

令和 5 年 5 月 2 0 日現在

機関番号：3 2 2 0 1

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：1 9 K 0 4 5 5 9

研究課題名（和文）構成材料の特性を考慮したコンクリートの温度・自己・乾燥収縮によるひび割れ制御

研究課題名（英文）Crack control of concrete caused by thermal-autogenous-drying shrinkages based on constituents

研究代表者

宮沢 伸吾（Miyazawa, Shingo）

足利大学・工学部・教授

研究者番号：1 0 1 5 7 6 3 8

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：コンクリートの温度収縮、自己収縮、乾燥収縮を考慮してFEM温度応力解析を行い、ひび割れ発生に対する各収縮の影響度について検討した。温度応力解析では、セメント硬化体の細孔径分布を考慮した毛細管張力理論に基づく既往の乾燥収縮モデルを用いた。応力解放法によりコンクリートの乾燥収縮応力の測定を行い、応力解析結果と比較検討した。乾燥収縮応力の測定値に基づいて乾燥収縮モデルのパラメータを決定して温度応力解析を行った結果、中程度の部材厚さの壁状構造物では、乾燥初期段階では壁の中心部で温度ひび割れが発生しやすく、その後は表面部で乾燥収縮に起因するひび割れが発生しやすいことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、マスコンクリートのひび割れ発生に対する事前検討や事後解析において、コンクリートの乾燥収縮の影響を定量的に考慮されることは少なかった。特に、部材寸法がそれほど大きくないマスコンクリート構造物では、乾燥収縮の影響が無視できないと考えられることから、ひび割れの発生原因を明確に判断できない事例も少なくないことが懸念される。本研究では、温度収縮と自己収縮のみでなく、乾燥収縮も考慮した温度応力解析結果を示すことがき、その成果は、今後のマスコンクリート構造物のひび割れ制御手法の合理化に資することが期待される。

研究成果の概要（英文）：FEM thermal stress analysis was performed considering not only thermal shrinkage and autogenous shrinkage of concrete but also drying shrinkage, and the effect of each shrinkage on cracking was investigated. In the thermal stress analysis, a conventional drying shrinkage model based on the capillary tension theory considering the pore size distribution of hardened cement paste was used. The drying shrinkage stress of the concrete specimen was measured by stress releasing method and compared with the stress analysis results. FEM thermal stress analysis was performed using the parameters determined based on the measured drying shrinkage stress. From the results of FEM stress analysis for a wall-type structures with medium thickness, it was found that the wall member was prone to cracking in the central portion due to thermal stress at early ages followed by drying shrinkage cracking on the surface.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：マスコンクリート 水和発熱 自己収縮 乾燥収縮 ひび割れ 温度応力解析 自己応力

1．研究開始当初の背景

コンクリートは様々な原因により収縮を生じる特性を有している。収縮が拘束を受けることより、コンクリートにはひび割れが発生することが少なくない。収縮に起因するひび割れの発生を制御することは、構造物の要求性能を確保するための重要な課題になっている。コンクリートの主な収縮は、セメントの水和熱に起因する温度収縮、自己収縮および乾燥収縮であるが、ひび割れの原因究明やひび割れ制御計画においては、各収縮のひび割れ発生への寄与度を把握することが必要となる。

マスコンクリート構造物では、初期材齢においては水和発熱による温度収縮及び自己収縮が発生し、その後、材料・配合に応じて自己収縮及び乾燥収縮が発生し、長期材齢においては主に乾燥収縮が発生する傾向がある。このような各収縮の寄与度は、セメント・骨材の種類、配合、部材寸法、環境条件により異なる。コンクリート構造物において収縮ひび割れ制御を的確に行うためには、これらの各収縮成分の発生機構や影響要因を的確に評価するとともに、各収縮成分がひび割れ発生に及ぼす影響を定量的に評価することが、ひび割れ制御計画にあたって実用上重要な課題となっている。

2．研究の目的

本研究では、使用するセメント及び骨材の特性を考慮したコンクリートの温度収縮・自己収縮・乾燥収縮の評価を行うことを目指している。具体的には、コンクリートの硬化過程から長期材齢にわたる温度収縮・自己収縮・乾燥収縮に起因する拘束応力の発生状況を、実構造物モデルの温度応力解析により評価し、各収縮ひずみ成分の拘束応力への寄与度を明らかにする。

プレストレストコンクリート製品では、初期材齢の強度を確保する目的で蒸気養生されることが多く、その際の温度上昇・降下過程において断面内の温度分布に基づく温度応力を生じる。また、蒸気養生終了後に乾燥を受ける場合には、乾燥収縮による拘束応力が加算される。従って、温度収縮と乾燥収縮がひび割れ発生の主要因になりうるので、これらの収縮のひび割れ発生に対する寄与度を明らかにする。

代表的なマスコンクリート構造物であるコンクリートダムの温度ひび割れ予測において、ひび割れの発生要因である温度収縮のみでなく、自己収縮についても考慮する必要性について、結合材の種類及び配合と関連させて検討を行う。

マスコンクリート構造物の代表的な例として、壁状構造物を対象として、三次元有限要素法による温度応力解析を行う。そして、各種構造物について、硬化過程から長期材齢にわたりコンクリート部材に発生する拘束応力を算定し、温度収縮、自己収縮および乾燥収縮の各収縮成分のひび割れ発生への寄与度の評価を行う。その結果に基づいて、コンクリートの構成材料及部材寸法を考慮した収縮ひび割れの発生要因を定量的に示すことを目指す。

3．研究の方法

プレキャストコンクリート製品を研究の対象とし、収縮成分のうち乾燥収縮が卓越すると考えられる条件として、断面寸法 100×100mm のコンクリート供試体が蒸気養生終了後に乾燥を受ける場合のコンクリートの乾燥収縮を計測した。特に、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合及びフライアッシュセメントや高炉セメントを用いた場合を対象とし、セメントの種類が乾燥収縮応力に及ぼす影響について、材料物性実験及びボックスカルバート製品を対象とした FEM 温度応力解析により検討した。

また、堤高 60m の中規模の重力式コンクリートダムを対象とした、自己収縮が温度応力に及ぼす影響に関する研究成果を既に学術論文誌に投稿していたが、これに対する査読意見を受けてさらに詳細な検討を行った。特に、施工過程でコンクリートダム堤体内に発生する拘束応力の解析結果について断面内の応力分布に着目して再検討を行った。

コンクリートの部材寸法が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について、骨材の収縮特性の影響と関連させて実験データにより検討を行った。そして、コンクリートの乾燥収縮ひずみの実測値と各種指針類の乾燥収縮ひずみ予測式との比較を行い、骨材の収縮特性をコンクリートの乾燥収縮ひずみの実用予測式について検討を行った。

部材寸法の異なるコンクリート供試体の乾燥収縮ひずみの実測値と有限要素法による温度応力解析値を比較検討した。温度応力解析では、セメント硬化体の細孔径分布を考慮した毛細管張力理論に基づく既往の石川らの乾燥収縮モデルを用いた。コンクリート供試体により乾燥収縮ひずみの測定および応力解放法による乾燥収縮応力の測定を行い、FEM 応力解析結果と比較検討した。その結果、両者の傾向は概ね一致することが明らかとなり、解析における乾燥収縮モデルが妥当であることが示唆された。

部材内に生じている自己応力は断面内でつり合っているため、供試体の一部を切断すれば新たな力のつり合い条件を満足するように弾性変形を生じる。この変形量の測定から自己応力を求める方法、すなわち応力解放法をコンクリートの乾燥収縮応力の測定に適用することを試みた。

壁状モデル構造物について、有限要素法により、セメントの水和発熱、セメントの水和反応に伴う自己収縮及びコンクリート中の水分の蒸発に伴う乾燥収縮応力を計算した。壁状構造物モデルの各要素の引張応力 (σ) が引張強度 (f_t) に等しくなる時、すなわちひび割れ指数 (f_t/σ) が 1.0 になる材齢を求めて、この材齢における乾燥収縮、自己収縮、および温度収縮の各収縮に起因する自己応力の比率を求め、3 種類の収縮が、それぞれどの程度ひび割れ発生に寄与しているかを算出した。

4．研究成果

プレキャストコンクリート製品 (ボックスカルバート) について、コンクリートの物性試験値を取得し、その結果に基づいて FEM 温度応力解析を行って各収縮に起因する拘束応力の発生状況について検討を行った。その結果、温度収縮及び乾燥収縮の寄与度について、部位及び材齢ごとに示すとともに、ひび割れ発生確率の高い部位とひび割れ発生原因について定量的に示すことができた。

乾燥収縮応力の測定値に基づいて決定したパラメータを用いて FEM 温度応力解析を行った結果、中程度の部材厚さの壁状構造物では、乾燥初期段階では壁の中心部で温度ひび割れが発生しやすく、その後は表面部で乾燥収縮に起因するひび割れが発生しやすいことが分かった。これまで、マスコンクリートのひび割れ発生に対する事前検討や事後解析において、乾燥収縮の影響を定量的に考慮されることは少なかった。そのため、特に部材寸法がそれほど大きくないマスコンクリート構造物では、ひび割れの発生原因を明確に判断できない事例も少なくなかった。

ダムコンクリートの温度ひび割れ予測においては、使用するセメントの種類によってはセメントの水和熱に起因する温度応力のみならず、自己収縮ひずみを考慮してひび割れ制御を行う必要があることを提案した。その成果は、2023 年制定土木学会コンクリート標準示方書に言及されることとなり、ダムコンクリートの温度規制計画において新たな視点の導入に繋がることとなった。

以上のように、本研究では、温度収縮、自己収縮及び乾燥収縮を考慮した温度応力解析結果を示すことができ、その成果は今後のマスコンクリート構造物のひび割れ制御手法の合理化に資することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 佐藤英明、宮澤伸吾	4. 巻 76
2. 論文標題 コンクリートダム施工時の温度応力に及ぼす自己収縮ひずみの影響に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）	6. 最初と最後の頁 130～143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejmcs.76.2_130	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 -

1. 著者名 Bernard A. Zulu, Shingo Miyazawa, Nobukazu Nito	4. 巻 5
2. 論文標題 Effect of Limestone Powder and Fine Gypsum on the Cracking Tendency of Blast-Furnace Slag Cement Concrete Subjected to Accelerated Curing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Infrastructure	6. 最初と最後の頁 57
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kipkemboi Benson, Zhao Teng, Miyazawa Shingo, Sakai Etsuo, Nito Nobukazu, Hirao Hiroshi	4. 巻 240
2. 論文標題 Effect of C3S content of clinker on properties of fly ash cement concrete	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 117840～117840
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.conbuildmat.2019.117840	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 -

1. 著者名 Zulu Bernard A., Miyazawa Shingo, Nito Nobukazu	4. 巻 4
2. 論文標題 Properties of Blast-Furnace Slag Cement Concrete Subjected to Accelerated Curing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Infrastructures	6. 最初と最後の頁 69～69
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/infrastructures4040069	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Aghiad Alhafez, Shingo Miyazawa
2. 発表標題 Properties of steam cured concrete with modified fly ash cement
3. 学会等名 The 2020 Structures Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shingo Miyazawa, Etsuo Sakai, Nobukazu Nito, Hiroshi Hirao,
2. 発表標題 Improvement of strength development of fly ash cement concrete by modifying mineral composition of clinker
3. 学会等名 15th International Congress on the Chemistry of Cement Prague
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gerald GYABAAH, Shingo MIYAZAWA and Nobukazu NITO
2. 発表標題 Mechanical and Shrinkage Properties of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Elimane Ndiaye, Yoshitaka Ishikawa and Shingo Miyazawa
2. 発表標題 Applicability of JCI Model for Prediction of Properties of Fly Ash Concrete
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation
4. 発表年 2019年

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------