

委員会報告 コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会

河野 広隆*1・野口 貴文*2・今本 啓一*3・綾野 克紀*4・真野 孝次*5・谷口 秀明*6・上野 敦*7・閑田 徹志*8

要旨: 本委員会は、平成 21 年度会長特別委員会「コンクリートの収縮問題検討委員会」が示した今後の課題のうち、いくつかについて検討を行った。収縮機構の解明と測定方法の検討を行う WG 1 では、コンクリート構成材料の収縮特性への影響に関する共通試験を行い、その成果としてコンクリートおよび構成材料の収縮評価方法に関する 3 つの試案を提案した。収縮がひび割れに及ぼす影響の調査を行う WG2 では、コンクリートの乾燥収縮ひずみの大きさと実構造物に生じるひび割れとの関係を主に検討し、その成果を(1)コンクリート供試体の収縮と実構造物におけるひび割れ、(2)乾燥収縮によるひび割れの評価方法の精度の現状、(3)収縮低減対策を行った効果の検証結果、に整理した。

キーワード: コンクリートの収縮, ひび割れ, 試験方法, 収縮低減対策

1. はじめに

コンクリートの収縮問題は長年にわたって議論されている課題であるが、近年、建築・土木の両分野で大きな動きがあり、コンクリート分野に大きな波紋を広げていた。すなわち、建築分野ではレディーミクストコンクリートの収縮を規定する基準が設けられたが、生コン業界ではその対応に苦慮していた。土木分野では大規模橋梁でコンクリートの収縮が一因とされるひび割れが発生し社会問題化した。コンクリート標準示方書での対応に明確な方向が打ち出せずにいた。そこで JCI では平成 21 年度に JCI 会長特別委員会「コンクリートの収縮問題検討委員会」¹⁾を設け、収縮の基準化について具体的な提案を行うことを目的に検討を行った。

そこでは、収縮に関する現状を把握し、日本建築学会と土木学会コンクリート標準示方書における収縮の取り扱いについて整理し、現状の試験方法・評価方法について考察を加え、収縮低減対策とその効果について概観

したものの、明確な対策の提案を行うには至らなかった。そして、その委員会報告¹⁾では、下記に示すような今後検討すべき課題を数多く示した。

- ①コンクリートの収縮がひび割れに影響を及ぼす各収縮因子の定量化
- ②コンクリートの収縮率を特定するための材料ごとの評価方法の必要性
- ③収縮のメカニズムの明確化
- ④コンクリートの収縮率の設計への反映方法
- ⑤コンクリートの収縮を基準化することの必要性の周知
- ⑥その他

本研究委員会は、上記の今後検討すべき課題の内、主に①～③の技術的な課題について、さらなる検討を加えるべく、2年間の期間を設定し活動を行った。

委員会の体制は、委員長、幹事(主査)を中心とした幹事会において運営方針を定め、実務としては WG 活

表-1 委員会構成

委員長	河野広隆 (京都大学)	オブザーバー	十河茂幸 (広島工業大学)
幹事	野口貴文 (東京大学)	綾野克紀 (岡山大学)	今本啓一 (東京理科大学)
	上野敦 (首都大学東京)	閑田徹志 (鹿島建設)	谷口秀明 (三井住友建設)
	真野孝次 (建材試験センター)		
委員	石川靖晃 (名城大学)	泉尾英文 (セメント協会)	菅俣 匠 (BASF ポゾリス)
	片平 博 (土木研究所)	後藤貴弘 (三菱マテリアル)	下村 匠 (長岡技術科学大学)
	城國省二・浅海順治 (全生工組連)	谷村 充 (太平洋セメント)	檀 康弘 (新日鐵高炉セメント)
	都築正則 (大林組)	三井健郎・井上和政 (竹中工務店)	宮澤伸吾 (足利工業大学)
	盛岡 実 (電気化学工業)	塚田哲生 (塚田陶管)	藤倉裕介 (フジタ)

*1 京都大学大学院 工博 (正会員)

*2 東京大学大学院 工博 (正会員)

*3 東京理科大学 工博 (正会員)

*4 岡山大学大学院 工博 (正会員)

*5 建材試験センター (正会員)

*6 三井住友建設 工博 (正会員)

*7 首都大学東京大学院 工博 (正会員)

*8 鹿島建設 工博 (正会員)

表-2.1 実験（共通実験）の内容

シリーズ番号, 名称	実験の内容
シリーズ1 粗骨材を破砕した細骨材を用いた検討	コンクリートの乾燥収縮率が既知の9種類の粗骨材を破砕した細骨材を検討対象として、その細骨材を使用したモルタル供試体の乾燥収縮率、圧縮強度、ヤング係数を測定した。また、骨材粒子の微細な径の細孔容積とモルタル及びコンクリートの乾燥収縮性状との関係を比較検討した。
シリーズ2 各種コンクリート材料を対象としたJISモルタルによる乾燥収縮共通実験	4種類のセメント、15種類の細骨材、6種類の混和材を検討対象として、JIS R 5201に準じてモルタル供試体を作製し、乾燥収縮率、圧縮強さ、ヤング係数を測定した。また、試験方法の標準化を考慮して、試験結果のばらつき、長さ変化の測定方法について検討した。
シリーズ3 各種コンクリート材料を使用したコンクリートの乾燥収縮共通実験	シリーズ2の実験結果を踏まえて、代表的な材料を選定し、それらの材料を使用した合計12配(調)合のコンクリートについて、乾燥収縮率、圧縮強さ、弾性係数を測定した。また、モルタルとコンクリートとの乾燥収縮試験結果の関係について比較検討した。

動を中心に行った。収縮機構の解明と測定方法の検討を行うWG1では、コンクリート構成材料の収縮特性への影響に関する共通試験を行い、構成材料の収縮評価方法に関する検討を行った。また、収縮がひび割れに及ぼす影響の調査を行うWG2では、コンクリートの乾燥収縮ひずみの大きさと実構造物に生じるひび割れとの関係を主に検討し、その成果を(1)コンクリート供試体の収縮と実構造物におけるひび割れ、(2)乾燥収縮によるひび割れの評価方法の精度の現状、(3)収縮低減対策を行った効果の検証結果、に整理した。WGの構成は、以下の通りであり、本報ではそれぞれの概要を述べるものである。

2. 収縮のメカニズムの解明と測定方法の検討

コンクリートに使用する材料の種類及び品質が硬化コンクリートの乾燥収縮性状に及ぼす影響の程度の把握、そのメカニズムの検討、さらに乾燥収縮性状に及ぼす影響の程度を評価する試験方法を標準化するための基礎資料（共通資料）を得ることを目的として、表-2.1のとおり、3つのシリーズの共通試験を実施した。なお、本報告書では、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に従って、又は準じて作製したモルタルを便宜上「JISモルタル」と総称する。

2.1 シリーズ1の検討

一般に、骨材はペーストの収縮を低減する機能を有する。本検討の結果では、図-2.1のとおり、コンクリートの乾燥収縮率は、モルタルの乾燥収縮率の約60%となっている。このコンクリートでの収縮率低減には、骨材粒

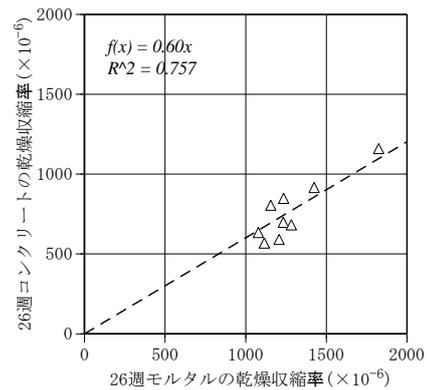


図-2.1 モルタルとコンクリートの収縮率の関係

径の影響と、骨材体積の影響の両方が含まれると考えられるが、骨材体積率はモルタルで0.58、コンクリートで0.67程度であるので、体積差だけが乾燥収縮率の差の要因になっているとは言えない。すなわち、粒径の大きな粒子の方が、媒体の収縮を拘束する効果が高いことがわかる。この傾向は、細骨材によるモルタルの乾燥収縮率への影響は顕著であるが、コンクリートの乾燥収縮率に対しては、細骨材の影響は小さく、粗骨材による影響が顕著としている既往の検討とも整合する。

2.2 シリーズ2および3の検討

セメント、細骨材、混和材料を試験試料として行ったJISモルタルの乾燥収縮試験結果を図-2.2及び図-2.3に示す。これらの図によると、JISモルタルの乾燥収縮率は、試験試料によって明確な差が認められる。従って、コンクリートを構成する材料の性能がコンクリートの

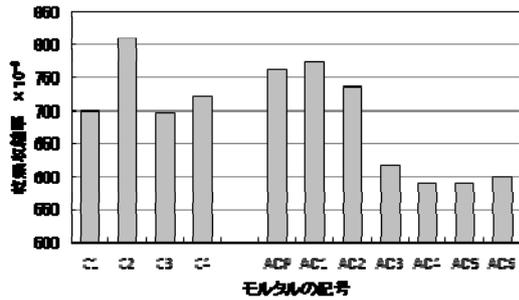


図-2.2 JIS モルタルによる収縮率(セメント・混和剤)

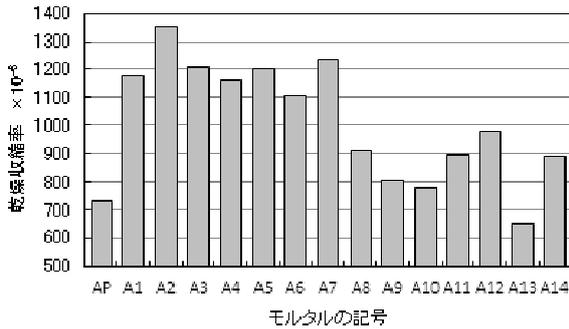


図-2.3 JIS モルタルによる収縮率 (細骨材種類)

乾燥収縮率性状に及ぼす影響の程度は、JIS モルタルの乾燥収縮率から評価することが可能と判断できる。

図-2.4 に、使用するセメントの製造会社が異なる場合のモルタルおよびコンクリートの乾燥期間 13 週までの乾燥収縮率を示す。図に示すように、製造 3 社の乾燥収縮率の範囲は、JIS モルタルで 118×10^{-6} 、コンクリートでは 52×10^{-6} であった。図-2.4 でのグレーのハッチングで示した既報の試験結果でも、JIS モルタルで 185×10^{-6} あった製造 12 社の範囲が、コンクリートでは 58×10^{-6} であった。両試験ともに、粗骨材の混入により、セメント製造社による影響が小さくなった。図-2.5 に示さ

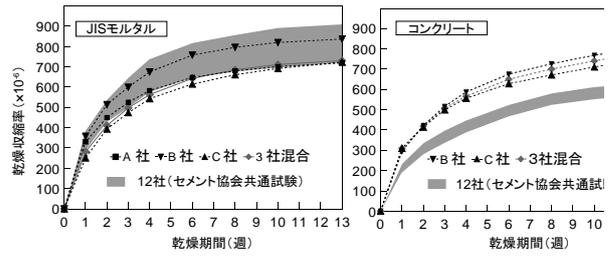


図-2.4 セメントペーストの収縮がコンクリートに及ぼす影響

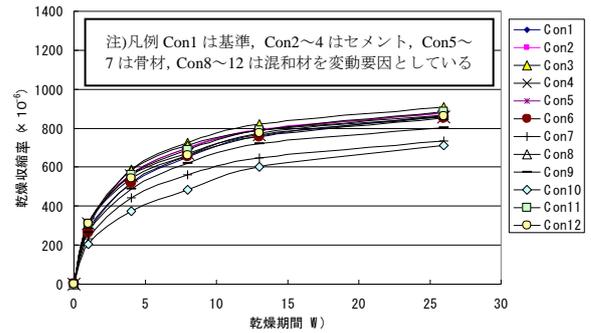


図-2.5 コンクリートの乾燥収縮率

るように、凡例 Con2~4 のセメント、Con5~7 の骨材、Con8~12 の混和材の種類によるコンクリートの乾燥収縮率は、JIS モルタルの試験結果と比較して小さくなる傾向がみられた。図-2.1 では、「細骨材よりも粗骨材の収縮抑制効果が大」を示すものであるが、図-2.5 は、JIS モルタル試験結果がコンクリートとしてどのようにふるまうかを示すものであり、この点を勘案して試験方法を運用することが望ましいと思われる。

2.3 メカニズムの検討

各細孔半径の範囲における相関係数を図-2.6 に示す。モルタルおよびコンクリートとも、細孔半径 150nm 以下

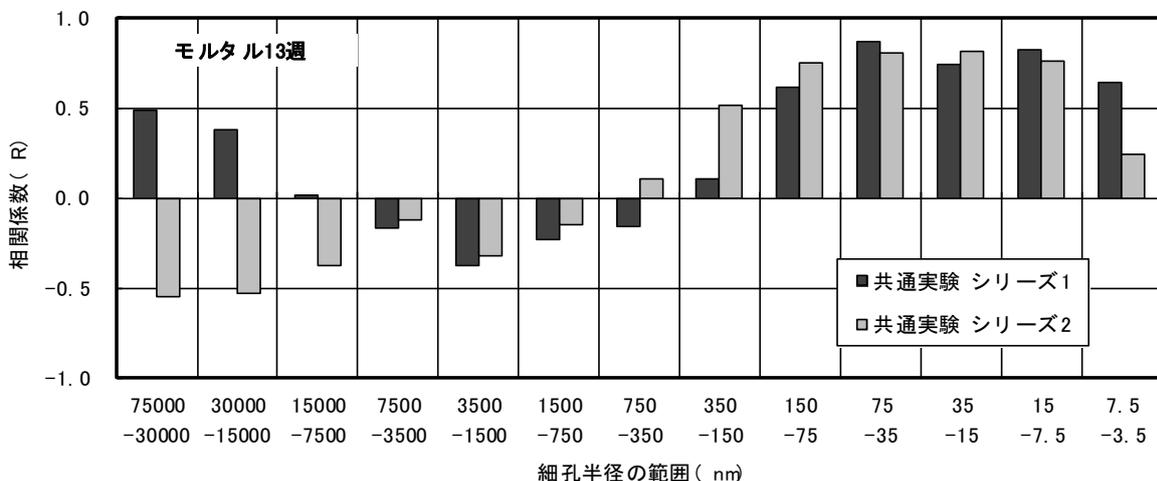


図-2.6 各細孔半径の範囲における相関係数 (モルタル)

において、比較的高い相関が認められた。一方、水蒸気吸着特性に着目して求めた骨材内部の比表面積についても、乾燥収縮率との間に高い相関が認められた。このことから、骨材中の微細な空隙がモルタルの乾燥収縮率に大きな影響を与えていると示唆され、これはモルタルおよびコンクリートの乾燥収縮率における毛細管張力（静水張力）の増大、分離圧の減少、または、両者の複合などの機構と同様であると考えられる。

3. 収縮がひび割れに及ぼす影響の調査

3.1 供試体と実構造物の収縮の相関

コンクリートの収縮の主たる成分である乾燥収縮は、コンクリート中からの水分の逸散によって生じ、その経時変化は構造物の周辺の温度、湿度等の環境条件、結合材や骨材等の使用材料の種類、コンクリートの配合および部材断面の形状寸法の影響を受ける。これらの要因を合理的に考慮して構造物中のコンクリートの収縮を算定するためには、コンクリート中の水分移動解析に基づき各部材のコンクリートの収縮を求めることが望ましい。ただし、コンクリート部材を棒部材と仮定し、コンクリートの乾燥収縮によって生じる変形を、平面保持の仮定が成り立つと仮定し簡易的に求める場合、例えば、7日間養生を行った 100×100×400mm の角柱供試体を用いて材齢 t に測定される乾燥収縮ひずみは、式 (3-1) に示される双曲線が用いられることが多い。

$$\epsilon'_{sh}(t, 7) = \frac{\epsilon'_{sh,inf} \times (t - 7)}{\alpha + (t - 7)} \quad (3-1)$$

コンクリートの乾燥収縮ひずみが拡散現象に伴う変形であるとすれば、理論的には、コンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値 $\epsilon'_{sh,inf}$ は、部材寸法によらず一定で、最終値に達するまでの時間が部材寸法の二乗に比例して長くなる。すなわち、材齢 t_0 に乾燥を開始する部材寸法が d mm の棒部材の乾燥収縮ひずみは、100×100×400mm の角柱供試体より測定される乾燥収縮ひずみの経時変化を表す乾燥収縮ひずみの最終値 $\epsilon'_{sh,inf}$ および経時変化を表す項 α を用いて、次式のように表される。

$$\epsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\epsilon'_{sh,inf} \times (t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \times \alpha + (t - t_0)} \quad (3-2)$$

図-3.1 は、式(3-2)を用いて、直径が 50mm および 75mm の円柱供試体より得られる乾燥収縮ひずみの経時変化を示したもので、実験室で用いられる寸法の供試体より求められる乾燥収縮ひずみは、拡散現象に伴う変形挙動を示すといえる。

しかし、実構造物においては、例えば、橋梁の上部工

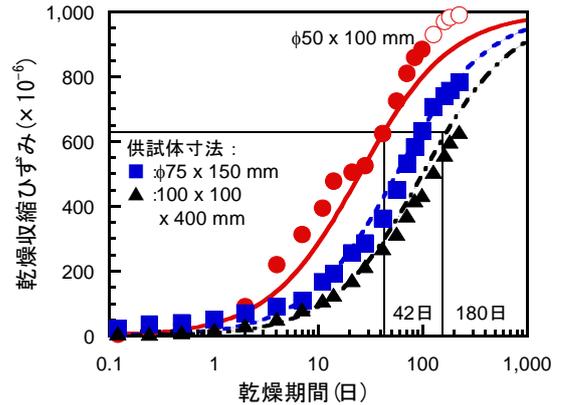


図-3.1 部材寸法の異なる供試体の乾燥収縮ひずみ

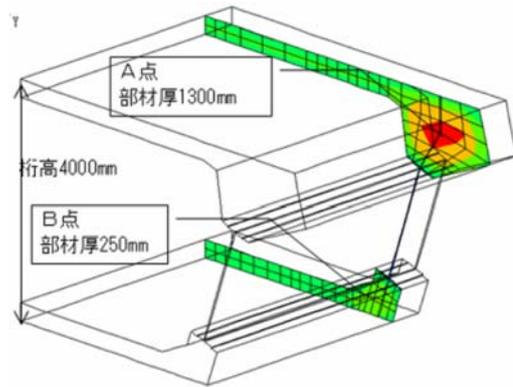


図-3.2 上部工の例

を夏に打設する場合には部材厚の条件によっては養生中のコンクリート温度が 80℃以上になる等、養生条件が必ずしも実験室とは同じではない。また、図-3.2 に示す同一部材の上部工であっても、上フランジと下フランジで実際に測定されたコンクリート温度は、20℃以上の差が生じている。このような養生中の温度が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を検討するために、図-3.3 に示す温度履歴を与えたコンクリートの乾燥収縮ひずみの結果が図-3.4 である。高い温度履歴を受けるほどコンクリートの乾燥収縮ひずみは小さくなっており、とくに、A 地点を想定した温度履歴を与えたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、20℃の恒温室中で養生を行ったものに比べて 6 割程度小さくなっている。

このように、実構造物のコンクリートは、そのコンクリートが受ける温度履歴等によって、実験室で用いられる供試体とは異なった条件で養生が行われるため、コンクリートの組織が異なり、100×100×400mm の角柱供試体を用いて得られる乾燥収縮ひずみと必ずしも同じにはならない。

3.2 ひびわれの評価方法

コンクリートの材料としての乾燥収縮率と構造物に発生するひび割れを結び付け、合理的なアプローチにて RC 構造物のひび割れ制御を目指すにあたり、構造物に実

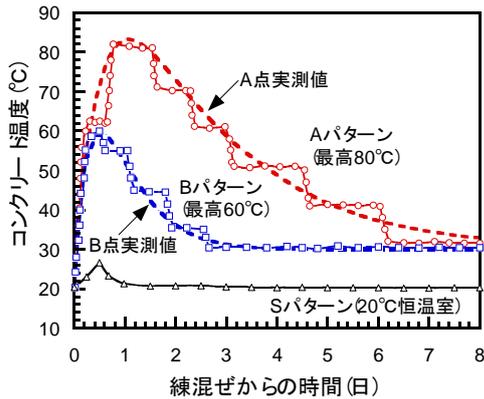


図-3.3 図-3.2に示す上部工での実測温度

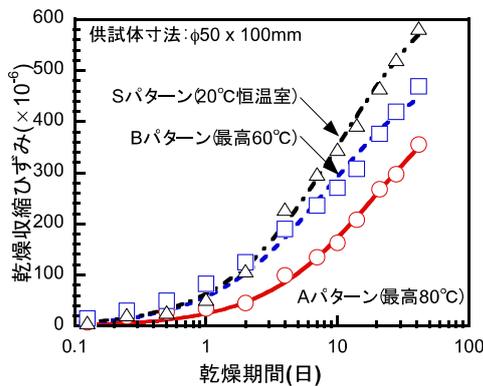


図-3.4 温度履歴が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響

際に生じたひび割れの発生状況を定量的に表現する必要がある。このような表現方法として、床や壁部材に生じたひび割れの幅と長さを実測し、ひび割れの見付け面積を部材の面積で除した値をひび割れ密度と定義し、ひび割れの多さの指標として利用する例等がある。

前記ひび割れ発生状況の指標として、ここではひび割れ係数 ϵ_{cr} を取り上げ、その物理的意味と定量的な指標としての妥当性について検討する。 ϵ_{cr} は、図-3.5に示すように、床や壁部材に生じたひび割れの幅を累積し、部材長さで除した値である。

図-3.6にRC部材の収縮によるひび割れ発生の様式図を示す。コンクリートの乾燥収縮により部材には自由収縮変形が発生する。この自由収縮変形が拘束されて拘束変形が生じ、この拘束変形は弾性変形とクリープ変形から構成される。ひび割れは、弾性変形に比例して発生する収縮拘束応力がひび割れ強度を上回ることによって生じることができると考えられる。さらに、ひび割れが発生した後は、収縮拘束応力が解放され部材に発生する応力が小さくなるとともに、発生前の拘束変形 l_{rs} は、クリープ分 l_{creep} を除きひび割れによる変位で代替されると考えられるから、ひび割れ幅の累積による変形を部材長さで除してひずみ表示とした ϵ_{cr} は以下のように表すことができる。

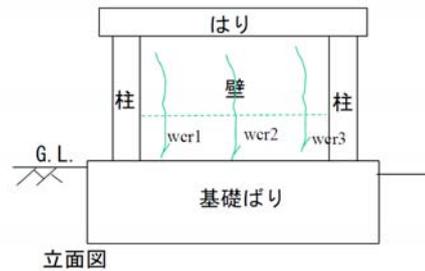


図-3.5 ひび割れ係数の概要

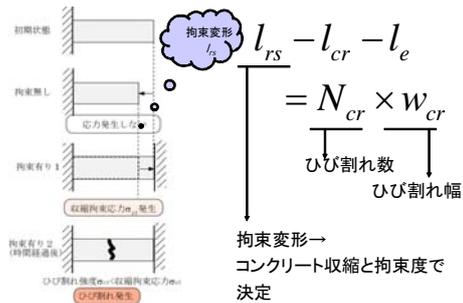


図-3.6 収縮拘束応力算定のための単純化モデル

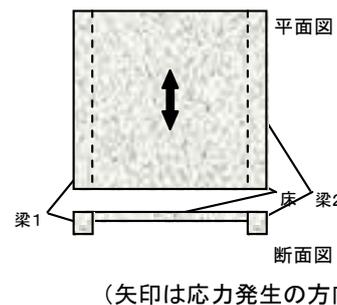


図-3.7 収縮拘束応力算定のための単純化モデル

$$\epsilon_{cr} \approx \frac{(l_{rs} - l_{creep})}{L} \quad (3-3)$$

式(3.3)の右辺は弾性変形に相当するひずみと考えると次のように表される。

$$\frac{(l_{rs} - l_{creep})}{L} \approx \epsilon_{sh} \times R / \phi \quad (3-4)$$

ここに、 ϵ_{sh} は部材の乾燥収縮ひずみ、 R は拘束度、 ϕ はクリープ係数である。さらに、上式の右辺は収縮拘束応力 σ_{st} の発現に寄与する弾性ひずみと等価であるので、次が成立すると考えることができる。ここに、 E_c はコンクリートの弾性係数である。

$$\frac{\sigma_{st}}{E_c} \approx \epsilon_{sh} \times R / \phi \quad (3-5)$$

これらの式から、 ϵ_{cr} が σ_{st} と正の相関関係にあることが類推され、また ϵ_{cr} の力学的な意味を明らかにしている。この ϵ_{cr} が、簡易的なひび割れ評価に用いられるひび割れ係数である。

表-3.1 検討対象の部材一覧および諸元

記号	調査対象物件		コンクリート条件					調査時の床部材乾燥収縮ひずみ ϵ_{sh} ($\times 10^{-6}$)
	物件概要	解析に供する構造条件	階数	呼び強度	W/C (%)	W (kg/m ³)	乾燥収縮率 ϵ_{sh} ($\times 10^{-6}$)	
A-1	物件 A 立体駐車場	フラットデッキスラブ スラブ: 160mm × 6000mm、 D13@150mm(ダブル) 鉄骨はり: 700-300-13-24(2本)	2F	24	53.0	171	545	195
A-2			3F	24	53.0	171	545	195
A-3			4F	24	53.0	171	545	195
A-4			5F	24	53.0	171	545	195
B-1	物件 B 生産施設	フラットデッキスラブ スラブ: 150mm × 13250mm、 D10@200mm(ダブル) 鉄骨はり: 596-199-10-15(3本) 800-358-16-28(2本)	2F	27	53.8	177	807	-
B-2			3F	27	53.8	177	807	-
B-3			4F	27	53.8	177	807	188
B-4			5F	27	53.8	177	807	188
C-1	物件 C 商業施設	山型デッキスラブ スラブ: 80mm × 8050mm、 D13@150mm、Φ@150mm 鉄骨はり: 588-300-12-20(1本) 600-300-12-22(2本)	3F1工区	27	54.1	176	749	315
C-2			3F2工区	27	54.1	176	749	277
C-3			4F1工区	27	54.1	176	749	303
C-4			4F2工区	27	54.1	176	749	285

表-3.2 ひび割れ調査および応力解析の結果

記号	ひび割れ調査結果		解析結果		
	調査材齢 (日)	ひび割れ係数 ϵ_{cr} ($\times 10^{-6}$)	収縮拘束応力 σ_{st} (N/mm ²)	収縮ひび割れ発生強度 σ_{cr} (N/mm ²)	応力強度比 σ_{st}/σ_{cr}
A-1	249	53	1.88	1.93	0.98
A-2	249	41	1.88	1.93	0.98
A-3	249	56	1.88	1.93	0.98
A-4	249	34	1.88	1.93	0.98
B-1	101	0	0.47	2.24	0.21
B-2	100	0	0.46	2.24	0.21
B-3	93	21	1.49	2.24	0.67
B-4	93	13	1.49	2.24	0.67
C-1	83	35	2.20	1.85	1.19
C-2	62	40	1.93	1.83	1.06
C-3	76	35	2.12	1.84	1.15
C-4	61	18	1.91	1.82	1.05

表-3.1 は、ひび割れ発生状況を定量的に表す指標としてのひび割れ係数の妥当性を検証するために、実際の床部材を対象に、コンクリートの乾燥収縮率を調査し、体積表面積率（以下、V/S）により部材の乾燥収縮ひずみの経時変化を算定した結果をまとめたものである。また、表-3.1の床部材について、ひび割れ調査と前述の収縮拘束応力の算定結果をまとめたのが表-3.2である。この表では、収縮拘束効力 σ_{st} をひび割れ強度で除した応力強度比で整理されている。なお、収縮拘束効力 σ_{st} は、拘束を受ける平面部材を、図-3.7に示すように一軸部材として単純化し、次により推定した。

$$\sigma_{st}(t) = \int \frac{E(t')}{(1 + \phi(t, t'))} \lambda(t') d\epsilon_f(t') \quad (3-6)$$

ただし、

$$\lambda(t') = \frac{d\epsilon_f(t') - d\epsilon_{total}(t')}{d\epsilon_f(t')} \quad (3-7)$$

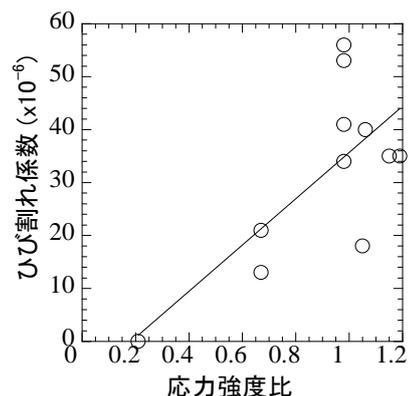


図-3.5 ひび割れ係数の妥当性

ここに、 $\sigma_{st}(t)$: 材齢 t における収縮拘束応力の予測値 (N/mm²)、 t : コンクリートの材齢(日)、 t' : 自由ひずみ変化が生じた材齢(日)、 $E(t')$: 材齢 t' におけるヤング係数 (N/mm²)、 $\phi(t, t')$: 材齢 t' で荷重された材齢 t におけるクリープ係数、 $\lambda(t')$: 材齢 t' における拘束度、 $d\epsilon_f(t')$: 材齢 t' における自由ひずみ (= 温度変化によるひずみ + 収縮ひずみ) の変化率、 $d\epsilon_{total}(t')$: 材齢 t' における全ひずみ (= 自由ひずみ - 弾性ひずみ - クリープひずみ) の変化率である。

収縮ひび割れの発生について支配的な影響を及ぼす構造体コンクリートの収縮拘束応力 σ_{st} と、簡易的なひび割れ評価に用いられるひび割れ係数 ϵ_{cr} を比較したのが、図-3.6である。解析による収縮拘束応力を基に求められた応力強度比と、ひび割れ調査から得られたひび割れ係数の間には一定の相関がある。すなわち、ひび割れ係数は、簡易的な手法ではあるが、ひび割れ発生メカニズムと力学的に関連付けられ、ひび割れ発生状況を定量的に表す指標として妥当性なものと考えられる。

4 まとめ

収縮機構の解明と測定方法の検討を行う WG1 では、コンクリート構成材料の収縮特性への影響に関する共通試験を行い、その成果としてコンクリートおよび構成材料の収縮評価方法に関する試案を提案する予定である。乾燥収縮がひび割れに及ぼす影響の調査を行う WG2 では、コンクリートの乾燥収縮ひずみの大きさと実構造物に生じるひび割れとの関係を主に検討し、その成果を、(1)コンクリート供試体の収縮と実構造物におけるひび割れ、(2)乾燥収縮によるひび割れの評価方法の精度の現状、(3)収縮低減対策を行った効果の検証結果で整理を行っており、本報告では、その一部を紹介した。

参考文献

- 1) JCI: 「コンクリートの収縮問題検討委員会」報告書 2010.03