

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420457

研究課題名(和文)日本におけるマスコンクリートにおけるDEF膨張のリスクの検証

研究課題名(英文)Verification of risk of crack caused by delayed ettringite formation in massive concrete in Japan

研究代表者

羽原 俊祐 (HANEHARA, Shunsuke)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：10400178

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、フランス、米国のマスコンクリートの製造ガイドラインでは、セメントの水和熱に起因する断熱温度上昇を考慮したコンクリート最高温度を約70℃と規定しているが、欧州や米国で懸念されているDEFによるマスコンクリートのひび割れ発生が、日本のマスコンクリートで発生する可能性があるかことを指摘した。マスコンクリートにおいても、DEFに対する何らかの対応策は取らざるを得ないと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Recently, the concrete maximum temperature due to the adiabatic temperature rise caused by the heat of cement hydration should be specified under about 70 °C in guideline to produce the massive concrete in France, the U.S., considering to restrain the expansion caused by crack of delayed ettringite formation DEF. In this research, it is researched whether DEF cracking the massive concrete in Japan prepared by Japanese resources would be appeared or not, comparing the concrete in the Europe and the U.S. The discussion is still necessary about whether or not it should introduce a countermeasure against DEF to guideline against the crack in the mass concrete in our country. However in the Europe and the U.S., it prescribes the maximum-temperature of concrete from the concerns and the risk lowering means of DEF is taken. On the mass concrete in Japan, some countermeasure should be discussed and specified to restrain DEF crack. The continuous research is also necessary in the future.

研究分野：土木材料

キーワード：エトリンガイト遅延生成 耐久性 ひび割れ マスコンクリート エトリンガイト コンクリート温度

### 1. 研究開始当初の背景

これまでの申請者らのDEFの生起条件とそのメカニズムについては研究成果と、我が国における事故例の調査から、高温蒸気養生を行うコンクリート製品(プレキャスト)に限定される現象であると考えてきた。セメントの水和熱による温度上昇が断熱に近いマスコンクリートでもDEFが問題となる指摘が散見されるにいたった。

### 2. 研究の目的

近年、フランス、米国のマスコンクリートの製造ガイドラインでは、セメントの水和熱に起因する断熱温度上昇を考慮したコンクリート最高温度を75と規定しているが、その根拠としてDEFの発生を懸念している。日本では、断熱温度上昇によるマスコンクリートの最大値の規制はなく、しかもDEF対策ということでは規定されていない。欧州や米国で懸念されているDEFによるマスコンクリートのひび割れ発生が、日本のマスコンクリートで発生する可能性があるかどうかを明らかにすることを研究の目的とする

### 3. 研究の方法

【欧米での事例の文献及び実地調査を含めた総合的な調査】フランス国立科学・テクノロジー・交通・開発・ネットワーク研究所(IFSTTAR)は、1997年以降のフランス国におけるDEFが懸念される劣化事例を基に、DEFのリスクを低減する指導書を取りまとめている。日本コンクリート工学会技術委員会マスコンクリートのひび割れ制御指針改定調査委員会WG3(課題:DEFの現状分析,海外指針等の調査技術委員会)(主査:羽原俊祐:岩手大学)(以降WG3と記す)と連携し、ヨーロッパ・フランスの技術情報・報告書を入手し、DEFが懸念されるコンクリート構造物の材料条件・配合条件・断熱温度上昇にともなう温度履歴を把握し整理する。また、同研究所の担当メンバーに、判定や評価について問合せを行い、結果を基に、DEFである可能性を整理する。ACI(米国コンクリート工学会)、タイ国タマサート大学 Somnuk T.教授からもDEF関連の技術情報を入手し、整理を加える。

【日本におけるDEF関連事例の調査】土木研究所、鉄道総研、ゼネコン研究所及び有力コンクリート製品会社に協力を願い、WG3と連携し、情報入手を行い、DEFの事故事例について、コンクリート製品を問わず、日本におけるDEFの事故事例を洗い出し、潜在的な可能性について整理評価する。

【日本と欧米での相違点と類似点の整理】材料条件、配合条件、温度履歴を比較し、日本と欧米での相違点と類似点を整理する。欧米におけるガイドライン(案)に示されている断熱温度上昇によるコンクリートの最高温度を75以下の設定は、欧米では、DEF

よりも考慮しつつも、断熱温度上昇によるコンクリートの温度応力によるひび割れに主眼をおいている気配もある。これまで検討してきたDEFの生起条件と照らし合わせ、日本のマスコンクリートにどの程度のDEFの発生確率があるかを検証する。

【マスコンクリートを模擬した温度履歴を与えた日本及び欧米のコンクリート配合での実験】実地調査を踏まえ、フランス国におけるDEFの事故事例と思われるマスコンクリートについて、DEFの再現を行う。コンクリートの断熱温度上昇試験装置(40°程度)を使用し、現地材料(セメント・混和剤・混和材)の入手または国内で模擬品の作成を行い、現地配合、熱履歴を与え、水中養生で保管し、経時的に試験体に打込んだピン間隔を測定し、長さ変化をしらべ、DEFが生起するかを確認する。日本のマスコンクリートでフランスの基準でDEFが生起する確率が高いとされる配合を数段階選び、同様な試験を行い、DEFの生起の有無を確認する。WG3のメンバーとも連携し、複数の水準について検討を実施する。

### 4. 研究成果

【欧米での事例の文献及び実地調査を含めた総合的な調査】

による劣化事例について、プレキャスト製品と現場打ちコンクリートに認められる。

DEFによる劣化事例は、海外では1980年頃から欧州諸国を中心に被害が報告されており、1990年代になってアメリカでも劣化報告がなされている。現場打ちコンクリートの事例の多くは、部材断面の大きいマスコンクリートであり、水和発熱に伴う温度上昇が一要因として影響したと考えられる。海外からフランス、イギリス、アメリカ、イタリア、アジアでの事例がある。

#### 【日本におけるDEF関連事例の調査】

DEFによる劣化事例について、国内のプレキャスト2件の事例がある。なお、国内では現場打ちコンクリートでの事例はまだ報告されていない。

DEFによる劣化は、海外では、コンクリート二次製品、現場打ちコンクリートの違いを問わず数多く報告されている。国内ではまだ報告例が少ないが、ASRや凍害等の劣化にまぎれている可能性もある。今回の調査を契機に、わが国でもDEFへの関心が高まり、防御および抑制のための技術開発に理解が深まっていくことを期待する。

#### 【日本と欧米での相違点と類似点の整理】

フランスにおいて建設される土木構造物および建築物に関して、現場打ちコンクリート(マスコンクリート)、ならびにプレキャスト製品を対象に、重要なコンクリート部材がDEFによる劣化に進展しないよう予防するための技術指針を示したもので、2009年

5月に当時のフランス土木研究所(LCPC)より"Recommendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation"が発行されている。フランスにおける最初の事例は1997年、現場打ちコンクリートにより建設された橋梁で、橋脚や橋台の上の横梁等、マッシブな構造部材が水に接触するか、高湿度環境に曝されたもので生じたと報告された。その後、同国では複数の橋梁において、主として夏期に打設されたマッシブな構造部材にDEFによる劣化が認められ、LCPCが行った調査によると、現在までに100余りの事例が確認されている。DEF膨張によるひび割れを修復する有効な補修方法はなく、同国ではこれ以上重要な構造物にDEF劣化が生じないように予防対策を確立すること急務となり、上述のとおりガイドラインが規定されるに至ったとみられる。

国内指針類では、2007年制定の土木学会コンクリート標準示方書においてはじめてDEFが取り上げられた。その後、コンクリート二次製品でDEFが主因とされる劣化事例が報告され、注意喚起がなされた。マスコンクリート構造物におけるDEFの可能性に言及したのものとしては、JCIの制御指針が唯一のものであるが、マスコンクリートでのDEFによるひび割れの発生事例の報告は現状なく、実態は把握されていない。このため、マスコンクリートにおけるDEFの取り扱い、フランスのLCPCガイドラインやACIの仕様書を参考にする程度の記述に止まっている。

一方、海外では、1990年代にDEFに関する研究が盛んに行われており(4.2節参照)、LCPCガイドラインやACI仕様書において最高温度に関する規制値が導入されるに至っている。特に、LCPCガイドラインはDEFの実務設計上の取り扱いを体系的に示しており、今後、国内においてDEFに関する規定(その必要性も含め)を検討する際には、是非とも参考にすべきものである。

【マスコンクリートを模擬した温度履歴を与えた日本及び欧米のコンクリート配合での実験】

70以上の高温の蒸気養生温度では、DEFが生起する確率は高くなる。石こうなどからの硫酸塩より、硫酸アルカリを多く含む場合には、DEFの発生確率はさらに増す。アルカリ共存下では、高温加熱時に高いアルカリ性のため、エトリングイトが不安定になり、分解されやすいためである。コンクリートが供用される環境条件としては、40、60の高温ではエトリングイトの再生成は起こらず、20程度が生起しやすい。湿空条件よりも水中保管のほうがDEFによる膨張が早期に生起し、かつ、最終膨張量も大きくなる。水中に連続浸漬するよりは、乾湿繰返しのほうがDEFによる膨張は、早期に生

起し、かつ最終膨張量は大きくなる。エトリングイトは、60以上の温度から分解しやすく、高温になればなるほど、分解する。低温ではエトリングイトからモノサルフェート水和物への転移が起こるが、高い温度ではさらに非晶質となる。どのようなセメントを用いても、高温加熱により分解したエトリングイトは、水中保管後13週ぐらいから、再生成が起こる。ただし、実際に硬化体がDEFによる膨張するのは、エトリングイトの分解量が多く、再生成量の多い硬化体に限られる。エトリングイトが再生成する集合のうちの一部がDEFによる膨張を起こし、同じ再生成しても膨張が起こらない場合があり、更なる検討が必要である。どのようなセメント使用しても、70以上の高温にさらされれば、エトリングイトは分解し、供用後水が十分な環境ではエトリングイトが再生成し、エトリングイトの遅延生成(DEF)は生じる。そのうちの初期エトリングイトの多いもの、アルカリ量が多い場合に、体積膨張によるDEFひび割れが生じる。ただし、60(または70)以下ではエトリングイトの分解が起こらないため、エトリングイトの再生成が起こらないことからDEFによる硬化体の膨張は生じない。これらは、これまでの各国で検討された結果整理すると、セメントの種類、C3A量、硫酸塩(SO<sub>3</sub>)量、R20量から、DEFの発生リスクを予想することができる。

2012年から我が国のコンクリート材料を用いてマスコンクリートによるDEFの発生再現の取り組みを行ってきたが、現在のところ、アルカリ量や硫酸塩量が現状のセメントやコンクリートの範囲では、DEFによる硬化体の膨張は観察されていない。しかし、コンクリートが70以上の温度に曝された場合には、硬化体中のエトリングイトは分解し、その後常温で水分が供給される環境が与えられた場合には、硬化体中ではエトリングイトの再生成(DEF)が起こることが確認されている。70以上の温度にすることにより、一度生成したエトリングイトは不安定になり分解する。ただし、エトリングイトの再生成が生じて、必ずしも膨張するとは限らず、膨張する場合は、セメントの種類や高アルカリなどの場合に限定されそうである。この分野は、まだまだ未解明であるといわざるを得ない。

マスコンクリートでのひび割れ対策に、我が国においてDEF対策を取り入れるべきかについてはまだまだ議論が必要であるが、欧米では、その懸念からコンクリートの最高温度を規定、DEFのリスク低減方策が取られている。過去のアルカリ骨材反応の我が国での事例のように、世界各国で起こっている事故・事象は我が国においても遠からず現れることは世の理である。マスコンクリートにおいても、DEFに対する何らかの対応策は取らざるを得ないと考える。そのためにも、

今後も継続的な検討が必要である。

D E Fによる膨張事故事例は、これまで我が国においてはプレキャスト製品に限定されているが、材齢初期に加熱されるマスコンクリートのD E Fによる被害事例が、欧米やアジア地域で認められている。マスコンクリートのひび割れの要因としてD E Fを捉え、その対策としてアメリカなどでは、ACI 301M-10 に、施工後のコンクリートの最高温度は 70 を超えてはならないと規定している。この理由は、強度ポテンシャルの低下に加えて、D E Fによる将来の耐久性への弊害を最小現に抑えるため、コンクリートの最高温度を制限したものである。D E Fによる実被害が著しいフランスでは、D E Fによる膨張リスクを軽減するために、LCPC（現IFSTTAR）が2007年8月にD E Fによる事故不具合を避ける指導書を報告し、構造物および構造部材の分類、設置環境の分類から予防水準の選定を行い、コンクリートの最高温度が各水準毎の閾値を超える場合には必要な予防措置を取ること、また、必要に応じてD E F評価試験の実施を提案している。このように欧米では、マスコンクリートの施工にあたって、ある程度D E Fを懸念しているのが現状である。

#### 5．主な発表論文等

研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

宮澤伸吾、溝淵利明、羽原俊祐、横関康祐、今本啓一、マスコンクリートのひび割れ制御指針改訂に向けた調整研究概要、コンクリート工学 (ISSN 0387-1061), Vol.53, No.2, pp-159-164, 2015.2

〔学会発表〕(計1件)

早坂万葉、羽原俊祐、小山田哲也、中村大樹：エトリングライトの遅延生成 (D E F) とそれによる膨張との関係、第68回セメント技術大会 p.98-99、2014.5.13-15

〔図書〕(計1件)

4.D E Fの現状分析、海外指針等の調査  
マスコンクリートのひび割れ制御指針改定調査委員会報告(委員長 佐藤良一、幹事長 金津努、主査 羽原俊祐 他)、日本コンクリート工学会、2014年6月

#### 6．研究組織

##### (1)研究代表者

羽原 俊祐 (HANEHARA Shunsuke)

岩手大学・工学部・教授

研究者番号：10400178