

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04650

研究課題名（和文）DEFによる化学膨張を受けたRC部材の構造性能評価

研究課題名（英文）Structural performance of RC members subjected to chemical expansion due to DEF

研究代表者

石川 靖晃（Ishikawa, Yasuaki）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：00257651

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：DEFがRCはりの構造性能にどの程度影響を及ぼし得るかにについて明らかにすることを目的とした。DEFの生成条件を満たしたRCはり試験体を作製し、膨張挙動を測定した。続いて化学膨張後のRCはりに対して載荷試験を行い、DEFによる化学膨張がRCはりのせん断耐荷性能にどのように影響を及ぼすのかについて実験および総エネルギー一定則に基づいた数値シミュレーションの視点から検討を行った。その結果、DEFに伴う化学膨張はRCはりのせん断挙動に大きく影響を及ぼすことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

DEFによる損傷を受けたRCはりを作製し、そのRCはりに載荷実験を実施すると同時に、同一環境下でのDEFによる化学膨張エネルギーを測定ことや、載荷時の構造性能に及ぼす影響について明らかにするといった試みは、これまで実施されておらず、本研究の独創的な点である。本研究の目的が達成された場合、化学膨張エネルギーを介して、DEFの生成条件とRC部材の構造性能を結びつけるにあたっての知見を提供することができると思われる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify that chemical expansion behavior due to DEF can affect the structural performance of RC beams. RC beam specimen satisfying the DEF conditions are made and their expansion behavior are measured. Subsequently, loading tests on the RC beam are also performed after the measurement of chemical expansion, and it is investigated whether the chemical expansion due to DEF affects the shear load-bearing performance of the RC beam from the viewpoint of experiments and numerical simulations. As a result, it is shown that the chemical expansion attributed to DEF greatly affects the shear behavior of RC beams.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：化学膨張 DEF 総エネルギー一定則

1. 研究開始当初の背景

セメントや骨材の化学反応による化学膨張は、コンクリート構造物の耐久性を損なう大きな要因の一つである。近年では DEF(エトリンガイトの遅れ生成)に起因する異常膨張がコンクリート部材の劣化が世界的に問題となっている。代表的な化学膨張現象として、DEF 以外には、ASR(アルカリシリカ反応)あるいはブルーサイト化が挙げられる。このような化学膨張現象に対しては、これまで多くの研究が行われてきている。これらの研究においては、遅れ生成のメカニズム、生起条件、既存構造物に対する診断方法および新設構造物に対する抑制対策について重点的に検討が行われており、DEF に伴う膨張量の測定も相当行われている。一方で、DEF に起因する化学膨張現象は力学的に解明されたとは言い難い状況にある。そのため、DEF に起因する化学膨張がコンクリート部材の構造性能にどの程度影響を及ぼし得るかについても定性的な知見はほとんど無い。

2. 研究の目的

本研究では、DEF に起因する化学膨張現象が RC 部材の構造性能にどのように影響を及ぼすのかについて実験と解析の両面から明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

図 - 1 に示す小型供試体と大型供試体を対象として、RC はりにおける DEF 膨張挙動を把握するとともに、DEF による材料劣化ならびに DEF が生じた RC はりの構造性能について実験的に検討した。供試体の寸法は、小型供試体は 100×100×400mm であり、大型供試体は 100×200×1800mm である。いずれも単鉄筋の RC 断面を有しており、小型供試体は D6 (降伏強度 $f_y = 427\text{N/mm}^2$) を、大型供試体は D13 (降伏強度 $f_y = 404\text{N/mm}^2$) を、それぞれかぶり 20mm で 2 本配置した。鉄筋比は、小型供試体および大型供試体で、それぞれ 0.82% および 1.46% である。なお、小型供試体、大型供試体のいずれもせん断補強鉄筋は配置していない。表 - 1 にコンクリートの配合表を示す。コンクリート中の SO_3 の調整には硫酸カリウムを用いた。本研究では、短期間で DEF 膨張を生起させるため、 SO_3 の混入量が単位セメント量に対して、質量比で 5.0% となるように硫酸カリウムを外割りで添加した。供試体は打設後、打設面を湿布で覆った後にビニールシートにより封緘し、既往の研究を参考にして初期材齢において加熱養生を施した。小型供試体では、前養生として 20 の環境の恒温装置内に 2 時間静置した後、2 時間かけて 90 まで昇温させた。90 の環境にて 14 時間静置した後、6 時間かけて 20 まで除熱し、脱型した。脱型後は 20 の水道水にて水中養生を行った。なお、供試体は、打設後 24 時間まで 20 の恒温室内にて静置した。大型供試体では、前養生として 20 の恒温室内に

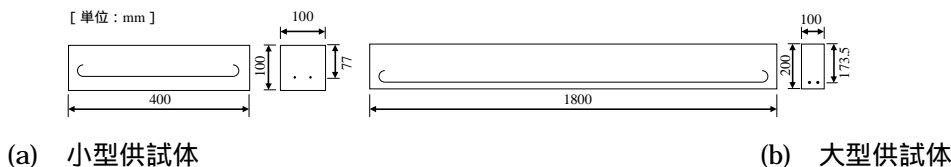


図 - 1 供試体概要図

表 - 1 コンクリートの配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				K ₂ SO ₄ (kg)
			W	C	S	G	
小型供試体	40	44.4	170	425	744	956	18.0
大型供試体	40	41.8	173	433	708	933	17.4

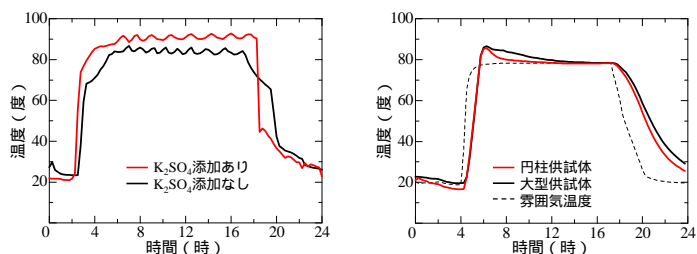
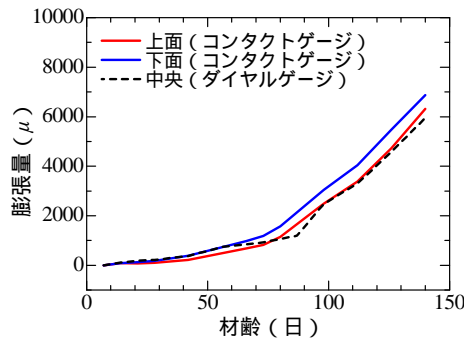
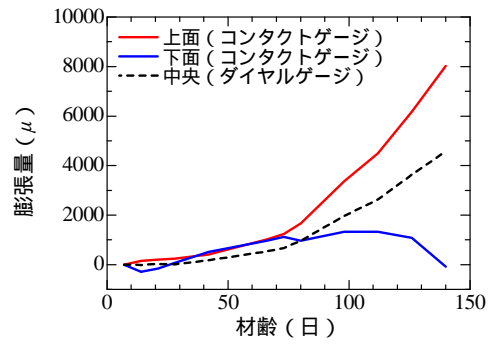


図 - 2 高温養生時の温度履歴

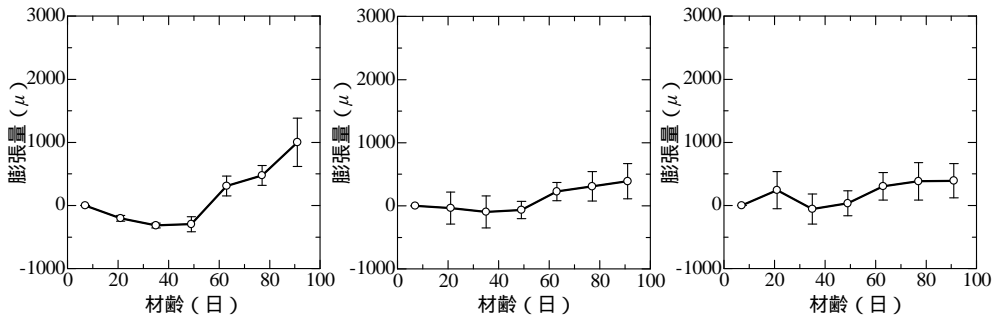


(a) 鉄筋配置なし



(b) 鉄筋配置あり

図 - 3 小型供試体の上下面の膨張量の経時変化 (コンタクトゲージ)



(a) 上部 (高さ 170mm) (b) 高さ中央 (高さ 100mm) (c) 下部 (高さ 30mm)

図 - 4 大型供試体の軸方向の膨張量

4 時間静置した後、2 時間かけて 80 °C まで加熱した。80 °C の環境にて 12 時間静置した後、6 時間かけて 20 °C まで除熱し、脱型した。脱型後は、材齢 7 日まで湿布養生とし、その後は 20 °C の水道水にて水中養生を行った。図 - 2 に初期養生時の温度履歴を示す。小型供試体については、 K_2SO_4 の混入の有無に対する雰囲気温度の履歴を、大型供試体については雰囲気温度とともに、大型供試体と円柱供試体の内部の温度履歴を示している。

図 - 3 に硫酸カリウムを添加して高温養生を施した小型供試体の上下面の膨張量の経時変化を示す。図にはダイヤルゲージで測定した結果も示している。鉄筋を配置していない供試体では、測定箇所に関わらず同程度の膨張量が得られていることがわかる。このことから、鉄筋を配置していない供試体では供試体が様に膨張したと考えられる。また、この結果から、本実験での DEF による自由膨張量は材齢 140 日時点で $6000 \sim 7000 \mu$ 程度であると考えられる。また、図 - 4 に大型供試体における軸方向の膨張量の経時変化を示す。はりの上部では平均して 1000μ 程度の比較的大きな膨張ひずみとなっているが、断面中央高さおよび下部の膨張ひずみは同程度となっており、その大きさは平均して 500μ 弱であった。

小型供試体に対しては、せん断スパン 150mm の 3 点曲げ試験を行った。図 - 5 に小型供試体における荷重 - 変位関係を示す。図中には、はり理論から算出した曲げ剛性を破線で示している。DEF が生じない供試体 NC においては、荷重 17kN 付近で曲げひび割れが生じ、その後荷重 28kN 付近で変形が増大し曲げ降伏したことが確認された。降伏後は変形が増大するとともにわずかに荷重が増加した。荷重 34.0kN を超えたあたりで、試験機の都合により載荷を止めた。斜めひび割れの発生は確認されず、曲げ破壊型の挙動を呈したといえる。

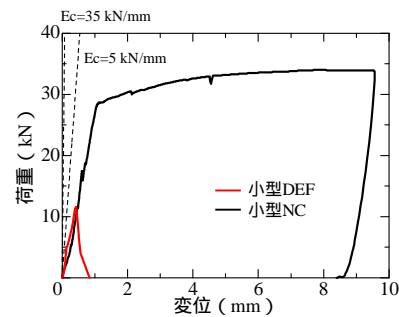


図 - 5 小型供試体の荷重 - 変位関係

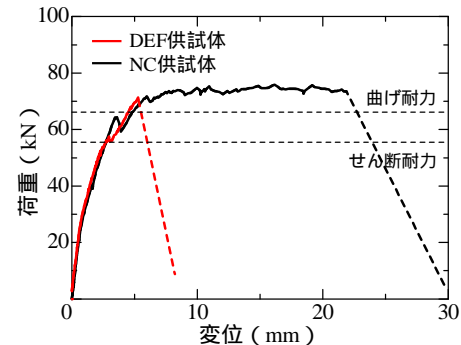


図 - 6 大型供試体の荷重 - 変位関係

一方、DEF 膨張が生じた小型供試体 DEF では、荷重 12kN あたりで斜めひび割れが発生し、支点部に進展することで荷重が低下する結果となった。部材の降伏は見られず斜め引張破壊が生じたと考えられる。予測と同様に斜め引張破壊となったが、最大荷重は大きく低下する結果となった。

次に、大型供試体を対象として、材齢 91 日において曲げ载荷試験を行った。载荷は、せん断スパン 500mm、等曲げ区間 400mm の 4 点曲げ载荷により行った。図 - 6 に荷重 - 変位関係を示す。なお、変位は载荷点変位の平均値を表している。図には、上記の斜め引張破壊時荷重と曲げ終局時の荷重（それぞれ、せん断耐力と曲げ耐力と表記）を破線により併記している。NC 供試体は荷重 64kN 時に左側のスパンにおいて斜めひび割れが発生し、荷重が低下した。しかし斜めひび割れの進展は見られず、再度荷重が増加した。荷重 72kN 時には、右側スパンに斜めひび割れが発生したが斜め引張破壊に至ることはなく、荷重 74kN 前後で荷重が停滞して変形が増大する挙動となった。その後、変位 21.9mm において右側スパンの斜めひび割れが進展・開口することで荷重が急激に低下した。

続いて、総エネルギー一定則に基づいた仮説に基づき DEF 膨張が生じるといった前提の下で、前述の試験結果に基づき数値検証を行った。まず、小型供試体の膨張量測定結果に対して総エネルギー一定則に基づいた数値シミュレーションを実施することにより、DEF による化学膨張が小型供試体の化学膨張挙動にどのような影響を及ぼすか検討を行う。次に、大型供試体の载荷試験結果に対して、化学膨張挙動を考慮した数値シミュレーションを実施し、小型供試体で得られた知見が大型供試体の構造性能評価にも適用可能かどうか検討を行う。

解析対象の小型供試体のメッシュ分割図と境界条件を図 - 7 に示す。構造モデルは対称性を

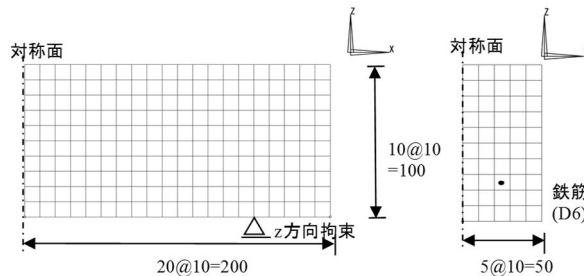


図 - 7 小型供試体メッシュ分割図と境界条件

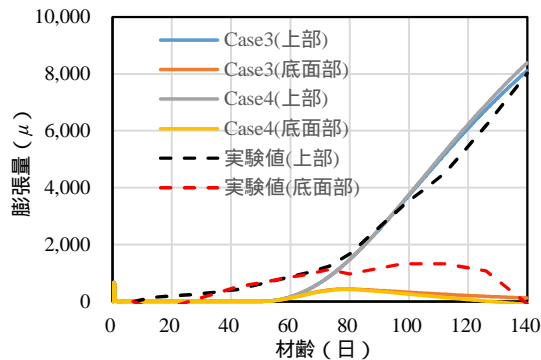


図 - 8 膨張量経時変化の比較(小型供試体)

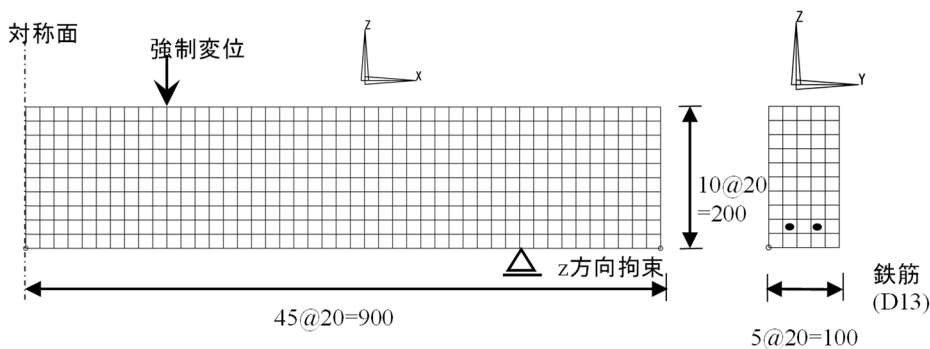


図 - 9 大型供試体のメッシュ分割図と境界条件

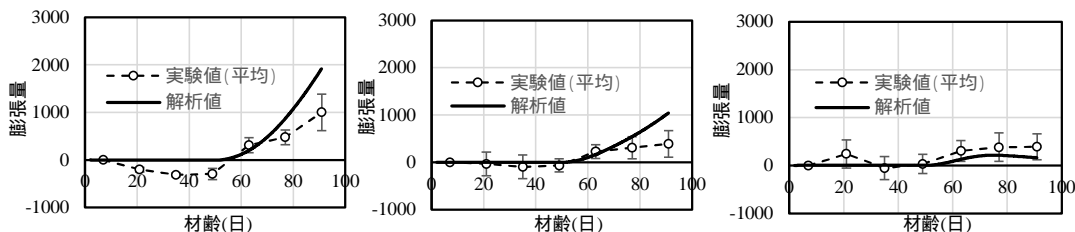


図 10 軸方向膨張量経時変化の比較

考えて 1/4 モデルとした。この構造モデルに対して温度解析実施後、化学膨張に伴う初期応力解析ならびに強制変位を作用させた耐荷力解析を実施した。図 - 8 に小型供試体での膨張量の経時変化における実験値と解析値の比較の一例を示す。本解析では、圧縮強度を 4 割程度低下させ、それに伴い破壊エネルギーも 4 割程度に低減させているが、膨張量はほぼ同じ値となった。また、解析は上部と底面部の膨張量の発生傾向を捉えている。

小型供試体での知見を大型供試体の載荷試験に適用した。大型供試体における解析対象 RC はりのメッシュ分割図と境界条件を図 - 9 に示す。構造モデルは対称性とメッシュ寸法、アスペクト比を勘案して 1/2 モデルとした。図 - 10 に軸方向膨張量の経時変化の比較を、図 - 11 に鉛直方向膨張量の経時変化

の比較を示す。軸方向、鉛直方向ともに、発生傾向は実験値と類似しているが、解析値は実験値よりも大きな値となっている。鉛直方向においては拘束が極めて小さいため、総エネルギー一定則の範囲を超えていると思われるが、いずれにおいても実際の化学膨張エネルギーは今回与えたものよりもさらに小さかったと考えられる。図 - 12 に載荷直前(材齢 91 日)での長手方向応力分布を示す。鉄筋付近に約 5N/mm^2 程度のケミカルプレストレスが作用している。

4. 研究成果

上記より、DEF が生じた RC はりの構造性能は材料の力学特性の影響により、斜めひび割れ発生荷重が低下することが実験的に確認された。また、総エネルギー一定則を考慮した数値計算の結果から、DEF 膨張によるケミカルプレストレスも構造性能に影響を及ぼす可能性が示唆された。上記の範囲では測定期間が短いため、限られた範囲ではあるものの、総エネルギー一定則は DEF に対しても適用可能であること、また現段階では最大荷重の低下を捉えることができないものの、当該モデルが、DEF により劣化した RC 部材の挙動を予測するうえで有用なツールになり得ることが示唆された。

上記は、本研究で行った一例を掲載したに過ぎない。その後、RC 試験体を再度作成し、上記と同様の検討を 1 年半実施した。その結果 1 年半の測定期間を通じて DEF による化学膨張は数千マイクロに達し、DEF による化学膨張は RC 試験体に曲げが伴った膨張変形を与えること、また、DEF による化学膨張による劣化が RC はりのせん断破壊モードにやはり影響を及ぼし得ることが実験的に確認された。

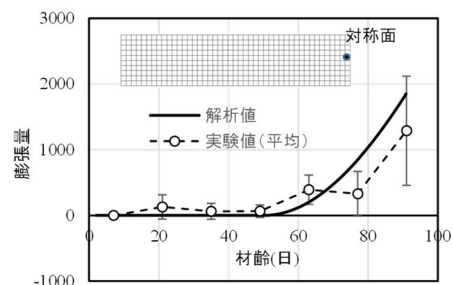


図 11 鉛直方向膨張量経時変化の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 石川靖晃, 上田尚史	4. 巻 67A
2. 論文標題 DEFを生じたRCはりの膨張挙動と 膨張後の構造性能に関する研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 645-658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.67A.645	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 董 元翔, 上田尚史, 中部主暁, 石川靖晃	4. 巻 -
2. 論文標題 Impacts of Delayed Ettringite Formation on Expansive behavior and Shear Capacity of RC beams	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Japan Concrete Institute	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	上田 尚史 (Ueda Naoshi) (20422785)	関西大学・環境都市工学部・准教授 (34416)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------