

平成 21 年 6 月 20 日現在

研究種目： 基盤研究(C)

研究期間： 平成 18 年度～平成 20 年度

課題番号： 18560453

研究課題名 (和文) 高炉セメントの水和熱・自己収縮低減によるマスコンクリートのひび割れ制御

研究課題名 (英文) Crack control of mass concrete with blast-furnace slag cement by reduction of heat of hydration and autogenous shrinkage

研究代表者 宮澤伸吾 (足利工業大学・工学部・教授)

## 研究成果の概要：

高炉セメント B 種を用いたコンクリートの自己収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比べて大きく、高温履歴を受けると初期材齢における自己収縮の進行速度が大きくなり、終極値も大きくなることを実験により明らかにした。自己収縮の終極値および進行速度を最高温度の関数として定式化し、温度履歴の影響を考慮した実用的な高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみの予測式を提案した。提案した自己収縮ひずみの予測式は、日本コンクリート工学協会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」の設計用値として採用された。

低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いた場合、温度上昇過程において、自己膨張に起因する圧縮応力が導入されることが認められ、一般の高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントを用いた場合と比べて引張応力-強度比が小さくなり、温度ひび割れ低減効果が認められた。これにより、高炉セメントの比表面積、三酸化硫黄(SO<sub>3</sub>)量および高炉スラグ混入率を調整することにより、マスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性は著しく向上することが明らかとなった。

フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートについて、自己収縮および断熱温度上昇量を把握するとともに、拡張レヤー工法(ELCM)により施工される重力式ダムについて 3 次元 FEM 温度応力解析を行った。その結果、高炉セメントを用いた場合は、外部コンクリートや着岩コンクリートにおいては大きな自己収縮が生じ、これに起因して発生する引張応力がひび割れの発生原因になりうることが明らかとなった。さらに、セメントの種類によりダムコンクリートの自己収縮は著しく異なり、セメントの種類を選定によりダムコンクリートのひび割れ抵抗の向上を図れる可能性があることを指摘した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18 年度	900,000	0	900,000
19 年度	900,000	270,000	1,170,000
20 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	600,000	3,500,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：マスコンクリート、温度応力、高炉セメント、温度ひび割れ、水和熱、自己収縮、コンクリートダム

## 1. 研究開始当初の背景

マスコンクリート構造物の温度ひび割れの制御において温度応力解析を行う場合には、入力値としてのコンクリートの物性値を正確に把握することが重要である。断熱温度上昇量や強度発現については、コンクリート標準示方書に予測式が示されており、JCI 研究委員会報告書にも、予測式が提案されている。一方、自己収縮については、各種セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみの予測式が提案されているが、高炉セメントについては実験データが少ないのが現状である。

特に、セメントの種類により発熱特性、高温履歴条件下における自己膨張・自己収縮、ヤング係数およびクリープ特性が異なり、応力の計算結果に大きな影響を与えられられる。研究代表者らは、高炉セメント B 種の JIS 規格の範囲内で化学成分と比表面積を調整した低発熱・収縮抑制型高炉セメントを提案し、各種実構造物に適用して、そのひび割れ低減効果について実証してきた。しかし、構造物や施工の条件によっては、ひび割れ低減効果の程度を正確に予測することが難しいケースがあった。従って、高炉セメント B 種および低発熱・収縮抑制型高炉セメントの高温履歴条件下での自己収縮をはじめとする物性値を正確に把握することが望まれていた。

コンクリートダムにおける温度応力については、リフト打設、配合、セメントの水和発熱や外気温に伴う温度変化を反映させた温度応力解析が行われているが、コンクリートの自己収縮については一般に考慮されていない。しかし、最近の研究によれば、単位結合材量の少ない貧配合のダムコンクリートにおいても、高炉セメントを用いた場合、配合や養生温度などによっては、ひび割れの発生要因となり得るような比較的大きな自己収縮ひずみを生じることが明らかとなっている。従って、各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮評価式を構築し、コンクリートダムの温度応力に及ぼす自己収縮の影響を定量的②把握するとともに、高炉セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮抑制方法を確立することが重要な課題となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、下記の 3 つの事項について検討することを目的とした。

- (1) マスコンクリートの温度応力解析に用いることを前提とした、高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみの予測式を構築する。
- (2) 各種セメントを用いたマスコンクリートの温度応力発生状況を一軸拘束試験により把握し、ひび割れ抵抗性について比較検討する。
- (3) ダムコンクリートの自己収縮ひずみおよび温度応力に及ぼすセメントの種類の影響について検討する。
- (4) 上記(1)~(3)により、水和熱および自己収縮の抑制による高炉セメントの温度ひび割れ抑制方法を提案する。

## 3. 研究の方法

- (1) 高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみ予測式の提案

市販の 4 種類の高炉セメント B 種を用いて、20℃条件下およびマスコンクリートを想定した高温履歴条件下においてコンクリートの自己収縮ひずみを測定し、高温履歴の影響を考慮した自己収縮ひずみの実用的な予測式を提案した。

- (2) マスコンクリートの拘束応力に及ぼすセメントの種類の影響の検討

マスコンクリート構造物を想定した温度履歴を供試体に加え、温度変化と自己膨張・自己収縮によるコンクリートの変形を熱膨張係数の小さいインバー鋼により拘束する試験を実施した。また、高温履歴条件下での強度特性およびヤング係数を把握するとともに、圧縮応力の発生開始材齢および見かけの有効ヤング係数についても検討した。

- (3) ダムコンクリートの温度応力に及ぼす自己収縮の影響の検討

フルサイズの粗骨材を用いたダムコンクリートについて、内部コンクリートと外部コンクリートの諸特性、とりわけ長期材齢における自己収縮特性を室内試験により明らかにした。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て三次元モデルによる温度応力解析を行い、温度応力に及ぼす自己収縮の影響について検討を行った。

#### 4. 研究成果

本研究において新たに得られた知見をまとめると、以下の通りである。

##### 4.1 高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみ予測式の提案

- (1) 高温履歴条件下では、20℃条件下の場合と比較して、コンクリートの自己収縮ひずみの増加速度および最終値が大きくなる。
- (2) 高温履歴を受ける場合は、20℃条件下の場合と比較して、高炉セメント B 種の銘柄による自己収縮ひずみの差が大きくなる。
- (3) 高炉セメント B 種を用い、水セメント比が 55%程度のコンクリートについて、高温履歴(最高温度が 70℃程度以下)を受ける場合の自己収縮ひずみの予測式を提案した。

##### 4.2 マスコンクリートの拘束応力に及ぼすセメントの種類の影響の検討

- (1) 硬化過程でコンクリートが拘束を受けた場合の圧縮応力の発生開始材齢は、凝結の始発と終結の間にあり、セメントの種類により若干異なる。
- (2) 中庸熱セメントおよび低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いた場合、普通セメントおよび高炉セメント B 種を用いた場合と比較して応力強度比が小さく、ひび割れ抵抗性に優れていることが認められた。
- (3) 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いた場合、温度上昇過程において、自己膨張に起因する圧縮応力が導入されることが認められた。

- (4) 見かけの有効ヤング係数は材齢 2 日以前で小さく、特に低発熱・収縮抑制型高炉セメントの場合是一般の市販セメントと比べてかなり小さくなった。

##### 4.3 ダムコンクリートの温度応力に及ぼす自己収縮の影響の検討

- (1) 大粒径骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみは、ウェットスクリーニングした小型供試体による試験結果から、複合則によって十分な精度で推定できる。
- (2) 高炉セメント B 種を用いた外部コンクリートの自己収縮ひずみは材齢 1 年で約  $130 \times 10^{-6}$  と、内部コンクリートに比べて著しく大きい傾向を示すが、中庸熱ポルトランドセメントおよび中庸熱フライア

ッシュセメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみは、配合によらず  $50 \times 10^{-6}$  程度以下である。

- (3) 低発熱・収縮抑制型高炉セメントにフライアッシュを 15%置換した場合は、ダムコンクリートの自己収縮は配合によらず著しく低減され、外部コンクリートにおいても材齢 1 年で約  $30 \times 10^{-6}$  である。
- (4) 各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮ひずみは、土木学会コンクリート標準示方書の自己収縮予測式を用い、予測式の諸係数をセメントの種類に応じて適切に設定することによって予測することができる。
- (5) 中規模の重力式コンクリートダムを対象とした三次元モデルによる温度応力解析の結果、自己収縮ひずみを考慮することによって、着岩部における上下流方向の引張応力および堤体上下流面近傍の外部コンクリートにおけるダム軸方向の引張応力が大幅に増大する。
- (6) ダムコンクリートにおいても自己収縮ひずみが有害なひび割れの発生原因となり得ることが明らかとなったことから、今後のコンクリートダムの温度規制において、自己収縮についても十分な検討が必要である。

#### 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 10 件)

- 1) 谷田貝敦・宮澤伸吾・廣島明男・大友健，マスコンクリートの拘束応力に及ぼすセメント種類の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.1，pp.675-680，2007
- 2) 宮澤伸吾・佐藤良一・杉山淳司，高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.1，pp.465-470，2008
- 3) 二戸信和・大澤友宏・鯉淵清・宮澤伸吾，高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と  $SO_3$  の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.121-126，2008
- 4) 大友健・二戸信和・鯉淵清・宮澤伸吾，スラグ粒度と化学成分を調整した高炉セメントコンクリートと膨張コンクリート

- の一軸拘束下でのひずみ挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.2, pp.133-138, 2008
- 5) 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報告集, Vol.30, No.2, pp.181-186, 2008
  - 6) S. Miyazawa, A. Hiroshima, K. Koibuchi and T. Ohtomo, Influence of cement type on restraint stress in concrete at early ages, 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, pp.373-379, 2008
  - 7) N. Nito, K.Koibuchi, T.Ohtomo and S. Miyazawa, Effect of fineness and chemical composition of blast-furnace slag cement on the performance of mass concrete, 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, pp.855-891, 2008
  - 8) 佐藤英明・宮澤伸吾・谷田貝敦, 各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, 2009 (掲載予定)
  - 9) 臼井達哉・大友健・宮原茂禎・宮澤伸吾, マス養生温度履歴下で測定した自己収縮ひずみの評価方法と温度ひび割れに及ぼす影響に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, 2009 (掲載予定)
  - 10) S. Miyazawa, H. Sato and A. Yatagai, Influence of autogenous shrinkage on thermal stress in dam concrete, 4th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, 2009 (掲載予定)
- [学会発表] (計 20 件)
- 1) 橋本祐一, 宮澤伸吾, ニ戸信和, 廣島明男, 大友健, 膨張性混和材によるコンクリートの収縮抑制に関する研究, JCI関東支部栃木地区研究発表会, 2007.3
  - 2) 藤澤昭裕, 谷田貝敦, 宮澤伸吾, ニ戸信和, 大友健, 温度履歴を受けるコンクリートの硬化過程における拘束応力, JCI 関東支部栃木地区研究発表会, 2007.3
  - 3) 杉山 淳司, 藤澤昭裕, 谷田貝敦, 宮澤伸吾, コンクリートの自己収縮の予測式に関する一考察, JCI関東支部栃木地区研究発表会, 2007.3
  - 4) 谷田貝敦, 稲田 裕介, 宮澤伸吾, 佐藤英明, ダムコンクリートの温度ひび割れに及ぼす自己収縮の影響, JCI関東支部栃木地区研究発表会, 2007.3
  - 5) 杉山 淳司, 藤澤昭裕, 谷田貝敦, 宮澤伸吾, マスコンクリートの自己収縮に関する一考察, 土木学会関東支部第34回技術研究発表会講演概要集, 2007.3
  - 6) 杉山淳司, 宮澤伸吾, 谷田貝敦, 廣島明男, 大友健, マスコンクリートの温度応力に及ぼす自己収縮・自己膨張の影響, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007.9
  - 7) 宮澤伸吾, 谷田貝敦, 佐藤英明, ダムコンクリートの自己収縮特性に関する研究, 共同研究成果発表会, あしかが産官学連携推進センター・足利工業大学総合研究センター, 2007.10
  - 8) 杉山淳司, 宮澤伸吾, 廣島明男, 大友健, 高炉セメントのひび割れ抵抗性の向上に関する研究, 栃木県建設業協会・土木学会関東支部栃木会研究発表会, 2008.2
  - 9) 小田部知典, 宮澤伸吾, 佐藤英明, 各種セメントを用いたダムコンクリートの特性, JCI関東支部栃木地区研究発表会, 2008.3
  - 10) 井下田健輔, 杉山淳司, 宮澤伸吾, 高温履歴を受けるコンクリートの自己収縮, JCI関東支部栃木地区研究発表会, 2008.3
  - 11) 広沢和樹, 杉山敦司, 宮澤伸吾, 鯉渕清, 大友健, 膨張材を用いた高炉セメントコンクリートの温度応力, JCI関東支部栃木地区研究発表会, 2008.3
  - 12) 杉山敦司, 宮澤伸吾, 鯉渕清, 大友健, 膨張材を用いた高炉セメントコンクリートの温度応力, 土木学会関東支部第35回技術研究発表会講演概要集, 2008.3
  - 13) 杉山淳司, 宮澤伸吾, 佐藤英明, 各種セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮および力学特性, 土木学会第62回年次学術講演会, 2008.9
  - 14) 大友健, 宮原茂禎, 臼井達哉, 宮澤伸吾, マス養生温度履歴下で測定した自己収縮

ひずみのJCI予測値との適合性に関する  
検討，土木学会第62回年次学術講演会，  
2008.9

- 15) 谷田貝敦，宮澤伸吾，佐藤英明，ダムコ  
ンクリートの温度応力に及ぼすセメント  
種類の影響，JCI関東支部栃木地区研究発  
表会，2009.3
- 16) 杉山淳司，宮澤伸吾，高炉セメントを用  
いたコンクリートの初期物性について，  
JCI関東支部栃木地区研究発表会，2009.3
- 17) 島村野武，宮澤伸吾，杉山淳司，温度変  
化を受けるコンクリートの自己収縮予測  
式，JCI関東支部栃木地区研究発表会，  
2009.3
- 18) 鈴木良幸，宮澤伸吾，杉山淳司，コンク  
リートの温度応力に及ぼす打込み温度の  
影響，JCI関東支部栃木地区研究発表会，  
2009.3
- 19) 堀口佳紀，宮澤伸吾，佐藤英明，ダムコ  
ンクリートの若材齢における体積変化，  
JCI関東支部栃木地区研究発表会，2009.3
- 20) 佐藤英明，宮澤伸吾，谷田貝敦，セメン  
トの種類がコンクリートダムの拘束応力  
に及ぼす影響，土木学会第63回年次学術  
講演会，2009.9(発表予定)

〔図書〕（計 0 件）

## 1.2 その他

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特に無し。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮澤伸吾（足利工業大学工学部教授）

(2) 連携研究者

今本啓一（足利工業大学工学部准教授，H20  
年度から東京理科大学工学部准教授）

(3) 連携研究者

鯉渕 清（株式会社デイ・シイ セメント事  
業本部）