

委員会報告 耐久性力学に基づく収縮影響評価研究委員会

佐藤 良一*1・下村 匠*2・氏家 勲*3・丸山 一平*4・半井 健一郎*1・小室 努*5・石田 哲也*6

要旨: 近年、コンクリートの収縮問題が、骨材自体の収縮やコンクリートの過大収縮の視点から活発に議論されているが、過大収縮がコンクリート構造物に及ぼす作用や性能に及ぼす影響などについてはほとんど検討されていない。そこで本委員会では、JCI-TC-061Aの耐久性力学WGで新たに提唱した耐久性力学による体系化手法に基づき、国内外の研究論文や設計法を材料と構造の連成問題として分析し、コンクリートの収縮が構造物の構造・耐久性に及ぼす影響を取りまとめた。これにより、今後の研究の方向性の設定や設計法の再構築に資することを目的とした。

キーワード: 収縮, 耐久性力学, 連成問題, 構造性能, 耐久性, 物理化学モデル

1. はじめに

1.1 委員会の設立趣旨および構成

PRC 高架橋における多数のひび割れ発生と変形問題¹⁾が明らかになって以後、近年、コンクリートの収縮問題が、骨材自体の収縮やコンクリートの過大収縮の視点から活発に議論されている。最近では、PC 構造においても過大な乾燥収縮が原因と推定されるひび割れの発生も報告されている²⁾。これらを契機に、設計上のコンクリートの収縮の扱いが土木学会のコンクリート標準示方書や建築学会のJASS5で規定されるとともに、精力的な研究が進められてきた。JCI においても、会長特別委員会「コンクリートの収縮問題検討委員会」が設置され、コンクリートの乾燥収縮の現状に関する調査結果の整理や収縮試験結果の評価方法の検討などが行われた³⁾。その後、「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 (JCI-TC-102A)」が、本委員会と同時期に設置され、コンクリートの収縮メカニズムや構成材料ごとの評価方法の検討などが継続して進められている。しかし、過大収縮がコンクリート構造物に及ぼす作用や性能に及ぼす影響などについての研究はこれまでほとんどなく、今後、これらの体系的な検討が必要になると考えられた。

そこで、「セメント系材料の時間依存性挙動に関する研究委員会 (JCI-TC-061A)」の耐久性力学WGで新たに提唱した耐久性力学による体系化手法^{4),5)}に基づき、国内外の研究論文、設計法を、材料と構造の連成問題として分析し、コンクリートの収縮が構造物の構造・耐久性に及ぼす影響を取りまとめ、今後の研究の方向性の設定や設計法の再構築に資することを目的とし、本委員会が設立された。

本委員会の構成を表-1 に示す。コンクリートの過大な収縮がコンクリート構造物の性能へ及ぼす影響に関して、構造物の力学的性能への影響を扱う構造WGと耐久性への影響を扱う材料WGを組織した。構造WG(下村主査)では、体積変化が構造性能に与える影響について、現象理解、モデル化、設計式の観点から検討を行うこととし、特に、ひび割れ幅、変形やせん断耐力への影響に関する調査研究を行った。材料WG(氏家主査)では、収縮ひび割れを含むコンクリートのひび割れが耐久性に与える影響について、現象理解、モデル化の観点から検討を行うこととし、特に、物質移動や鉄筋腐食に着目した調査研究を行った。

表-1 委員会構成

委員長:佐藤良一(広島大学) 副委員長:下村匠(長岡技術科学大学) 幹事:丸山一平(名古屋大学), 半井健一郎(群馬大学)
【構造WG】 主査:下村匠(長岡技術科学大学), 副査:小室努(大成建設) 委員:小林薫(JR東日本), 佐藤靖彦(北海道大学), 高橋典之(東京大学), 中村光(名古屋大学), 長谷川俊昭(清水建設), 平喜彦(三井住友建設), 福原武史(竹中工務店), 三木朋広(神戸大学), 溝渕利明(法政大学), 丸田誠(島根大学), 宮澤伸吾(足利工業大学), 兵頭彦次(太平洋セメント)
【材料WG】 主査:氏家勲(愛媛大学), 副査:石田哲也(東京大学) 委員:今本啓一, 兼松学(東京理科大学), 佐伯竜彦(新潟大学), 親本俊憲(鹿島建設), 林和彦(横浜国立大学), 丸屋剛(大成建設), 山路徹(港湾空港技研)
協力委員:青木優介(木更津高専), 鈴木雄大(JR東日本), 鈴木雅博(ピーエス三菱), 谷村充(太平洋セメント), 千々和伸浩(東京大学), 寺西浩司(名城大学), 細田暁(横浜国立大学), 李柱国(山口大学)

*1 広島大学大学院 工博 (正会員)

*3 愛媛大学大学院 工博 (正会員)

*5 大成建設(株) 工博 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 博士(工学) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 博士(工学) (正会員)

*6 東京大学大学院 博士(工学) (正会員)

なお、本委員会で研究対象としたコンクリート材料の体積変化と構造性能の連成問題は、複雑な現象を扱うもので研究の歴史も比較的浅い。そのため、10年後のコンクリート工学における、新しい学術・技術分野を構築することを目指して調査研究活動を行った。また、平成23年8月に中間ワークショップを開催し、2件の基調講演、1件の招待論文発表、12件の一般論文発表、7名のパネリストを迎えてのパネルディスカッションにより、本委員会の意義や課題の整理を行い、最終報告書の作成に反映した。

1.2 耐久性力学による収縮問題へのアプローチ

JCI-TC-061Aの耐久性力学WGで定義されたコンクリート構造物の耐久性力学^{4),5)}は、コンクリート材料および構造の時間依存性挙動を体系的に予測および評価するための学問体系のひとつである。すなわち、化学反応、環境作用および外荷重によるセメント系材料の物理化学的劣化現象の経時変化を、反応、物質移動、破壊、およびこれらの複合現象に関する物理化学モデルで記述し、コンクリート材料に関する構成則を構築することにより、コンクリート構造物の時間依存性挙動を予測することを可能とする学問体系である。

コンクリートの過大収縮の構造物への影響評価に関し、本委員会の調査研究活動において対象とした課題の概要および本報告書における該当箇所を図-1に示す。乾燥収縮や水和熱等によって生じたコンクリートの体積変化が拘束されることによって応力が発生し、その値が破壊基準を超えることでコンクリートに損傷が発生する。発生したひび割れの幅や密度、蓄積された応力によって、構造物の構造性能や耐久性が変化する。ここでは、温湿度や荷重などの外部条件の作用も影響している。

本委員会の活動では、コンクリート構造物におけるマクロな現象を支配していると考えられる物理化学現象の抽出や工学的な設計式のバックデータを供給する実験における要因分析などを試みることで、従来の検討よりも一段踏み込んだ考察や議論を目指した。ただし、詳細な検討に必要な情報が十分に得られないこともあり、この取り組みは道半ばであって、現在も検討を継続中である。今後の継続的な発展のための検討の出発点にあることをご理解いただきたい。なお、継続検討中の課題に関しては、2012年10月3日に開催する成果報告会での発表を予定している。

2. コンクリートの収縮による応力蓄積と損傷

2.1 収縮による構造物の初期ひび割れ

コンクリートの収縮が構造物に及ぼす影響として重大なことのひとつは、ひび割れの原因となることである。



図-1 収縮問題への耐久性力学的アプローチ

(【 】内の数値は本報告書の章節番号と対応)

乾燥収縮による構造物のひび割れは、コンクリート中の水分移動解析、水分の逸散に伴う構造物の収縮応力解析およびひび割れの発生・進展解析を行うことにより予測される。しかし、数学問題としては類似性のあるマスコンクリート構造物の温度ひび割れ予測と比べて、一般化された具体的な方法は存在しない。本委員会では、以下の観点から検討を行った。

(1) 数値解析による構造物の収縮ひび割れの予測

構造物の収縮ひび割れを数値解析により予測する際のいくつかの技術的な課題のうち、クリープを考慮した時間依存性応力解析、ひび割れ進展解析に焦点を当てた検討を行った。

乾燥収縮は、乾燥開始直後の表面部を除けば、ゆっくり進行するので、収縮応力を正しく評価するにはクリープの考慮が不可欠であるが、構造物の応力解析においてクリープを考慮する方法は、クリープモデルの違い、数学的解法の違いなどにより種々ある。複雑な計算を避けるために、有効弾性係数を時間の関数として用いるなど近似的な解法が用いられることも多い。

委員会報告書においては、応力履歴を積分したクリープ解析を概説している。さらに収縮ひび割れは、最初のひび割れの発生が発生した時点で終わるのではなく、ひび割れの進展、複数のひび割れの発生が認められる場合がある。これらを考慮した解析法を整理した。

(2) 温度ひび割れ予測における自己収縮、乾燥収縮の取り込み

マスコンクリートの温度応力にも自己収縮が拘束されることによる応力が複合することが知られている。自己

収縮を考慮することにより、応力の算定精度が向上するだけでなく、ひび割れ発生部位やひび割れ方向など、説明可能となるマスコンクリートのひび割れがあることが示されている⁹⁾。

また、部材厚さによっては、セメントの水和に起因した温度応力と乾燥による乾燥収縮応力の双方が発生し、複合してひび割れの原因となることがある。

(3) 棒部材・壁部材の収縮応力評価に基づくひび割れ予測

収縮ひび割れは、薄い部材、構造物中でも梁、壁などで表現可能な部位に生じることが多いので、解析次元、境界条件を簡略化した応力解析によりひび割れ発生の危険度を評価する方法もある。

(4) 橋梁に生じたひび割れの分析

コンクリートの収縮が原因のひとつとして生じた橋梁のひび割れ事例は後を絶たない。事前解析によりひび割れの発生が精度よく予測されるようになれば、設計、施工段階でひび割れが生じないように対策を講じることができる。しかし、そこまで技術は進歩していないのが実情である。

実構造物のひび割れ予測を行うには、現実起こったひび割れについて、形態、位置、程度などが説明できなければならない。実構造物では、影響因子が多数ある。たとえば橋梁の上部工では、コンクリートの収縮特性のみならず、部材寸法、厚さ、配筋、PC シースの配置、それによるコンクリート断面の欠損、施工順序、施工時の荷重、プレストレス、各部位の乾燥条件などが影響する。委員会では、一般の設計では想定し得ないひび割れ損傷を生じた実 PC 上部工をはじめとして、いくつかの事例について検討を行い、影響因子について仮説を立てたが、検証に至っていない。今後の検討課題である。

2.2 RC・PRC 構造のひび割れ幅に及ぼすクリープ・収縮の影響

構造物によっては、ひび割れが発生してもただちに必要とする性能が損なわれるわけではない。RC・PRC 構造では、ひび割れが発生しないことを要求性能とするのではなく、供用中に生じるひび割れ幅を性能に支障がない範囲に抑える性能確保の考え方が従来とられている。そのため、ひび割れ幅算定手法は、構造物の設計計算において重要な役割を果たしている。供用中の構造物のひび割れ幅の経時変化には、収縮とクリープが影響するので、その影響を適切に考慮してひび割れ幅算定法に反映することが研究課題となっている。

(1) ひび割れ幅に及ぼす収縮の影響に関する既往の研究

鉄筋コンクリートのひび割れ幅に関する研究は、これまで数多く行われており、その中で収縮・クリープの影

響についても検討されている。

石橋らは、脱枠・支保工撤去によりひび割れが発生して以降、ひび割れ間のコンクリートを自由体とみなして収縮ひずみを求め、ひび割れ幅算定式に用いる方法を提案している(図-2)⁷⁾。その後、関らによりひび割れ間のコンクリートの収縮が結果的に自由収縮と同程度となるのは、ひび割れ近傍のコンクリートの収縮が大きいことによりもたらされていることが、室内実験により明らかにされた⁸⁾。

ひび割れ幅に及ぼす収縮・クリープの影響は同時に論じられることが多いが、クリープの影響が意味する内容は収縮の影響ほども明確ではない。曲げ部材の圧縮側のクリープ、ひび割れ間のコンクリートの引張クリープ、鉄筋とコンクリート間の付着の経時的な低下(付着クリープ)が考えられるが、それぞれひび割れ幅に影響するメカニズムが異なることに注意すべきである。

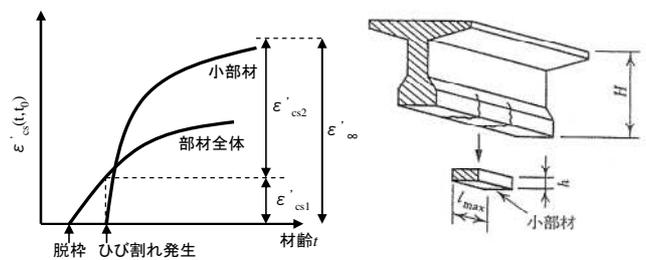


図-2 ひび割れ間のコンクリートの収縮の評価方法⁷⁾

(2) 近年の実験、解析による検討

設計上の指標としても、その後の劣化過程の予測の前提としても、構造物のひび割れ幅を正しく予測する必要性は高いので、現在も多くの研究が続けられている。委員会報告書では、委員により実施された実験的研究⁹⁾、解析的研究¹⁰⁾を紹介している。

3. コンクリートの収縮が構造性能に及ぼす影響

3.1 道路・鉄道構造物の変形と応力に及ぼすクリープ・収縮の影響

土木分野では、橋梁等の道路構造物・鉄道構造物の設計において、コンクリートの収縮、クリープの影響が随所で様々な形で考慮されてきた。現在の設計基準に継承されている方法や数値の中には、定められた経緯が不明な事項もある。

たとえば、土木学会コンクリート標準示方書など土木分野におけるいくつかの設計規準では、ラーメン構造などにおいて収縮による不静定力を弾性解析により求める際に、収縮の値を 150μ とすればよいことが記されている。これは昭和6年の最初の土木学会示方書に「収縮の影響を考慮する必要ある場合には、之を温度低下

15°Cに相当する影響あるものと設定すべし」と規定され、これが現在まで継承されているものである。この 150 μ という値は、クリープによる応力緩和を見込んだ応力を、クリープ解析を行うことなく簡易な弾性解析において算定するための収縮の入力値であるので、仮想的な値であって、実際に自由収縮供試体の収縮ひずみがこの値になるというわけでない。また、本来、部材断面の収縮は、コンクリートの配合、断面寸法、環境条件、配筋、乾燥開始材齢により変わるが、諸条件が標準的な範囲内ではこの値を用いてよいものと考えられる。

収縮の値を 150 μ と設定することに不都合はなく、むしろこの値が長らく用いられてきた実績がある。しかし、この値で構造物の重要な諸元が決まることがあるので、その根拠、適用範囲について明らかにしておかなければならない。不静定構造物の応力、ひび割れ幅における収縮・クリープの影響はとくに鉄道構造物において系統的に実測され、検討が行われている^{11),12)}。

3.2 PC 橋の長期変形に関する近年の問題

収縮、クリープが関連する構造問題で、近年、世界中の研究者が注目している問題として、PC 橋の長期たわみがある。断面の平均ひずみを算定する設計用収縮予測式、クリープ予測式を用いて計算した数年～数十年の長期たわみは、用いる予測式によって異なること、いずれの予測式も長期の実測値を精度よく再現できないことが明らかとなっている。その原因は次のように考えられている。

張出施工により順次施工を行った PC 橋の場合、セグメントにより載荷時期が異なるために、たわみにはクリープの終局値だけでなく、進行曲線が影響する。進行曲線はクリープ予測式によりかなり異なる。また、これらの PC 橋の断面は箱型断面であり、上床板、下床板、ウェブ、それぞれの内外面の温度、湿度条件が異なるので、棒材の軸方向平均ひずみを算定対象とする設計用の収縮予測式、クリープ予測式では、精度のよい予測が得られない。主として、プレストレスロスや 1, 2 年の短期の挙動を計算対象とした、収縮予測式、クリープ予測式が抱える宿命的な問題でもある。

これらを克服し、精度のよい長期たわみの予測を行うために、構造物内の水分の移動、熱移動を実条件に応じて考慮し、精度のよい収縮モデル、クリープモデルを組み込んだマルチスケール構造解析手法の適用が試みられている¹³⁾。

3.3 コンクリートの収縮が建築構造に及ぼす影響

コンクリートのクリープや乾燥収縮が建築構造の変形や応力に及ぼす影響を主に取り上げ、建築の基・規

で、ひび割れや変形がどのように扱われているのか、収縮が建築架構の応力や地震応答に影響するのかを示す。また、近年、超高層建築に使用されている超高強度コンクリートにおける収縮やクリープの問題、CFT 構造に代表される複合構造における収縮の課題等を示す。

(1) 建築の基・規準における長期荷重に対するひび割れ幅・変形の扱い

建築基準法では、RC 系構造に関し、明確なひび割れ幅の記載はない。日本建築学会「プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種 PC) 構造設計・施工指針・同解説(1986)」では、最大ひび割れ幅を、環境条件・作用応力条件に応じて 0~0.2mm の値を示している。また、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2010)」(以下、RC 規準)では、鉄筋の長期許容応力度を定め、間接的にひび割れ幅の増大を防いでいる。ひび割れ幅の制限値として、建物外面では 0.2~0.25mm、建物内面では 0.3~0.4mm と考えている。せん断に関しては、せん断ひび割れを部材に生じさせないことを原則とするが、梁では鉄筋の寄与項を有する長期許容せん断力式を用いてもよいこととしている。RC 規準では、梁や床スラブの曲げ部材の長期たわみの限界値を決めるべきと記述している。床スラブのたわみの限界値を $l_x/250$ とし、床スラブの厚さ算定式を明記している。床スラブの長期載荷実験による長期たわみの実態把握の研究から、長期たわみ量 δ_L は弾性たわみ δ_e に対して両端固定の場合 12~16 倍、単純支持の場合 6~12 倍としている。また、RC 規準付 7.7 では長期たわみの予想式を示している。

(2) 不静定応力の評価および地震応答への影響

青山は¹⁴⁾、温度応力・収縮などに起因するラーメンの自己歪応力の算出法について、節点における力のつり合いから、ラーメンの自己歪応力の算出法を提案した。また、自己ひずみを生じた柱梁架構において、全体崩壊型が保証されている場合では大きな影響は無いが、局部崩壊に対しては自己ひずみ応力が大きな影響を与えることがあることを指摘した。さらに自己ひずみは剛性に大きな影響があることを指摘して、剛性低下の評価式を提案するとともに、単純梁及び架構試験体の静的載荷実験結果との比較によりその手法の実用性を検証した。

RC 系構造物において、乾燥収縮およびクリープによる不静定モーメントがひび割れモーメントを上回る可能性がある。乾燥収縮およびクリープによる不静定モーメントが部材にひび割れを生じさせ、部材剛性を低下させる場合、架構全体の地震応答に影響を与えることがあると考えられる。

(3) 超高強度コンクリートの収縮とクリープ

都市部を中心に超高層集合住宅建築が増加し、Fc100 以上の超高強度コンクリートは、40~50 階クラスの超

高層建築の大きな軸力を支持する低層階柱に適用されてきている¹⁵⁾。超高強度コンクリートを用いた RC 柱を、超高層建築物の低層階に使用する場合、軸応力度を高く設定する場合が多く、軸ひずみは大きなものとなる。そのため、設計において長期圧縮性状を適切に見積もり、設計に反映させることは非常に重要となってくる。また、超高強度コンクリートでは、自己収縮に起因して、内外コンクリートのひずみ差や鉄筋による拘束によってひび割れが入ることが知られている¹⁶⁾。これらの現象が構造部材に影響を及ぼす可能性があることが指摘されている¹⁷⁾。

(4) 複合構造における課題

高層建築物に CFT 構造が利用される例が増えてきている。特に最近では、超高強度鋼と超高強度コンクリートを併用した例も見られる。材料の高強度化は性能を向上させるが、一方で自己収縮を考慮すると、鋼管とコンクリートの一体性への影響が懸念される。CFT 構造では、現状のところ、充填されたコンクリートの収縮問題を加味したうえで実構造物における荷重分担状況は明快にされておらず、当面は構造実験やモニタリングによる確認や、自己収縮を前提としたディテールの工夫を実施する等、実務上の対応が重要と考えられる。

3.4 構造物の終局耐力に及ぼすコンクリートの収縮の影響とその評価

従来、コンクリートの収縮は、構造物のひび割れ、変位・変形、プレストレスロスへの影響がほとんどで、構造物の終局状態への影響は大きくないと考えられてきた。実際、鉄筋コンクリートの曲げに関しては、コンクリートの収縮は、曲げひび割れ発生荷重、初期剛性には影響するが、終局状態では収縮の影響は消失し、終局耐力、終局変形にはあまり影響を及ぼさないことが確認されている。

しかしながら、近年佐藤らにより、鉄筋コンクリート部材中で高強度コンクリートの自己収縮が鉄筋に拘束された場合、せん断ひび割れ発生荷重 (V_c) が低下することが明らかにされ (図-3)、コンクリートの収縮は終局荷重にも無視できない影響を及ぼす場合があることが指摘されている¹⁸⁾。

前川らは、佐藤らの実験にみられたコンクリートの収縮による RC 部材のせん断耐力の低下を数値解析により再現することに成功している¹⁹⁾。

4. コンクリートの損傷が耐久性に及ぼす影響

材料 WG ではコンクリート自身の収縮がコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響を評価することを目的としていたが、収縮が直接的に劣化現象に関係する事例が

見当たらないため、収縮が原因となる、あるいは収縮によって増大する損傷の一つであるひび割れを取り上げ、ひび割れがコンクリート中の物質移動、鉄筋腐食および凍害に及ぼす影響について、既往の研究事例を整理して取りまとめた。

4.1 ひび割れが耐久性に及ぼす影響についての海外の研究動向

コンクリートのひび割れと耐久性の研究の歴史は古いが、ここでは、比較的最近の海外の取り組みとして RILEM TC 214-CCD (Concrete cracking and its relation to durability: Integrating material properties with structural performance) の活動の、2012 年段階での状況について報告する。本 TC の委員長は米国パデュー大学の Jason Weiss 教授、幹事はデンマーク工科大学の Mette Geiker 教授が務めている。2006 年にキックオフミーティングがカナダのケベックで開催され、以降、年に一回程度委員会が開催されている。State-of-the-art-report の内容として、ひび割れ形成のモデルとひび割れ部における物質移動に関するモデルの紹介や許容ひび割れ幅などの各国比較なども予定されており、現在、その完成に向けて活動が進められている (図-4)。

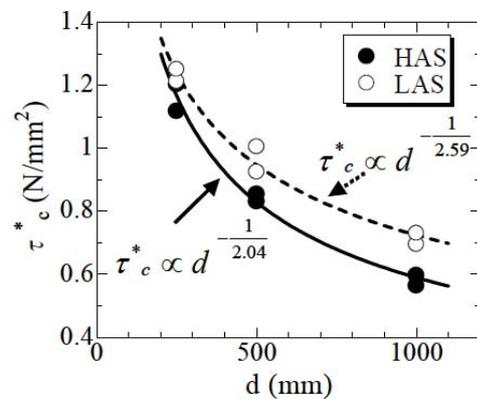


図-3 収縮がせん断耐力に及ぼす影響¹⁸⁾
(HAS : 高収縮, LAS : 低収縮)

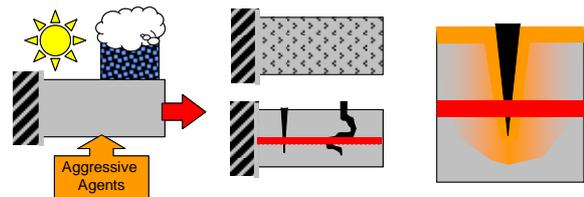


図-4 TC が焦点を当てるひび割れと耐久性の関連図

(2008 年 TC 会議の議事録から引用)

4.2 コンクリートのひび割れが物質移動に与える影響とその評価

(1)内部ひび割れが鉄筋腐食に与える影響

鉄筋コンクリートの引張部の異形鉄筋周辺に内部ひび割れが発生することは周知の事実である²⁰⁾。この内部ひび割れは鉄筋とコンクリートとの付着特性に影響を及ぼすことに加え、かぶりコンクリートの密実性を低下させる²¹⁾。かぶりコンクリートの密実性の低下は酸素や水分などの鉄筋腐食因子の侵入を容易にすることから、鉄筋腐食を促進することが考えられる。そこで、塩化物の混入量を変化させた両引き供試体を作製し、腐食促進試験に供し、内部ひび割れの有無により鉄筋腐食に与える影響を検討した。図-5 は分極抵抗法を用いて測定した鉄筋腐食速度を示す²²⁾。一例ではあるが、引張力を作用させ、内部ひび割れを発生させた場合に鉄筋腐食速度が大きくなる結果が得られた。図中の回帰線は既往の研究による腐食速度予測式²³⁾によるものである。

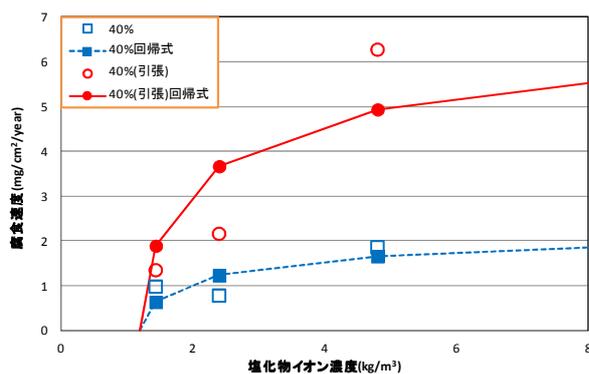


図-5 鉄筋腐食速度に及ぼす内部ひび割れの影響²²⁾
(W/C=40%, 引張力の作用の有無の検討)

(2) 物質移動に及ぼすひび割れの影響の数値解析

微視的な空隙から構成されるセメント硬化体のマトリックス部と比較して、ひび割れ部では物質移動が加速される。数値解析モデルを用いた既往研究では、マトリックス部とひび割れ部における移動現象を各々モデル化し、両者を組み合わせることで、ひび割れを有するコンクリートの物質移動現象を取り扱うものが多い。平均ひび割れひずみによってひび割れ部の水分流束を評価するもの²⁴⁾、ひび割れ幅に応じて拡散係数の増大を表現するもの²⁵⁾などがある。ひび割れ幅、ひび割れ間隔、あるいは平均ひび割れひずみと、水分、気体、イオンそれぞれの物質移動速度の定量関係については、未だ一定の見解が得られていない。ひび割れ部において水蒸気や気体の移動が卓越する問題か、常に浸潤した状態でイオンの移動が生じる問題か、また乾湿繰り返し条件下で水分移動が主となるのかなど、ひび割れ部での移動機構が条件に

よって各々異なるため、マトリックス部と比べて加速の程度が異なるためと考えられる。ひび割れの形状を離散的に取り扱うモデル^{26),27)}、あるいはナノからミリまでの幅広い空隙分布を取り扱う手法²⁸⁾も近年提案されており、今後、微視的機構に基づく精度の高い定量評価手法の構築が期待される。

4.3 コンクリートのひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響

(1)かぶりの影響を含めたひび割れ部での鉄筋腐食の検討

ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食性状は、ひび割れ幅の影響を受けることが多くの実験や調査から確認されているが、腐食量をひび割れ幅のみで評価できないこともよく知られている。腐食に影響するひび割れ幅以外の要因は数多くあるが、特に影響が大きいと考えられているのがかぶりである。

神山は、ひび割れ幅とかぶりの影響が鉄筋腐食に及ぼす影響を同時に評価する指標として、[ひび割れ幅/かぶり²]を提案している²⁹⁾。この指標を他の研究者の実験、調査結果³⁰⁾⁻³⁴⁾に適用し、その有効性について検討した。その結果、かぶりが同一であれば腐食量はひび割れ幅のみで腐食量を評価可能であるが、かぶりが大きく異なる場合の評価には、[ひび割れ幅/かぶり²]が有効であることが確認できた。このことから、[ひび割れ幅/かぶり²]は腐食の進行に影響するひび割れ形状を代表し得る指標であると考えられる。ただし、当然ではあるが、材料・配合が異なる場合や腐食原因(塩害、中性化)や腐食環境(塩化物イオン供給条件、温度、湿度など)が異なる場合は、ひび割れ幅とかぶりのみで腐食量を評価することはできなかった。

(2)中性化とひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響

中性化の促進実験では、ひび割れの有無が鉄筋の腐食に与える影響は大きい、ひび割れ幅の影響については結果が分かれる。ただし、一部の研究では0.1~0.2mm程度まではひび割れ幅が腐食に与える影響が大きく、それ以上のひび割れ幅になると影響は小さい結果が見られる。これは、ひび割れが鉄筋位置に達していないか先端部のひび割れ幅が極めて小さいために中性化が十分に進行していなかったり、水分等の供給が抑えられたりしている可能性が考えられる。かぶり厚さは多くの研究で鉄筋の腐食に与える影響が大きいことが指摘されている。一方、長期暴露・実構造物調査の結果では、必ずしもひび割れ幅やかぶり厚さが腐食量と関係するとは限らない例が見られ、またひび割れ位置と腐食位置との関係が小さい例も見られる。施工品質のばらつきや供用環境が鉄筋腐食に与える影響を十分に把握できていないことが一因と考えられる。

(3) 塩化物イオンの供給量が多い環境下におけるひび割れ部での鉄筋腐食性状

海洋環境下における複数の暴露試験結果を基に、海洋環境下におけるひび割れ部の腐食挙動に関する考察を行った。ひび割れ部のマクロセル腐食速度は時間とともに減少したが、マイクロセル腐食速度は時間とともに増加する傾向が見られた。

また、セメント種類が異なると、ひび割れ幅が同程度であっても腐食の状況は異なる。高炉セメントのように、塩化物イオンの拡散が遅い場合にひび割れ部での腐食が抑制された。さらに、ひび割れ部のマイクロセル腐食速度と鉄筋位置の塩化物イオン濃度の間には相関が見られた。このひび割れ部での鉄筋腐食の開始・進行はひび割れがない健全部の場合と同様であり、「ひび割れ部周辺の塩化物イオン濃度」が「ひび割れ部周辺の腐食に関する（工学的な）指標」となりうることを示唆するものである。すなわち、ひび割れ部における鉄筋腐食速度は、ひび割れ部の塩化物イオンの拡散性状を考慮することで評価可能であることを示唆するものである。

(4) ひび割れとマクロセルの形成について

マクロセル腐食回路の形成には鉄筋における自然電位の不均一差が必要であり、この不均一差の形成にはコンクリートに発生するひび割れの間隔が影響を及ぼす。ひび割れ間隔が狭い場合には、マイクロセル腐食回路における自然電位の平準化の程度が大きいため、鉄筋要素間の自然電位の相対差は小さくマクロセル腐食回路形成時の電流密度も小さい。一方、ひび割れ間隔が広い場合には、マイクロセル腐食回路における自然電位の変化が局所的に大きいため、マクロセル腐食回路形成時の電流密度も大きくなる。このとき、ひび割れ部分はアノードになるため、ひび割れ部分の腐食量も大きい。なお、マイクロセル腐食回路における電流密度はひび割れ本数が多いほど大きくなり、マクロセル腐食回路形成時の電流密度とは異なる（図-6）³⁵⁾。

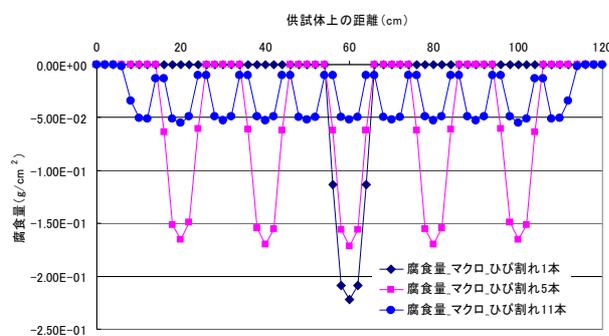


図-6 ひび割れ供試体の腐食量の解析結果³⁵⁾

4.4 コンクリートの表面ひび割れが凍害に及ぼす影響

乾燥収縮などによる表面ひび割れは、幅およびひび割

れ密度にもよるが、微細なひび割れが多数入ることにより、水分の浸入が助長されて凍害に悪影響を及ぼす。このことは、東北地方のコンクリート構造物の凍害実態調査結果³⁶⁾、ひび割れを導入した20年の暴露実験³⁷⁾、蒸気養生を行ったコンクリートの実験^{38),39)}などにより報告されている。

大塚ら^{38),39)}は、蒸気養生されたコンクリートに発生する表面微細ひび割れが耐久性に悪影響を与えることを明らかにした。特に、蒸気養生終了後、製品が出荷されるまで工場敷地内に保管される二次養生中の条件が気中養生の場合には、蒸気養生により発生した微細なひび割れが乾燥収縮により進展することで、凍結融解抵抗性、中性化抵抗性、塩分浸透性に悪影響を及ぼすことを示している。渡辺ら⁴⁰⁾は、同様のメカニズムによりプレストレスコンクリート電柱の凍害劣化の特徴として、軸方向の微細ひび割れの発生および、そのひび割れが塩化物イオンの浸透を助長することを示している。

これよりも幅の大きい貫通ひび割れについては、凍害を促進させる効果は無いとする報告³⁷⁾もある一方、内藤ら⁴¹⁾はスリットにより模擬ひび割れを導入した実験において、AEコンクリートを用いても初期ひび割れの存在によりひび割れ部に侵入した水の凍結膨張作用によってひび割れが開口・進展することを示している。

5. まとめ

構造物の設計におけるコンクリートの収縮の影響は、これまでも様々な形で考慮されてきた。一方で、今回示したように、実PC橋の長期変形問題や最近の実験結果から示されたせん断耐力の低下、さらには新たな超高強度コンクリートや複合構造などにおける課題も明らかになった。また、ひび割れと耐久性の関連性に関する研究の歴史は古いものの、メカニズムの解明や定量的な評価には至っていない。これらコンクリートの収縮が構造物の性能に与える影響の本質を理解し、その定量評価や合理的かつ効果的な対策を行うためには、対象を材料と構造の連成問題として扱い、物理化学的な機構に立脚した分析を行うことが不可欠である。そのための手法として期待されるのが耐久性力学である。本委員会の活動を機に当分野における研究活動を推進し、所要の性能を有するコンクリート構造物の設計・施工技術の向上に資することを目指したい。

参考文献

- 1) 垂井高架橋の損傷に関する調査研究委員会：最終報告書，土木学会，2008.3
- 2) 第二阪和国道の橋梁損傷対策検討特別委員会：最終報告書，土木学会，2010.3

- 3) コンクリートの収縮問題検討委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 2010.
- 4) セメント系材料の時間依存性挙動に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.115-182, 2008.12
- 5) 丸山一平, 半井健一郎, 下村匠, 佐藤良一: コンクリート構造物の耐久性力学, コンクリート工学, Vol. 42, No. 10, pp. 14-21, 2009.10
- 6) 佐藤英明, 宮澤伸吾, 谷田貝敦: ダムコンクリートの温度応力に及ぼす自己収縮の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.181-186, 2008.
- 7) 石橋忠良, 津吉毅: コンクリート桁の表面の曲げひび割れ幅の算定法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.22, No.484, pp.33-40, 1994.2
- 8) 関友則, 櫻井哲哉, 下村匠: 鉄筋コンクリートのひび割れ幅の経時変化における乾燥収縮の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp. 211-216, 2010.7
- 9) 林和彦: 鉄筋コンクリートの鋼材腐食と曲げひび割れの内部構造の関係に関する研究, 横浜国立大学学位論文, 2010
- 10) 玉野慶吾, 中村光, 上田尚史, 国枝稔: PRC はり部材のひび割れ幅経時変化の解析的評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.521-526, 2011
- 11) 石橋忠良, 北後征雄, 吉野伸一, 斉藤啓一, 松田猛: RC ラーメン高架橋の温度・乾燥収縮の影響に関する調査(1), 国鉄構造物設計資料, No.77, 1984
- 12) 岩田道敏, 石橋忠良, 斉藤啓一, 近藤敦司: ラーメン高架橋の長期応力変動について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16. No.1, pp.633-638, 1994.
- 13) Maekawa, K., Chijiwa, N. and Ishida, T. : Long-term deformational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites, *Cement and Concrete Research*, 2011.5
- 14) 青山博之: 鉄筋コンクリート造建築物の自己歪応に関する研究, 東京大学学位論文, 1959.12
- 15) 高強度コンクリートの技術の現状(2009), 日本建築学会, pp.379-401, 2009
- 16) 丸山一平, 佐藤良一, 鈴木雅博 : 高強度コンクリートの健全性に関する検証, 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), Vol. A, pp. 625-626, 2005.9
- 17) 高森直樹, 佐藤幸博, 松戸正士, 佐々木仁: 超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造短柱の耐震性能に及ぼす長期性状の影響, フジタ技術研究報告, 第45号, 49-54, 2009
- 18) Sato, R. and Kawakane, H.: A new concept for the early age shrinkage effect on diagonal cracking strength of reinforced HSC beams, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1) 45-67, 2008.
- 19) Gebreyouhannes, E. and Maekawa, K.: Numerical simulation on shear capacity and post-peak ductility of reinforced high-strength concrete coupled with autogenous shrinkage, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(1), 73-88, 2011.
- 20) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第294号, pp.85-100, 1980
- 21) 氏家勲, 佐藤良一, 長瀧重義: 内部ひび割れに起因するかぶりコンクリートの密実性低下の透気性による検討, 土木学会論文集, No.550, V-33, pp.163-172, 1996
- 22) 氏家勲, 岡崎慎一郎, 村上展将, 中野泰邦: コンクリート中の鉄筋の腐食速度に及ぼす内部ひび割れの影響に関する研究, 第66回セメント技術大会講演要旨, 2012
- 23) 中川裕之, 松崎康晴, 横田優, 松島学: 確率論に基づいた塩害劣化コンクリート構造物の劣化予測システムの開発, アップグレート論文報告集, 第8巻, pp.139-144, 2008.10
- 24) 西利明, 下村匠, 佐藤博之: ひび割れを有するコンクリート中における水蒸気の拡散移動のモデル化, コンクリート工学年次論文報告集, 859-864, Vol.21, No.2, 1999
- 25) 岩永真弘, 武若耕司, 山口明伸, 前田聡: 鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化三次元シミュレーションモデルの構築, コンクリート工学年次論文報告集, 1053-1058, Vol.29, No.1, 2007
- 26) 野城良祐, 石川靖晃, 中村光, 田邊忠頭: 物質移動を考慮した RBSM によるひび割れ進展解析手法の開発, コンクリート工学年次論文報告集, 467-472, Vol.25, No.1, 2003
- 27) Licheng Wang and Tamon Ueda : Mesoscale modeling of the chloride diffusion in cracks and cracked concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.9 (2011), No. 3, pp. 241-249
- 28) Tetsuya ISHIDA, Prince O'Neill Iqbal and Ho Thi Lan Anh : Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete, *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 913-923
- 29) 神山 一: コンクリート中の鉄筋のさび, セメン

- ト・コンクリート, pp.50-57, No.308, 1972.10
- 30) 秋元泰輔, 小坂寛巳, 山内博司: ひびわれの生じている鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する研究, コンクリート工学, Vol.27, No.2, pp.31-39, 1989.2
- 31) 柳 嶺峻, 大野義照: 中性化したコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼすひび割れと水セメント比の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, pp.15-21, 2002.9
- 32) Peter Schiessl and Michael Raupach: Laboratory Studies and Calculation on the Influence of Crack Width on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete, ACI Material Journal, Jan.-Feb., pp.56-62, 1997.
- 33) 鈴木計夫, 大野義照他: コンクリート中の腐食に及ぼすひび割れ幅の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 397 号, pp.1-9, 1989.3
T.U.Mohammed, N.Otsuki, M.Hisada and T.Shibata: Effect of Crack and Bar Types on Corrosion of Steel in Concrete, Journal of Material in Civil Engineering, May/June, pp.194-201, 2001.
- 34) 丸屋 剛, 武田 均, 堀口賢一, 小山 哲: コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する再現実験と数値解析, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.500-514, 2008.10.
- 35) 庄谷征美, 月永洋一: 東北地方のコンクリート構造物の凍害について, コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.3-8, 2004.12
- 36) 田畑雅幸, 洪悦郎, 鎌田英治: コンクリートの凍害におけるひびわれの役割の考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 336 号, pp.11-17, 1981.8
- 37) 大塚浩司, 庄谷征美, 小関憲一, 阿波稔: コンクリートの蒸気養生過程で発生する表面微細ひび割れの性状に関する研究, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.143-155, 1995.8
- 38) 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.97-111, 1998.2
- 39) 渡辺優樹, 細田暁, 樋口隆行, 吉田晴亮, 青木勇人: PC 電柱に発生する縦ひび割れの発生・進展の機構についての考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.11, pp.513-520, 2011.10
- 40) 内藤英樹, 林弘, 齊木佑介, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.3, pp.436-450, 2011.9