

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：32675

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630206

研究課題名(和文) 細孔内自由水の移動によるコンクリート粘性発現機構の解明と支配的空隙スケールの特定

研究課題名(英文) Identification of mechanism of micro-pore and pore water dominating viscosity of concrete

研究代表者

藤山 知加子 (FUJIYAMA, Chikako)

法政大学・デザイン工学部・准教授

研究者番号：60613495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリートのひずみ速度依存性は微細空隙内の自由水の移動抵抗性によって生じ、また自由水の移動抵抗性は空隙のスケールに依存することを明らかにすることを目的として、直径50mm、高さ100mmのモルタルおよびセメントペースト円柱供試体を用いて、様々な条件下において一軸高速試験を行った。実験結果から、セメントペースト中の毛細管空隙の形成に伴いがひずみ速度効果の発現度合が大きくなると考えられる一方、遷移帯の影響は比較的小さいことがわかった。

研究成果の概要(英文)：The strain rate dependent responses of concrete mortar and cement paste cylinders those diameter is 50mm and heights is 100mm were investigated using uniaxial compression tests with high and low loading rates. The influence of pore structure and interfacial transition zone were focused on. Experimental results suggests that developing of capillary pore enhances strain rate effect. It is also suggested that the effect of ITZ is relatively small.

研究分野：コンクリート

キーワード：ひずみ速度効果 コンクリート 細孔構造 液状水 遷移帯 凍結 モルタル セメントペースト

1. 研究開始当初の背景

コンクリートの動的強度が静的強度に比べ増加することが最初に報告されてから約100年が経過している。以来、様々な実験により圧縮強度、引張強度、曲げ強度いずれにおいても同様の現象が報告されるとともに、コンクリートの「ひずみ速度依存性」として理解され、国内外で多くの構成則が提案されてきた。その機構については、コンクリート内部の微小な空隙に存在する自由水の移動抵抗性である可能性が指摘されているが、検証は必ずしも十分とは言えない。

これを明らかにする鍵として、セメント硬化体中の $10^{-10} \sim 10^{-4}(m)$ という幅広いスケールに分布する水の凍結性状と、凍結時膨張圧による未凍結の自由水の移動メカニズムについて多くの議論行われてきた凍害の研究に着目した。ここから、凍結温度の制御により自由水の移動を意図的に制限するという本研究の着想に至ったものである。

2. 研究の目的

(1) 研究の目的

コンクリートのひずみ速度依存は微細空隙内の自由水の移動抵抗性によって生じ、また自由水の移動抵抗性は空隙のスケールに依存することを明らかにするのが、本研究の目的である。具体的には、自由水の凍結温度は自由水が存在する空隙のスケールに依存することに着目し、試験体冷却温度の制御により特定の空隙スケールにある自由水を凍結させ、ひずみ速度をパラメータとした載荷試験を行う。凍結して固体となった水は高い剛性を示すが、移動はできないため載荷速度によらない。一方自由水は、ひずみ速度が大きい場合のみ移動の際周囲との摩擦を生じ、粘性を発現する。これらの性質を利用して、コンクリートのひずみ速度依存特性が自由水の移動によることを明らかにするとともに、ひずみ速度依存性に支配的な空隙スケールの特定を目指す。

(2) 学術的な特色および意義

微細空隙中の水の動態を、意図的に水を凍結させることにより制御するという手法の提案が、本研究の特色である。ひずみ速度依存性が微細空隙中の水の移動特性に基づくことが本研究により物理的に検証されれば、凍結融解やクリープといった長期の問題と、振動や衝撃といった短期の問題とを包括する材料構成則の構築に大きく貢献すると予想される。学術的意義は大きい。

3. 研究の方法

(1) 供試体配合および養生条件

供試体は直径 50mm 高さ 100mm のモルタルあるいはセメントペースト、また直径 100mm 高さ 200mm のコンクリート円柱とした。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川水系陸砂を使用した。異なる細孔構造の形成を期待して水セメント比を

35%、40%、50%、60%の4種類設定し、混和剤は用いていない。ブリーディングの影響を除くため供試体上面数 mm を研磨した後、載荷直前まで水中養生を行っている。養生日数は、弱材齢(1,3,5,7日)に着目したもものから、28日以上107日以下までさまざまに設定した。また、異なる含水状態を設定するため、養生後に100で24時間乾燥、気中に30日静置等、の条件を与えた。

(2) 凍結および保温方法

恒温槽による凍結では、設定温度を -20 とした凍結融解装置の恒温槽に約2日間供試体を静置することで凍結を行った。水セメント比に関わらずいずれの供試体も概ね6時間で中心部の温度が -20 に達し、以降は一定となった。極低温での凍結は、液体窒素を満たした容器に供試体を直接あるいは銅板ケースを介して間接的に浸漬させることで行った。同様の手法で、ドライアイスおよび氷水による凍結も実施した。

載荷中の保温については、研究当初は取り出した供試体を速やかにスタイロフォームで覆うという簡易なものであったが、本研究期間において、液体窒素循環による保温装置(図-1)を開発した。



図-1 凍結供試体保温装置

(3) 計測項目と計測手法

すべての供試体について、縦ひずみと周方向のひずみの測定のためひずみゲージを円周の対称に2か所ずつ貼付し、ロードセルでの荷重測定とともにサンプリング周波数 20Hz で計測を行った。

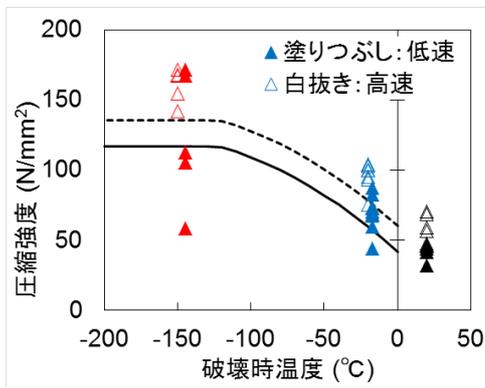
4. 研究成果

(1) 凍結温度とひずみ速度効果

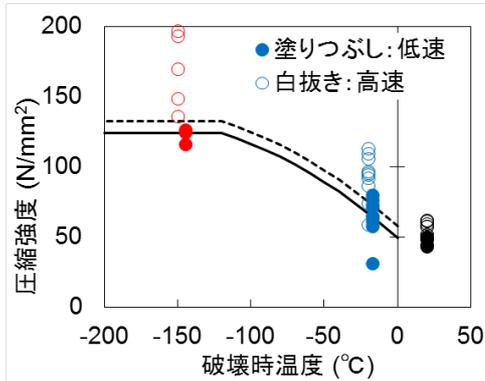
ひずみ速度依存性

試験で得られた一軸圧縮強度は、凍結供試体については、ばらつきが大きかった。破壊時の温度と一軸圧縮強度の関係について、 $W/C=35\%$ 、 50% (KTシリーズを除く)、 60% ごとにまとめたものが図-2である。 $W/C=35\%$ 、 50% のシリーズ(図-2(a)(b))では、全供試体の含水量を7%と仮定した場合のコンクリートの温度低下と強度増加の関係式¹⁾を実線で示す。破線は未凍結(常温)・高速載荷での低速載荷に対する強度増加分を、実線に上乗せしたものである。

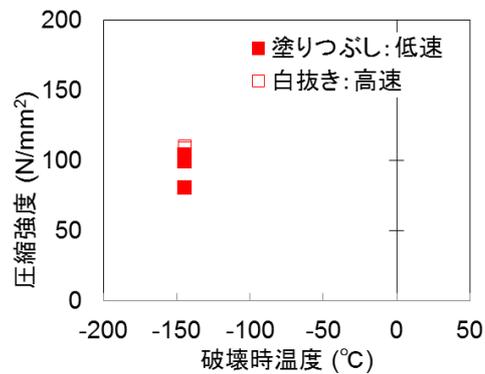
高速載荷の $W/C=35\%$ の -145 ではばらつきが大きい(図-2(a))ものの、低速載荷(静的載荷)での低温による強度増加割合の平均値は既往の静的載荷結果¹⁾と同程度である



(a) W/C=0.35



(b) W/C=0.50

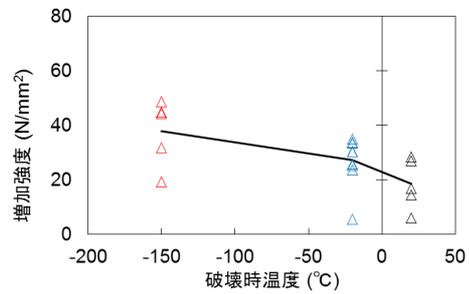


(c) W/C=0.60

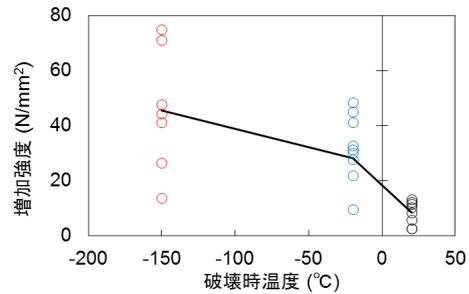
図 - 2 破壊時の温度と一軸圧縮強度

ことから、本研究の液体窒素を用いた供試体凍結手法は妥当と判断された。また、凍結かつ高速荷重の強度は、破線で示される強度を上回っていることから、未凍結（常温）時よりも、凍結時のひずみ速度依存性の発現（強度増加）が顕著であることが確認された。特に、W/C=50%のシリーズ（図 - 2(b)）において凍結かつ高速荷重時の強度は破線を大きく上回っていた。一方、供試体数は少ないものの、W/C=60%のシリーズ（図 - 2(c)）ではひずみ速度依存性は小さかった。

次に、ひずみ速度と一軸圧縮強度の関係について、W/C=35%および50%（KTシリーズを除く）ごとに検討した。全供試体の含水率を100%と仮定した場合のコンクリートのひずみ速度と強度増加の関係式²⁾も併せて検討した。W/C=35%では、高ひずみ速度による強



(a) W/C=0.35



(b) W/C=0.50

図 - 3 ひずみ速度と圧縮強度増分

度増加は温度にかかわらず既往の関係式を上回る傾向にあった。W/C=50%では、凍結時に既存式を大きく上回る一方で、常温ではデータはほぼ線の上にプロットされた。

含水の影響

水中養生後に100%で24時間乾燥させたのち、-20℃恒温槽によって凍結させたKT-50シリーズ4体の一軸圧縮強度を、T-50シリーズの結果と併せて検討した。急速乾燥の影響によりT-50シリーズに比べ全体的に強度が低下していた。また、ひずみ速度依存性の発現は見られるものの、T-50シリーズに比べ、その程度が小さかった。

凍結温度の影響

いずれの凍結手法においてもひずみ速度依存性の発現が確認されたが、ひずみ速度依存性発現に關与する空隙スケールを検討するため、温度ごとに荷重速度による圧縮強度の増加量とひずみ速度の関係をまとめたものが、図 - 3 である。増加量の算出基準は、各シリーズの低速荷重供試体で得られた強度の平均値を用いた。各温度における増分の平均値を実線で、最大値および最小値を破線で結んでいる。

W/C=35%の各シリーズを比較したところ、ばらつきは大きいものの、ひずみ速度効果による強度の増加は、-197℃で凍結を行ったE-35シリーズで最も大きく19~49N/mm²、次いで-20℃凍結のT-35シリーズ6~35N/mm²、未凍結（常温）のW-35シリーズ6~29N/mm²であった（図 - 3(a)）。同様の傾向は、W/C=50%でも確認されたが、低温時の増分はW/C=35%よりも大きく、E-50シリーズで14~75N/mm²、

T-50 シリーズで $10 \sim 49 \text{N/mm}^2$, W-50 シリーズで $3 \sim 13 \text{N/mm}^2$ であった。

以上より、本研究のモルタル供試体では、自由水が部分的に凍結した状態でもひずみ速度依存性が発現すること、その発現程度は未凍結（常温）よりも凍結時に顕著であり、かつ凍結温度が低温のほうが大きいことを確認した。また、凍結時に観察されるひずみ速度依存性は、すなわち細孔構造の違いによって影響を受ける可能性は示唆された。

(2) 弱材齢と骨材の遷移帯に存在する水の効果検証

圧縮強度

圧縮強度とひずみ速度の関係を、標準養生（C50-D7, C40-D7）について図 - 4 に、若材齢試験（C40-D1~M40-D5）について図 - 5 に示す。凡例の L, H は低速荷重, 高速荷重を意味する。W/C が 50% では、ひずみ速度増加に伴い強度が減少しているもの多く見られた。

凍結試験（C40-D28-E, M40-D28-E）での圧縮強度とひずみ速度の関係を図 - 6 に示す。凍結試験ではひずみ速度に大きなばらつきが見られた。ひずみ速度は強度の $1/3$ に至るまでの軸方向ひずみゲージの測定値から供試体ごとに算出したが、凍結試験体ではひずみゲージによる計測が難しく、縦ひずみの値が 1000μ 程度以下までしか計測できないケースがあったことが、ひずみ速度算出に影響したと考えられる。またモルタルの強度は、ひずみ速度上昇に伴い増加傾向にあったが、セメントペーストの強度は、凍結によって低下しただけでなく、凍結状態ではひずみ速度上昇に伴い、減少傾向にあった。

図 - 7 に各試験での破壊形態の一例を示す。材齢 1 日では、セメント、モルタル共に破壊面で未水和反応分のセメントと思われる粉体が見られた。また、(1) で示した実験シリーズと同様、凍結試験ではいずれの試験体も大きな音をたてて爆裂的な破壊に至った。

W/C の影響

W/C が 50% と 40% の場合のセメントペースト（C50-D7, C40-D7）のひずみ速度上昇による強度増加倍率を検討した。増加倍率は、低速荷重における強度の平均値を基準としている。W/C が 50% では増加倍率 1.0 を下回っているケースが多くみられるが、W/C が 40% の方がひずみ速度効果の発現度合は大きい。W/C が低い場合細孔構造が密実になることで、自由水の移動が制限され、高速荷重時の粘性抵抗が増加したと考えられる。

若材齢での細骨材の影響

若材齢試験での強度増加倍率を検討した。セメントペースト、モルタル共に材齢が高くなるにつれて強度増加倍率の平均値は増加している傾向が見られた。これは材齢に伴い形成されるセメント内の毛細管空隙が影響していると考えられる。強度増加倍率の平均値で比較する場合、モルタルとセメントペースト

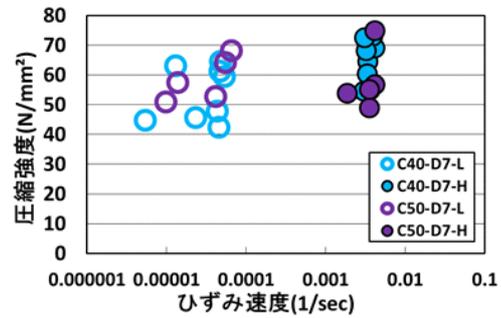


図 - 4 ひずみ速度 圧縮強度（標準）

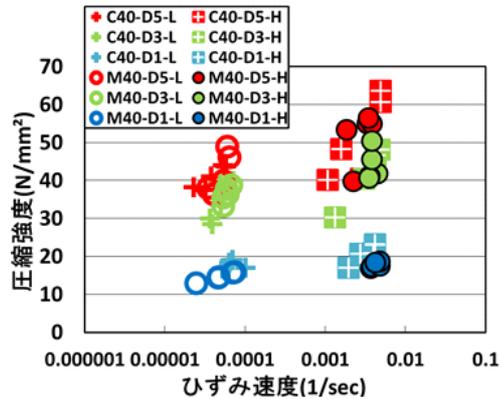


図 - 5 ひずみ速度 圧縮強度(弱材齢)

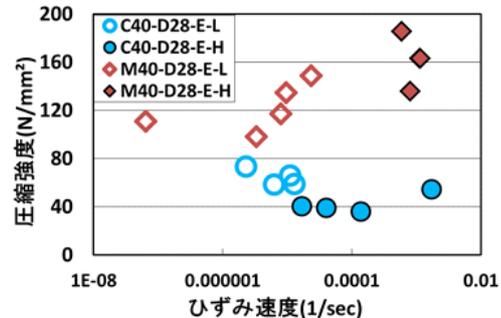


図 - 6 ひずみ速度 圧縮強度（凍結）

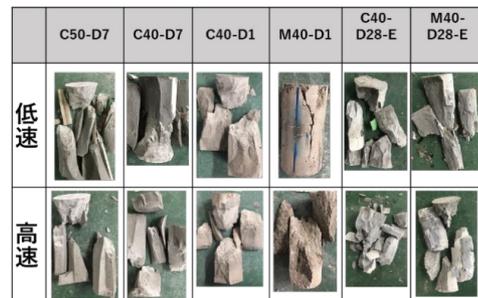


図 - 7 破壊形態の一例

では大きな差はなかった。遷移帯から発生するマイクロクラックによる応力分散の影響は、明らかではなかった。

凍結下での細骨材の影響

冷却試験での強度増加倍率を検討した。両者を比較すると、凍結モルタルのみ、ひずみ速度上昇による強度増加が見られた。セメントペーストでは、自由水の凍結による固結効

果よりも、自由水凍結時の膨張による組織劣化が、モルタルよりも進行していたことが考えられる。

(3) 結論と今後の課題

以上より、当初の想定とは異なり、微細空隙中の水の動態を、意図的に水を凍結させることにより制御した場合でも、ひずみ速度効果が発現するという結果を得た。また、遷移帯の有無によってひずみ速度効果の発現度合が異なる可能性があることを示した一方、細孔構造の支配スケールの特定には至らなかった。

<引用文献>

- 1) 後藤幸正, 三浦尚: 極低温化における鉄筋コンクリート部材の性質に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol.285, 99.121-134, 1979
- 2) 森幸二, 上林勝敏, 藤掛一典, 大野友則, 佐藤紘志: 高ひずみ速度下におけるコンクリートの圧縮および引張強度特性に及ぼす含水率の影響, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1673-1681, 2001

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3件)

C. Fujiyama and R. Kato, Proceedings of The fib symposium 2017, 査読有, 巻号頁未定, 2017.6

藤山知加子, 森野麻由, 溝淵利明: 凍結モルタル供試体の高速一軸圧縮載荷によるひずみ速度依存性発現メカニズムの検討, 査読有, コンクリート工学年次論文集, 第37巻, 第1号, pp343-348, 2015.7

Tetsuri Kaji, Chikako Fujiyama: Mechanical Properties of Saturated Concrete Depending on the Strain Rate, Journal of Procedia Engineering, 95, 442-453, 2014, 査読有.

[学会発表](計5件)

加藤遼二郎, 藤山知加子: 若材齢および凍結させたモルタルおよびセメントペーストを用いた高速載荷試験, 第72回土木学会年次学術講演会講演概要集, 九州大学(福岡県・福岡市), 2017.9. (採択決定)

Chikako Fujiyama, Mayu Morino and Toshiaki Mizobuchi: Strain Rate Effect in Frozen Mortar Subjected to Uniaxial Compression, Proceedings of the 9th Asia Pacific Structural Engineering and Construction Conference & the 8th Asean Civil Engineering Conference (APSEC-ACEC 2015), Kuala Lumpur, Malaysia, 2015.11.4 (eISBN 978-983-44826-8-8)

C. Fujiyama, T. Kaji and Y. Ogiyama: Fatigue life assessment of RC bridge deck considering both dynamic response of saturated concrete and action of impact load, Proceedings of 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE), pp.1265-1272, 2014.11. 17, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan.

T. Kaji, C. Fujiyama: Mechanical Properties Of Saturated Concrete Depending On The Strain Rate, Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials (SCESCM) MAT-15, Jogjakarta, Indonesia, 2014.9.24

鍛冶哲理, 藤山知加子: 含水コンクリートの強度及び初期弾性のひずみ速度効果発現メカニズムの検討, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-021, 大阪大学(大阪府・豊中市), 2014.9.10.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他] 特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤山 知加子 (FUJIYAMA, Chikako)
法政大学・デザイン工学部・教授
研究者番号: 60613495

(2) 研究分担者

溝淵 利明 (MIZOBUCHI, Toshiaki)
法政大学・デザイン工学部・教授
研究者番号: 60339504

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし