

論文 スラブ軌道てん充層の疲労寿命に関する研究

高橋 貴蔵^{*1}・桃谷 尚嗣^{*2}・長沼 光^{*3}

要旨：スラブ軌道のてん充層に使用されている CA モルタルの劣化に対する補修の要否は、軌道スラブの許容応力度に基づいて定められた目安値等に従って判断されているため、CA モルタルに対する評価はほとんど行われていなかった。そこで、CA モルタルの圧縮疲労寿命を推定することを目的として、てん充層の外周部の劣化によって CA モルタルに生じる圧縮応力度を有限要素解析により評価するとともに、CA モルタルの圧縮疲労試験を実施し、塑性変形の限界値に基づく S-N 曲線を提案した。これらの結果、てん充層の外周部から劣化が生じた際の CA モルタル外周部の疲労寿命を推定することが可能となった。

キーワード：スラブ軌道, CA モルタル, 圧縮疲労試験, 疲労寿命

1. はじめに

レール、軌道スラブおよびてん充層等で構成されるスラブ軌道（図-1）は、軌道スラブを支持するてん充層に用いられるセメントアスファルトモルタル（以下、「CA モルタル」と称す。）の耐凍害性の改善等を実施することで、東北新幹線および上越新幹線以降、寒冷地にも適用されてきた。しかし、寒冷地用として開発した初期の CA モルタルが用いられている一部の区間において凍害によるものと考えられる劣化が生じている¹⁾。

現在は CA モルタルの劣化によって軌道スラブの支持面積が変化した場合に生じる軌道スラブの応力度が許容応力度を満足するかどうかを考慮して定めた表-1 に示す目安値等に基づいて、補修の要否を判断している²⁾。この管理値は、幅 2.34m×長さ 4.93m×厚さ 0.19m の初期の平板軌道スラブを対象として定められたものであるが、北陸新幹線（高崎-長野）以降から採用されている幅 2.2m×長さ 4.9m×厚さ 0.19m の平板軌道スラブや枠型軌道スラブに対しても、これまで同じ管理値が用いられてきた。

また、CA モルタルの劣化を模擬したスラブ軌道供試体に対する繰返し載荷試験の結果から、繰返し回数が増加するとともに変位量が増加する傾向が確認されている。

この原因は、劣化幅が拡大することによって軌道スラブを支持している CA モルタルの圧縮応力度が増加し、繰返し荷重により塑性変形が進行するためとしている³⁾。

したがって、スラブ軌道のてん充層を適切に維持管理するためには、軌道スラブの耐力と CA モルタルの塑性変形を考慮する必要がある。軌道スラブは、従来、許容応力度設計法に基づいて設計されていたが、現在では性能照査型設計法に基づいて設計が行われている。そのため、軌道スラブの耐力に対しては、てん充層の劣化を考慮して軌道スラブの曲げモーメントを算出し、鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造に示されている方法によって性能を照査することで対応することが可能である⁴⁾。一方、CA モルタルの塑性変形については、これまで検討された実績が少ないため、新たに評価する必要がある。

そこで、本研究では、てん充層の外周部からの劣化を考慮したスラブ軌道モデルに対する有限要素解析によって CA モルタル外周部に生じる圧縮応力度を算出するとともに、圧縮疲労試験によって塑性変形量を限界値とする CA モルタルの S-N 曲線を推定し、てん充層の外周部から劣化が生じた際の CA モルタル外周部の圧縮疲労寿命を評価する方法を提案した。

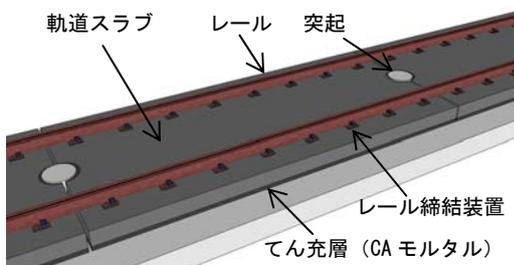


図-1 スラブ軌道の概略図

表-1 現行の補修要否の判定の目安値²⁾

損傷部	ランク	判定値
欠損	A	$s \geq 10\text{cm}$
	B	$10\text{cm} > s \geq 5\text{cm}$
	C	$5\text{cm} > s \geq 2\text{cm}$
判定 ランク	A	速やかに補修する。
	B	計画的に補修する。
	C	注意する（台帳記入）。

※s：劣化幅

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

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 主任研究員 (GL) 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 研究員 工修 (正会員)

2. 列車荷重によって生じる CA モルタルの圧縮応力度

2.1 有限要素解析の概要

(1) 解析ケース

有限要素解析に用いるスラブ軌道の諸元を表-2 に示す。軌道スラブは新幹線で使用されている寒冷地用とした⁵⁾。凍害による CA モルタルの劣化は、既往の文献の結果を踏まえ、外周部から進行するものとした⁶⁾。CA モルタルの劣化は図-2 に示す S(Side)および C(Corner)の位置に生じるものとし、劣化幅は表-3 に示す値とした。

(2) 解析モデル

有限要素解析は静的線形弾性解析とし、汎用有限要素解析ソフト NX Nastran を用いた。解析に用いた解析モデルの例を図-3 に示す。解析モデルは軌間中央で対称となる 1/2 モデルとし、軌道スラブと CA モルタルの間に摩擦係数 0.3、CA モルタルとコンクリート道床の間に摩擦係数 0.5 の接触要素を挿入した。摩擦係数 0.3 は図-1 中に示した突起の設計に用いる作用を算出する際に用いる 0.35 を参考により厳しい条件として定めた。また、一般的に軌道スラブはてん充層の上面で縁切れが生じてい

表-2 スラブ軌道の諸元

種類	軌道スラブ 寸法(m)			片レール当 たりのレール 締結装置の数	レール締結 装置の間隔 (mm)
	幅	長さ	厚さ		
A-55C(8)	2.34	4.93	0.19	8	625



図-2 CA モルタルの劣化範囲

表-3 CA モルタルの劣化幅

	解析ケース							
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
S(mm)	0	50	100	150	200	235	100	100
C(mm)	0	50	100	150	200	235	200	300

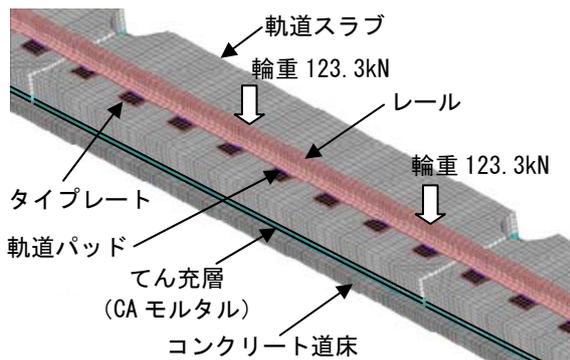


図-3 解析モデルの例

表-4 材料特性

軌道部材	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	摩擦係数
軌道スラブ	31000	0.17	下面 0.3
コンクリート道床	26400	0.17	上面 0.5
タイプレート	200000	0.3	—
レール	200000	0.3	—
軌道パッド	23.81	0.35	—
CA モルタル	1200	0.35	上面 0.3 下面 0.5

ることを考慮し、てん充層下面の摩擦係数は上面よりも大きな値として、ここでは 0.5 とした。

てん充層は標準的な厚さである 50mm とし、軌道スラブの支持範囲は図-2 および表-3 に示す範囲を除く軌道スラブの全底面とし、凍害による劣化を想定した範囲は要素を作らないものとした。レール締結装置は直結 8 形としてタイプレートおよび軌道パッドのみをモデル化し、レール締結装置の間隔は 625mm とした。レールは 60kg レールとし、レールと軌道パッド、軌道パッドとタイプレートは剛結とした。

解析に用いた材料特性を表-4 に示す。ここで、CA モルタルのヤング率は 20℃における CA モルタルの設計強度 1.8N/mm² から換算して 1200N/mm² とし、軌道スラブとコンクリート道床のヤング率は、それぞれのコンクリートの設計基準強度 40N/mm² と 27N/mm² から換算して 31.0kN/mm² と 26.4kN/mm² とし、タイプレートとレールのヤング率は 200kN/mm² とした⁴⁾。軌道パッドのばね定数はスラブ軌道で使用されている 60kN/mm とし、ばね定数が同程度となるようにヤング率を定めた。

解析では軌道スラブの疲労破壊に関する安全性の照査に用いる輪重（静的輪重 85kN × 変動輪重係数 1.45=123.3kN）を作用させた⁴⁾。作用位置は、軸距 2.5m の新幹線の台車を考慮して、軌道スラブの端部から 1 番目と 5 番目のレール締結装置直上のレール頭頂面とした。

2.2 有限要素解析の結果

軌道スラブ隅角部の劣化を考慮しない場合（解析ケース No.1~6）における軌道スラブの端部から 1 番目のレール締結装置（輪重載荷点）の断面に生じる CA モルタル上面の圧縮応力度分布を図-4 に示す。劣化幅が 100mm 程度まではレール直下に生じる圧縮応力度はほぼ一定であり、側面に生じる値よりも大きいことがわかった。また、劣化幅が 200mm 程度になると外側の圧縮応力度はレール直下と同等になり、235mm に達するとレール直下よりも大きくなることがわかった。

つぎに、隅角部の劣化を考慮した解析ケース No.3 および No.7~8 の CA モルタルに生じる圧縮応力度のコンター図を図-5 に示す。図-5 より、CA モルタルに生じる圧縮応力度の最大値は載荷点直下に生じることを確認した。

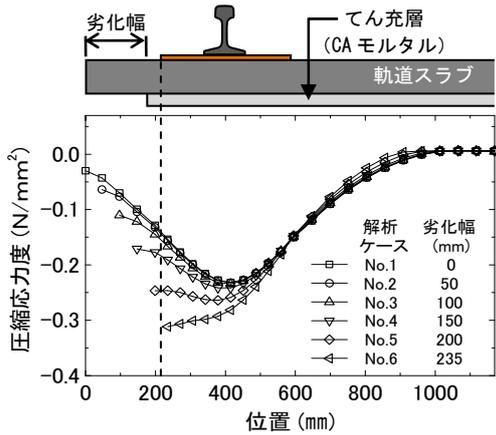


図-4 第一締結のCAモルタルの圧縮応力度分布

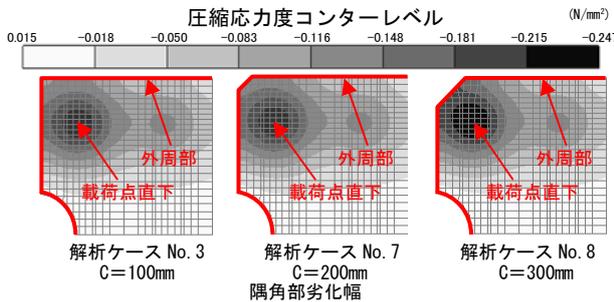


図-5 CAモルタルの圧縮応力度カウンター

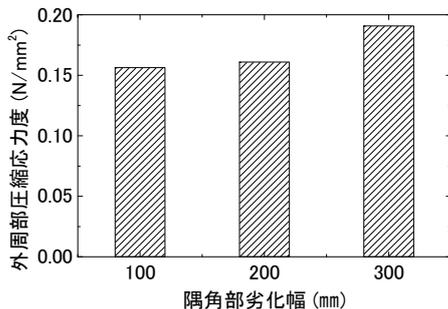


図-6 CAモルタル外周部の圧縮応力度の最大値

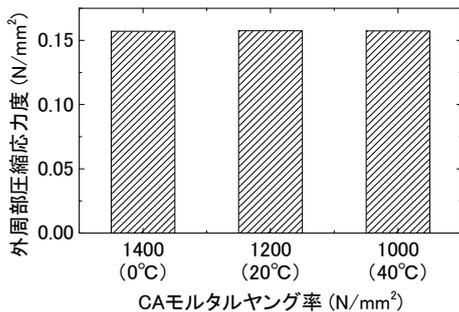


図-7 CAモルタルのヤング率と圧縮応力度の関係

一方で、3軸拘束の影響を受けない外周部に着目すると、隅角部の劣化幅Cが大きくなることで、圧縮応力度の分布が変化し、外周部の値が大きくなることがわかった。そこで、CAモルタルの外周部に生じる圧縮応力度の最大値を整理した結果を図-6に示す。図-6より、隅角部の劣化幅Cが200mmまでは、圧縮応力度の最大値はほぼ一定だが、300mmまで劣化すると最大値は増加し、

隅角部の劣化幅が100mmの場合に比べて約1.2倍になることがわかった。

なお、CAモルタルはコンクリートに比べると感温性が高い材料であり、温度の変化によって強度やヤング率といった材料特性が変化する。そこで、CAモルタルの温度を0°C、20°Cおよび40°Cとした場合のヤング率⁴⁾をそれぞれ1400N/mm²、1200N/mm²および1000N/mm²とし、ポアソン比は0.35の一定としてCAモルタルに劣化が生じていない状態で解析を行った。その結果、CAモルタルに生じる圧縮応力度は図-7に示す通りであり、温度によるCAモルタルのヤング率の違いは圧縮応力度にはほぼ影響しないことを確認した。

3. CAモルタルの圧縮疲労試験⁷⁾

3.1 圧縮疲労試験の概要

(1) CAモルタルの配合および材料

試験に使用したCAモルタルの配合と材料種別を表-5と表-6に示す。試験に使用したCAモルタルは東北新幹線大宮-盛岡間および上越新幹線大宮-新潟間の明り区間に敷設されているスラブ軌道に使用しているものと同じである。

(2) 試験方法

CAモルタルのS-N曲線を検討するため、材齢28日におけるφ50×100mmの円柱供試体に対する一軸圧縮疲労試験(以下、「圧縮疲労試験」という)を実施した。繰返し応力度の下限值は表-7に示す圧縮疲労試験の直前に別途実施して得られた圧縮強度に対して5%の一定とし、上限値は圧縮強度に対する比率(以下、「圧縮強度比」と

表-5 CAモルタルの配合

セメント (kg/m ³)	混和材 (kg/m ³)	A乳剤 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	膨張剤 (g/m ³)	消泡剤 (g/m ³)	AE剤 (kg/m ³)	添加水 (kg/m ³)
279	31	496	620	40	155	7.8	65

表-6 使用材料

材 料	種 類	比重
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
A乳剤	アスファルト乳剤	1.02
細骨材	山形県大石田町産天然硅砂 (6号と7号のブレンド、粗粒率:1.4)	2.63
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
添加水	水道水	1.00

表-7 圧縮疲労試験直前の圧縮強度

圧縮強度比(%)	圧縮強度(N/mm ²)		
	0°C	20°C	40°C
15	4.0	2.7	2.4
35	3.8	3.0	2.2
55	4.4	2.9	2.2
75	3.4	2.5	2.6

表-8 一軸圧縮疲労試験条件

雰囲気温度	繰返し応力度の上限値 (圧縮強度比)
0,20,40℃	15,35,55,75%

いう)として表-8に示す値を用いた。なお、圧縮疲労試験は、CAモルタルの感温性を考慮し、0℃、20℃および40℃で湿度60±5%の恒温恒湿室で実施した。

载荷周波数は20Hzとし、荷重制御の正弦波で载荷した。繰返し回数は最大500万回とし、疲労破壊した時点で試験を終了した。また、500万回まで達した場合は、荷重を除荷して24時間の遅れ弾性ひずみを測定した。

3.2 圧縮疲労試験の結果

0℃、20℃および40℃における圧縮疲労試験から得られた繰返し回数と最大荷重時のひずみの関係を、それぞれ図-8～図-10に示す。圧縮強度の15～55%に相当す

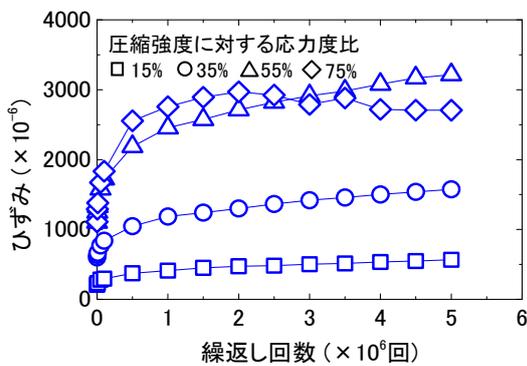


図-8 0℃での繰返し回数-ひずみ関係

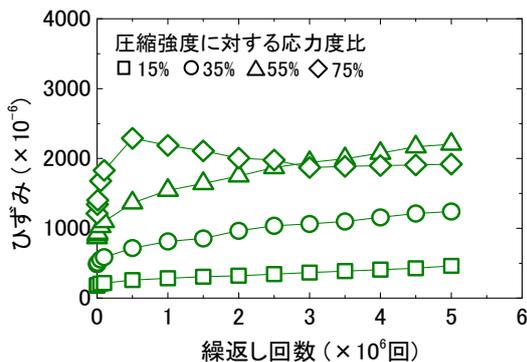


図-9 20℃での繰返し回数-ひずみ関係

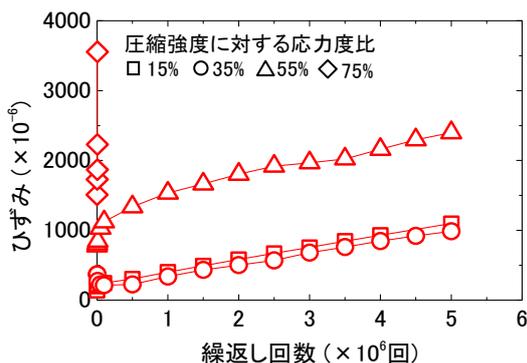


図-10 40℃での繰返し回数-ひずみ関係

る荷重で繰返し载荷した場合、ひずみは繰返し回数100万回までの間に急激に増加し、その後線形的に増加した。繰返し回数100万回以降における線形回帰直線の傾きをひずみ勾配と定義して図-11に示し、線形回帰直線の繰返し回数0回における切片を初期ひずみと定義して図-12に示す。

図-11より、各温度において、ひずみ勾配は繰返し荷重の増加に伴い大きくなる傾向にあった。ただし、40℃では繰返し荷重が最も小さい条件でもひずみ勾配が大きく、载荷一回当たりの疲労度が大きいことがわかった。

図-12より、各温度において、初期ひずみは繰返し荷重の増加に伴い大きくなる傾向にあり、繰返し荷重と概ね比例関係にあることがわかった。また、初期ひずみを同一荷重条件で比較すると20℃と40℃の値は概ね等しいものの、0℃の値はこれらの1.5～1.6倍になることを確認した。ここで、40℃の条件で繰返し荷重の最大値を圧縮強度の35%としたケースについて、繰返し回数50万回までひずみが低下したため、図-12には示していない。このケースについては試験時の繰返し荷重が50万回までの間に試験装置の不具合により8%程度小さくなったことがひずみ低下の原因の一つとして考えられる。

圧縮強度の75%に相当する荷重で繰返し载荷した場合、図-13に示すように0℃では200万回以降、20℃では50万回以降でひずみが低下した。また、40℃では0.5万回以降でひずみが急激に進展した。ひずみが低下あるいは急激に進展したのは、繰返し载荷によってせん断面にひ

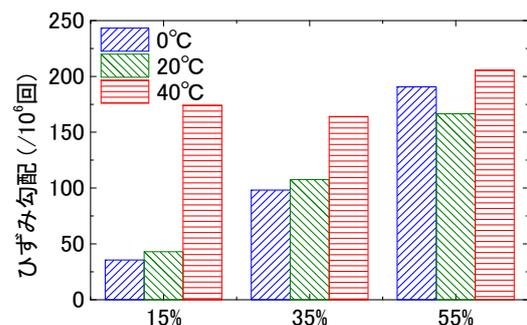


図-11 繰返し応力度とひずみ勾配の関係

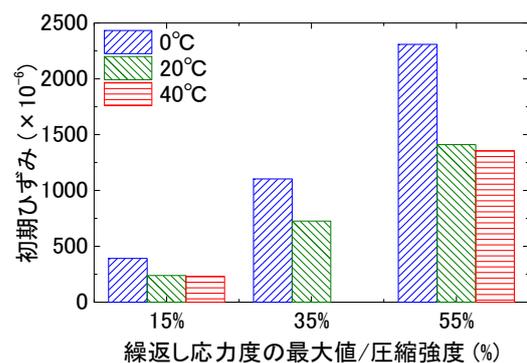


図-12 繰返し応力度と初期ひずみの関係

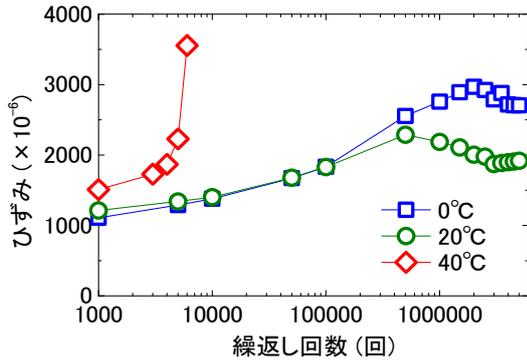


図-13 応力度比 75%での繰返し回数-ひずみ関係

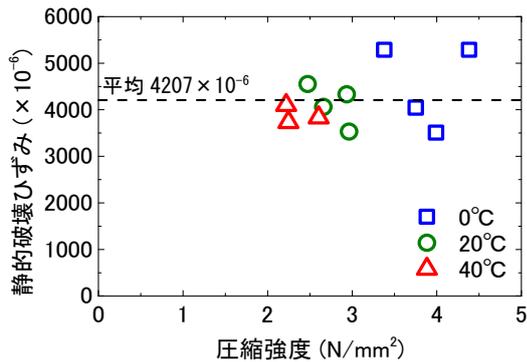


図-14 圧縮強度と静的破壊ひずみの関係

ずみが増加したためと考えられ、ひずみゲージの測定位置がせん断面の近傍の場合、ひずみが増加し、せん断面から離れている場合、ひずみが低下したものと考えられる。ひずみの進展の変化は、 $2000 \sim 3000 \times 10^{-6}$ 程度で生じており、この際の繰返し回数を圧縮疲労寿命とした。表-7 に示した静的圧縮試験で得られた最大荷重時のひずみ（以下、「静的破壊ひずみ」と称す。）は図-14 に示す通り $3500 \times 10^{-6} \sim 5500 \times 10^{-6}$ の範囲であり、圧縮強度に対する相関が小さく、平均値は 4207×10^{-6} であった。以上より、本試験条件において、圧縮疲労試験による最大荷重時のひずみが静的破壊ひずみの平均値に対して約 50~70%となると疲労寿命に達するものと考えられる。

3.3 CA モルタルの S-N 曲線

CA モルタルの圧縮疲労破壊は静的破壊ひずみの 50% に達すると生じるものとし、繰返し回数 100 万回以降の線形回帰直線を用いて寿命を推定するものとした。圧縮疲労寿命の推定に関する概念を図-15 に示す。なお、静的破壊ひずみは、図-14 に示した結果を考慮し、圧縮強度にかかわらず、平均的な値として 4000×10^{-6} とした。

スラブ軌道の CA モルタル外周部の疲労寿命を算定する場合、季節変動による温度変化の影響を考慮する必要がある。そこで、想定する温度に対する圧縮疲労寿命の推定に用いる線形回帰直線のひずみ勾配と初期ひずみは、図-11 と図-12 に対して線形補間により定めるものとする。ただし、実際のスラブ軌道では、圧縮疲労試験のように持続的な繰返し荷重を受けないことから、クリー

プひずみの影響を最小化する必要がある。そのため、圧縮疲労寿命を推定する場合は、図-12 に示す線形回帰直線の初期ひずみから図-16 に示す圧縮疲労試験終了 24 時間後の遅れ弾性ひずみを差し引いた修正初期ひずみを用いるものとした。なお、除荷後 24 時間での遅れ弾性ひずみは一定値に漸近していることを確認している。

また、CA モルタルの圧縮強度は表-7 に示したように温度によって変化することから、疲労寿命を推定する際に用いる圧縮強度についても温度の影響を考慮する必要がある。そこで、表-7 に示した圧縮強度の結果から、図-17 に示すように 20°Cにおける圧縮強度を基準強度とする式(1)に示す算定式を用いて圧縮強度を算定した。

$$f'_{CAM} = f'_{CAM20} \cdot (1 + 0.0135(20 - T)) \quad (1)$$

ここに、 f'_{CAM} : 圧縮強度(N/mm²)

f'_{CAM20} : 20°Cにおける圧縮強度(N/mm²)

T : CA モルタルの温度(°C)

上述した方法で推定した基準強度を 2.5 N/mm^2 とした場合の 0°C~40°Cにおける圧縮疲労寿命を図-18 に示す。なお、ここで示した疲労寿命は外周部を対象としており、

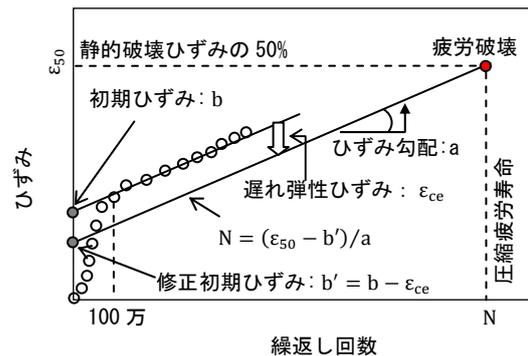


図-15 圧縮疲労寿命の算定方法

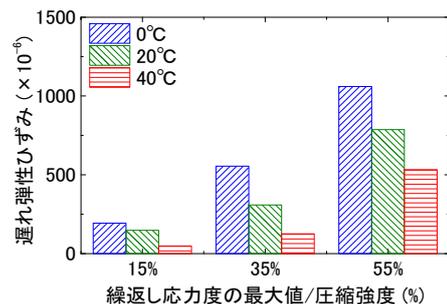


図-16 繰返し応力度と遅れ弾性ひずみの関係

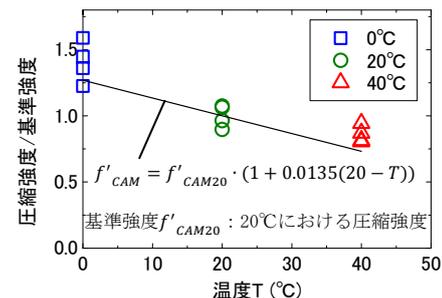


図-17 圧縮強度/基準強度と温度の関係

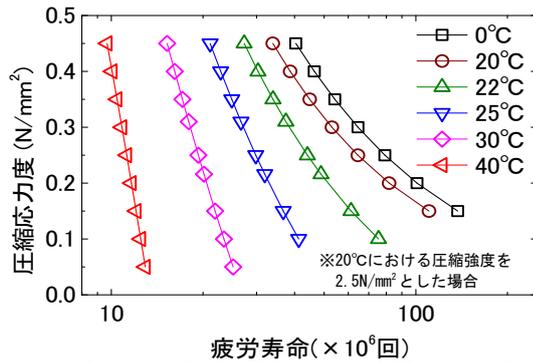


図-18 CAモルタルの圧縮疲労寿命の例

レール直下ではCAモルタルは3軸拘束下にあることから、外周部より圧縮疲労寿命は長いと考えられる。

4. スラブ軌道におけるCAモルタル外周部の疲労寿命

「2.2 有限要素解析の結果」に示した解析モデルに対して列車荷重によって軌道スラブを支持するCAモルタル外周部に生じる圧縮応力度を算出し、この値を用いて「3.3 CAモルタルのS-N曲線」に示したCAモルタルのS-N曲線から算定した圧縮疲労寿命に達する年数を表-9に示す。ここで、圧縮疲労寿命の算定には実際の列車荷重および圧縮強度に近い値を用いる必要がある。そのため、列車荷重は100%乗車時を対象とした輪重64kNに変動輪重係数1.45を乗じた荷重を用い、CAモルタルの圧縮強度は表-7に示した20°Cの中で最も小さな2.5N/mm²とした。繰返し回数は新幹線の編成を16両とし、1日当たりの列車本数は、軌道スラブが敷設されている区間を考慮して75本と仮定して算出した。

疲労寿命の算出に当たっては冬季(1~3月)、春季(4~6月)、夏季(7~9月)および秋季(10~12月)の平均温度を、前述のように敷設されている区間を考慮してそれぞれ-1.4°C、14.0°C、24.1°Cおよび6.5°Cとし、各季節における被害度を個々に算出し、それぞれを足し合わせた値が1.0となった場合に疲労破壊が生じるとする線形被害則を取り入れている。なお、-1.4°Cにおけるひずみ勾配、修正初期ひずみおよび圧縮強度は外挿により求めた。

CAモルタルの圧縮応力度は、図-7に示したように0~40°Cの温度の影響を考慮したCAモルタルのヤング率1000~1400N/mm²によらずおおむね等しい。そのため、各季節におけるCAモルタルの圧縮応力度は、温度の影響を省略してCAモルタルのヤング率を1200N/mm²として算出した値を用いた。

表-9より、側面の劣化がタイプレートの位置(S=235mm)まで達すると、CAモルタルの外周部が圧縮疲労寿命に達する年数は33.6年と推定された。また、側面のみが100mm劣化した場合よりも、側面100mmと

表-9 CAモルタル外周部が疲労寿命に達する年数

		隅角部劣化幅 C(mm)			
		0	100	200	300
側面劣化幅 S (mm)	0	57.4年	-	-	-
	50	57.3年	-	-	-
	100	56.7年	56.7年	55.6年	49.5年
	150	52.8年	-	-	-
	200	40.5年	-	-	-
	235	33.6年	-	-	-

隅角部 300mm の両方が劣化した場合の方が寿命に達する年数が7年程度短くなると推定された。

5. まとめ

本研究によって得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 有限要素解析の結果、スラブ軌道でん充層に用いているCAモルタルの劣化により、CAモルタル外周部に生じる圧縮応力度が大きくなることを確認した。
- (2) CAモルタルの圧縮疲労試験を実施し、塑性変形量を限度値とする温度の影響を考慮したCAモルタルのS-N曲線を提案した。
- (3) 有限要素解析から得られた圧縮応力度と圧縮疲労試験から得られたS-N曲線を用いて、季節の変化に伴う温度の影響を考慮したスラブ軌道でん充層に用いられているCAモルタル外周部に対する疲労寿命の推定を行った。

参考文献

- 1) 佐藤靖紀, 原口征人, 赤川敏: スラブ軌道におけるCAモルタルの経年劣化, 土木学会年次学術講演会, No.4, Vol.56, pp.548-549, 2001.9
- 2) 鉄道総合技術研究所: スラブ軌道各部補修の手引, 鉄道総合技術研究所, pp.55, 2002.2
- 3) 高橋貴蔵, 瀧上翔太, 桃谷尚嗣, 藪中嘉彦: スラブ軌道でん充層の補修効果に関する研究, 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム, s2-3-6, 2014.12
- 4) 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, 2012.1
- 5) 日本国有鉄道著: 東北新幹線工事誌大宮・盛岡間, pp.268, 1983.1
- 6) 長沼光, 高橋貴蔵, 藪中嘉彦, 桃谷尚嗣: 寒冷地のスラブ軌道用でん充層の劣化深さに関する検討, 土木学会第68回年次学術講演概要集, pp.567-568, 2013.9
- 7) 高橋貴蔵, 長沼光, 桃谷尚嗣, 藪中嘉彦: セメントアスファルトモルタルの圧縮疲労強度, 土木学会第68回年次学術講演概要集, pp.269-270, 2013.