表－１ 解析に用いた力学的特性

ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン 比	初期空隙率
20000	0.16	0.15

表－２ 解析パラメータ

解析供試体	拡散係数 (cm ² /day)	反応速度 定数	反応速度 定数
RH30-10	0.1905(RH.30%)	1.0	10.0
RH50-10	0.0677(RH.50%)	1.0	10.0
RH70-10	0.0220(RH.70%)	1.0	10.0
RH50-1	0.0667(RH.50%)	1.0	1.0
RH50-20	0.0667(RH.50%)	1.0	20.0

次に、炭酸化反応率 h と炭酸化反応による収縮ひずみの関連であるが、Verbeck⁹⁾の研究を基に相対湿度 50%時の最大収縮ひずみを求め、次式に示すように炭酸化反応率により線形的に変化するものとした。

$$\varepsilon^{hyd}(\phi, t) = \varepsilon_{\max} \cdot h(\phi, t) \quad (16)$$

ここで、 $\varepsilon_{\max}$ は最大収縮ひずみ量であり、

$\varepsilon_{\max} \cong 0.10\%$ とする。

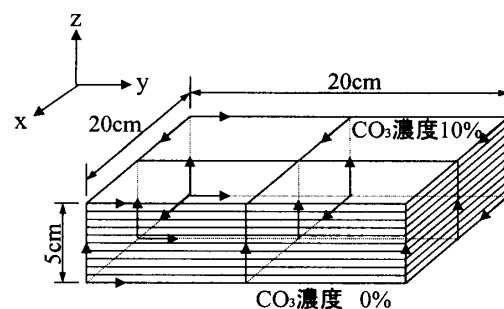
このような関係を(11)式に代入することにより、セメント・コンクリートの炭酸ガスの拡散とそれによる変形が統一的に求まるわけである。

3. 炭酸ガス拡散と変形特性に関する数値シミュレーション

前章で構築した炭酸ガス拡散・変形連成解析モデルにより炭酸ガス拡散と変形特性に関する数値シミュレーションを実施する。

3. 1 解析モデルと解析条件

解析モデルは、図－３に示すように、20×20×5cmの形状寸法を持つコンクリート供試体であり、その上面に10%の炭酸ガス濃度を与えた。変位に関する境界条件は一軸状態を仮定し、炭酸ガス濃度に関する境界条件を未知（温度でいう断熱温度境界）とした。解析条件は、表－１に示す通りである。



図－３ 解析モデル

3. 2 解析パラメータ

解析パラメータは表－２に示すように炭酸ガスの拡散係数および反応速度定数である。炭酸ガスの拡散係数は、Papadakisの研究⁹⁾を参考にコンクリート供試体の相対湿度が、30,50,70%における値である。なお、拡散変形性状に及ぼす炭酸ガスの拡散係数の影響は、解析供試体 R.H.30-10, R.H.50-10, R.H.70-10 を比較することにより実施され、また反応速度定数の影響は解析供試体 R.H.50-1, R.H.50-10, R.H.50-20 を比較することにより実施される。

3. 3 拡散変形性状に及ぼす拡散係数の影響評価

図－４、５は、それぞれ解析モデルの深さ方向における炭酸ガス濃度分布および応力分布であり、各図(a), (b)は、それぞれ経過日数が20日および100日の解析結果である。図中に示す記号◇, □, △は、それぞれ解析供試体 R.H.30-10, R.H.50-10, R.H.70-10 である。

まず、図－４に示す濃度分布、供試体の拡散係数が小さい程、深さ方向に急激な低下を示す放物線分布をしており、時間の経過とともに徐々に直線分布へと近づいていく。

次に、図－５に示す応力分布であるが、炭酸化初期においては、供試体上面近傍で非常に大きな引張応力状態となり、供試体下面近傍では非常に小さな圧縮応力状態である。この応力分布は、供試体上面においては、炭酸ガス濃度が高いことに起因して、炭酸化反応が急激に進むことにより収縮変形が生じ、その収縮変形を供試体下面のコン

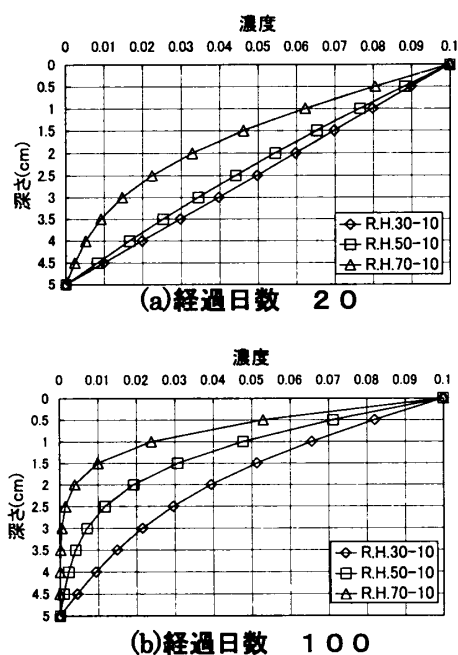


図-4 濃度分布 (反応速度定数 1.0)

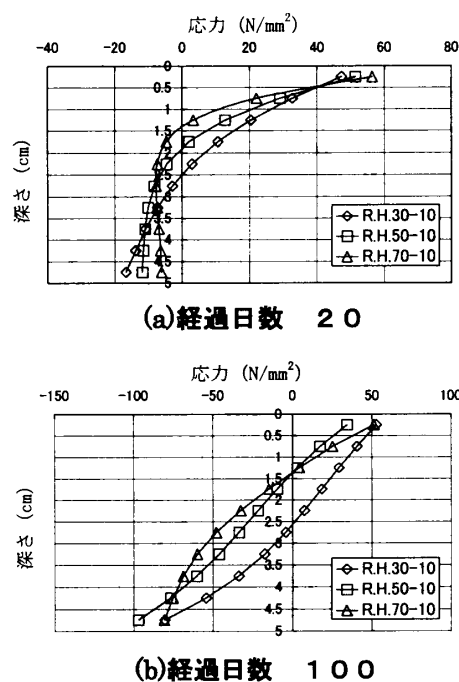


図-5 応力分布 (反応速度定数 1.0)

クリートが拘束することにより引張応力が発生する。これに対して、供試体下面では逆に拘束による圧縮応力が発生することになるが、その程度は、供試体下面自身の炭酸化反応による収縮により低減されるわけである。そして、日数経過とともに、特に供試体上面近傍では下面に比べて時間によって濃度が増加する割合が大きく、炭酸化反応が大きくなることにより、収縮量が大きくなる。これに伴って、空隙率が小さくなり剛性が大きくなる。逆に供試体下面近傍では濃度の絶対値が小さく、時間による増加量も小さいため、ほとんど収縮を生じない。したがって、大きな剛性を持つ供試体上面近傍が、大きな収縮を生じることにより、供試体下面近傍では圧縮応力が時間とともに徐々に大きくなるわけである。このような時間の経過とともに変化する応力の性状を表したものが、図-6である。この図からも、供試体上面域と中心部では時間による応力性状の変化はほとんど無いことに対して、供試体下面では時間とともに圧縮応力が徐々に大きくなっていることが確認される。最後に応力性状に及ぼす拡散係数の影響であるが、本研究の範囲内においてはほとんど無いものと考えられる。

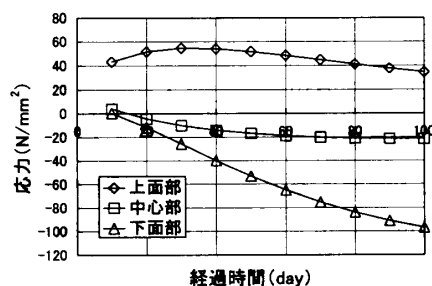


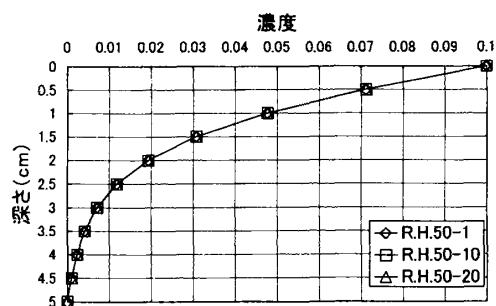
図-6 応力履歴 (R.H.50-10)

3. 4 拡散変形状に及ぼす反応速度定数の影響評価

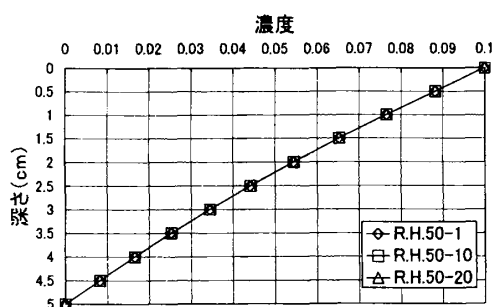
図-7, 8は、それぞれ深さ方向における炭酸ガス濃度分布および応力分布であり、各図の(a), (b)は、それぞれ経過日数が20日、および100日の解析結果である。図中に示す記号◇, □, △は、それぞれ解析供試体 R.H. 50-1, R.H. 50-10, R.H. 50-20である。

まず、図-7に示す濃度分布は、拡散係数のみに依存するため反応速度係数によらず一定であり、初期には放物線分布を示し、時間の経過とともに直線分布となる。

次に、図-8に示す応力分布であるが炭酸化初期においては、反応速度係数が大きいほど供試体

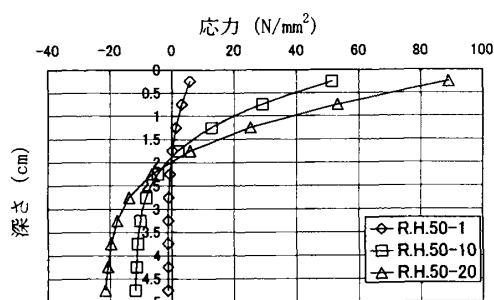


(a)経過日数 20

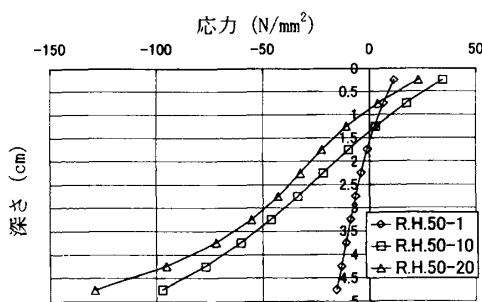


(b)経過日数 100

図-7 濃度分布 (R.H. 50%)



(a)経過日数 20



(b)経過日数 100

図-8 応力分布 (R. H. 50%)

上面近傍に生じる引張応力が大きく、また、下面近傍に生じる圧縮応力も大きい。これは、反応速度係数を大きくすることにより、特に供試体上面近傍では反応率が大きくなることに起因して収縮ひずみや剛性が大きくなり、下面のコンクリートによる拘束により、応力状態が大きくなるわけである。そして、時間の経過とともに反応係数が大きいほど上面近傍の引張応力は小さくなり、逆に下面近傍の圧縮応力は大きくなる。このような下面近傍の応力性状は前節と同じ傾向であるが、上面近傍では著しく応力の低下を生じている。これは、供試体上面近傍と下面近傍とで、その収縮量、剛性の違いが大きいことによるものと思われる。

4. まとめ

本研究では、炭酸化に関する化学種を炭酸ガス、炭酸イオンに限定し、コンクリートの炭酸化と変形を統一的に表わすことのできるモデルを構築し、その評価を行った。本研究で得られた結果を要約すると、以下のように示される。

1) 炭酸化と変形の連成モデルの構築が行われた。

2) 炭酸化初期には炭酸化面が引張り応力状態となり、下端面近傍が圧縮応力状態となる。

3) 下端面近傍の圧縮応力状態は時間の経過とともに大きくなる。

4) 応力性状に及ぼす炭酸化反応の影響は非常に大きい。

5) 本モデルの適用性は、今後実験結果との比較により、詳細に検討しなければならない。

参考文献

- (1) Powers, T.C.: A Hypotheses on Carbonation Shrinkage Journal of Research and Development Laboratories, Portland Cement Association, Vol.4, No.2, pp.40-50, 1962
- (2) ACI Committee 517: Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure-State of the Art, ACI Journal, Proceedings Vol.77, No.6, pp.429-448, 1980
- (3) 佐伯 竜彦・大賀 宏行・長瀬 重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, V-12, pp.99-108, 1990
- (4) Verbeck, G.J.: Carbonation of Hydrated Portland Cement, ASTM STP No.205, pp.17-36, 1958
- (5) Papadakis, V.G., et al.: Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, ACI Materials Journal, Vol.188, No.2, pp.186-196, 1991