

論文 水分拡散解析に基づくコンクリート構造物の乾燥収縮ひび割れの解析的検討

梅田 祐史*1・野田 淳人*2・大沼 博志*3

要旨: コンクリート構造物に発生するひび割れの原因には種々のものがあり、ひび割れ発生の原因の一つに、コンクリート中の水分の逸散による乾燥収縮が挙げられる。本論文では、まず、非定常水分拡散解析によって求めたコンクリート中の水分変化とコンクリートに生じる乾燥収縮ひずみは線形関係にあることを明らかにし、これを乾燥収縮係数と名付ける。次に、実コンクリート構造物の非定常水分拡散解析によって得られたコンクリート中の水分変化量とこの乾燥収縮係数から実構造物に生じる応力を求めることができ、さらにひび割れの発生の有無を評価できることを明らかにする。

キーワード: 非定常水分拡散解析, 乾燥収縮ひずみ, 乾燥収縮係数, ひび割れ発生

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、構造物の安全性や耐久性の低下、美観の損失といった悪影響を及ぼすことがある。そのため、設計の段階でひび割れ予測を行うことが重要である。ひび割れ発生原因の一つに、コンクリートの乾燥収縮がある。

乾燥収縮ひずみの算定には従来から数多くの実験から得られた評価式が設計や解析に用いられてきた。本論文の特徴は、これらの評価式を用いるのではなく、非定常水分拡散解析によって求めたコンクリート中の水分変化量を3次元応力解析に用いて乾燥収縮応力やひび割れの発生を算定しようとするものである。これによって、有限要素法による一貫した乾燥収縮ひび割れの解析が可能となる。

具体的には、まず JIS A 1129 に準拠した乾燥収縮試験で得られたコンクリートの乾燥収縮ひずみとその水分拡散解析で求めた水分変化量との関係を明らかにする。次に、実際のコンクリート壁の非定常水分拡散解析にこの関係を適用して乾燥収縮応力を求めることにより、コンクリートに発生するひび割れの有無、発生したひび割れの方向、範囲、及びひび割れ発生の時期を検討する。

2. 有限要素法による非定常水分拡散解析

2.1 3次元非定常水分拡散解析

コンクリート中の水分移動は水蒸気の拡散によるものであり、浸透流はコンクリート中の含水量に無関係であると仮定するとき、水分移動は拡散方程式によって表すことができる。線形非定常の水分拡散の支配方程式は、3次元問題では次式によって与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

また、等方性 ($D_x = D_y = D_z = D$) を仮定すると次式のように表すことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

境界条件には、コンクリート表面湿度が外気の湿度と等しいとする固定境界条件と、コンクリート表面の蒸発速度が内部と外表部の湿度差に比例するものとする水分伝達境界条件の2種類がある。

(a) 固定境界条件:

$$C = C_a \quad (3)$$

(b) 水分伝達境界条件:

$$D_n \frac{\partial C}{\partial n} + f(C - C_b) = 0 \quad (4)$$

ここで、 x, y, z は座標 (cm)、 C は単位体積当たりの水分量 (gr/cm^3)、 D_x, D_y, D_z は x, y, z 方向の水分拡散係数 (cm^2/day)、 f は外部流体への水分伝達係数 (cm/day)、 C_a は固定境界上の単位体積あたりの水分量 (gr/cm^3)、 C_b は外部流体の単位体積あたりの水分量 (gr/cm^3)、 t は時間 (日) である。

また、初期条件は次式で与えられる。

$$C(x, y, z, t = 0) = C_0 \quad (5)$$

ここで、 C_0 は初期水分量 (gr/cm^3) である。

*1 北海道大学大学院 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学 工学部環境社会工学科

*3 北海道大学大学院 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 教授 工博 (正会員)

2.2 3次元応力解析

各要素の水分変化にコンクリートの乾燥収縮係数を乗じて乾燥収縮ひずみを求め、これを自由ひずみとすると、式(6)からコンクリートに生じる応力を求めることができる。

$$\{F\} = [K]\{\delta\} + \{F\}_e \quad (6)$$

ここで、 $\{F\}$ ：節点力、 $[K]$ ：剛性マトリックス、 $\{\delta\}$ ：節点変位、 $\{F\}_e$ ：収縮ひずみによる節点力である。

3. 乾燥収縮係数

3.1 乾燥収縮試験の概要¹⁾

乾燥収縮試験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメントで比重 3.16、比表面積 3130cm²/gr、フライアッシュは比重 2.15、比表面積 3010cm²/gr、膨張材は水和熱抑制型で、比重 2.71、比表面積 2800cm²/gr であった。混和剤として AE 減水剤をセメント重量の 0.25% を使用し、さらに AE 剤を同様に 0.004% 用いた。乾燥収縮試験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。

乾燥収縮試験は JIS A 1129 に準拠した方法で行った。供試体の寸法は 10×10×40cm の角柱であり、コンクリートは 2 層に分けて充填し、各層はテーブルバイブレーターによって締め固めた。供試体は 24 時間後に脱型した。脱型後、温度 20±1℃、相対湿度 95±5% の恒湿保存箱中で湿潤養生した。湿潤養生 60 日後から、温度 20±1℃、相対湿度 60±5% の気中において 182 日間にわたり、乾燥収縮ひずみを測定した。測定には測定基長が 30cm のコンタクトゲージを用いた。

3.2 試験結果

乾燥開始後を基準とした乾燥収縮ひずみ曲線を図-1 に示す。

乾燥開始 182 日後の乾燥収縮ひずみは、普通コンクリート(1)が 503×10⁻⁶、普通コンクリート(2)が 686×10⁻⁶、フライアッシュコンクリートが 548×10⁻⁶、膨張コンクリートが 554×10⁻⁶ であった。

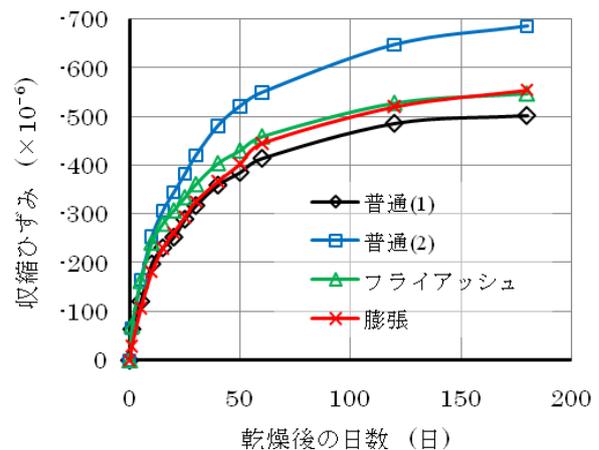


図-1 気中放置後の乾燥収縮ひずみ曲線

3.3 乾燥収縮試験の解析

解析対象とした供試体の寸法は 10×10×40cm の角柱である。Pickett の論文²⁾から、水分拡散係数を 0.23cm²/day とし、水分伝達係数を 0.18cm/day に仮定した。供試体の置かれた環境は、気温が 20℃で、相対湿度が 60% であるので、その時の外部空気の単位体積当たりの水分量は 1.04×10⁻⁵gr/cm³ である。初期水分量は 0.18gr/cm³ とした。

これらの条件を基に対称性を考慮して、図-2 に示すように、供試体の 1/8 断面モデルを用いて非定常水分拡散解析を行い、コンクリート供試体の水分量変化を求めた。要素分割は X 方向に 10 分割、Y 方向に 10 分割、Z 方向に 20 分割とし、要素数は 2000、節点数は 2541 である。

この水分拡散解析法は、形状に関しては有限要素法に基づくものであり、時間項に関しては差分法を用いている。コンクリートは均質でかつ等方性であるとし、水分拡散係数は打設方向に依存せず、一定とした。またコンクリート供試体の外表面は水分伝達境界条件とした。

表-1 乾燥収縮試験に用いたコンクリートの配合

コンクリートの種別	G 最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						
			W	C	FA	S	G	E	A
普通コンクリート(1)	20	46.5	185	299	—	795	925	—	0.75
普通コンクリート(2)	20	46.5	185	285	—	800	931	—	0.72
FA コンクリート	20	46.0	173	239	69.8	793	942	—	0.61
膨張コンクリート	20	46.5	185	269	—	796	927	30	0.68

W：水、C：セメント、FA：フライアッシュ、S：細骨材、G：粗骨材、E：膨張材 (CSA)、A：混和剤

3.3 解析結果

非常常水分拡散解析の結果を図-3 に示す。また、供試体の中心に沿って端面から 20cm(a), 5cm(b)および端面角(c)の水分量の経時変化を図-4 に示す。

図-3 から明らかなように、コンクリート内部の水分移動は、はじめにコンクリート表面部から起こり、乾燥時間の経過とともに、次第に内部に及ぶ。また、乾燥収縮試験における端面の影響は限られた範囲にあり、測定基長(30cm)の範囲では断面内の水分量分布は、ほぼ同一であることが分かった。

また、図-4 から端面角である点 c は XY, YZ, ZX 平面の水分伝達の影響を受けるために、早期に水分の逸散が起こる。逆に、コンクリート供試体の中心である点 a では水分伝達境界面からの距離が大きいため、水分の逸散が遅いことが分かった。乾燥開始約 180 日後には、コンクリート中の水分がほぼ完全に逸散した。

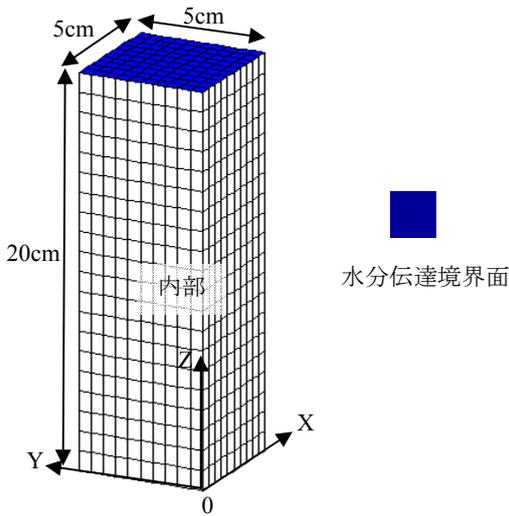


図-2 供試体の要素分割モデル

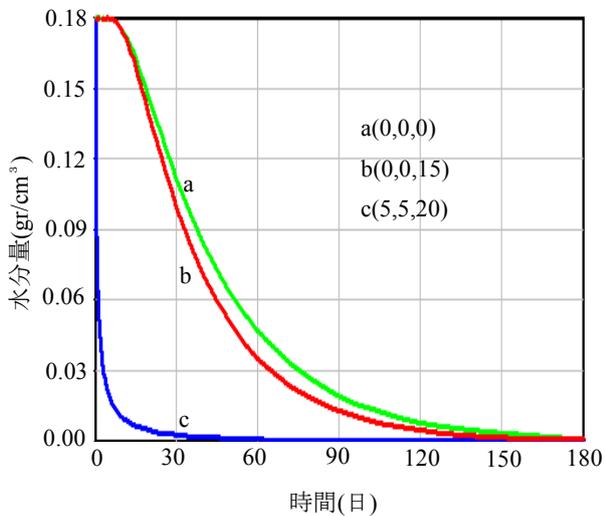
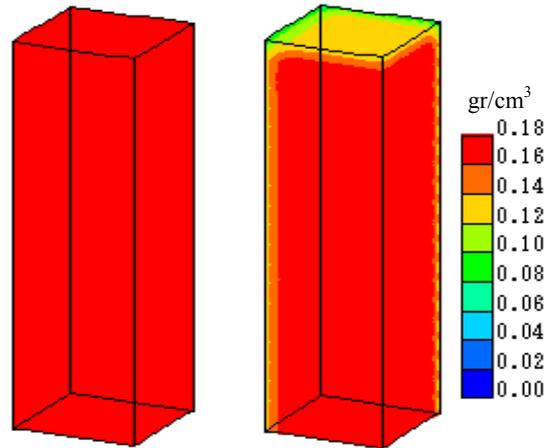
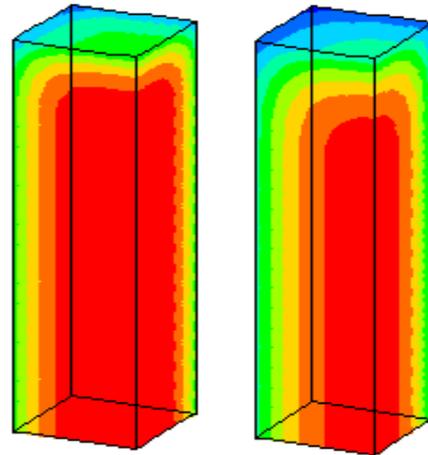


図-4 水分量の経時変化



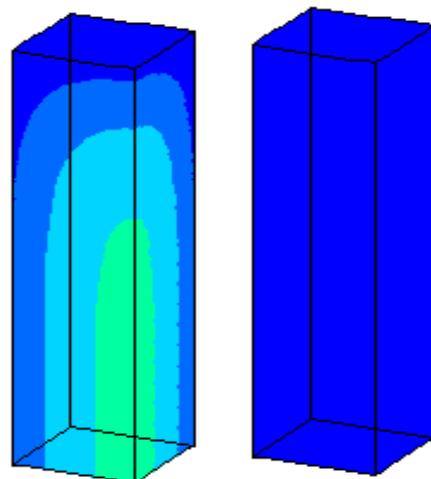
乾燥開始時

1日後



5日後

10日後



50日後

180日後

図-3 供試体内部の水分量の変化

3.4 乾燥収縮係数の算定

既往の乾燥収縮試験で得られたコンクリートの乾燥収縮ひずみと、非定常水分拡散解析から求めた平均水分変化量の関係を図-5に示す。また、平均水分変化量は供試体中央断面の平均値である。

図-5から、コンクリートの乾燥収縮ひずみと平均水分変化量は線形の関係にあることが分かる。本論文では、この直線勾配を乾燥収縮係数と呼ぶことにする。したがって、両者の関係は式(6)によって与えることができる。

$$\epsilon_{shrinkage} = \beta_c \times \Delta C = \beta_c (C - C_0) \quad (6)$$

$\epsilon_{shrinkage}$: 乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$), β_c : 乾燥収縮係数($10^{-6}/\text{gr}/\text{cm}^3$), ΔC : 単位体積あたりの水分変化量(gr/cm^3), C : 内部水分量(gr/cm^3), C_0 は初期水分量(gr/cm^3)である。それぞれのコンクリートについて乾燥収縮係数を求めると、普通コンクリート(1)は2782.3, 普通コンクリート(2)は3725.2, フライアッシュコンクリートは3126.1, 膨張コンクリートは2920.9となった。

平面保持の定理から乾燥収縮試験で得られる乾燥収縮ひずみは供試体の平均値であり、また水分拡散解析から平均水分変化量が得られるので、式(6)のように、両者の関係は乾燥収縮係数によって与えられることが示された。

4. 実構造物の解析

乾燥収縮係数の考え方を適用して、コンクリート壁に生じるひび割れ発生の有無を検査する。

4.1 実構造物の水分拡散解析

乾燥収縮ひび割れは、水分の逸散が早期に起こる比較的薄いコンクリート構造物に起こりやすい。そこで本研究では、図-6に示すような建物の窓周辺部のコンクリート壁を解析対象とした。コンクリート壁は高さ280cm, 幅360cm, 厚さ20cmであり、窓の大きさは、180cm \times 90cmである。窓は壁の中央に位置するとした。また、養生期間を14日間と仮定した。

解析モデルは形状の対称性を考慮して1/8断面モデルとした。図-7に解析モデルの要素分割を示す。要素数は1224, 節点数は1735である。空気に露出している面を水分伝達境界条件とし、コンクリート壁の上下面および左右側面では水分の移動が生じないとした。また、解析に用いたコンクリートの材料特性値は3節と同一とする。すなわち、水分拡散係数は0.23cm²/day, 水分伝達係数は0.18cm/dayに仮定した。構造物の置かれた環境は、気温が20°Cで、相対湿度が60%とすると、その時の外部空気の単位体積当たりの水分量は1.04 \times 10⁻⁵gr/cm³である。また、初期水分量は0.18gr/cm³とした。コンクリートは均質でかつ等方性であるとした。

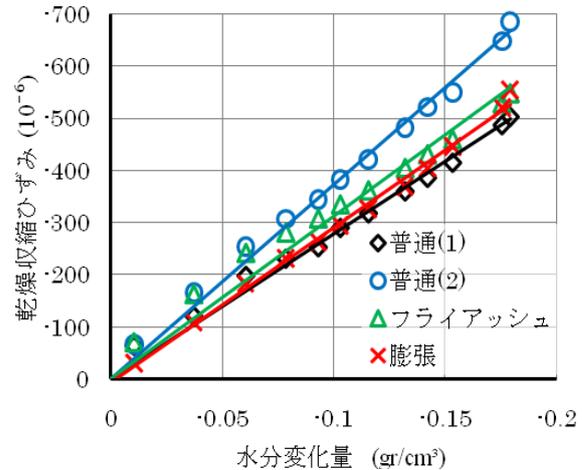


図-5 乾燥収縮ひずみと水分変化量の関係

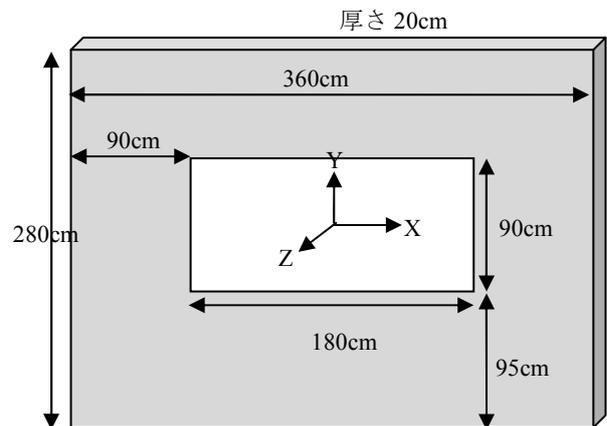


図-6 コンクリート壁の形状寸法

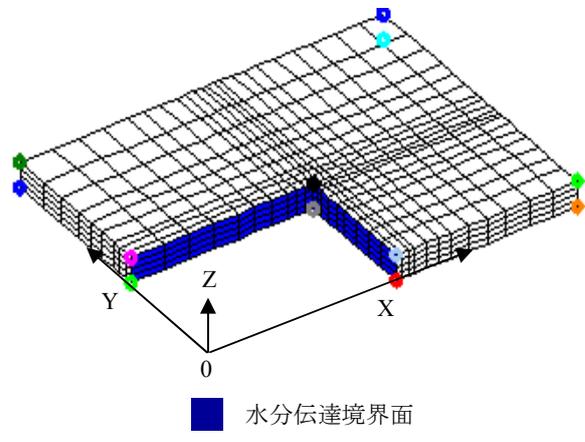


図-7 解析モデル

4.2 水分拡散解析結果

コンクリート内部の水分量の経時変化を図-8に示す。この図から、水分はほぼ壁面から逸散しており、窓枠の部位に近いほど水分の逸散が早いことが分かった。

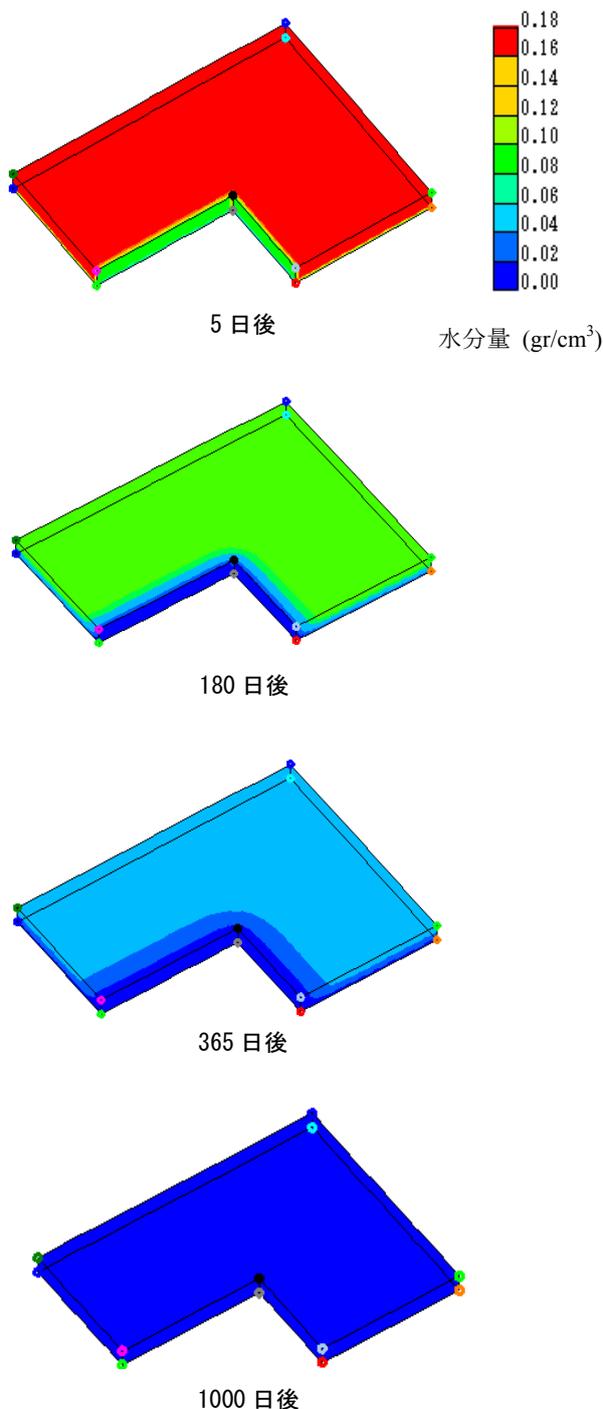


図-8 内部水分量の変化

4.3 実構造物の応力解析

コンクリート壁には表-1の普通ポルトランドセメント(1)を使用した。したがって、乾燥収縮係数は $2782.3 \times 10^{-6} / \text{gr/cm}^3$ であり、またポアソン比は0.2とした。コンクリートの圧縮強度、引張強度およびヤング係数はコンクリートの材齢の影響を考慮して次式のように与えた。^{3),4)}

$$f'_c(t) = \left\{ \frac{t}{(a + bt)} \right\} f'_{ck} \quad (7)$$

$$f'_{tk}(t) = 0.44 \sqrt{f'_c(t)} \quad (8)$$

$$E_e(t) = 4700 \sqrt{f'_c(t)} \quad (9)$$

ここで、 $f'_c(t)$: コンクリート材齢 t 日における圧縮強度(N/mm²)、 f'_{ck} : 材齢91日の設定基準強度(N/mm²)、 a, b : セメント種類による圧縮強度に関する定数、 $f'_{tk}(t)$: 材齢 t 日における引張強度(N/mm²)、 $E_e(t)$: 材齢 t 日における有効ヤング係数(N/mm²)である。解析には $f'_{ck} = 27.6$ 、 $a = 4.5$ 、 $b = 0.95$ の値を用いた。

対称面およびコンクリート壁の上下面と左右側面の垂直方向を拘束条件とした。

本論文では、乾燥収縮に起因する応力がコンクリートの引張強度よりも大きくなる時、乾燥収縮ひび割れが発生するものとした。

4.4 応力解析結果とひび割れ発生の予測

解析で得られた主応力分布図(1000日後)、主応力ベクトル図(1000日後)および主応力の経時変化をそれぞれ図-9、図-10および図-11に示す。

図-9から、窓の隅角部にコンクリートの引張強度を上回る大きな引張応力が生じることが示された。これは、水分拡散解析から明らかなようにコンクリート中の水分変化量が大きいことと、変断面部であることによる応力集中のためである。

主応力ベクトル図は発生応力の値と方向を表わしているため、ひび割れの方向を求めることができる。図-10から推定できるように、コンクリート壁の隅角部にはX軸(水平軸)に対して角度約45°にひび割れが発生することが分かった。

隅角部近傍における発生応力の経時変化を図-11に示す。この図の1, 2, 3, 4, 5の数字は隅角部近傍の要素積分点である。また、点線はコンクリートの引張強度の経時変化を示している。解析によってコンクリートに生じるひび割れ発生の有無と発生時期を予想することができ、図-11から明らかなように、乾燥開始約150日後にひび割れが発生することが示され、ひび割れは乾燥面から徐々にコンクリート内部に進展していき、引張強度を下回る位置まで続くと予想できる。

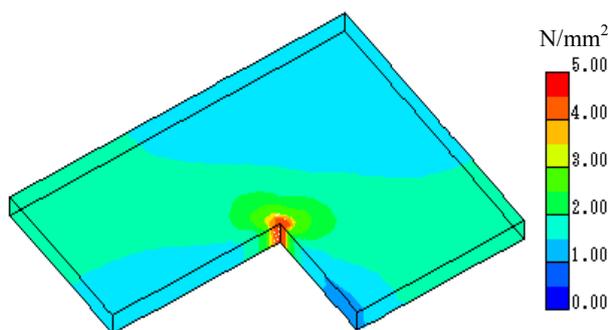


図-9 主応力分布図

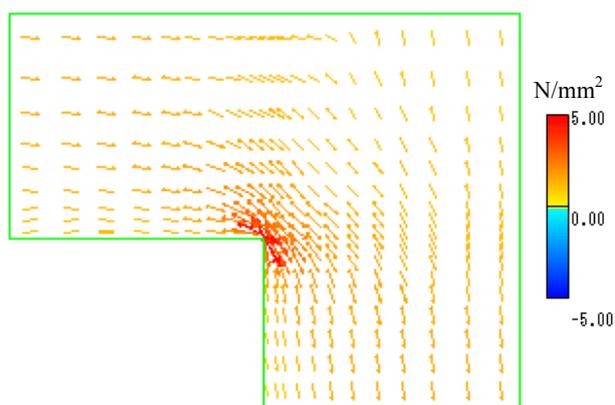
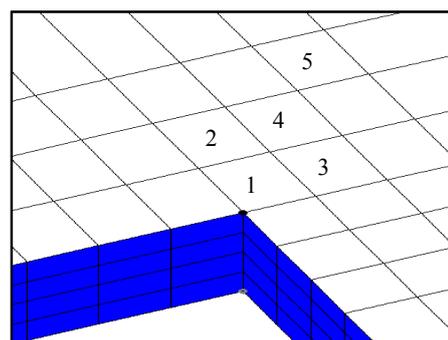


図-10 主応力ベクトル図

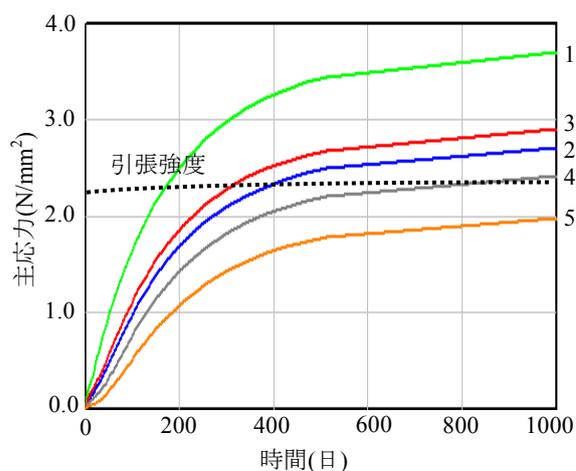


図-11 引張主応力の経時変化

5. 結論

3次元有限要素法プログラムを用いた非定常水分拡散解析、乾燥収縮応力解析から以下の結論が得られた。

- 1) 乾燥収縮試験から得られた乾燥収縮ひずみと、非定常水分拡散解析によって求めたコンクリート中の水分変化量は、線形関係にあることが明らかにされた。線形関係から求まる勾配を乾燥収縮係数と名付けた。
- 2) コンクリート壁の非定常水分拡散解析に乾燥収縮係数を適用して乾燥収縮応力を求めることにより、コンクリートに発生するひび割れの有無、発生したひび割れの方向、範囲およびひび割れ発生の時期を予測することができた。

本研究では、水分拡散係数と水分伝達係数は一定値と仮定し、また外部環境条件には気温 20℃、相対湿度 60% の一定値を用いている。今後は、コンクリートの打ち込み方向による異方性や、材料物性の非線形性や実際の環境を考慮することによって解析精度の向上をはかりたいと考える。

参考文献

- 1) H.Ohnuma, T.Nawa, K.Izumo : Drying Shrinkage of Concrete Based on Water Diffusion Analysis, Proceedings of the 4th Joint Symposium on Structural Materials between Japan and Korea, pp.145-152, 2001.7
- 2) G. Pickett : Shrinkage Stress in Concrete, ACI Journal, Vol. 17, No. 3, PP.165-195, Jan. 1946
- 3) 土木学会 : 2007 年度制定 コンクリート標準示方書 [設計編]
- 4) 土木学会 : 2007 年度制定 コンクリート標準示方書 [施工編]
- 5) 日本コンクリート工学協会 北海道支部 : コンクリートの収縮とコンクリート構造物のひび割れ, 2001.4