

# 論文 乾燥収縮解析に用いる物性値の取得に関する収縮試験法の提案

寺澤 正人\*1・川里 麻莉子\*2・榎島 修\*2・鈴木 基行\*3

**要旨:** 近年, 乾燥収縮解析を適用する事例が増加している。解析には種々の入力物性値が必要となるが, 入力物性値に関するデータの蓄積は, 実務上の標準的な解析手法が確立している温度応力解析に比較して少ないと思われる。本研究では, 乾燥収縮解析に必要な物性値を短期間にて取得することが可能な, 薄板供試体を用いた乾燥収縮試験法を考案し, 試験および乾燥収縮解析の実施を通じて, その妥当性や実用性に関して検討した。その結果, 考案した試験法は, 乾燥収縮解析において必要となる入力物性値に関するデータの蓄積に寄与し, 解析と組み合わせることで実用的で有用なひび割れ抵抗性評価手法となることを確認した。

**キーワード:** 乾燥収縮, ひび割れ, 収縮試験法, 湿気移動解析, 乾燥収縮解析

## 1. はじめに

コンクリートに発生するひび割れは, 構造物の耐久性などを低下させる要因の一つである。施工段階から発生する初期ひび割れの代表例は温度ひび割れである。ひび割れ対策の立案などを目的として, 温度応力解析が実施されるが, 既に実務上の標準的な解析手法が確立され, 「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」<sup>1)</sup>(以後, 指針と呼ぶ) などには解析手法とともに, 解析の便を図るために入力物性値(解析定数)の一般値や推定式が示されている。一方, 乾燥収縮もひび割れを発生, 進展させる要因である。乾燥収縮に対する解析手法は, 部材に一樣な乾燥収縮ひずみを与える手法と, 部材内の水分量などの分布を求め, その分布に応じた乾燥収縮ひずみを与える手法に二分される。乾燥はコンクリート表面から内部に向けて進行するが, 前者は表面と内部の乾燥収縮ひずみの差に起因する内部拘束応力を表現できず, 実際の乾燥収縮挙動を十分に反映できない。後者は内部拘束応力を考慮可能で, より正確に乾燥収縮挙動を表現できるため, 近年では適用事例が増加している。解析手法の例として, 水分移動を考慮したトラスネットワークモデルと剛体ばねモデル(RBSM)を組み合わせた手法<sup>2)</sup>がある。本手法はひび割れの発生, 進展挙動をより詳細に表現可能で有用なものであるが, 解析時間の長さなどの要因により, 解析対象は壁のみと言った部材レベルに留まり, 実務での適用例は少ないと思われる。これに対して, 比較的短時間にて構造物レベルでの解析が可能で, 実用的な乾燥収縮解析法の代表例として笹橋らの解析手法<sup>3)</sup>があり, 本手法を基にした解析コードも提供されている。その解析原理は, 部材内部の相対湿度分布を湿気移動解析にて求め, 分布に応じた乾燥収縮ひずみを初期ひずみとして FEM モデルに与えて, 収縮応力増分を求めるもの

である。一般にはコンクリートを弾性体として扱うため, ひび割れの発生, 進展挙動を詳細に解析することはできず, ひび割れの発生程度は一般的な温度応力解析と同様に指針に示される「ひび割れ指数」などを指標として評価するが, ひび割れ対策効果の比較評価などは十分可能である。湿気移動解析には蒸発率などが入力物性値として必要であり, 収縮応力解析にはコンクリートの相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係(以後, 乾燥収縮特性と呼ぶ)が必要である。しかし, 種々のひび割れ対策が開発, 適用される現況下にて, これらデータの蓄積は少ないと思われる。物性値の取得法の例として, JIS A1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に準拠し, 100×100×400mm の角柱供試体を種々の一定湿度環境下に置き, 各湿度環境下での終局乾燥収縮ひずみと外気相対湿度から乾燥収縮特性を得る手法<sup>4)</sup>などがあるが, 試験期間が長く, データの蓄積には限りが生じるとと思われる。このように試験期間の長さも, 入力物性値に関するデータ蓄積の少なさの一因と思われる。本研究では, 供試体厚さを薄くした薄板供試体を用いて乾燥速度を速め, 乾燥収縮解析に用いる物性値を短期間にて取得可能な試験法を考案し, その妥当性や実用性に関して検討を行った。

## 2. 試験法の考案

### 2.1 供試体断面寸法の検討

筆者らは既往の研究<sup>5)</sup>において, 平均気温 18.0°C, 平均相対湿度 26.4%の室内環境下において, 50mm 厚さのコンクリートの表層部(表面から 10mm 内側)と内部(同 30mm 内側)の相対湿度測定を実施し, 表層部は内部よりも相対湿度の低下速度が速いことや, 乾燥開始から 28 日において, 両者の相対湿度に 20%程度の差があることなどを確認している。乾燥収縮ひずみの測定には, 一般

\*1 飛島建設(株) 建設事業本部 土木事業統括部 設計グループ 部長(正会員)

\*2 飛島建設(株) 建設事業本部 土木事業統括部 設計グループ (正会員)

\*3 東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 教授 工博(正会員)

的に JIS A1129 に準拠して 100×100×400mm の角柱供試体が用いられるが、同様に、表面と中心では乾燥速度や相対湿度に差が生じ、供試体の相対湿度が一様化して安定するまでには長い期間を要することが予測される。これに対して、普通ポルトランドセメントを用いた単位セメント量 300kg/m<sup>3</sup>、単位水量 165kg/m<sup>3</sup> のコンクリートを使用して作製した 100×100×400mm の角柱供試体と、供試体厚さを 20mm とした 20×100×400mm の薄板供試体を 1 週間の湿潤養生の後に気温 20℃、相対湿度 60% の恒温恒湿環境下にて乾燥させることを想定し、FEM による湿気移動解析を実施した。湿気移動解析には温度との連成を考慮する手法<sup>6)</sup>を採用したため、湿気移動解析に先行して温度解析を実施した。解析に用いる熱物性値には指針に示される一般値や推定式による推定値を用いた。湿気移動解析に用いる透湿率、湿気容量には西岡らの研究成果<sup>7)</sup>に示される値を、蒸発率には中村の研究成果<sup>8)</sup>に示される値を用いた。解析には解析コード JCMAC3 を使用した。解析で得られた各供試体の代表点での相対湿度解析値を図-1 に、乾燥日数 7 日での供試体の相対湿度の断面内分布を図-2 に示す。この解析例では、供試体内の相対湿度が一様となり、外気相対湿度と同値となって安定するまでの乾燥日数は角柱供試体で 63 日程度であるが、薄板供試体では 14 日程度であり、薄板化によって短い時間で供試体を一様に乾燥できることが確認される。また、角柱供試体では乾燥の初期段階にて表面と中心での相対湿度差が大きい期間が長く、収縮ひずみ差による内部拘束応力の影響が生じる可能性が考えられるが、薄板供試体ではこれを軽減可能であると判断される。これらより、試験には薄板供試体を用いることとした。一般的なコンクリートよりも最大骨材寸法を小さくし、供試体断面寸法を小さくした研究例<sup>3)</sup>があるが、供試体の作製性を勘案して、供試体の厚さは一般的な最大粗骨材寸法の 20、25mm、幅は角柱供試体と同様の 100mm、長さは 400mm とすることとした。厚みの薄さ等から、供試体の不均一性によるひずみ測定値の変動が懸念される。これに対し、3 配合にて最大粗骨材寸法 20mm、厚さ 20mm の 3 供試体で乾燥収縮ひずみを測定した。各測定日の測定値の変動係数を平均すると各配合で 3.0、3.2、5.3% と、ばらつきが小さいことを確認した。変動係数が最大の配合での測定結果を図-3 に示す。

## 2.2 測定センサ配置法と物性値取得法の検討

試験では、供試体の相対湿度と収縮ひずみを自動測定することとした。図-1 が示すように、薄板供試体は乾燥過程の初期段階から、ほぼ一様に乾燥収縮すると思われるが、より正確な乾燥収縮特性を得るには供試体の同一位置において相対湿度と収縮ひずみを測定するのが妥当である。この点と供試体厚さや測定センサの大きさ

を勘案し、異なる薄板供試体の中心に、それぞれ湿度センサと埋設型ひずみゲージを配置することとした。供試体厚さ 20mm の場合の測定センサの配置位置を図-4 に示す。湿度センサを供試体に空けた計測孔へ挿入して設置する方法例<sup>3)</sup>があるが、計測孔の設置方法やセンサ挿入時における計測孔への外気の侵入の影響などに課題があ

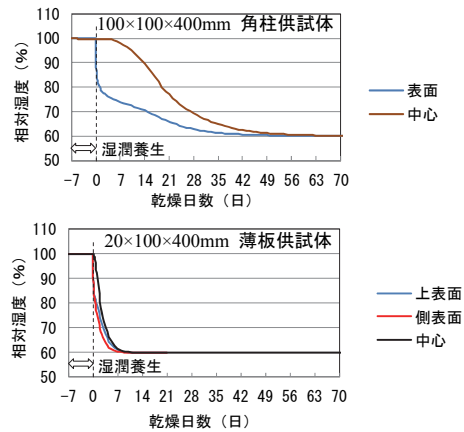


図-1 相対湿度解析値

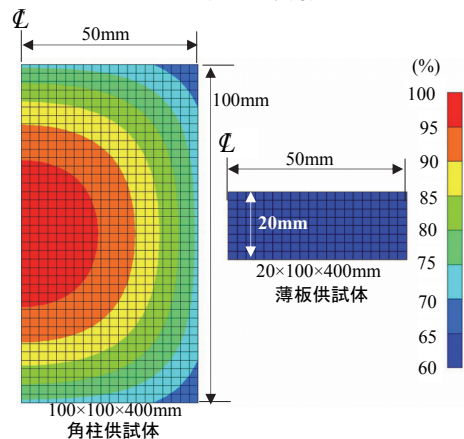


図-2 乾燥日数 7 日での相対湿度の断面内分布

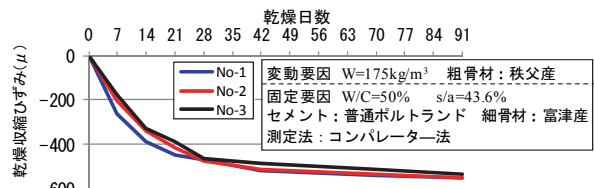


図-3 薄板供試体での乾燥収縮ひずみ測定結果例

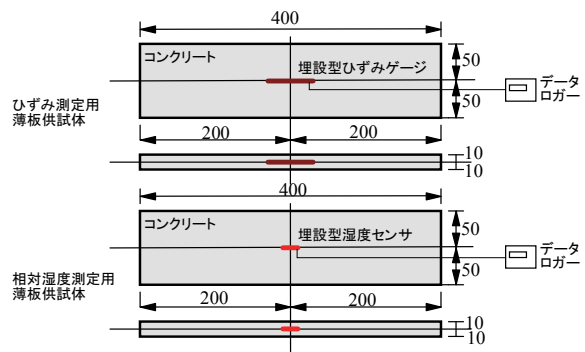


図-4 測定センサ配置位置

と思われるため、コンクリート打設前から設置が可能で、計測孔が不要な埋設型湿度センサを用いることとした。使用する埋設型湿度センサは、市販の湿度センサ（高分子膜抵抗型）の受感部に対する耐アルカリ透湿防水フィルムによる透湿防水処理と、基板、ケーブルに対してシリコン樹脂などにて防水処理を施したもの<sup>9)</sup>とした。埋設型ひずみゲージにはφ4mm、標点距離60mm、見掛けの弾性係数40N/mm<sup>2</sup>のものを使用し、コンクリートの弾性係数との差によって生じる付加応力を小さくする配慮を行うこととした。本試験法では蒸発率を直接的には取得できないが、相対湿度測定値を基にして、湿気移動解析にて同定し、取得することが可能である。近年では、乾燥収縮ひび割れ対策として種々の材料が開発、提供され、その中には水分蒸発抑制を原理とするものもある。短期間に蒸発率を取得可能なことは対策の選定時において有効であると思われる。また、本試験法では乾燥収縮特性を、単一湿度環境下での、乾燥開始から同一時刻における供試体の相対湿度と乾燥収縮ひずみの測定値の組み合わせから、連続かつ直接的に求めることができる。従前の方法<sup>4)</sup>などでは、複数の湿度環境と長い試験期間が必要であることに比べて、本試験法は乾燥収縮特性を効率的に取得可能であると判断される。

### 2.3 脱枠時期と養生方法の検討

JIS A1129 では、材齢1日において脱枠を実施し、材齢7日まで水中養生を行った後に、供試体を乾燥環境下に静置することとしているが、実施工において構築するコンクリート部材が水中養生されることは稀であると思われる。また、低発熱系セメントなどを使用した強度発現が遅いコンクリートを試験に供する場合には、薄板状の供試体を材齢1日にて脱枠すると、供試体が破損する可能性が考えられる。これらを勘案して、コンクリート上表面の均し作業完了以降から所定の脱枠日まで、型枠を含む供試体の全周を不透湿フィルム（ラップ）で被う封緘養生を実施することとした。脱枠実施材齢は JIS A1129 の水中養生完了材齢である材齢7日を標準とするが、試験、検討の対象となる工事の施工スケジュールに合わせて変更することも可能である。

### 2.4 考案した試験法の試行

考案した試験法（以後、薄板収縮試験と呼ぶ）の考案内容の良否やデータの取得性等を確認するために、普通ポルトランドセメントと最大寸法20mmの粗骨材を用い

表-1 試行に用いたコンクリートの示方配合と材料

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G1	G2	Ad
55	48.2	185	336	831	551	367	1.7

細骨材S: 君津産陸砂 混和剤Ad: AE減水剤標準形  
粗骨材G1: 八王子産硬質砂岩5号砕石 粗骨材G2: 八王子産硬質砂岩6号砕石

た、表-1 に示す配合、材料によるコンクリートを対象として、厚さ20mmの薄板供試体を用いて試験を試行した。試験環境は気温20±2℃、相対湿度60±5%とした。供試体の相対湿度と収縮ひずみの測定値を図-5に示す。ここに乾燥収縮ひずみは、測定される全収縮ひずみから乾燥開始時点での自己収縮ひずみを減じたものである。相対湿度測定値は図-1 下段図に示す解析値の変化挙動と同様の挙動を示しており、相対湿度の測定に問題はないと判断される。乾燥収縮ひずみは相対湿度の低下に応じて増加しており、測定に問題はないと判断される。また、図-5 最下段図には、JIS A1129 の「コンタクトゲージ法」にて測定した薄板供試体表面での乾燥収縮ひずみを併記するが、中心と表面でのひずみ測定値はほぼ同等であり、供試体全体がほぼ一様に収縮し、内部拘束応力の発生を抑制できていると判断される。既往の研究<sup>4)</sup>等の手法では数点の相対湿度での乾燥収縮ひずみが取得されるのみであるが、薄板収縮試験での乾燥収縮特性は図-6のように細密なもので、より詳細な情報が得られると判断される。相対湿度と乾燥収縮ひずみが安定するまでの期間は42日で、既往の研究<sup>4)</sup>の189日などに比べて、試験期間が短縮されている。以上より、考案内容に問題はなく、データの取得性は良好であると判断される。

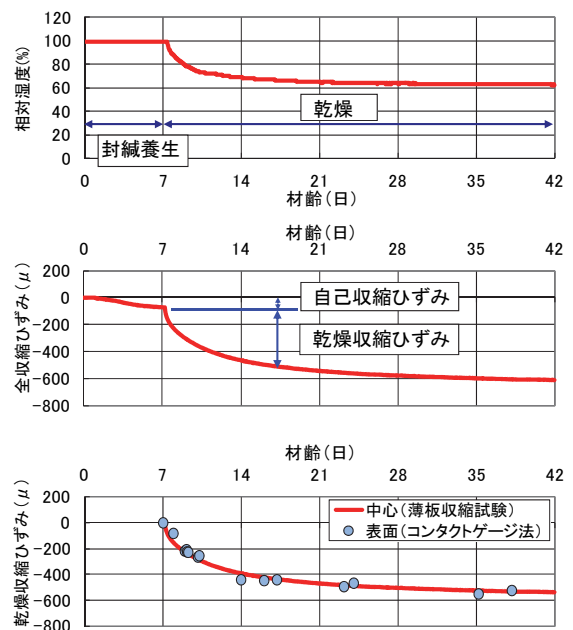


図-5 相対湿度と収縮ひずみ測定値

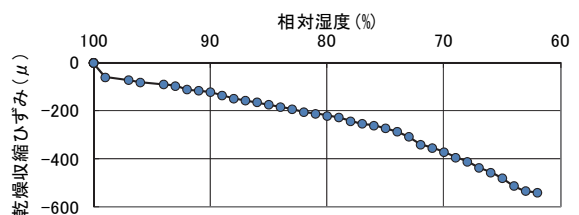


図-6 取得された乾燥収縮特性

### 3. 薄板収縮試験で得られる物性値の妥当性の検討

#### 3.1 検討法概要

気温  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $60 \pm 5\%$  の試験環境下にて、高炉セメント B 種と最大骨材寸法 20mm の粗骨材を用いた表-2 に示す配合、材料によるコンクリートを対象とし、薄板収縮試験と同様の封緘養生を施した  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  角柱供試体に対する「コンタクトゲージ法」による供試体表面の収縮ひずみ測定（以後、JIS 法試験と呼ぶ）と薄板収縮試験を実施した。次に薄板収縮試験から得られた蒸発率の妥当性を、既往の研究結果との比較などにより検討した。最後に薄板収縮試験から得られた蒸発率と乾燥収縮特性を用いて、JIS 法試験を解析的に模擬し、収縮ひずみ解析値と JIS 法試験での測定値の比較によって、乾燥収縮特性の妥当性を検討した。

#### 3.2 薄板収縮試験結果

薄板収縮試験で得られた供試体の相対湿度および乾燥収縮ひずみ測定値を図-7 に示す。

#### 3.3 蒸発率の取得と妥当性の検討

蒸発率は供試体の相対湿度測定値を基に、湿気移動解析による同定解析によって取得した。解析に用いたモデルを図-8 に、解析用物性値を表-3 中に示す。解析には解析コード JCMAC3 を用いた。同定解析によって得られた蒸発率を図-9 に、取得された蒸発率を用いて得られた供試体の相対湿度解析値と測定値の比較を図-10 に示すが、解析値は測定値を良好に表現している。図-9 に中村の研究結果<sup>8)</sup>での蒸発率を、図-10 には同蒸発率を用いて得られた相対湿度の解析値を併記するが、同蒸発率による解析値と測定値には差異がある。乾燥挙動をより正確に解析にて表現するためには、実際に使用するコンクリートやひび割れ抑制材料を用いて試験を実施

表-2 検討に用いたコンクリートの示方配合と材料

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G1	G2	Ad
55	48	165	300	860	579	386	3.0

細骨材S: 鹿島産陸砂 混和剤Ad: AE減水剤標準形  
粗骨材G1: 八王子産硬質砂岩5号砕石 粗骨材G2: 八王子産硬質砂岩6号砕石

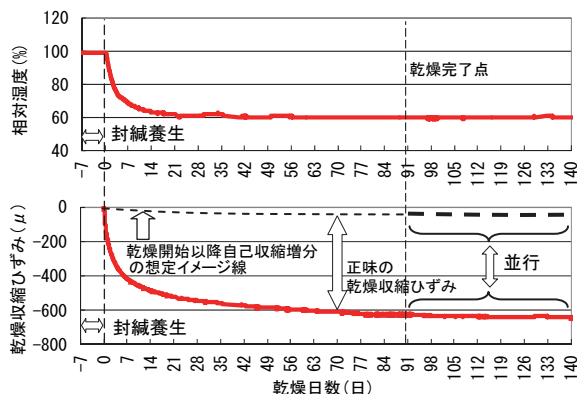


図-7 相対湿度と乾燥収縮ひずみ測定値

し、蒸発率を取得することが望ましいと思われる。薄板収縮試験結果から得られる蒸発率は、より実情に即した湿気移動挙動の予測に寄与できることから、妥当かつ有用なものであると判断される。

#### 3.4 乾燥収縮特性の取得と妥当性の検討

供試体の相対湿度が外気相対湿度と同値となって安定し、乾燥が完了したと判断される乾燥日数 91 日までの相対湿度と乾燥収縮ひずみから、乾燥収縮特性を取得した。得られた乾燥収縮特性を図-11 に示す。同図に

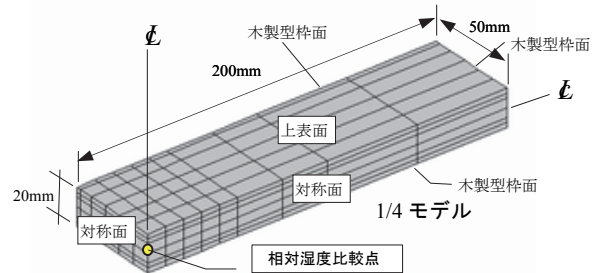


図-8 蒸発率の同定に用いた解析モデル

表-3 共通解析用物性値

温度解析	断熱温度上昇曲線		指針掲載式による
	比熱		1.15 KJ/kg°C
	熱伝導率		2.7W/m°C
	密度		2300kg/m <sup>3</sup>
熱伝達率	木製型枠、封緘養生面	8W/m <sup>2</sup> °C	
	鋼製型枠、乾燥面	14W/m <sup>2</sup> °C	
湿気移動解析	湿気容量	文献7)の値による	
	透湿率	文献7)の値による	
応力解析	圧縮・引張強度発現、有効ヤング係数	指針掲載式による	
	線膨脹係数	10 μ / °C: 普通ポルトランド 12 μ / °C: 高炉B種	

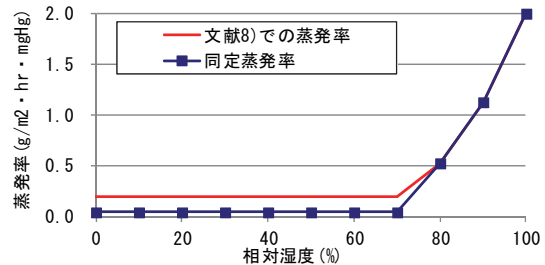


図-9 取得された蒸発率

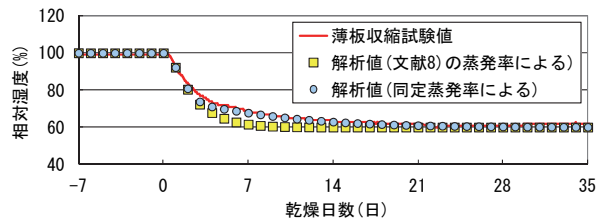


図-10 供試体中心の相対湿度測定値と解析値

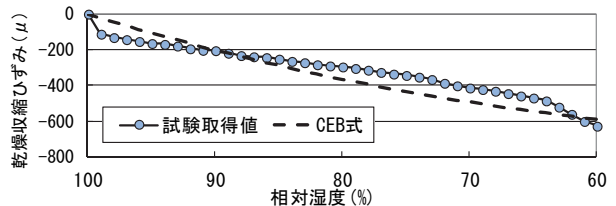


図-11 取得された乾燥収縮特性

CEB-FIP MODEL CODE 1990<sup>10)</sup>の予測式から求めた乾燥収縮特性を示す。変化傾向にやや差異はあるが、両者の全体的なひずみレベルはほぼ同等であり、取得した乾燥収縮特性は概ね妥当なものと考えられる。次に、取得した乾燥収縮特性を入力値として JIS 法試験を養生過程を含めて模擬する解析での供試体表面の収縮ひずみ解析値と、JIS 法試験での測定値を比較して、乾燥収縮特性の妥当性を検討した。解析に用いる蒸発率は図-9 中の同定値とした。その他の入力物性値は表-3 の値とし、水和熱による温度応力を考慮し、指針の予測式による自己収縮を考慮する、考慮しないの2ケースを図-12 に示す解析モデルにて、解析コード JCMAC3 を用いて解析した。収縮ひずみの解析値と測定値を図-13 に示す。自己収縮を考慮しないものは 300 $\mu$  程度までは解析値と測定値はほぼ同等で、以後差異が生じている。一方、自己収縮を考慮した解析値は測定値をより良好に表現できており、指針の自己収縮予測式が収縮ひずみ挙動の比較的長期に渡る良好な表現に寄与することを示している。昨今のひび割れ照査解析では自己収縮の考慮が必要とされる。自己収縮を別途、指針等の予測式で求めて考慮する場合には、乾燥が完了したとする時点（以後、乾燥完了点と呼ぶ）までの乾燥収縮ひずみから求める乾燥収縮特性が、乾燥開始以降の自己収縮の増分（図-7 参照）

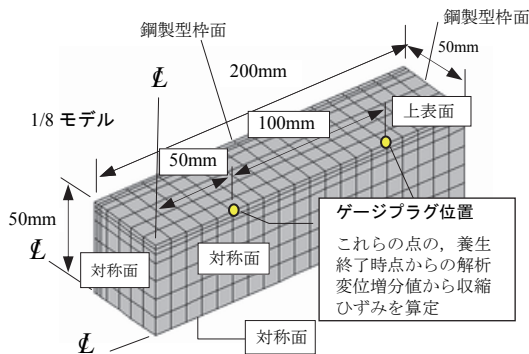


図-12 妥当性検討に用いた解析モデル

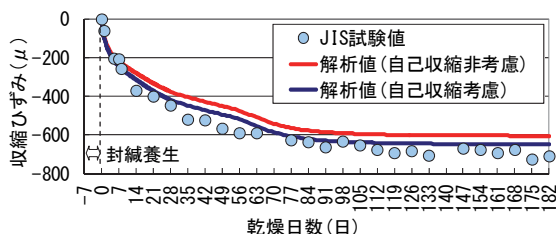


図-13 収縮ひずみ解析値と測定値

表-4 評価対象とした乾燥収縮ひび割れ対策

略号	対策の概要
N	無対策
LS	粗骨材に石灰石骨材を使用
SR	収縮低減型AE減水剤（高機能タイプ）を使用し、単位水量を「N」より15kg/m <sup>3</sup> 低減
P	脱枠時点（材齢7日）で、コンクリート表面に塗布型収縮低減剤を100g/m <sup>2</sup> 塗布

を含むため、乾燥収縮特性を単純に解析に用いると自己収縮の一部に重複が生じる。乾燥収縮特性に含まれる自己収縮の増分を、環境湿度を下げ、乾燥完了点日数を短くして小さくする方法等が考えられるが、正確な解を得るための自己収縮の重複回避法に関しては、重複量にセメント種別、水セメント比、温度等が影響するため、更に検討が必要である。しかし、自己収縮の重複は解析に考慮する収縮ひずみを大きく見積るため、便宜的に乾燥収縮特性と、指針の予測式による自己収縮を単純に解析に考慮しても、安全側で実務上支障のない結果が得られると考えられる。以上より、薄板収縮試験で得られる乾燥収縮特性は実務上は妥当なものであると考えられる。

#### 4. 薄板収縮試験の実用性の検討

薄板収縮試験から得られる物性値を用いて、乾燥収縮ひび割れ対策の効果を、解析的に比較評価して、薄板収縮試験の実用性を検討した。床版上の RC 高欄壁（厚さ 200mm×高さ 1500mm×誘発目地間隔 5000mm）を対象

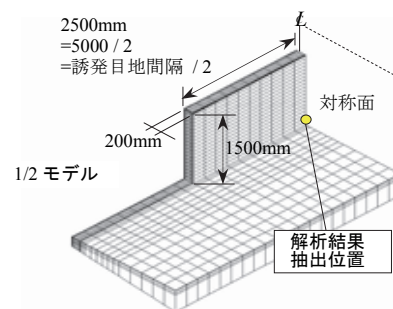


図-14 実用性検討に用いた解析モデル

表-5 各対策のコンクリートの示方配合と材料

略号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G1	G2	混和剤
N	55	48	165	300	860	579	386	3.0
LS	55		150	300	879	591	394	3.0
SR	50		185	336	831	551	367	4.5
P	55		185	336	831	551	367	3.4

セメント：いずれも普通ポルトランドセメント  
 混和剤：SRは収縮低減型AE減水剤標準形 その他はAE減水剤標準形  
 細骨材S：N、LSおよびSRは鹿島産陸砂、Pは津洋産陸砂  
 粗骨材G：LSは高知県吾川郡産石灰石砕石 その他は八王子産硬質砂岩砕石  
 Gmax = 20mm Pは塗布型収縮低減剤塗布前の母材コンクリートの配合

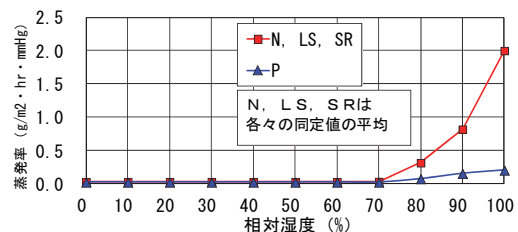


図-15 各ひび割れ対策の蒸発率

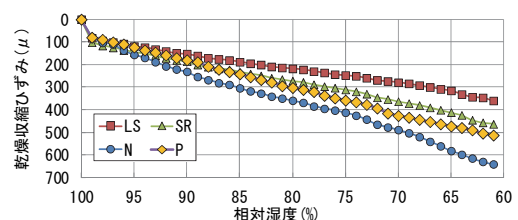


図-16 各ひび割れ対策の乾燥収縮特性

とし、表-4 に示す対策を評価した。図-14 に示す解析モデルを用い、表-5 に示す各対策の配合、材料によるコンクリートに対して実施した薄板収縮試験にて取得した図-15 に示す蒸発率と、図-16 に示す乾燥収縮特性を入力物性値とした。図-15~16 を見ると、塗布型収縮低減剤の効果が蒸発率の低減に現れ、また、乾燥収縮特性において各ひび割れ対策の乾燥収縮抑制効果が乾燥収縮ひずみの低減として現れている。解析では温度応力を考慮し、指針に示される式にて自己収縮ひずみを予測して解析に考慮した。その他の入力物性値は表-3 に示す一般値や推定式による値としたが、コンクリートの線膨脹係数は指針等を参考とし、石灰石粗骨材を利用するケースは  $6\mu/\text{C}$ 、その他では  $10\mu/\text{C}$  と仮定した。環境条件は東京の年平均の気温  $20\text{C}$ 、相対湿度  $63\%$  とした。解析コードには JCMAC3 を用いた。図-17 に解析結果を示す。ひび割れ指数を指標として、塗布型収縮低減剤は、相対湿度の低下抑制効果によって脱枠後の表面ひび割れの抑制に効果があること、石灰石粗骨材は、表面ひび割れと、躯体中心部で大きく発生する外部拘束応力による貫通ひび割れの両者に対して抵抗性が高いこと等、対策の効果の比較評価が可能な解析結果が得られていると判断される。拘束供試体試験にて、各種対策のひび割れ抵抗性を比較評価する事例<sup>11)</sup>があるが、単一条件下での

材料レベルの評価がされるのみである。一方、薄板収縮試験で得られる物性値を用いた解析では、本解析のように部材、構造物レベルにてより具体性を持ったひび割れ抵抗性の評価が可能である。薄板収縮試験は試験期間が短く、乾燥収縮解析入力物性値に関するデータの蓄積に寄与し、解析と組み合わせることで、実用的で有用なひび割れ抵抗性評価手法となるものと考えられる。

## 5. 結論

本研究を通じて、

- 1) 乾燥収縮解析に用いる物性値を、短期間に取得する薄板収縮試験を考案し、その妥当性、実用性等を確認した。
- 2) 得られる物性値は実務的には妥当なもので、薄板収縮試験は、乾燥収縮解析に必要な入力物性値に関するデータの蓄積に寄与し、解析と組み合わせることで実用的で有用なひび割れ抵抗性評価手法となるものと考えた。

より良い試験法とするための今後の課題として、多量の配合等を対象として多くのデータを蓄積した上での、試験精度、乾燥収縮特性の妥当性の検証と必要に応じた改善や改良、より正確に収縮挙動を表現するための、乾燥完了点の乾燥日数、セメント種別、水セメント比等に応じた自己収縮の扱い方に関する検討等が考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008.11
- 2) 長崎了, 中村光, 上田尚史, 国枝稔：乾燥収縮によるコンクリート構造物のひび割れ進展解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.453-458, 2008
- 3) 籠橋忍, 伊藤佑樹, 堀部謙, 森本博昭：コンクリートの乾燥収縮によるひずみと応力の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.441-446, 2002
- 4) 三谷祐二, 石井祐輔, 谷村充：コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす相対湿度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.547-552, 2013
- 5) 寺澤正人, 平間昭信, 岩城圭介, 北倫彦：コンクリート内部の相対湿度計測と湿気移動解析, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, V-425, 2008.9
- 6) 籠橋忍, 泰泳, 小澤満津雄, 森本博昭：温度との連成を考慮したコンクリートの湿気移動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.685-690, 2001
- 7) 西岡栄香, 原田有：多孔質物質の透湿率および湿気拡散について, セメント技術年報, XV, pp.274-278, 1961
- 8) 中村恭香：コンクリートの湿気移動に関する研究, 岐阜大学卒業論文, 2003.2
- 9) 岩城圭介, 平間昭信, 加藤淳司, 寺澤正人：コンクリート内部の相対湿度計測による湿潤養生管理の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.211-216, 2008
- 10) CEB-FIP：CEB-FIP MODEL CODE 1990, 1990.
- 11) 郭度連, 中出睦, 佐々木豊, 小林正明, 杉野雄克：各種ひび割れ低減材料を用いたひび割れ抵抗性の評価, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演要集, V-432, 2011

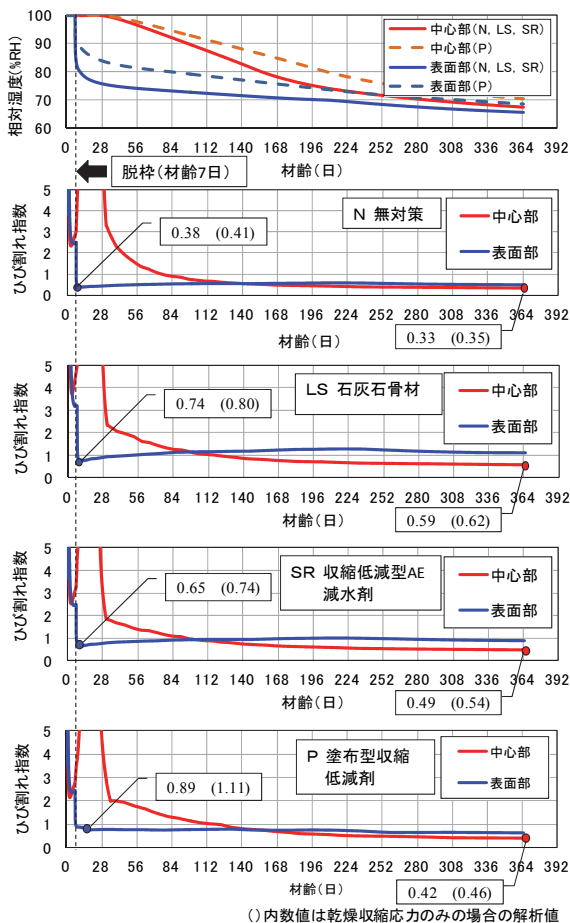


図-17 解析結果