乾燥収縮による微細ひび割れの発生程度と 透気試験結果の関係性に関する研究

寺澤 正人¹・槇島 修²・川里 麻莉子³・鈴木 基行⁴

¹正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)
E-mail: masato_terazawa@tobishima.co.jp

²正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)
E-mail: osamu_makishima@tobishima.co.jp

³正会員 飛島建設株式会社 土木事業本部 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)
E-mail: mariko_kawasato@tobishima.co.jp

⁴フェロー会員 東北大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻
(〒980-8579 宮城県 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
E-mail: suzuki@civil.tohoku.ac.jp

コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす一因として、乾燥収縮ひび割れがある。R. Torrentが考案したダブルチャンバー法による透気試験結果には、乾燥収縮と関係性が深いコンクリート表層の水分量が影響するとされる。本研究では供試体を種々の実験環境下におき、コンクリート表層の相対湿度測定、透気試験および蛍光エポキシ含浸によるひび割れ発生程度の観察などからなる実験と乾燥収縮解析を実施した。その結果、透気係数にはコンクリート表層の水分量が主に影響すること、表層ひび割れの挙動が水分量の挙動に依るため、透気係数と表層の微細ひび割れの発生程度には関係性が見られること、ひび割れ密度が一定値以上となると、透気係数と微細ひび割れの発生程度の関係性に変化が生じることが明らかになった。

Key Words : *air permeability test, drying shrinkage, crack due to drying, crack observation, drying shrinkage stress analysis*

1. はじめに

施工段階から発生するひび割れとして乾燥収縮ひび割れがある。養生完了時点より未水と水分の蒸発、逸散が始まり、部材の乾燥は表面側から進行するため、部材内外の水分量(湿度)差による表層ひび割れ(内部拘束ひび割れ)が生じやすい。土木構造では橋梁床版などの断面の薄い構造物を除くと、部材断面が大きく、部材内部の乾燥が進行する速度が遅いため、ひび割れ幅が大きい貫通性のある外部拘束ひび割れが発生するケースは少ない。従って、土木構造において発生する乾燥収縮ひび割れは、比較的微細な表層ひび割れが主体であると思われる。既往の研究例として、乾燥収縮による微細ひび割れが耐久性に影響を及ぼすとの大塚らの研究成果¹⁾があるように、微細ひび割れの発生程度によっては構造物の表層品質や耐久性に及ぼす影響は小さくはないと考えられる。昨今では、乾燥収縮を抑制する方法として、養生方法に代表される施工方法や収縮低減型の混和剤、養生剤

などの種々の材料が考案、提供されている。これら乾燥収縮抑制策を実施に適用した際の、耐久性向上を目的とするひび割れ抑制効果を予測する方法の一つとして、構造物内の相対湿度や水分量分布を求める湿気移動解析の実施後に、乾燥収縮応力を求め、ひび割れの発生程度を予測する解析法(以後、乾燥収縮解析と呼ぶ)を適用する事例が増えつつある。一般的に微細なひび割れは目視にて観察することが困難なため、乾燥収縮解析結果と実際のひび割れの発生程度の関係性は十分な吟味がなされてはいないと思われる。従って、コンクリート構造物の耐久性に関する知見を更に深め、また、乾燥収縮解析の精度向上を図るためには、乾燥収縮による微細ひび割れに関する知見やデータを数多く蓄積することが必要と思われる。そのためには目視では観察が困難な微細ひび割れの発生程度を、簡便かつ実構造物に損傷を与えることなく非破壊的に知る手法が必要で、その手法の確立には工学的意義があると考えられる。コンクリートの透気性とひび割れの関係を検討した研究例として、長瀧らの

材齢(日)	5	14	21	28	182
気中養生 (養生なし)	型枠	シートなどによる養生をしないで静置			
封緘養生	型枠	気泡緩衝シート	シートを撤去し静置		
			塗布型収縮低減剤塗布		
塗布型収縮 低減剤塗布	型枠	気泡緩衝シート	シートを撤去し静置		
実験環境	20℃ 80%RH 環境	室内自然環境			

図-1 実験で適用した養生方法(実験水準)と実験環境

表-1 コンクリートの示方配合

水セ 比 W/C (%)	細骨 材 率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		水 W	セ メ ン ト C	細骨材S		粗 骨 材 G	混 和 剤 Ad
				S1	S2		
54.3	45.7	165	304	584	249	1018	3.04

研究²⁾や荻野らの研究³⁾などがあり、それぞれ、ひび割れ幅の比較的大きな温度ひび割れや円柱供試体を割裂した単一ひび割れを対象とはしているが、透気性とひび割れの関係性が研究成果の中で示されている。また、コンクリートの表層品質や耐久性を簡便かつ非破壊的に評価する試験法としてR. Torrentが考案したダブルチャンバー法による透気試験法⁴⁾(以後、本法を透気試験と呼ぶ)があり、近年では、施工品質評価などを目的とした適用事例や研究事例が増加し、蔵重・廣永の研究⁵⁾のように、乾燥が進行してコンクリート表層の水分量が低下すると透気係数が増大するとする研究や、コンクリートの水分量と関係がある乾燥収縮量と透気試験結果の関係を検討した栗塚らの研究⁶⁾などがある。微細ひび割れの発生程度と透気試験結果の関係性に着目した研究事例は少ないが、細田らの研究⁷⁾では、実構造物を対象として透気試験を実施し、部材の諸元や微細ひび割れの発生程度によってはコンクリート表面からダブルチャンバー内に空気が流入することで、透気試験結果に微細ひび割れが影響する可能性があるとの知見が示されている。筆者らは、これら研究の知見と、品質評価手法として普及が進んでいることから、今後、関連データの蓄積が図られ易いとの想定を基に、コンクリート表層の水分量とその試験結果の関係性が深い透気試験を用いて、乾燥収縮を主原因とするコンクリート表層の微細ひび割れの発生程度を推定する手法の確立を考えている。本研究では、この手法の可能性を探ることを目的として、供試体を種々の実験

表-2 使用材料

材 料	種 類	諸元, 主成分
セメントC	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
細骨材S	S1	砕砂(70%) 栃木県佐野市産
	S2	陸砂(30%) 千葉県成田市産
粗骨材G	砕石 栃木県佐野市産	表乾密度2.70g/cm ³ 最大寸法20mm
混和剤Ad	AE減水剤標準形(I種)	変性リグニンスルホン酸化合物
	AE剤	界面活性剤

環境下に置き、コンクリート表層の相対湿度測定、透気試験および微細ひび割れの発生程度の観察を実施する実験と、実験後に実施した乾燥収縮解析を通じて、微細ひび割れの発生程度と透気試験結果の関係性に関して検討した。

2. 透気試験結果と微細ひび割れ発生程度の関係性の予備確認実験(実験その1)

(1) 実験概要

図-1に示す3種の養生方法を実験水準として、供試体を外気相対湿度、気温が経時変動する室内自然環境下に置き、コンクリート表層の相対湿度計測を実施するとともに、時系列的に透気試験を実施した。また、実験完了時点で蛍光エポキシ樹脂を表層に発生した微細ひび割れに真空含浸させて、ひび割れの発生程度を観察した。

a) 供試体の作製方法

目標スランブ8±2.5cm、空気量4.5±1.5%のレディーミクストコンクリートを使用して、各実験水準ごとに寸法150×150×150mmの立方体供試体を4体作製した。使用したコンクリートの示方配合を表-1に、使用材料を表-2に示す。コンクリート打設後の締固めは突き棒を用いて行い、セメントナイフを用いて側方型枠面においてスパーキングを実施した。4体の供試体のうち1体においては、図-2に示すように、供試体側面においてコンクリート表面から1cm内側の位置に相対湿度受感部が配置されるように埋設型湿度センサーを埋設した。使用した埋設型湿度センサーは、市販の外気相対湿度測定用センサー(高分子膜抵抗型)のセンサー部に対して耐アルカリ透湿防水フィルムによる透湿防水処理ならびに基板、ケーブルに対してシリコン樹脂、ブチルゴムにて防水処理を施したものである⁸⁾。コンクリートの打設から型枠存置完了までの材齢5日までの作業は相対湿度80%、気温20℃の環境において実施した。型枠には鉄製型枠を使用し、型枠存置期間においては、コンクリート打設後の上面均しが完了した時点で、コンクリート上面を不透湿のラッ

図-2 埋設型湿度センサーの設置方法

表-3 透気試験実施材齢

試験回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
材齢(日)	5	7	12	14	28	33	35	42	49	55	77	91	153	182

図-3 ひび割れ観察面

布で覆い、水分の蒸発を防いだ。材齢5日での脱枠後の作業は、室内自然環境下で実施し、気泡緩衝シート（ポリエチレン製、厚さ0.05mm、粒径10mm、粒高4mm）を供試体全面に2枚重ねで、直ちに設置した。塗布型収縮低減剤には、グリコールエーテル系誘導体を主成分とするものを使用し、供試体全面に対して、気泡緩衝シートの撤去完了直後に1回あたり115g/m²の塗布量にて、2回塗布した。

b) 実験方法

以下に示す測定や試験などは、材齢182日まで室内自然環境下において実施し、実験期間中、コンクリート表層の相対湿度、外気相対湿度および気温を経時測定した。透気試験は、各実験水準ごとに作製した4体の供試体のうち埋設型湿度センサーを設置しない3体の供試体での測定値の平均値である。これらより次の知見、考察が得られる。

1) 気泡緩衝シートを用いた「封緘養生」は、シート撤去後の相対湿度の低下の程度が、特別な養生を実施しない「気中養生」と大きくは変わらないが、養生実施中においては相対湿度がほぼ100%と湿潤状態を保つことができて、乾燥の開始が遅れること、および気泡緩衝シートの撤去後に塗布した塗布型収縮低減剤のコンクリート表面からの水分逸散抑制効果によって、全実験期間を通じて、コンクリート表層の相対湿度のレベルは「気中養生」

図-4 相対湿度および気温測定値

図-5 透気係数測定値

紫外線を照射して、透気試験を実施した面に直交する切断面にて表層ひび割れの深さ方向の発生程度を観察した。

(2) 相対湿度測定および透気試験結果と考察

図-4にコンクリート表層と外気の相対湿度ならびに気温、図-5に透気係数の測定結果を示す。ここに透気係数は、各実験水準毎の4体の供試体のうち、埋設型湿度センサーを配置していない3体の供試体での測定値の平均値である。これらより次の知見、考察が得られる。

1) 気泡緩衝シートを用いた「封緘養生」は、シート撤去後の相対湿度の低下の程度が、特別な養生を実施しない「気中養生」と大きくは変わらないが、養生実施中においては相対湿度がほぼ100%と湿潤状態を保つことができて、乾燥の開始が遅れること、および気泡緩衝シートの撤去後に塗布した塗布型収縮低減剤のコンクリート表面からの水分逸散抑制効果によって、全実験期間を通じて、コンクリート表層の相対湿度のレベルは「気中養生」

生」＜「封緘養生」＜「塗布型収縮低減剤塗布」である。
2) 養生方法によらず、透気係数は材齢の経過とともに増大している。また、いずれの透気係数も材齢153日まではコンクリート表層の相対湿度の低下とともに増大するが、材齢153日以降では相対湿度が上昇しても増大して、全実験期間を通じて、そのレベルは「気中養生」＞「封緘養生」＞「塗布型収縮低減剤塗布」である。上記1)に示すように相対湿度のレベルは「気中養生」＜「封緘養生」＜「塗布型収縮低減剤塗布」であり、コンクリート表層の水分量の透気係数への影響が認められる。

(3) ひび割れ観察結果と考察

図-6に、材齢182日の実験完了時点で実施した蛍光エポキシ含浸の後に紫外線を照射して撮影した、ひび割れ（骨材とセメントペーストおよびモルタルの剥離、間隙）の発生状況写真を示す。これによれば、封緘養生と塗布型収縮低減剤のひび割れ抑制効果が認められ、最大ひび割れ深さは、「気中養生」＞「封緘養生」＞「塗布型収縮低減剤塗布」であり、この順列は上記(2)に示した透気係数の順列に一致する。このことから、最大ひび割れ深さと透気係数に関係性があることが認められる。

3. 透気試験結果と微細ひび割れ発生程度の関係性の詳細確認実験（実験その2）

(1) 実験概要

「実験その1」では、ひび割れ観察は実験完了時のみにて実施した。ここでは、複数の材齢にて、透気試験、コンクリート表層の水分率測定とひび割れ観察を実施して、透気係数、水分率および微細ひび割れの発生程度の相互の関係を詳細に確認した。

a) 供試体の作製方法

「実験その1」で使用したものと同様のコンクリートを使用し、寸法150×150×150mmの立方体供試体を7体作製した。そのうち1体には「実験その1」と同様に埋設型湿度センサーを設置し、透気試験およびひび割れ観察は残りの6体で実施することとした。養生方法は「実験その1」の「封緘養生」と同様とした。

b) 実験方法

図-7に示すように、材齢189日までは相対湿度60%、気温20℃の環境下に、材齢280日までは、コンクリートの表層の相対湿度を下げて内部拘束応力の発生域をより供試体内部まで進展させて、微細ひび割れの深さを深くすることを目的として、相対湿度40%、気温20℃の環境下に、以後、材齢393日（乾燥開始から365日）までは、乾湿繰り返しの影響を見ることを目的として、図-9に示す外気相対湿度、気温の室内自然環境下に供試体を静置した。「実験その1」と同様の方法で、コンクリート表層

図-6 ひび割れ観察写真

材齢（日）	5	28	189	280	393
乾燥材齢（日）		0	161	252	365
養生	型枠	封緘養生 (気泡緩衝シート)	シートを撤去して静置		
実験環境	相対湿度60% 気温20℃			相対湿度 40% 気温20℃	室内自然 環境

図-7 実験で適用した養生方法と実験環境

の相対湿度測定と透気試験を時系列的に実施した。透気試験の実施前に、高周波容量式の水分計にて測定レンジを表面から深さ40mmの範囲とし、コンクリート表層の水分率を併せて測定した。図-8に示すように蛍光エポキシ樹脂含浸によるひび割れ観察は、深さ方向の発生状況を把握するための供試体切断面に加えて、コンクリート表層のひび割れの面的発生状況を把握するため、透気試験を実施した面にて実施した。供試体表面には、含浸、

図-8 ひび割れ観察面

養生完了後の日数

表-4 実験スケジュール

	材齢(日)	養生完了後の期間(日)	透気試験	ひび割れ観察
1	28	0	実施	—
2	63	35	実施	実施(初回)
3	105	77	実施	実施(2回目)
4	182	154	実施	実施(3回目)
5	245	217	実施	実施(4回目)
6	343	315	実施	実施(5回目)
7	393	365	実施	実施(6回目)

固化した蛍光エポキシ樹脂が薄箔状に残るため、樹脂とその下のコンクリートを僅かに研磨除去した後にひび割れを観察した。実験スケジュールを表-4に示す。

(2) 相対湿度、水分率測定および透気試験結果と考察

図-9に相対湿度、気温および透気係数の測定値を、コンクリート表層の水分率と透気係数の関係を図-10に示す。これらより以下の知見、考察が得られる。

- 1) 乾湿繰り返しの影響がない材齢245日までは、材齢の経過およびコンクリート表層の相対湿度の低下とともに透気係数が増大する関係が認められる。乾湿繰り返しの影響を受ける材齢245日から343日では、コンクリート表層の相対湿度が上昇するのにに対して透気係数が増大し、また、材齢343日から393日では、コンクリート表層の相対湿度がわずかに低下するが、透気係数が小さくなるという材齢245日までの関係と逆の関係が確認される。
- 2) 既往の研究例⁵⁾などでは、コンクリート表層の水分量が低下すると透気係数が増大するとの知見があるが、図-10に示すように、相対湿度40%環境から室内自然環境に移行し、乾湿繰り返し影響を受ける材齢245日から343日では、コンクリート表層の水分率は低下せず上昇しているが、透気係数が比較的大きく増大している。材齢245日から343日では図-9のように表層の相対湿度も上昇しており、図-10に示される材齢245日から343日における水分率と透気係数の関係が示す挙動は、既往の研究の知見における関係のものとは異なるものと考えられる。
- 3) 図-10が示す材齢343日から393日におけるコンクリー

図-9 相対湿度および透気係数測定値

図-10 表層水分率と透気係数の関係

ト表層の水分率の上昇に伴う透気係数の低下の関係は、前述2)に示した既往の研究の知見での関係に一致するものと考えられる。ただし、この区間のみにおいては、水分率が上昇しているのに対して、コンクリート表層の相対湿度は図-9が示すようにわずかに低下している。水分率は、コンクリート表面より深さ方向領域内の平均的な値として捉えられている。これに対して、乾湿繰り返し作用の影響下では、放湿、吸湿、保湿の相互作用により、表層領域内には比較的複雑な形状の相対湿度分布が生じると考えられる。表層領域内の一部にて相対湿度の局所的な低下が生じて、領域内の相対湿度分布の平均的なレベルが上昇していれば、コンクリート表面から10mm内側の1点の相対湿度測定値と領域で捉えた水分率測定値の変化挙動が逆となる特異な現象も説明可能と推察される。しかし、本実験ではコンクリート内の相対湿度分布を捉えておらず、この考え方を検証することができない。従って、材齢343日から393日におけるコンクリート表層の水分率と相対湿度分布の関係や透気係数の低下挙動の原因の吟味、検討は今後の課題と考える。

図-11 切断面ひび割れ観察写真

図-12 表面ひび割れ観察写真

(3) ひび割れ観察結果と考察

図-11に切断面でのひび割れ観察写真，図-12に表面でのひび割れ観察写真を示す。画像処理ソフトを用いて，観察写真上の表面気泡等への樹脂含浸影像部を除去した上で，図-13のように二値化処理し，式(1)を用いて算定したひび割れ密度 ρ と透気係数の関係を図-14に，最大ひび割れ深さと透気係数の関係を図-15に示す。これらより以下の知見，考察が得られる。

図-13 二値化処理の一例

$$\rho = P_B / P_{all} \times 100 \quad (1)$$

ρ : ひび割れ密度 (%) P_B : 黒色部画素数
 P_{all} : 評価面全画素数

1) 図-14にて、ひび割れ密度は材齢の経過とともに概ね増大する関係性が見られる。また、透気係数が大きいと、概ねひび割れ密度が大きいという関係性が見られるが、材齢182日から245日にひび割れ密度のわずかな低下があるものの、乾湿繰り返しの影響を受けない材齢63日から245日では両者の関係が規則的であるのに対し、乾湿繰り返しの影響を受ける材齢245日から393日では規則性が失われ、関係性が変化することが確認される。材齢245日から343日では、ひび割れ密度と透気係数が他区間に比べて比較的大きく増大しているが、この区間は図-10にて表層の水分率は低下せずに透気係数が増大する、既往の研究の知見と異なる挙動を示す区間に一致している。これより、乾湿繰り返しの影響によってひび割れ密度が一定値以上になると、微細ひび割れが透気係数に影響を与えるものと考えられる。また、その原因はチャンバー内外を跨ぐ微細ひび割れを介した、細田らの研究⁷⁾の知見にも示される「チャンバー内への空気の流れ」であると考えられる。

2) 最大ひび割れ深さは、図-9に示す表層の相対湿度が徐々に低下し、最低値に近づく材齢245日までは材齢の経過とともに増大し、相対湿度が再上昇した後の343日以降では245日の値から変化がなく、上限値を持つこと、また、245日までは透気係数が大きいと最大ひび割れ深さが深いという規則的な関係性があることが確認される。

なお、「実験その2」では、ひび割れ観察は透気試験を実施した供試体から無作為に1体を抽出して実施した。透気試験は、初回ひび割れ観察時は6体に対して、また以降は、前回に蛍光エポキシ樹脂含浸によるひび割れ観察を実施して残った供試体に対して実施し、各回の透気係数は各測定値の平均値として評価した。試験対象供試体数が2体以上である5回目ひび割れ観察までの、各回の透気係数測定値の変動係数は6.6~14.3%であった。これまでの知見、考察は、透気係数のこのばらつきと、ひび割れ発生とのばらつきの影響を含んだ上でのものである。

4. 乾燥収縮解析による実験結果に対する考察

ここでは、複数の材齢において、透気試験とコンクリート表層の微細ひび割れの観察を実施した「実験その2」を対象として、3次元FEMモデルにて供試体を模擬して乾燥収縮解析を実施し、ひび割れ観察で得られたひび割れ密度と最大ひび割れ深さ、乾燥収縮解析結果ならびに透気試験結果の相互の関係に関して考察を加えた。

(1) 解析方法

乾燥収縮解析の手法としては、その手法を基とした市販の解析プログラムが提供されるなど、実務的な手法と考えられる簗橋らの手法¹⁰⁾を採用した。解析モデルは図-

図-14 透気係数とひび割れ密度の関係

図-15 透気係数と最大ひび割れ深さの関係

16に示す3次元FEMモデルとした。湿気移動解析では温度との連成を考慮するため、湿気移動解析の実施前に温度解析を実施した。温度解析に必要なとなるコンクリートの解析定数は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」¹¹⁾（以後、指針と呼ぶ）に示される一般値や推定式によって求めた値とした。温度解析に用いた解析定数を表-5に示す。湿気移動解析に用いる蒸発率は中村の研究成果¹²⁾より図-17に示す値、透湿率および湿気容量は西岡・原田の研究成果¹³⁾より図-18に示す値とした。本解析で採用した簗橋らの解析手法の原理は、まず、湿気移動解析にてコンクリート断面内の相対湿度分布を求め、次にそれに応じた乾燥収縮ひずみ分布を用いて、乾燥収縮応力を求めるものである。収縮応力解析時に必要となるコンクリートの相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係を示す乾燥収縮特性は、文献¹⁴⁾を参考として、CEB-FIP MODEL CODE 1990¹⁵⁾に掲載される予測式から、ある相対湿度に対して算定される終局収縮ひずみとその相対湿度の組み合わせとして求めた。図-19に解析に用いた乾燥収縮特性を示す。収縮応力解析時には温度応力を考慮し、強度、ヤング係数等は指針¹¹⁾に掲載される式によった。収縮応力解析に用いた解析定数を表-6に示す。実務的な温度応力解析で一般的に採用される手法と同様に、コンクリートは線形連続体として扱い、ひび割れの発生程度の指標には、式(2)で求められるひび割れ指数 I_{cr} を用いた。指針¹¹⁾には、ひび割れ指数と温度応力による外部拘束ひび割れの発生確率やひび割れ幅との関係式が示されているが、乾燥収縮による表層ひび割れの発生程度との関係を示す知見は現時点では見当たらない。一般的には、ひび割れ指数が小さい場合にはひび割れ発生危険

表-5 温度解析に用いた解析定数

項 目	値, 推定式
熱伝導率	27 W/m°C
密 度	2300 g/cm ³
比 熱	1.155 kJ/kg°C
断熱温度 上昇量	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma(t-t_{0,Q})})$ $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量 (°C) Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C) γ : 断熱温度上昇速度に関する係数 t : 材齢 (日) $Q_{\infty} = a + b \times T_a$ $a = 17.5 + 0.113 \times C$ $b = -0.146 - 0.000308 \times C$ $\gamma = a + b \times T_a$ $a = -0.426 + 0.00207 \times C$ $b = -0.0471 + 0.0000188 \times C$ $t_{0,Q} = a \times e^{-b \times T_a}$ $a = 0.832 - 0.000531 \times C$ $b = 0.0482 + 0.000068 \times C$ T_a : 打込み温度 (°C) C : 単位セメント量 (kg/m ³)
熱伝達率	露出面, 鋼製型枠面: 14 W/m ² C 気泡緩衝シート: 6 W/m ² C

表-6 収縮応力解析に用いた解析定数

項 目	値, 推定式
圧縮強度	$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b \cdot (t_e - S_f)} f'_c(i)$ $f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e 日圧縮強度 (N/mm ²) $a = 21.9 - 3.94 \times (C/W)$ C/W : セメント水比 $b = 0.203 + 0.143 \times (C/W)$ $f'_c(i) = -17.6 + 25.2 \times (C/W)$ i : 28 日
引張強度	$f_{tk}(t_e) = 0.13 \times f'_c(t_e)^{0.85}$ $f_{tk}(t_e)$: 有効材齢 t_e 日引張強度 (N/mm ²) $f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e 日圧縮強度 (N/mm ²)
ヤング 係数	$E_e(t_e) = \Phi_e \times 6.3 \times 10^3 f'_c(t_e)^{0.45}$ $E_e(t_e)$: 有効材齢 t_e 日有効ヤング係数 (N/mm ²) Φ_e : クリープの影響を考慮するためのヤング係数の低減係数 最高温度到達有効材齢まで: 0.42 最高温度到達有効材齢+1日以降: 0.65
自己収縮	$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \times \varepsilon_{sh,\infty} \times \beta_{sh}(t_e)$ $\varepsilon_{sh}(t_e)$: 有効材齢 t_e 日自己収縮ひずみ (μ) η_c : セメントの種類が自己収縮ひずみの終局値に及ぼす影響を表す係数 $= 1.00$ (普通ポルトランドセメント) $\varepsilon_{sh,\infty} = 3070 \times \exp\{-7.2(W/C)\} + 50[1 - \exp\{-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{max} - 20)^4\}]$ T_{max} : コンクリート最高温度 (°C) $\beta_{sh}(t_e) = 1 - \exp\{-a_{sh}(t_e - t_{e,set})^{b_{sh}}\}$ $a_{sh} = 3.7 \times \exp\{-6.8 \times (W/C)\}$ $b_{sh} = 0.25 \times \exp\{2.5 \times (W/C)\}$ $t_{e,set} = 0.30$ W/C : 水セメント比
ポアソン比	0.2
線膨張係数	10 μ /°C

度が高く、大きい場合には危険度が低いなどと解釈される。

$$\text{ひび割れ指数 } I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_t(t) \quad (2)$$

$f_t(t)$: 材齢 t における引張強度
 $\sigma_t(t)$: 材齢 t における最大主引張応力

(2) 解析結果と考察

図-20に示す節点での相対湿度解析値と要素重心でのひび割れ指数解析値を以後の検討に用いることとした。

図-16 解析モデル

図-17 解析に用いた蒸発率

図-18 解析に用いた透湿率と湿気容量

図-19 解析に用いた乾燥収縮特性

相対湿度解析値と測定値を図-21に、図-22にひび割れ指数解析値を示す。また、図-23にひび割れ指数とひび割れ観察で得られた最大ひび割れ深さを、図-24にひび割れ指数とひび割れ密度を示す。これらより以下の知見、考察が得られる。

- 1) 図-21より、相対湿度測定点（節点a）の相対湿度解析値は測定値を概ね良好に表現していると考えられる。
- 2) 図-21、図-22より、供試体内外の相対湿度差に起因する内部拘束応力によって、材齢28日の封緘養生終了の後と、材齢189日の実験環境相対湿度が60%から40%へ変化した時点の後にて、コンクリートに大きな引張応力が発生すること、また、乾湿繰り返し環境下では、比較的レベルの高い繰り返し引張応力が発生することを、ひび割れ指数解析値が示していることが確認される。相対湿度解析値は表層（節点a 相対湿度測定点）のほうが供試体中心（節点b）よりも変動量が大いことから、主にコンクリート表層の相対湿度（水分量）の挙動が、

図-20 解析結果の抽出対象節点と要素

図-21 相対湿度解析値と測定値

図-22 ひび割れ指数解析値

ひび割れ指数の挙動に影響していると考えられる。

3) 初ひび割れ発生の判定値をひび割れ指数1.0以下、ひび割れの発生、進展、密度増加の挙動とひび割れ指数値の変化との対比を通じて、以後のひび割れ深さの増大や発生の判定値を同5.0以下と便宜的に設定すると、図-23より、表-7に示すように判定値に到達する要素の重心位置と最大ひび割れ深さは、ほぼ一致する。また、最表面側の要素Aのひび割れ指数が5.0以下となる経験回数を図-24に括弧付き数値で示すが、図-25が示すように、材齢105日、182日を除けば、経験回数の増加とともにひび割れ密度が増大するという関係に整理できる。

4) 前述の判定値のひび割れ指数値5.0は、解析にてコンクリートを線形連続体としたため、既存のひび割れの先端部位や、ひび割れが発生していない部位へのひび割れ

図-23 ひび割れ指数と最大ひび割れ深さ

図-24 ひび割れ指数とひび割れ密度

図-25 ひび割れ指数5.0以下経験回数とひび割れ密度

表-7 判定値到達要素重心位置と最大ひび割れ深さ

事象	判定値到達要素重心位置	観察による最大ひび割れ深さ
材齢28日 封緘養生終了後	表面から2.5mm (要素A)	3.5mm (図-23中の(1))
材齢189日相対湿度 60% → 40%変化後	表面から7.5mm (要素B)	8.0mm (図-23中の(2))

発生に伴う解放応力の再分配や応力繰り返しの影響を考慮できないことの影響を受けた代替的な値であると考えられる。その工学的解釈や汎用性等の関する詳細な検討が今後必要と思われるが、本解析にて求められたひび割れ指数は「実験その2」のコンクリート表層の微細ひび割れの発生、進展挙動を説明できていると考えられる。従って、前述2)の後半の知見より、透気係数に主に影響を及ぼすコンクリート表層の水分量の挙動が、微細ひび割れの発生、進展挙動に影響すると考えられる。更に、これが、ひび割れ密度が一定値以上になるとその関係性が変化する原因を除き、透気係数が大きいと微細ひび割れの密度が大きいう関係性を、また、深さに上限はあるが、透気係数が大きくと最大ひび割れ深さが深いという関係性をもたらすことの一因であると考えられる。

5. 結論

コンクリート表層の水分量（相対湿度および水分率）の測定、透気試験、ひび割れの観察および乾燥収縮解析の実施を通じ、以下のことが明らかとなった。

- 1) 既往の研究の知見と同様に、透気係数には、コンクリート表層の水分量が主に影響することが認められる。
- 2) 透気係数が大きいと、コンクリート表層の微細ひび割れの発生密度が大きく、深さに上限はあるが、最大ひび割れ深さが深いという関係性があることが認められる。
- 3) 透気係数に主に影響を及ぼすコンクリート表層の水分の挙動が、微細ひび割れの発生、進展挙動に影響することを乾燥収縮解析にて確認し、これが、透気係数と微細ひび割れの発生程度との間に、上記2)の関係性を間接的にもたらすことの一因であると考察される。
- 4) ただし、微細ひび割れのひび割れ密度が一定値以上になると、透気係数を増大させ、透気係数とひび割れ密度の関係性に变化を生じさせることが認められる。

今後の課題として、透気係数へ影響を与え始めるひび割れ密度、ひび割れ密度が影響を及ぼし始めた後のコンクリート表層の水分率と相対湿度分布の関係性やそれらが透気係数へ与える影響の検討などが考えられる。また、上記の1)から4)は、実験データの蓄積によるデータのばらつきについて検討を加え、透気係数と微細ひび割れの発生程度の関係が整理できれば、コンクリート表層の微細ひび割れの発生程度を概略的に推定する手法の確立に繋がる可能性があるものと推察される。今後もその可能性の追求のために研究を継続したいと考えている。

参考文献

- 1) 大塚浩司, 庄谷征美, 阿波稔: 蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響, 土木学会論文集, No.585/V-38, pp.98-111, 1998.
- 2) 長瀧重義, 氏家勲, 西岡耕一郎: 微細ひび割れを有するコンクリートの透気性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.187-192, 1987.
- 3) 荻野和彦, 氏家勲: ひび割れ部の透水性および透気性に影響を及ぼす要因に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.811-816, 2000.
- 4) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site, *Material and Structures*, Vol. 25, pp. 358-365, 1992.
- 5) 蔵重勲, 廣永道彦: 透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.225-232, 2009.
- 6) 栗塚一範, 角田晋相, 原田尚幸: コンクリートの乾燥収縮と透気係数の関係について, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, V-274, 2011.
- 7) 細田暁, 林和彦, 下田智也, 吉田早智子: コンクリート表層のマイクロクラックが表面の吸水性と透気性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.196-203, 2009.
- 8) 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.212-216, 2008.
- 9) 岩城圭介, 加藤淳司, 平間昭信, 塩谷智基: 微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.999-1004, 2004.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの初期ひび割れおよびひび割れ進展の解析方法, マスコンクリートソフト作成委員会報告書, pp.33-35, 2003.
- 15) CEB-FIP: CEB-FIP MODEL CODE 1990, pp.57-58, 1993.

(2014. 10. 20 受付)

STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN OCCURRENCE GRADE OF MICROCRACK DUE TO DRYING SHRINKAGE AND RESULT OF AIR PERMEABILITY TEST

Masato TERAZAWA, Osamu MAKISHIMA, Mariko KAWASATO
and Motoyuki SUZUKI

The result of air permeability test devised by R. Torrent is supposed to be affected by moisture content in surface layer of concrete. In this study, air permeability test, crack observation, and measurement of surface humidity were carried out under various humidity condition and drying shrinkage stress analysis were carried out. And the following knowledge have been obtained: moisture content in a surface layer of concrete influences the air permeability of concrete, occurrence grade of microcrack in concrete depending on the behavior of moisture content is related to air permeability of concrete, when density of microcrack becomes than a constant value, a change occurs in the relationship and so on.