

論文 凍害を受けた CA モルタルの強度特性に関する基礎研究

高橋 貴蔵*1・斉藤 成彦*2・三澤 祥文*3・桃谷 尚嗣*4

要旨: スラブ軌道のてん充層に用いられている CA モルタルの強度特性に及ぼす凍害の影響について基礎的な検討を行った。供試体中心の最低温度を-3℃および-18℃に設定した凍結融解試験後に圧縮強度試験を行った結果、凍結融解サイクル数の増加に対して圧縮強度が低下し、凍結融解サイクル数に対する圧縮強度の低下傾向は-3℃よりも-18℃の方が大きくなることを確認した。また、凍結融解試験後の圧縮強度試験で得られた破壊荷重の 50%の荷重振幅で圧縮疲労試験を実施した結果、ひずみ勾配に大きな違いがないことを確認した。これは、劣化していない健全部が繰返し荷重の大部分を支持していたためと考えられる。

キーワード: スラブ軌道, CA モルタル, 凍害, 圧縮疲労, 強度特性

1. はじめに

A 形スラブ軌道（以下、「スラブ軌道」とする）は図-1 に示すように、レールをレール締結装置によって一定間隔で固定した軌道スラブをてん充層で支持する軌道構造である。てん充層には、セメントとアスファルト乳剤等からなるセメントアスファルトモルタル（以下、「CA モルタル」とする）が用いられており、てん充層の標準的な厚さは 50mm である。

スラブ軌道は、山陽新幹線の岡山-博多間に本格的に採用された。その後、東北新幹線および上越新幹線といった寒冷地に敷設する際には、CA モルタルに対する耐凍害性の検討が行われ、消泡剤および AE 剤により微細な連行空気を適切な気泡間隔に分散させた消泡 AE 型 CA モルタルが用いられることとなった¹⁾。なお、北陸新幹線（高崎-長野間）以降では、ポリマーを配合することでさらなる耐凍害性の向上が図られた CA モルタルが用いられている²⁾。

消泡 AE 型 CA モルタルが用いられている一部の区間のスラブ軌道では、てん充層の外周部、特に軌道スラブの隅角部から凍結融解作用によるものと考えられる劣化が発生しており、CA モルタルの補修が実施されている³⁾。最近では、CA モルタルの劣化により列車の通過によ

って 4mm 程度の動的な変位が生じる軌道スラブが確認されており⁴⁾、列車荷重による圧縮疲労が加わることで軌道スラブとてん充層の間に生じている隙間の範囲が内部に進展することが懸念されている。

したがって、CA モルタルの劣化は凍結融解作用による凍害と列車荷重による圧縮疲労の影響が複合して生じている可能性があるものの、CA モルタルに対して凍害と圧縮疲労が複合した劣化に対する検討は実施されていない。

そこで本研究では、CA モルタルの円柱供試体に対する凍結融解試験を行い、凍結融解サイクル数が圧縮強度の低下および劣化範囲に与える影響について検討した。さらに、凍結融解試験後の円柱供試体に対して圧縮疲労試験を行い、凍結融解作用が圧縮疲労によって生じるひずみに与える影響についても検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

本試験で用いた CA モルタルは整備新幹線の温暖地で使用されているものであり⁵⁾、寒冷地では劣化が確認されている消泡 AE 型 CA モルタルとほぼ同じ配合である。

CA モルタルの配合および材料を表-1 および表-2 にそれぞれ示す。なお、空気量の目標値は 8~12% である。水と膨張材の混入量は J10 漏斗流下時間と膨張率が規格値を満足するように調整し、本試験では水を 40.3kg/m³、膨張剤を 0.040kg/m³ とした。CA モルタルの練混ぜには攪拌容量 16L の混合攪拌機を用い、練混ぜ量は 10L とした。練混ぜ直後のフレッシュ性状は表-3 に示すとおりであり、いずれも施工管理で要求される規格を満足した。

CA モルタルの円柱供試体の養生条件を図-3 に示す。CA モルタルの練り混ぜ後に温度 20℃、相対湿度 65%の

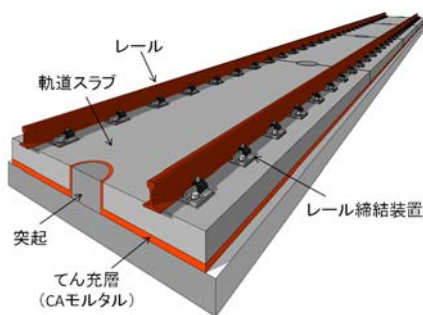


図-1 A 形スラブ軌道の外観図

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工修 (正会員)

*2 山梨大学大学院 総合研究部教授 工博 (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工修

*4 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 工博 (正会員)

表-1 CA モルタルの配合

単位量 (kg/m ³)							
水	セメント	混和材	細骨材	アスファルト乳剤	膨張剤	消泡剤	AE 剤
40.3	279	31	620	496	0.040	0.155	7.8

表-2 CA モルタルの材料

材 料	種 類	比 重
水	水道水	1.00
セメント	早強ポルトランドセメント	3.12
混和材	膨張性セメント混和材	2.93
細骨材	天然硅砂 (6号と7号のブレンド) 粗粒率: 1.4	2.63
アスファルト乳剤	A 乳剤	1.02
膨張剤	アルミニウム粉末	—
消泡剤	エマルジョン型シリコーン消泡剤	1.01
AE 剤	天然樹脂酸塩	1.06
水	水道水	1.00

表-3 フレッシュ性状試験

試験項目	フレッシュ性状	品質規格
J10 漏斗流下時間	23.8 秒	18~26 秒
空気量	8.8%	8~12%
モルタル温度	21.0°C	5~40°C
膨張率	1.8%	1~3%
ブリーディング率	0%	0%

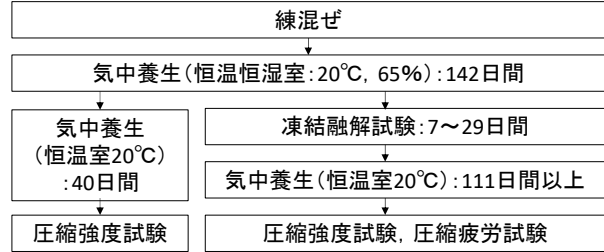


図-3 円柱供試体の養生条件

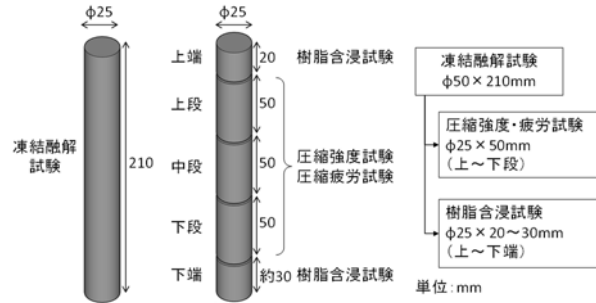


図-4 円柱供試体と切断供試体の寸法

恒温恒湿室で気中養生を実施し、十分に圧縮強度が発現したと考えられる材齢 142 日で凍結融解試験を実施した。凍結融解試験終了後は、温度 20°C で 111 日間以上の気中養生を実施した後、圧縮強度試験および圧縮疲労試験を実施した。凍結融解試験を実施していない円柱供試体については、上記の恒温恒湿室での気中養生および温度 20°C で 40 日間の気中養生を行った後に圧縮強度試験を実施した。

2.2 円柱供試体寸法

本研究では 2.3 項に示すように、凍結融解試験、圧縮強度試験、圧縮疲労試験および蛍光エポキシ樹脂含浸試験を実施する。これらの試験に用いた円柱供試体と切断した供試体の寸法を図-4 に示す。円柱供試体の型枠には、内径 25mm の硬質ポリ塩化ビニル管を使用し、CA モルタルの打込は上方から気泡を巻き込まないように実施した。凍結融解試験には、φ25×210mm の円柱供試体を用いた。このような長い円柱供試体を用いたのは、凍結融解試験を実施した 1 本の円柱供試体を切断することで、残りの試験に用いるための円柱供試体 (以下、「切断供試体」) を作製するためである。圧縮強度試験および圧縮疲労試験には、φ25×210mm を 4 か所で切断して作製した φ25×50mm の切断供試体 3 体 (図-4 中の上段、中段、下段) を用いた。蛍光エポキシ樹脂含浸試験には、残りの 2 体 (図-4 中の上端、下端) の切断供試体を用いた。

CA モルタルの圧縮強度試験には、通常 φ50×100mm の円柱供試体を用いるが、本研究では凍結融解試験による劣化ができるだけ内部に及ぶように円柱供試体の直径を φ25mm とした。

2.3 試験概要

(1) 凍結融解試験

凍結融解試験は「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法」の A 法に準じて実施し、円柱供試体は外周部が 3mm 厚の水で覆うことができるゴム製の容器内に設置した。円柱供試体の表面は、光沢が消えるまで紙やすり (#320) で研磨した。

凍結融解試験の条件を表-4 に示す。円柱供試体の中心温度の目標は -18~+5±2°C (以下、「最低温度 -18°C」とする) および -3~+5±2°C (以下、「最低温度 -3°C」とする) の 2 水準とし、1 サイクルあたりに対する水中凍結と水中融解に要する時間は 3 時間以上 4 時間以内とした。凍結融解サイクル数は最低温度 -18°C に対して 20,50,100 回、最低温度 -3°C に対して 30,50,100,200 回とした。中心温度は、温度管理用の円柱供試体 (φ25×210mm) の高さ中央の断面中心位置に埋設した熱電対で測定した。温度管理用の円柱供試体もゴム製の容器内に設置し、周囲を水で覆ったが、凍結融解で劣化が進行しないように供試体周囲をアルミテープで保護した。

表-4 凍結融解試験の条件

No.	供試体名	凍結融解温度 (目標)	サイクル数	試験項目
0	N	—	—	圧縮強度試験
1	T18-C20-1	-18°C~ +5°C	20	
2	T18-C50-1		50	
3	T18-C100-1		100	
4	T3-C30-1	-3°C~ +5°C	30	
5	T3-C50-1		50	
6	T3-C100-1		100	
7	T3-C200-1		200	
8	T18-C20-2	-18°C~ +5°C	20	圧縮疲労試験
9	T18-C50-2		50	
10	T18-C100-2		100	
11	T3-C30-2	-3°C~ +5°C	30	
12	T3-C50-2		50	
13	T3-C100-2		100	
14	T3-C200-2		200	

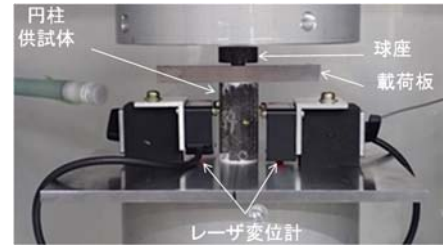


図-7 圧縮疲労試験状況

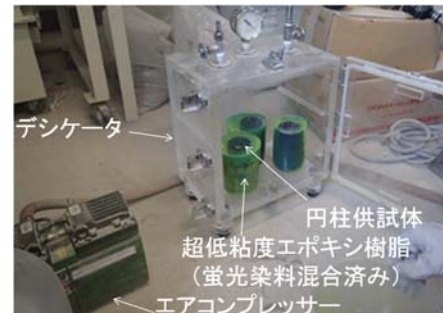


図-8 蛍光エポキシ樹脂含浸試験状況

供試体の中心温度は-4.0~6.3°Cとなった。なお、円柱供試体の表面温度は試験装置の設定温度程度まで低下している可能性がある。

(2) 圧縮強度試験および圧縮疲労試験

圧縮強度試験は、ひずみ速度が0.5%/minとなるように変位制御で実施した。圧縮強度試験には表-4に示したNo.0~7の切断供試体（上段、中段、下段）を用いた。

圧縮疲労試験の試験状況を図-7に示す。圧縮疲労試験は、温度を20°C、載荷周波数を20Hz、繰返し回数を300万回とし、荷重制御の正弦波で載荷した。圧縮疲労試験には表-4に示したNo.8~14の切断供試体の内、中段を用いた。繰返し荷重の下限値は20Nで一定とし、荷重振幅は圧縮強度試験で得られた破壊荷重の50%とした。3.2項で示すように、同じφ25×210mmの円柱供試体から作製した中段と下段の切断供試体の圧縮強度は、概ね等しいことが確認されたことから、荷重の設定にはNo.8~14の下段の切断供試体に対する圧縮強度試験の結果を用いた。

(3) 蛍光エポキシ樹脂含浸試験

凍結融解試験による劣化範囲を可視化するため、図-8に示す蛍光エポキシ樹脂含浸試験（以下、「含浸試験」とする）を実施した。含浸試験は、蛍光染料を混合した超低粘度エポキシ樹脂（130±20mPa・s at 20°C）に浸漬した切断供試体（上端、下端）をカップ内に設置し、エアコンプレッサーで減圧することで微細ひび割れ等に注入して硬化させ、供試体切断面に紫外線を照射することで可視化する方法⁹⁾であり、コンクリートの他にアスファルト混合物でも実施されている⁷⁾。

含浸試験に用いる切断供試体は、凍結融解試験によって生じると考えられる微細なひび割れに超低粘度エポキシ



凍結融解試験機 (-18~5°C用) 恒温恒湿器 (-3~5°C用)
図-5 凍結融解試験状況

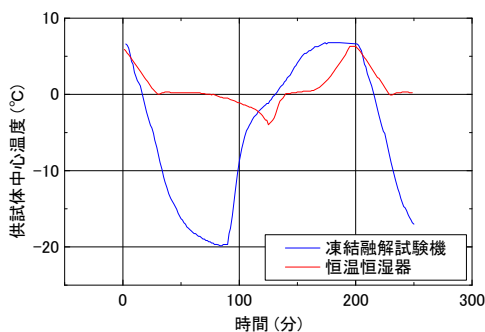


図-6 円柱供試体の中心温度

凍結融解試験に用いた装置は凍結融解温度によって異なり、図-5に示すように最低温度-18°Cには凍結融解試験機を、最低温度-3°Cには恒温恒湿器を用いた。図-6に凍結融解試験で測定した円柱供試体の中心温度を示す。凍結融解試験機では不凍液を用いることで効率よく円柱供試体の温度を変化させることが可能であり、不凍液の温度を-22~9°Cに設定した結果、円柱供試体の中心温度は-20.0~+6.8°Cとなった。一方、恒温恒湿器では熱伝達係数が小さい空気で供試体温度を変化させる方法であり、恒温恒湿器内の温度を-6.8~19.8°Cに設定した結果、円柱

シ樹脂が含浸しやすくなるように、質量がほぼ一定となるまで40℃の恒温槽内で5日間乾燥させた。カップ内の超低粘度エポキシ樹脂に切断供試体を浸漬し、デシケータ内に密封して、ゲージ圧力が0.1MPaとなるまで真空ポンプで減圧した。減圧の継続時間は2分間とし、その後、大気圧環境下に3分間保持する工程を、超低粘度エポキシ樹脂の可使時間(30~40分間)を考慮して7回繰り返した。

含浸完了後に切断供試体を2日間以上静置し、切断供試体を湿式コンクリートカッターで横断方向に2等分に切断した。切断面に紫外線を照射し、写真を撮影した。パソコンに取り込んだ写真の画像データに対して紫外線で変色した境界部に目視で線を引くことで区切り、区切られた範囲内の画素数を画像解析により求めることで変色していない中央部の面積を測定した。劣化部の面積は、凍結融解試験前の断面積から変色していない中央部の面積を引くことで算定した。

3. 試験結果および考察

3.1 凍結融解作用による圧縮強度の低下

切断供試体の採取位置と圧縮強度の関係を図-9に示す。なお、凍結融解試験の最低温度が-18℃の場合は凍結融解サイクル数100回で、最低温度が-3℃の場合は凍結融解サイクル数200回で、円柱供試体表面に明確なスケールリングが確認された。圧縮強度は円柱供試体から切断した上段の切断供試体が最も小さく、中段と下段が概ね同じ値となった。図-10にNo.0から採取した上段、中段および下段の切断供試体の密度を示す。図-10より、中段および下段の密度が上段よりも大きいことを確認した。したがって、中段および下段の圧縮強度が上段より大きいのは、CAモルタルの硬化過程において、中段より下側の密度が増加したためと考えられる。

圧縮強度と凍結融解サイクル数の関係を図-11に示す。同図には線形近似曲線も示した。最低温度および切断供試体の採取位置にかかわらず、凍結融解サイクル数が増加するにしたがい、圧縮強度は低下する傾向を示した。また、凍結融解サイクル数に対する圧縮強度の低下

割合(線形近似曲線の傾き)は、最低温度-18℃の方が最低温度-3℃よりも大きいことを確認した。コンクリートでは凍結融解試験の最低温度によって相対動弾性係数が低下する割合が異なることが確認されており⁸⁾、本研究の範囲内においてCAモルタルも最低温度が低いほど圧縮強度が低下したものと考えられる。

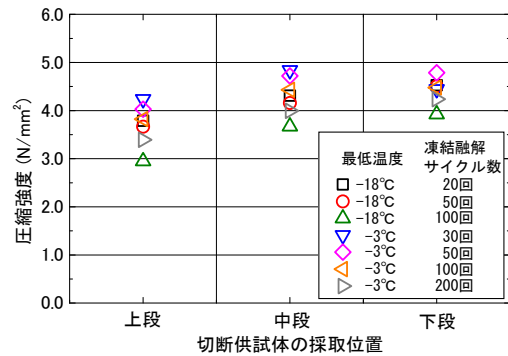


図-9 切断供試体の採取位置-圧縮強度の関係

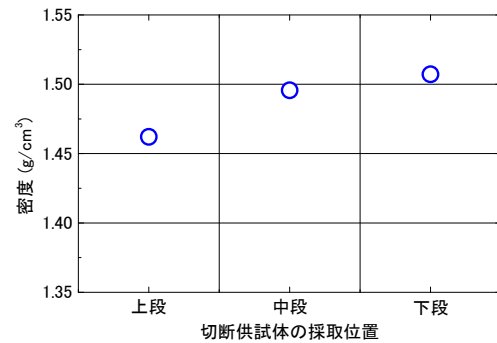


図-10 切断供試体 (No. 0) の採取位置-密度の関係

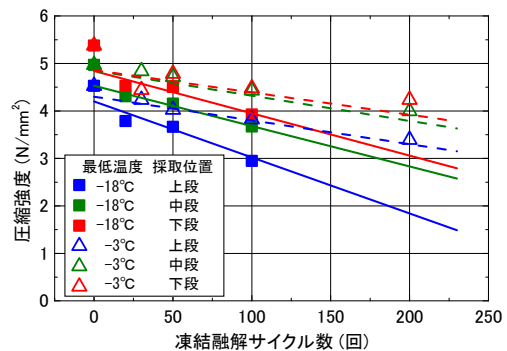


図-11 圧縮強度-凍結融解サイクル数の関係

表-5 凍結融解試験による劣化範囲

	-18~5℃			-3~5℃			
	20回	50回	100回	30回	50回	100回	200回
上端							
下端							

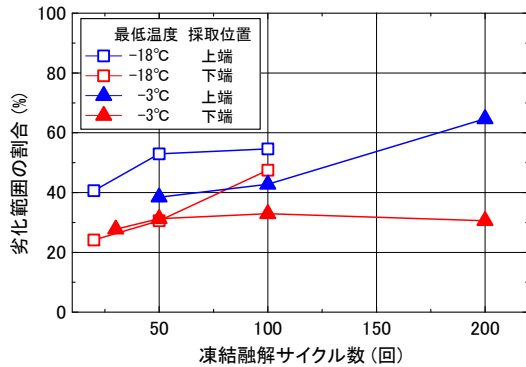


図-12 劣化範囲の割合-凍結融解サイクル数の関係

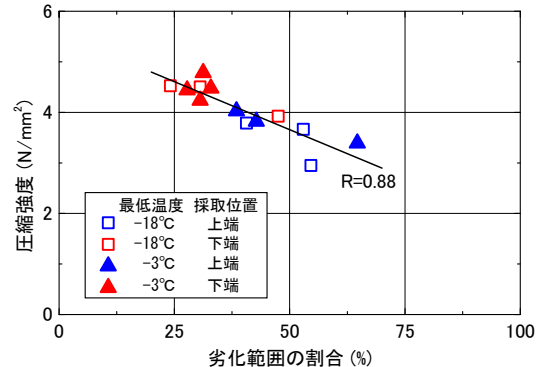


図-13 圧縮強度-劣化範囲の割合の関係

3.2 凍結融解試験による劣化範囲

含浸試験で撮影した写真の一覧を表-5に示す。切断供試体断面外周部の着色された範囲が超低粘度エポキシ樹脂の含浸範囲であり、本研究ではこの含浸範囲を劣化範囲とした。最低温度-3°Cで凍結融解サイクル数30回の凍結融解試験を実施した上端の切断供試体の劣化範囲は、他の切断供試体と比較して極端に小さいことから、含浸試験に不備があった可能性があると考えられ、以後の検討には含んでいない。なお、超低粘度エポキシ樹脂は健全なCAモルタルに含浸しないことは確認されている⁹⁾。

劣化範囲の割合と凍結融解サイクル数の関係を図-12に示す。劣化範囲の割合は画像処理に基づいて求めた劣化範囲の面積を凍結融解試験前の断面積で除すことで算定した。最低温度-3°Cの下端の切断供試体は凍結融解サイクル数50回以降において劣化範囲の割合は増加せず、その他のケースでは凍結融解サイクル数の増加に対して劣化範囲の割合も増加する傾向を示した。また、最低温度で劣化範囲の割合を比較すると、最低温度-18°Cの方が最低温度-3°Cよりも広くなることを確認した。

コンクリートに対する凍結融解作用では、最低温度が低いほど、コンクリート内部の、より小さな毛細管空隙の水が凍結するため、劣化の程度が大きくなるとされている¹⁰⁾。CAモルタルでも同様な現象が生じ、最低温度-18°Cの圧縮強度の方が低くなったものと考えられる。

最低温度-3°Cの下端の切断供試体で劣化範囲の割合が凍結融解サイクル数50回以降に増加しなかった。この要因として最低温度が高かったことから凍害が生じにくい状況であったことに加えて、3.1項に示したように上端よりも下端の密度の方が大きいことから、上端と下端で気泡組織が異なり、下端の方が耐凍害性の高い空気量や気泡間隔係数を有していた可能性があるものと考えられる。

3.3 凍結融解作用による劣化範囲と圧縮強度の関係

凍結融解による劣化範囲の割合と圧縮強度の関係を図-13に示す。ここで、上端および下端の切断供試体の圧縮強度には、それぞれ上段および下段の圧縮強度を用い

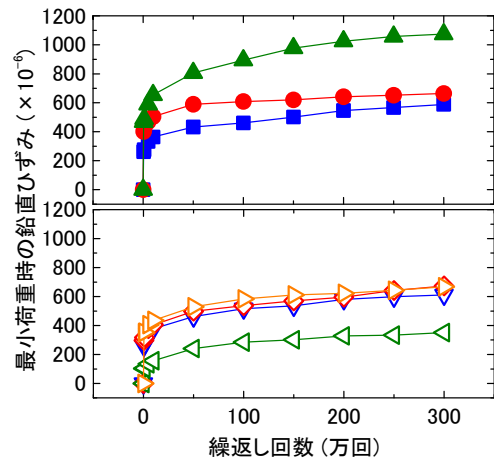
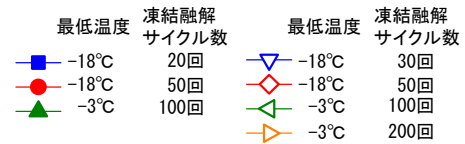


図-14 ひずみ-凍結融解サイクル数の関係

た。図-13より、強度と劣化範囲の割合との間に、相関係数0.87となる強い相関関係があることから、凍結融解試験後の圧縮強度の低下は、劣化範囲内の圧縮強度が低下することによって生じているものと考えられる。

3.4 圧縮疲労試験による鉛直ひずみ

圧縮疲労試験から得られた繰返し回数と最小荷重時の鉛直ひずみの関係を図-14に示す。凍結融解試験後の圧縮強度の50%に相当する荷重振幅で圧縮疲労試験を行った結果、鉛直ひずみは繰返し回数20万回までの間に急激に増加し、繰返し回数100万回以降はほぼ線形的に増加した。なお、図-14に示した鉛直ひずみは変位計で測定した荷重板の変位量から換算して算出したため、繰返し回数20万回程度までに増加する鉛直ひずみには切断供試体と荷重板の不完全接触の影響等が含まれている可能性が高い。

CAモルタルの圧縮疲労寿命は、図-15に示すように圧縮疲労によって残留するひずみが静的破壊ひずみ(圧縮試験における最大荷重時のひずみ)の50%に達する際の繰返し回数とし、残留ひずみを「初期ひずみ」と「ひ

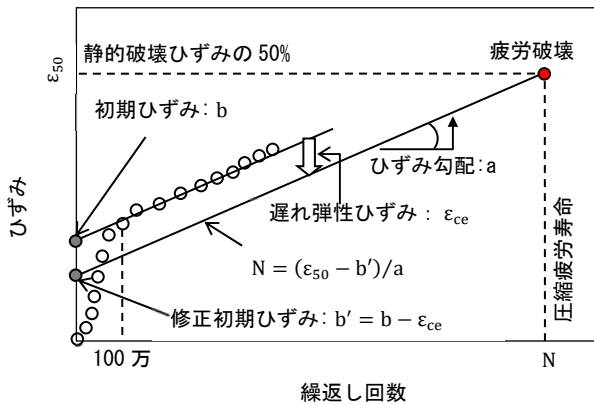


図-15 圧縮疲労寿命の算定方法¹¹⁾

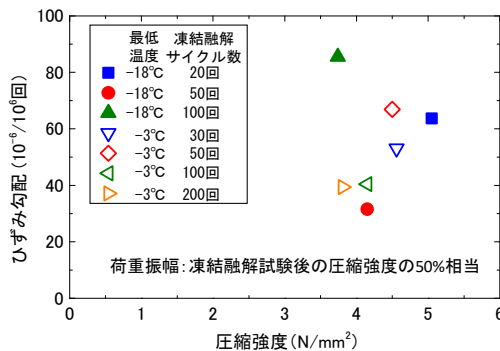


図-16 圧縮疲労試験によるひずみ勾配

ずみ勾配」を用いて算定する方法が提案されている¹¹⁾。そこで、載荷板の影響が少ないと考えられる繰返し回数 100 万回以降における鉛直ひずみと繰返し回数の線形回帰直線の傾き（以下、「ひずみ勾配」とする）を用いて、凍害が与える影響について検討した。

図-16 に圧縮強度とひずみ勾配の関係を示す。凍結融解試験後の圧縮強度試験で得られた破壊荷重の 50% の荷重振幅で圧縮疲労試験を実施した結果、圧縮強度とひずみ勾配の間に明確な相関関係は確認されず、ひずみ勾配は $32 \sim 86 \times 10^{-6}/10^6$ 回となり、大きな違いがないことを確認した。凍結融解試験後の圧縮試験における破壊荷重は、劣化していない健全部の圧縮強度に依存していると考えられ、圧縮疲労試験の繰返し荷重は、この劣化していない健全部の圧縮強度に基づいて定められていたと考えられる。したがって、圧縮疲労試験では繰返し荷重の大部分を健全部が支持しており、圧縮破壊荷重の 50% の荷重振幅で実施した疲労試験では、ひずみ勾配に大きな違いが生じなかったと考えられる。

6. まとめ

CA モルタルに対する凍結融解試験および圧縮疲労試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 凍結融解サイクル数の増加に伴い圧縮強度が低下すること、また最低温度が低いほど圧縮強度の低下割合が大きくなることを確認した。

- (2) 凍結融解試験の最低温度が低いほど劣化範囲の割合が大きくなる傾向にあることを確認した。
- (3) 凍結融解試験による劣化範囲の割合と圧縮強度の間に相関があることを確認した。
- (4) 凍結融解試験後の圧縮強度試験で得られた破壊荷重の 50% の荷重振幅で圧縮疲労試験を実施した結果、ひずみ勾配に大きな違いがないことを確認した。これは、劣化していない健全部が繰返し荷重の大部分を支持していたためと考えられる。

参考文献

- 1) 原田豊, 鳥取誠一, 板井則之, 野戸崇治: 耐凍害性セメントアスファルトモルタルの開発に関する研究, 鉄道技術研究報告, No.1208, 1982.3
- 2) 宮田尚彦, 上野眞, 板井則之: 改良型寒冷地用 CA モルタルの開発試験, 鉄道技術研究所速報, No.A-86-4, 1986.1
- 3) 盛岡工務局: CA モルタル劣化調査報告書, 1983.1
- 4) 高橋貴蔵, 小滝康陽, 洲上翔太, 板倉真理佳: てん充層の劣化状態が軌道スラブの応答に与える影響に関する基礎的研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.22, pp.115-121, 2018.7
- 5) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善, pp.384-387, 2012
- 6) 手塚喜勝, 朝倉啓仁, 中村眞一, 佐々木元茂: 蛍光エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサンプルの微細ひび割れの可視化手法, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.61, v-10, 2005.2
- 7) 丸山記美雄, 木村孝司: 凍結融解作用を受けた舗装混合物に対する蛍光エポキシ樹脂含浸法による評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.72, v-038, 2017.9
- 8) 石井清, 江川顕一郎, 堤知明, 野口博章: 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会論文集, No.564, v-35, pp.221-232, 1997.
- 9) 高橋貴蔵, 小滝康陽, 桃谷尚嗣, 齊藤成彦: CA モルタルに対する凍結融解試験による劣化範囲の圧縮強度に関する基礎的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.74, v-244, 2019.9
- 10) 田畑雅幸, 洪悦朗, 鎌田栄治: コンクリートの凍害の環境要因効果に関する実験的研究: コンクリートの耐凍害性におよぼす環境要因の影響(その 1), 日本建築学会構造系論文報告集, Vol.367, pp8-15, 1986
- 11) 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣, 長沼光: スラブ軌道てん充層の疲労寿命に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.619-624, 2015.7