

論文 凍結モルタル供試体の高速一軸圧縮载荷によるひずみ速度依存性発現メカニズムの検討

藤山 知加子*¹・森野 麻由*²・溝渕 利明*³

要旨：モルタル供試体を異なる凍結温度で凍結させてセメント硬化体中の移動可能な自由水の量を制限し、低・高ひずみ速度での一軸圧縮試験を行った。その結果、モルタルは凍結した状態でもひずみ速度依存性を発現すること、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 -20°C 凍結よりも -197°C 凍結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による強度増加は、 $W/C=35\%$ より 50% で大きい傾向であること、载荷時の縦ひずみと横ひずみの関係は水セメント比よりも凍結温度に顕著に影響を受けることを示した。

キーワード：ひずみ速度依存性、凍結、モルタル、一軸圧縮試験、細孔構造

1. はじめに

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は、圧縮強度¹⁾、引張強度²⁾、曲げ強度³⁾いずれにおいても様々な条件のもと確認され、コンクリートの「ひずみ速度依存性」として理解されている。これらの研究成果の蓄積に基づき、ひずみ速度を考慮した材料構成則も既に提案されている^{4),5)}。

一方で、ひずみ速度依存性発現の機構については、引き続き議論が行われている。高ひずみ速度での強度増加の要因は、基本的にはマイクロクラックの減少¹⁾、つまり微視的レベルでの応力分散機能の低下⁶⁾と考えられるが、速度効果の発現程度は供試体が湿潤状態にあるとき明らかに大きくなるのが圧縮、引張いずれの条件でも報告されていることから^{7),8)}、コンクリート内部の微小な空隙に存在する自由水の粘性⁹⁾や間隙水圧の発生¹⁰⁾という機構に基づく構成則も提案されている。よって、コンクリートのひずみ速度依存性が微細空隙内の自由水の粘性抵抗と間隙水圧によって生じ、またその機構は自由水の存在する空隙のスケールに依存するという仮説の検証を、本研究の目的とした。

ここで、水の関与を明らかにする鍵として、セメント硬化体中の $10^{-10} \sim 10^{-4}(\text{m})$ という幅広いスケールに分布する自由水の性状と移動メカニズムについて多くの議論が行われてきた凍害の研究に着目する。凍結温度と凍結する空隙スケールの関係より、凍結は比較的大きな空隙の自由水から生じ、温度の低下に伴い微細な領域に及ぶことが知られている^{11),12)}。

これらの知見は、換言すれば、凍結温度の制御により、移動可能な自由水の量を意図的に制限できる可能性を示している。凍結領域の増加に伴いひずみ速度依存性の発

現程度に変化が現れれば、ひずみ速度依存性に関与する微細空隙スケールの特定にもつながると考えられる。

一方で、コンクリートおよびモルタルは、低温にするほど静的（低ひずみ速度）強度が増加することが報告されている¹³⁾。いくつかの要因のうち、低温になるほど自由水の凍結により空隙構造の緻密化が進むことも指摘されている¹⁴⁾が、未解明な点が多い。

以上の背景より、本研究では、モルタルを異なる凍結温度で凍結させた状態での低・高ひずみ速度での一軸圧縮試験を行い、ひずみ速度依存性の発現有無について調べるものとした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 供試体配合および養生条件

本報告の供試体98体の諸条件をまとめて表-1に示す。载荷速度の欄に示しているのは同条件の供試体数である。供試体は直径50mm高さ100mmのモルタル円柱とした。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（表乾密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 2.64% ）を使用した。セメントと砂の質量比はすべて1:2とし、異なる細孔構造の形成を期待して水セメント比を35%、50%、60%の3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、载荷直前まで水中養生を行っているが、KT50シリーズ4体は水中養生後に 100°C で24時間乾燥、E60シリーズ6体は養生槽から出して気中に30日静置した。常温での载荷はWシリーズ、凍結後の载荷は、凍結手法により凍結融解試験（Tシリーズ）と液体窒素浸漬（Eシリーズ）の2種類とした。凍結手法の詳細は2.2節に述べる。

*1 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 准教授 工博（正会員）

*2 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科（学生）

*3 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 教授 工博（正会員）

(2) 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極低温まで温度補償可能な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。また、凍結状況および試験時の温度変化を測定するため、載荷する供試体とは別に、中心部に熱電対を埋め込んだ温度確認用供試体を同配合で作製し、温度変化の静的測定を行った。

(3) 載荷方法

万能試験機のストローク制御により、高速、低速2種類の載荷を行ったが、本手法では供試体の寸法や設置状況によってひずみ速度が異なるため、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。その結果、高速は $1.6 \times 10^{-3} \sim 3.7 \times 10^{-3} \text{ s}$ 、低速は $1.6 \times 10^{-5} \sim 6.5 \times 10^{-5} \text{ s}$ であり、ばらつきはあるものの、高速と低速で概ね2オーダー異なることが確認された。

2.2 凍結および保温方法

(1) 恒温槽による凍結

設定温度を -20°C 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°C に達し、以降は一定となった。測定値の例を図-1(a)に示す。

(2) 液体窒素による凍結

極低温での凍結は、液体窒素を満たした容器に供試体を10分間浸漬させることで行った(写真-1(a))。水セメント比に関わらずいずれの供試体も概ね4分程度で中心部の温度が -197°C に達し、以降はほぼ一定となった。測定値の例を図-1(b)に示す。

(3) 保温方法

載荷中の温度上昇を極力抑えるため、 -20°C 恒温槽および液体窒素より取り出した供試体を速やかにスタイロフォームで覆い、載荷を行った(写真-1(b))。凍結環境から供試体を取り出してから低速載荷で破壊に至るまでに要した時間を計測したところ概ね4~5分間であり、その間温度計測用供試体の温度は、 -20°C で凍結させたものが $-17 \sim -16^\circ\text{C}$ 、 -197°C で凍結させたものが $-150 \sim -140^\circ\text{C}$ まで上昇していた。高速載荷では供試体は1秒以内に破壊に至るため、凍結環境から取り出した後に低速載荷と同時間実験室内に静置した後、載荷を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊形態

破壊形態について、水セメント比による顕著な差は見られなかったため、破壊形態の例を写真-2に示す。試

表-1 供試体条件一覧

シリーズ名	凍結温度(°C)	W/C (%)	載荷速度		載荷時材齢(日)	
			低速(L)	高速(H)		
E-35-L	-197	35	5	-	107	
E-35-H			-	5		
T-35-L-1	-20		5	-	32	
T-35-H-1			-	5		
T-35-L-2			5	-	63	
T-35-H-2			-	5		
W-35-L	未凍結(常温)		5	-	28	
W-35-H			-	5		
E-50-L	-197		50	5	-	46
E-50-H				-	7	
T-50-L-1	-20	5		-	32	
T-50-H-1		-		5		
T-50-L-2		5		-	60	
T-50-H-2		-		5		
KT-50-L	未凍結(常温)	2		-	22	
KT-50-H		-		2		
W-50-L-1	未凍結(常温)	3		-	32	
W-50-H-1		-		3		
W-50-L-2		5	-	45		
W-50-H-2		-	5			
E-60-L	-197	60	3	-	105	
E-60-H			-	3		

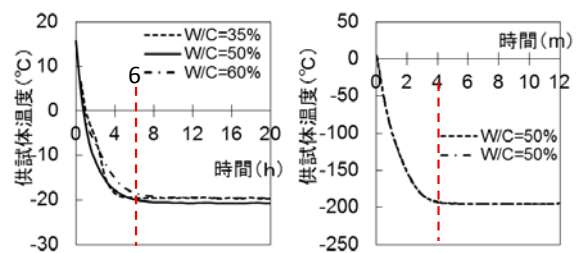


図-1 凍結方法と凍結時温度変化



写真-1 凍結方法と凍結時温度変化

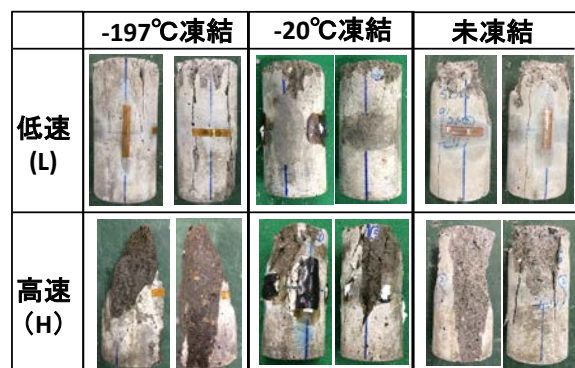


写真-2 破壊形態

験時温度にかかわらず、低速载荷では複数のひび割れによる破壊、高速载荷では少数の大きなひび割れによる破壊が生じる傾向にあった。特に液体窒素による凍結後の高速载荷では、いずれも爆裂的破壊が観察された。

3.2 一軸圧縮強度

(1) ひずみ速度依存性

試験で得られた一軸圧縮強度の一覧を表-2に示す。凍結供試体については、既報¹³⁾で-120℃以下では強度にばらつきがあると指摘されているとおり、Eシリーズの結果はばらつきが大きかった。また、各シリーズ内で明らかに他と離れている数値は斜体文字で示した。

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¹³⁾を

表-2 一軸圧縮強度一覧

シリーズ名	一軸圧縮強度 N/mm ²							平均	標準偏差	変動係数
	1	2	3	4	5	6	7			
E-35-L	105.8	58.4	112.7	172.1	167.6	-	-	123.3	42.4	34.4
E-35-H	172.1	167.6	142.6	155.1	168.1	-	-	161.1	10.9	6.8
T-35-L-1	73.4	44.3	72.8	70.8	69.1	-	-	66.1	11.0	16.6
T-35-H-1	75.2	95.1	100.1	100.0	93.4	-	-	92.8	9.2	9.9
T-35-L-2	68.8	59.6	87.4	82.5	67.7	-	-	73.2	10.2	13.9
T-35-H-2	103.2	103.4	95.4	104.6	100.0	-	-	101.3	3.3	3.3
W-35-L	41.9	46.3	32.2	45.7	44.1	-	-	42.0	5.2	12.4
W-35-H	70.6	58.9	69.0	48.0	56.5	-	-	60.6	8.4	13.9
E-50-L	124.6	126.5	116.3	-	-	-	-	122.5	4.4	3.6
E-50-H	197.4	193.7	149.0	136.2	170.3	167.0	163.7	168.2	20.4	12.1
T-50-L-1	64.7	64.5	58.1	31.3	61.5	-	-	56.0	12.6	22.5
T-50-H-1	86.7	95.9	94.8	58.9	92.5	-	-	85.8	13.8	16.1
T-50-L-2	73.3	65.0	71.1	76.4	80.3	-	-	73.2	5.1	7.0
T-50-H-2	113.1	74.3	105.9	97.4	109.7	-	-	100.1	13.9	13.9
KT-50-L	46.0	49.1	-	-	-	-	-	47.6	1.6	3.4
KT-50-H	65.5	66.0	-	-	-	-	-	65.8	0.3	0.5
W-50-L-1	47.3	56.3	52.5	-	-	-	-	52.0	3.7	7.1
W-50-H-1	60.8	52.1	55.2	-	-	-	-	56.0	3.6	6.4
W-50-L-2	50.1	49.1	50.2	45.0	43.8	-	-	47.6	2.7	5.7
W-50-H-2	62.5	57.9	51.9	61.6	59.8	-	-	58.7	3.8	6.5
E-60-L	104.1	99.5	80.6	-	-	-	-	94.7	10.2	10.8
E-60-H	110.4	100.8	109.3	-	-	-	-	106.8	4.3	4.0

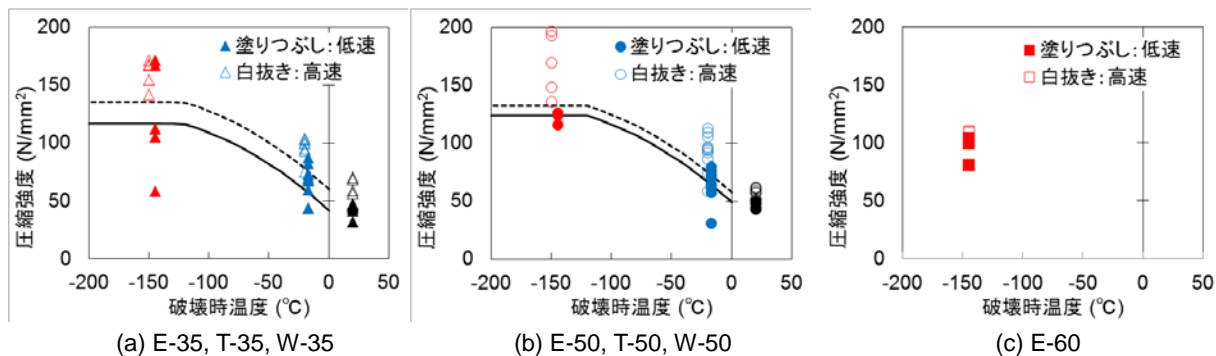


図-2 破壊時の温度と一軸圧縮強度の関係 (KTシリーズを除く)

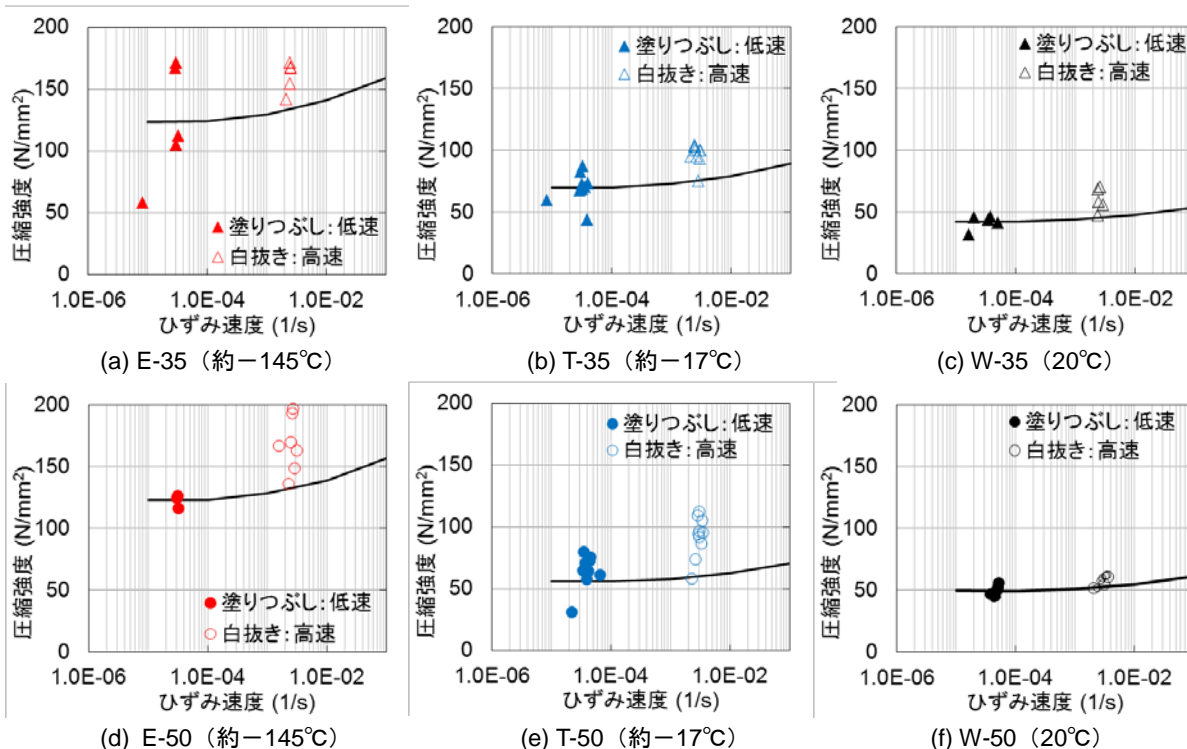


図-3 ひずみ速度と一軸圧縮強度の関係 (KTシリーズ, E-60シリーズを除く)

実線で示す。破線は未凍結（常温）・高速载荷での低速载荷に対する強度増加分を、実線に上乘せしたものである。

高速载荷の W/C=35% の -145°C ではばらつきが大きい（図-2(a)）ものの、低速载荷（静的载荷）での低温による強度増加割合の平均値は既往の静的载荷結果^{13,14}と同程度であることから、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、凍結かつ高速载荷の強度は、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载荷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）ごとに図-3 に示す。図中には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⁷も併せて実線で示す。W/C=35% では、高ひずみ速度による強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（図-3(a)(b)(c)）。W/C=50% では、凍結時に既存式を大きく上回る（図-3(d)(e)）一方で、常温ではデータはほぼ線上にプロットされた（図-3(f)）。

(2) 含水の影響

水中養生後に 100°C で 24 時間乾燥させたのち、-20°C 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（図-3(e)）の結果と併せて図-4 に示す。図中の実線は図-3(e) で用いたものと同じである。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。

(3) 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関与する空隙スケールを検討するため、温度ごとに载荷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-5 である。増加量の算出基準は、各シリーズの低速载荷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°C 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°C 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-5(a)）。同様の傾向は、W/C=50% でも確

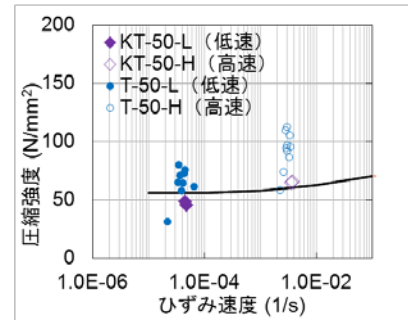
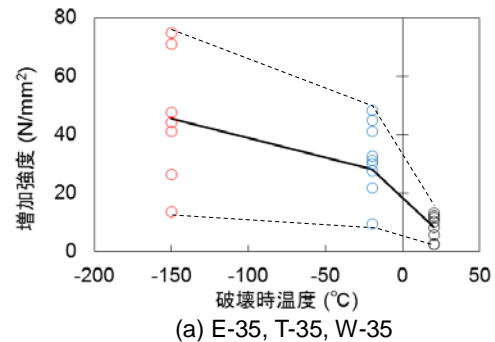
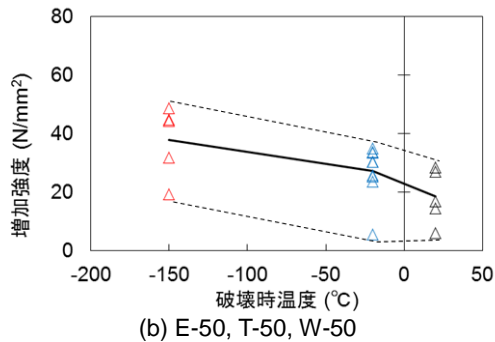


図-4 KT シリーズの一軸圧縮強度



(a) E-35, T-35, W-35



(b) E-50, T-50, W-50

図-5 ひずみ速度と一軸圧縮強度増分の関係

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 10~49N/mm²、W-50 シリーズで 3~13N/mm² 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¹²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、W/C、すなわち細孔構造の違いによって影響を受ける可能性が示唆された。

3.3 応力-ひずみ関係

W/C=35%、50%（KT シリーズ、E-60 シリーズを除く）の応力-ひずみ関係の例を図-6 に示す。ひずみは 2 か所ずつ計測した縦ひずみ、横ひずみの供試体ごとの平均値であり、実線が低速载荷、破線が高速载荷を示す。

温度に関わらず高速载荷時の応力-ひずみ関係（破線）は低速载荷時（実線）に比べ剛性が高い。また、-197°C で凍結させた E シリーズでは、水セメント比に関

ならず高速載荷時の挙動が破壊直前まで線形であることから (図-6(a)(c)), 塑性変形が少なく爆裂的 (脆性的) に破壊した (写真-2) という観察結果と一致している。

また, W/C=50%かつ -20°C 凍結の T-50 シリーズでは高速載荷による破壊時の縦ひずみの値が 4000μ 近く到達するもの多く見られた (図-6(e))。全体に, 高速載荷では剛性の増加に加えて変形性能が大きくなること, 強度増加の一因であることが示唆された。

図-6 で示した各ケースについて, 縦ひずみと横ひず

みの関係を 図-7 に示す。実線が低速載荷, 破線が高速載荷のデータを示す。 -197°C 凍結の E シリーズでは載荷開始の 1~2 分前から計測を開始したためその間の温度上昇で 200μ 弱の横ひずみが計測されているが, 載荷開始後はポアソン比 0.2 相当の傾きを保ったまま破壊に至った (図-7(a)(d))。 -20°C 凍結の T シリーズでは載荷初期ポアソン比が 0.2 より若干大きい傾向にあり, かつ高速載荷時は破壊直前の横ひずみ増加によってさらに増加した (図-7(b)(e))。未凍結 (常温) W シリーズは,

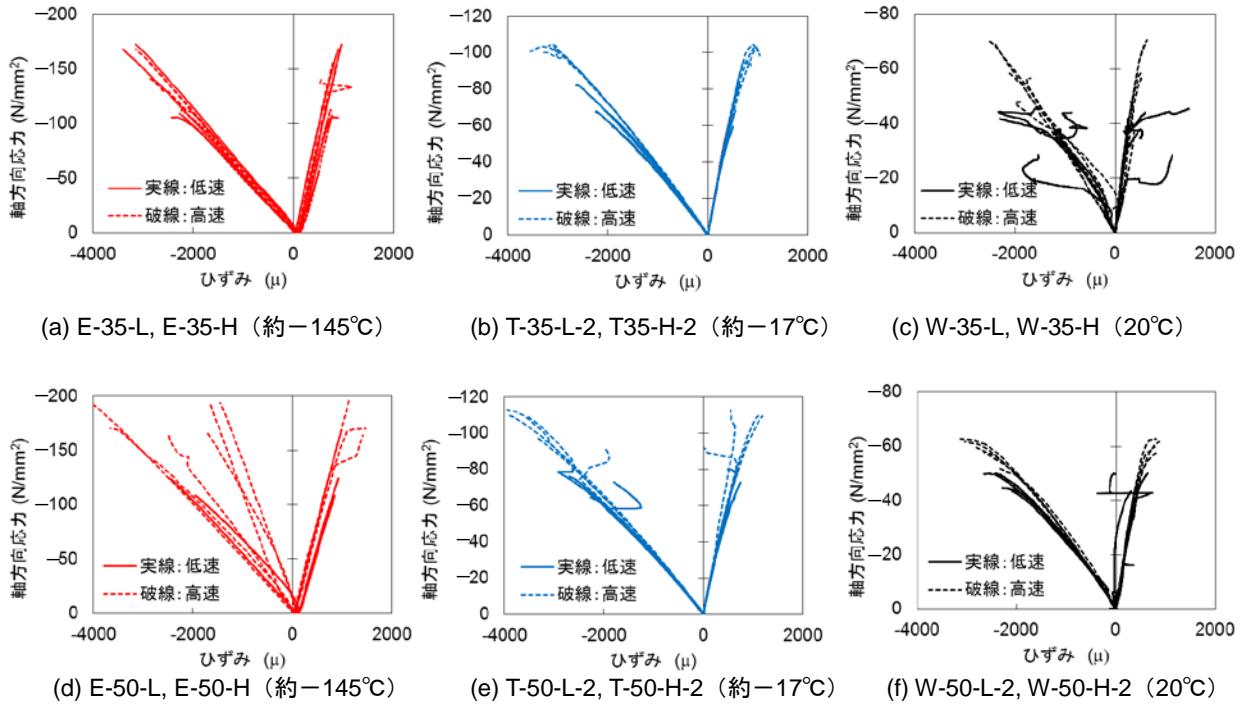


図-6 応力-ひずみ関係 (KT シリーズ, E-60 シリーズを除く)

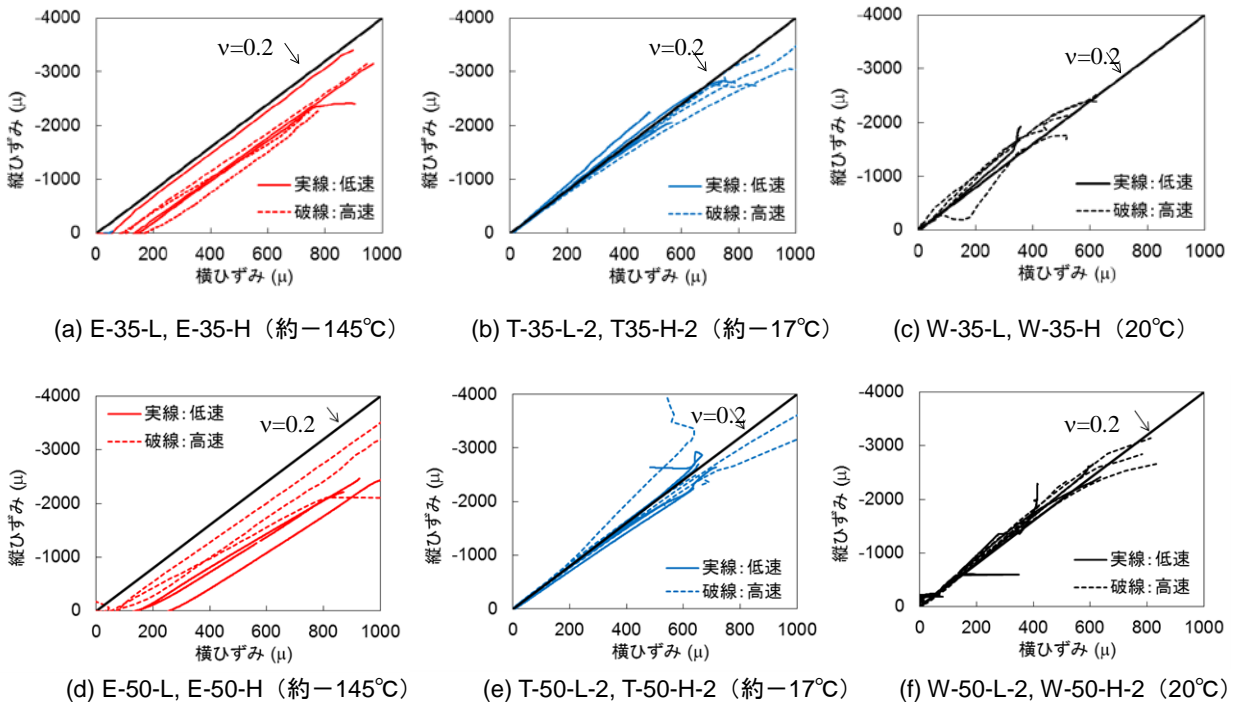


図-7 ポアソン比 (KT シリーズ, E-60 シリーズを除く)

初期ポアソン比が 0.2 より若干小さいが、破壊直前の横ひずみの増加でポアソン比が増加しており、強度試験で一般的にみられる傾向であった (図-7(c)(f))。

4. ひずみ速度依存性発現要因の考察

ひずみ速度依存性の発現要因をセメント硬化体中の自由水に関するものと考えた場合、凍結温度が低下するほど自由水の量自体が減少することから、硬化体中に含まれる自由水の量(含水量)よりも自由水の移動を阻害する氷の生成(細孔構造の緻密化)が大きく関与するものと推察される。今後供試体の細孔構造を調べることで、W/C=50%でのひずみ速度依存性が W/C=35%よりも比較的顕著であった点とともに、引き続き検討したい。

一方、乾燥後の供試体においてもひずみ速度依存性は幾分見られたことから、高速載荷時のマイクロクラックの減少が、ひずみ速度依存性発現のメカニズムのひとつであることは再確認された。また、 -20°C 凍結供試体において初期からポアソン比がやや大きい傾向にあるのは、いわゆる凍害によって内在マイクロクラックが増加していた可能性を示唆しており、 -197°C 凍結供試体でポアソン比の変化が小さいのは、極低温下の体積収縮により微小レベルで水和物や未水和物間の凝集力が高まり拘束効果を高めたものと推察される。

5. 結論

本研究の条件のもとで得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 自由水が部分的に凍結した状態でも高速載荷によって一軸圧縮強度が増加するというひずみ速度依存性の発現が確認された。
- (2) 凍結供試体の結果はばらつきが大きいものの平均では、常温供試体よりもひずみ速度依存性の発現は顕著であり、かつ -20°C 凍結供試体よりも -197°C 凍結供試体で強度増加は大きい傾向であった。
- (3) W/C=35%よりも 50%のほうが、ひずみ速度依存性の発現は概ね大きい。
- (4) 載荷時の縦ひずみと横ひずみの関係は水セメント比よりも凍結温度に顕著に影響を受けることを示した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 No. 26630206 の助成を受けて実施した。実験に協力いただいた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) たとえば Bischoff, P., H. and Perry, S., H.: Compressive behavior of concrete at high strain rates, *Materials and Structures*, Vol.24, pp.425-450, 1991
- 2) たとえば江田智, 別府万寿博, 大野友則, 佐藤紘志:

異なる急速引張試験法によるコンクリートの動的引張強度特性の評価, *構造工学論文集*, Vol.50A, pp.1305-1315, 2004

- 3) たとえば竹田仁一, 立川博之: 高速圧縮, 引張りおよび曲げを受ける各種コンクリートの力学的性質, *日本建築学会論文報告集*, Vol.77, pp.1-6, 1962
- 4) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度依存効果を考慮した三軸応力化におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, *土木学会論文集*, No.669/V-50, pp. 135-148, 2001
- 5) Eibl, J. and Schmidt-Hurtienne, B.: Strain rate sensitive constitutive law for concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.125, No.12, 1999
- 6) 三橋博三: コンクリート強度特性に及ぼす載荷速度の影響に関する確率論的研究, *コンクリート工学*, Vol. 19, No.10, pp. 95-103, 1981
- 7) 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
- 8) Cadoni, E., Labibes, K., Albertini, C., Berra, M. and Giangrasso, M.: Strain-rate effect on the tensile behavior of concrete at different relative humidity levels, *Material and Structures*, Vol.34, pp.21-26, 2001
- 9) Zheng, D. and Li, Q.B.: An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, pp.2319-2327, 2004
- 10) Maekawa, K. and Fujiyama, C.: Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads, *Journal of Engineering Computations*, Vol.30, Iss.6, pp.825-841, 2013
- 11) 鎌田英治: コンクリートの凍害と細孔構造, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol. 10-1, pp. 51-60, 1988
- 12) 鳴海玲子, 張文艶, 岸本嘉彦, 濱幸雄: 収縮低減剤を使用したモルタルの収縮低減及び耐凍害性低下に影響する要因の検討, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.79, No.700, pp.671-680, 2014
- 13) 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
- 14) 三井健郎, 米澤敏男, 井上孝之: 超高強度コンクリートの極低温環境下での力学特性に関する研究, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.19, No.1, pp.175-180, 1997