

論文 支持状態を考慮した鉄道用軌道スラブの限界値の評価に関する研究

高橋 貴蔵*1・小滝 康陽*2・桃谷 尚嗣*3・洲上 翔太*4

要旨: 新幹線における主要な軌道構造の一つであるスラブ軌道の一部では軌道スラブを支持する CA モルタルに劣化などが発生しており, 設計で想定しているよりも小さな輪重で軌道スラブが限界値に達する可能性がある。そこで, CA モルタルによる支持状態が軌道スラブの限界値に与える影響を評価することを目的に, スラブ軌道模型供試体の载荷試験を再現することが可能な解析モデルを作成した。そして, 支持状態を考慮することが可能な実物大のスラブ軌道の解析モデルに拡張し, 軌道スラブに生じるひび割れなどの発生位置や限界値に達する輪重を想定することが可能であることを確認した。

キーワード: スラブ軌道, 軌道スラブ, CA モルタル, 有限要素解析, 限界値

1. はじめに

山陽新幹線(岡山-博多間)以降において A 形スラブ軌道(以下, スラブ軌道と称する)は新幹線の主要な軌道構造として使用され, 現在では整備新幹線の 9 割以上に敷設されている¹⁾。スラブ軌道の基本的な構造は, 図-1 に示すようにレールを締結した軌道スラブをてん充層で支持し, 軌道スラブの両端中央部に配置する突起によって軌道スラブの移動を防止するものである。

軌道スラブの設計では, てん充層による軌道スラブの支持状態は変化しないものとされているが, てん充層に用いられているセメントアスファルトモルタル²⁾(以下, 「CA モルタル」と称す。)の一部では図-2 に示す凍害によると考えられる隙間や欠損が確認されている³⁾⁴⁾。

このように CA モルタルによる軌道スラブの支持状態が変化すると列車通過時における軌道スラブの動的変位が増加するばかりではなく, 設計で想定しているよりも小さな輪重で軌道スラブに生じる曲げモーメントが増加

し, 限界値に達する可能性がある。スラブ軌道模型供試体に対する载荷試験では支持状態が変化することで耐力に達する荷重が低下することが確認されている⁵⁾。したがって, スラブ軌道の維持管理を計画的に実施するためには, CA モルタルによる支持状態を考慮した軌道スラブの限界値を評価する必要があると考えられる。

そこで, 本稿では CA モルタルによる支持状態が軌道スラブの限界値に与える影響を非線形有限要素解析によって評価することとした。はじめに支持状態を変化させたスラブ軌道模型供試体に対する载荷試験結果を再現することが可能な解析モデルを作成した。次に, 作成した解析モデルを実物大のスラブ軌道に拡張し, CA モルタルの支持状態によって軌道スラブに生じるひび割れなどの発生位置ならびに限界値に達する輪重に関する評価を行った。なお, 本研究の非線形有限要素解析には, 陽解法に基づく非線形動的構造解析汎用コード LS-DYNA (ver.971) を用いている。

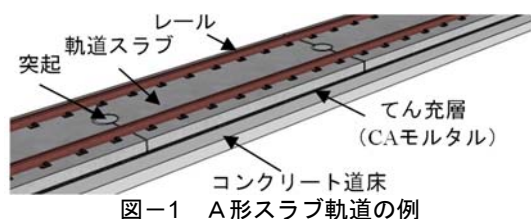


図-1 A形スラブ軌道の例

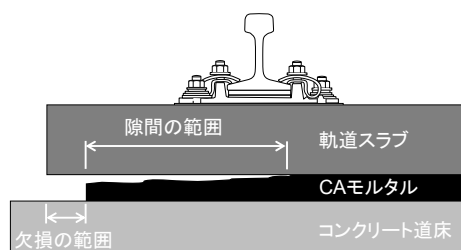


図-2 CA モルタルに生じている劣化の模式図

2. スラブ軌道模型供試体の概要

非線形有限要素解析の対象としたスラブ軌道模型供試体(以下, 「スラブ供試体」と称す。)の形状を図-3 に示す。これらのスラブ供試体は, 参考文献 5) における载荷試験で用いられたものであり, スラブ軌道の端部を線路横断方向に切り出したような形状である。スラブ供試体に対する载荷はレールの位置で行った。

スラブ供試体に用いられた鉄筋コンクリート梁の配筋図を図-4 に示す。鉄筋コンクリート梁の高さと長さは, 軌道スラブの高さとレール直角方向の幅に合わせており, 軸方向鉄筋の高さは軌道スラブの線路直角方向の鉄筋に合わせている。また, 鉄筋比も軌道スラブに概ね合わせている。なお, 軌道スラブの性能照査は曲げモー

*1 (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 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 研究員 工修

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

*4 (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)

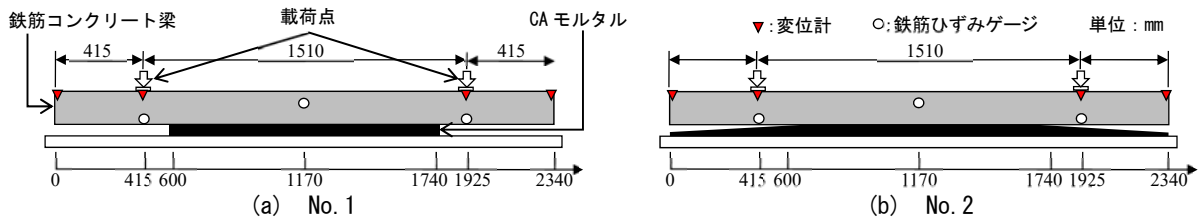


図-3 スラブ軌道模型供試体の形状

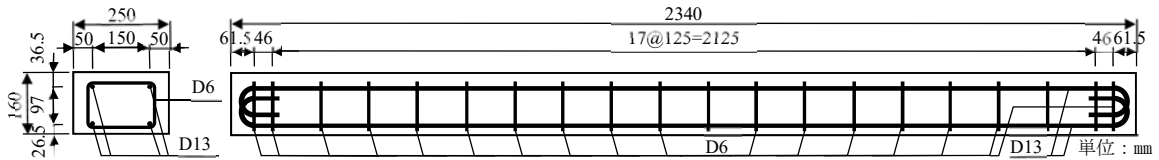


図-4 スラブ供試体に用いる鉄筋コンクリート梁の寸法および配筋図

表-1 CAモルタルの厚さの設計値

	端部からの距離 (mm)			
	0	600	1740	2340
No. 1	0mm	50mm	50mm	0mm
No. 2*	40mm	50mm	50mm	40mm

※0~600mm および 1740~2340mm の間の CA モルタルの厚は直線勾配で設定した

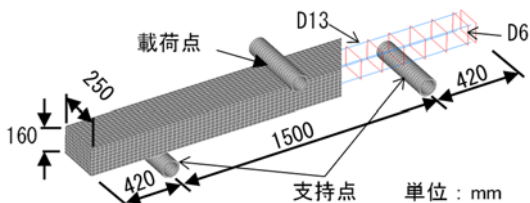


図-5 鉄筋コンクリート梁の3点曲げの解析モデル

メントに対して行われているため、鉄筋コンクリート梁にはせん断破壊が先行しないようにせん断補強鉄筋が配筋されている。せん断補強鉄筋には鉄筋コンクリート梁のかぶりを考慮して、実際の軌道スラブでは配筋されていないD6の鉄筋が用いられている。スラブ供試体のCAモルタルの厚さは表-1に示すとおりであり、両端600mmの範囲において、No.1には欠損、No.2には隙間を設けている。

3. スラブ軌道模型供試体の有限要素解析

3.1 解析モデル

(1) 鉄筋コンクリート梁

スラブ供試体の解析モデルを作成する事前検討として、鉄筋コンクリート梁の解析モデル(図-5)が破壊に至るまでの過程をシミュレートすることが可能か3点曲げ荷重試験の結果⁵⁾と比較した。曲げ荷重試験の支点間距離は1500mm、せん断スパンは750mmである。図-3に示したスラブ供試体に対する荷重試験では、鉄筋コンクリート梁の上縁側が引張となるため、3点曲げ荷重試験では鉄筋コンクリート梁の上下を反転した。

鉄筋コンクリート梁のコンクリートには8節点のソリッド要素、鉄筋にはビーム要素を用いた。また、荷重点と支持点は剛体の円筒モデルとし、支持点の円筒モデル

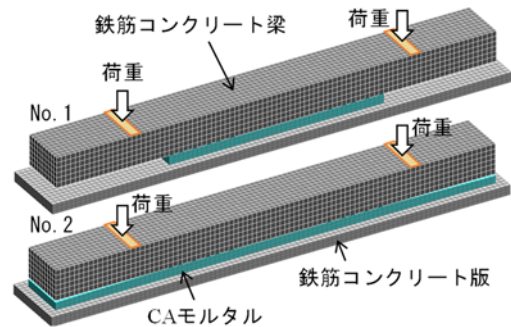


図-6 スラブ供試体モデル

は全方向変位成分を拘束した。

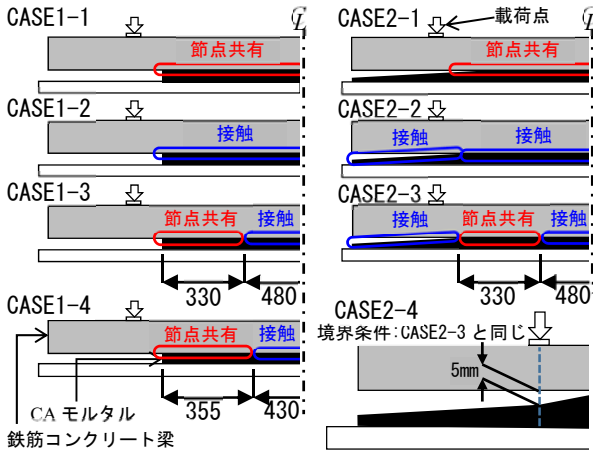
コンクリートと鉄筋の要素間は完全付着とし、鉄筋コンクリート梁と荷重点および支持点の円筒モデルの境界部には接触を定義した。

(2) スラブ供試体

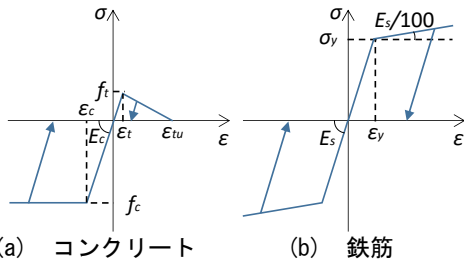
スラブ供試体の解析モデルを図-6に示す。鉄筋コンクリート梁の解析モデルは図-5と同じとした。

CAモルタルには8節点のソリッド要素を用いた。CAモルタルの下部には鉄筋コンクリート版をモデル化し、その底部の全方向変位成分を拘束した。

スラブ供試体 No.1 および No.2 の鉄筋コンクリート梁と CA モルタルの境界条件は、それぞれ図-7に示す4種類とし、鉄筋コンクリート梁と CA モルタルが付着していると仮定した範囲は節点共有とし、その他の範囲には接触を定義した。内側で接触を定義したのは、荷重の増加によって鉄筋コンクリート梁の中央部が上方に変位したためである⁵⁾。CAモルタルの形状は表-1と同じとした。ただし、図-7のCASE2-1からCASE2-4に対してはスラブ供試体のCAモルタルの製作誤差⁵⁾を踏まえ、両端部のCAモルタルの厚さを表-1に示す40mmから37.5mm(隙間の厚さを10mmから12.5mm)に、さらにCASE2-4においては荷重点直下のCAモルタルの厚さを46.9mmから45mm(隙間の厚さを3.1mmから5mm)に変更した。ここで、接触面の摩擦係数は0.7~1.05⁶⁾と推定されていることを参考に、本解析では0.7に設定した。



(a) No. 1 (b) No. 2
図-7 スラブ軌道模型供試体の境界条件



(a) コンクリート (b) 鉄筋
図-8 相当応力-相当ひずみ関係

3.2 スラブ軌道模型供試体の材料諸元

本解析に用いたコンクリートならびに鉄筋の相当応力-相当ひずみ関係を図-8に示す。CA モルタルにもコンクリートと同じ相当応力-相当ひずみ関係を用いた。解析に用いた材料諸元として、コンクリートおよび CA モルタルを表-2に、鉄筋を表-3に示す。

コンクリートおよび CA モルタルの構成則には LS-DYNA に実装されている Winfrith モデル⁷⁾を用いた。圧縮側に関しては、完全弾塑性体のパイリニア型にモデル化した。圧縮側の降伏応力は、圧縮試験から得られた圧縮強度とした。引張側に関しては、引張強度以降応力度が線形に低下するパイリニア型にモデル化した。除荷時は初期剛性で弾性復帰するものとした。表-2に示した CA モルタルのヤング率は材齢を変化させて測定した図-9に示す圧縮強度-割線弾性係数(応力度 0~0.1N/mm²)関係から推定した値である。また、表-2に示すコンクリートと CA モルタルの引張強度と破壊エネルギー、ならびに鉄筋 (D6) の降伏応力とヤング率は鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造⁸⁾に準じて算出した。なお、コンクリート要素は Ottosen の破壊基準⁹⁾に従うものとし、ひずみ速度効果の影響を考慮しないものとした。

鉄筋には、降伏後の塑性硬化係数を 1/100 とした等方弾塑性体モデルを用いた。除荷時は初期剛性で弾性復帰するものとした。なお、降伏の判定は、Von Mises の降伏条件に従うものとした。

表-2 コンクリートおよび CA モルタルの材料諸元

	単位	コンクリート	CA モルタル
圧縮強度	f'_c N/mm ²	49.9 ^{※1}	6.2 ^{※1}
引張強度	f_t N/mm ²	3.12	1.09
ひずみ	ϵ'_c	1400	2100
	ϵ_t	89	380
	ϵ_{tu}	2600	2100
ヤング率	E_c kN/mm ²	35.0 ^{※1}	2.9 ^{※2}
単位重量	ρ ton/mm ³	2.4×10^{-9}	1.7×10^{-9}
ポアソン比	γ	0.2	0.35
破壊エネルギー	G_f N/mm	100	23.1

※1: 実験値, ※2: 図-9 から推定

表-3 鉄筋の材料諸元

	単位	鉄筋	
		D13	D6
降伏応力	σ_y N/mm ²	379 ^{※1}	345
ひずみ	ϵ_y $\times 10^{-6}$	1900 ^{※1}	1700
ヤング率	E_s kN/mm ²	194 ^{※1}	200
単位重量	ρ ton/mm ³	7.8×10^{-9}	
ポアソン比	γ	0.3	

※1: 実験値

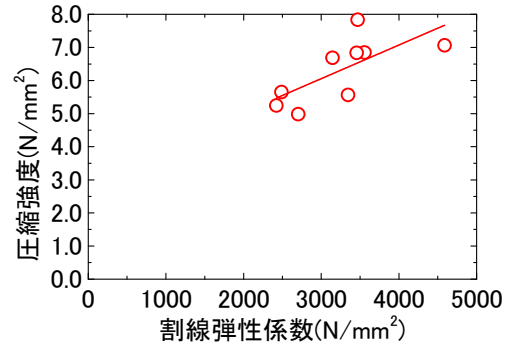


図-9 CA モルタルの圧縮強度-割線弾性係数関係

3.3 解析結果および考察

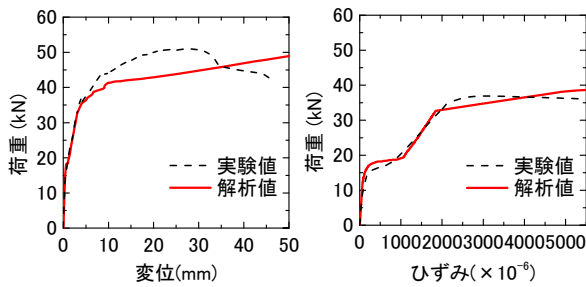
(1) 鉄筋コンクリート梁の3点曲げ載荷

3点曲げ載荷試験および有限要素解析によって得られた鉄筋コンクリート梁の荷重-中央変位関係ならびに荷重-鉄筋ひずみ関係を図-10に示す。鉄筋ひずみは載荷点直下の引張鉄筋の値であり、実験値は2本の引張鉄筋の平均値である。また、図-11に解析による最終状態のひび割れ状況を示す。

図-11より、完全に開口したひび割れ本数は3本であり、曲げ載荷試験と同じ本数であった。また、荷重-中央変位関係および荷重-鉄筋ひずみ関係は実験値と解析値でほぼ同程度であった。したがって、本解析モデルは概ね実験結果をシミュレートできていることから、スラブ供試体の解析モデルに用いることとした。

(2) スラブ供試体の載荷

スラブ供試体に対する載荷試験および有限要素解析によって得られた鉄筋コンクリート梁の荷重-変位関係を図-12に、荷重-鉄筋ひずみ関係を図-13に示す。載荷試験における両端あるいは載荷点の変位、ならびに載荷点の鉄筋ひずみは平均値である。



(a) 荷重-中央変位 (b) 荷重-鉄筋ひずみ
 図-10 3点曲げ載荷試験の実験値と解析値の比較

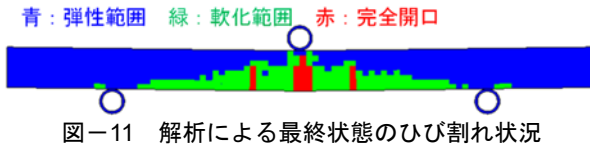


図-11 解析による最終状態のひび割れ状況

図-12に示したスラブ供試体 No.1 に対する CASE1-1 の荷重-変位関係において、荷重は実験値を上回り、逆に CASE1-2 では下回った。鉄筋コンクリート梁と CA モルタルの境界部で節点を共有とした CASE1-1 では鉄筋コンクリートの変形が CA モルタルに拘束され、接触を定義した CASE1-2 では変形が拘束されなかったことが実験と異なる結果となった要因として考えられる。

CASE1-3 と CASE1-4 は節点の共有と接触の範囲をわずかに変えたケースではあるが、両者の荷重-変位関係は異なり、CASE1-4の方が実験値に近い結果となった。この傾向は、図-13に示した鉄筋コンクリート梁の鉄筋のひずみでも同様であった。

スラブ供試体 No.2 に対して端部の変位に着目すると、変位 12mm までの範囲において境界部をすべて接触とした CASE2-2 以外は概ね実験値と同様な結果となった。また、載荷点の変位に関しては、載荷点直下の隙間量を 5mm に変更した CASE2-4 が最も実験値に近い値となった。CASE2-4 の CA モルタルの形状がスラブ供試体に近かったものと考えられる。

鉄筋コンクリート梁中央の上側鉄筋に関して、CASE2-1 ではひずみはほぼ増加せず、CASE2-2 では荷重 167kN 以下において実験値よりも大きなひずみが生じた。スラブ供試体 No.1 と同様に、境界部のすべてを共有あるいは接触とすることはスラブ供試体 No.2 に対して適していないと考えられる。一方、境界部に共有と接触を定義した CASE2-3 および CASE2-4 の鉄筋コンクリート梁中央の上側鉄筋のひずみは 1500×10^{-6} までは実験値とほぼ同じ値となった。また、載荷点直下の下側鉄筋については、荷重-変位関係と同様に、載荷点直下の隙間量を 5mm とした CASE2-4 の方が実験値に近い値となった。

なお、境界部の一部を共有することで実験と解析の値が近づいたのは、載荷試験時において鉄筋コンクリート梁と CA モルタルが付着していたためと考えられる。

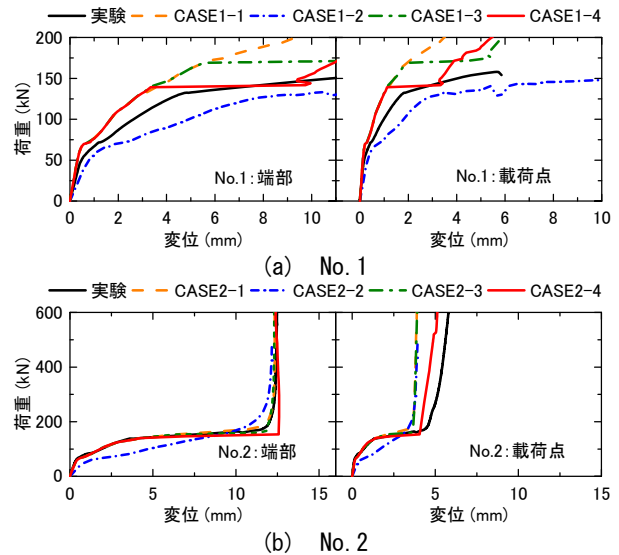


図-12 スラブ供試体の荷重-変位関係

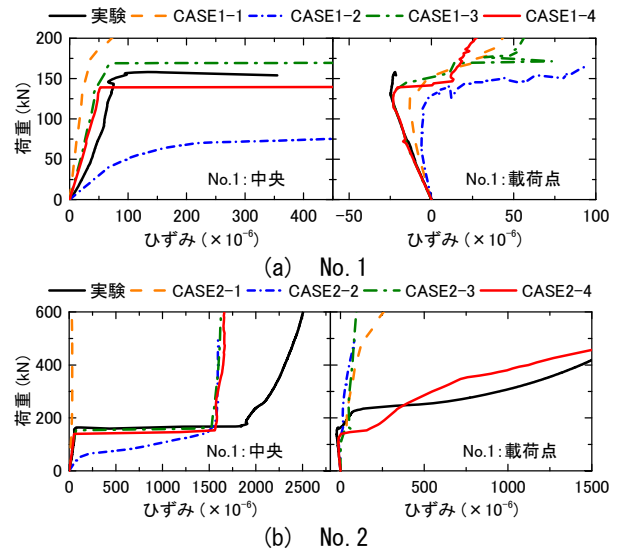


図-13 スラブ供試体の荷重-鉄筋ひずみ関係

(3) 鉄筋コンクリート梁のひび割れ・降伏荷重

実施した解析ケースの中で実験値と近い挙動を示した CASE1-4 および CASE2-4 におけるひび割れ状況を図-14に示す。両ケースともに、初期ひび割れは欠損や隙間が生じている両端から 600mm 程度の位置に発生した。ひび割れおよび鉄筋降伏の発生荷重を表-4に示す。実験に対するこれらの荷重は、荷重-変位関係の変曲点から推定した。一方、解析に対しては、引張縁のコンクリート要素のひずみが ϵ_t あるいは ϵ_{tu} に達した際をひび割れの発生荷重とし、鉄筋要素のひずみが ϵ_y に達した際を鉄筋降伏の発生荷重とした。ここで、コンクリート要素のひずみが ϵ_t に達した時点軟化開始時、 ϵ_{tu} に達した時点完全開口時とする。

No.1 および No.2 に対する載荷試験でひび割れが発生した荷重は、それぞれ 50kN および 60kN であった⁵⁾。これらの荷重は、解析による軟化開始時から完全開口時の荷重の範囲内であった。また、No.1 および No.2 対す



図-14 スラブ軌道模型供試体のひび割れ状況

表-4 ひび割れおよび鉄筋降伏の発生荷重

		No. 1		No. 2	
		実験	CASE1-4	実験	CASE2-4
ひび割れ	軟化開始時	50 kN	45 kN	60 kN	47 kN
	完全開口時		73 kN		80 kN
鉄筋降伏		130 kN	138 kN	135 kN	139 kN

る解析において鉄筋が降伏する位置は、図-14に示した初期ひび割れの発生位置とおおむね等しく、降伏する荷重はそれぞれ138kNおよび139kNであり、実験に近い値であった。

以上の結果を踏まえ、本解析モデルは隙間および欠損を考慮したスラブ供試体の荷重に対する応答を概ね再現できたものと考えられる。

4. 実物大スラブ軌道の有限要素解析

3章に示したスラブ供試体の解析モデルを実物大のスラブ軌道に拡張した解析モデルを図-15に示す。解析モデルに用いた軌道スラブの形状と配筋は実際の軌道スラブと同じとし、厚さ160mm×長さ4950mm×幅2340mmとした¹⁰⁾。コンクリートおよびCAモルタルの材料諸元は表-2と同じとし、鉄筋(D10およびD13)の材料諸元は表-3のD13と同じとした。解析モデルの全長は軌道スラブ4枚分の20mとし、輪重がレール締結部材を伝わって作用する範囲を考慮してモデル化する軌道スラブは2枚とした。軌道スラブをモデル化していない範囲の軌道パッドの底部は完全固定とした。解析モデルでは、弾性的にレールの底部を支持する軌道パッドのばね係数を60kN/mm、レールの種別を60kgレール、レールを軌道スラブに固定するレール締結部材の間隔を625mmとし、新幹線で一般的に用いられている数値とした。CAモルタルの厚さは標準的な厚さである50mmとした。ただし、図-16に示すように3章で検討したスラブ供試体と同様に側面から600mmの範囲を基本とし、隅角部ではより深い範囲にまで隙間を設けた。軌道スラブの外周部の隙間の厚さは3mmとし、支持範囲から外周部の間は直線勾配で隙間の厚さを設定した。供用中の軌道スラブは1日の間の温

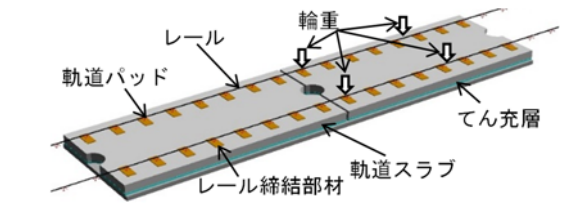


図-15 RC構造の軌道スラブを対象とした解析モデル

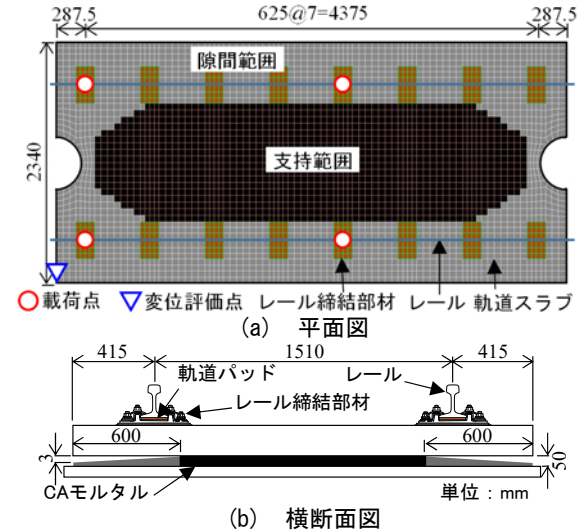


図-16 CAモルタルによる軌道スラブの支持状態

度変化によって変形することが確認されており¹¹⁾、軌道スラブとCAモルタルが接触する全ての面は付着していないものと考えられるため、本解析では境界部に摩擦係数を0.7とする接触面を定義した。

荷重は軸距2.5mとなる1台車分の輪重を図-16に示す位置に与えた。なお、この載荷点は軌道スラブ隅角部の変位が最も大きくなる位置であり、軌道スラブの設計においても同じ位置で荷重を与えている⁶⁾。

解析における最終荷重である520kN時のひび割れ状況を図-17に、鉄筋が初期に降伏する位置を図-18に示す。図-17に示したひび割れが初期に完全に開口する位置は、鉄筋が降伏する位置と同じであった。次に、解析で得られた軌道スラブ隅角部(図-16の変位評価点)の荷重-変位関係および荷重-鉄筋ひずみ関係を図-19に、実物大スラブ軌道の解析結果を表-5に示す。なお、図-19および表-5に示す軟化開始時および完全開口時の定義については3.3(3)に示してある。

実物大スラブ軌道の解析によって得られた軌道スラブの軟化開始時および完全開口時の輪重は、それぞれ静的輪重85kNの0.8倍と2.4倍となった。ここで、静的輪重85kNとは軌道スラブの設計で用いる車輪が静止した状態における輪重のことである。軌道スラブの設計における性能照査では、ひび割れを限界値とした照査は行わないものの、CAモルタルと軌道スラブの隙間の範囲が広いと静的輪重よりも小さい荷重でひび割れが発生する可能性があると考えられる。

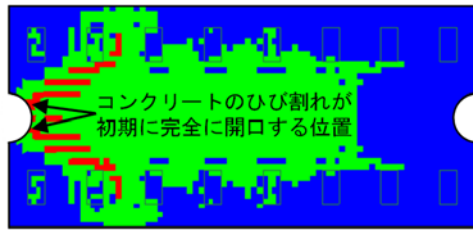


図-17 荷重 520kN 時のひび割れ状況

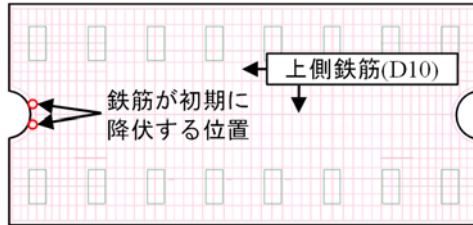


図-18 鉄筋が初期に降伏する位置

ひび割れ発生以降の応力の繰り返しが鉄筋の疲労寿命に影響を与えるものと仮定して、列車本数を120本/日、編成数を16両、耐用年数を50年として疲労寿命を算出すると1.4億回⁶⁾となり、鉄筋の疲労強度は155N/mm²となる。鉄筋の疲労強度に達する際の輪重は208kNとなり、静的輪重の2.5倍となった。疲労破壊に関する安全性の照査では鉄筋の疲労強度を限界値とし、静的輪重に作用係数1.45を乗じた設計作用で応答値を算出しているので疲労破壊には至らないと考えられる。

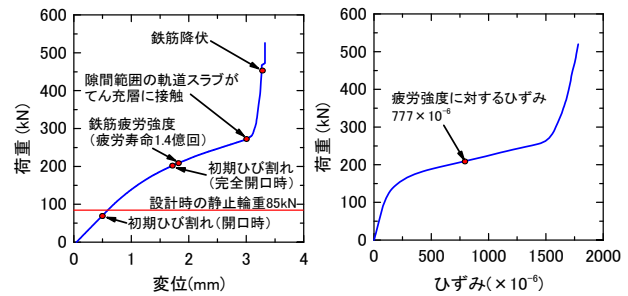
また、鉄筋の降伏は隙間が生じている範囲の軌道スラブの底面がCAモルタルに接触して以降に生じた。その際の輪重は455kNとなり静的輪重の5.4倍となった。損傷に関する使用性の照査では鉄筋の降伏が限界する際の曲げ降伏耐力を限界値とし、静的輪重に作用係数3.0を乗じた設計作用で応答値を算出しているので鉄筋の降伏には至らないと考えられる。

5. まとめ

軌道スラブと CA モルタルの境界部を考慮したスラブ軌道の有限要素解析により、以下の知見を得た。

- (1) 材料の非線形性とコンクリートのひび割れ進展を考慮した有限要素解析により、スラブ軌道模型供試体の載荷試験を概ね再現できることを確認した。
- (2) スラブ軌道模型供試体の解析モデルを拡張して、隙間を考慮した実物大のスラブ軌道解析モデルに対する有限要素解析を行い、隙間の形状によってひび割れや鉄筋の降伏が生じる位置、また限界値に達する荷重を推定できる可能性を確認した。

今後は、様々なCAモルタルの隙間などの形状に対する軌道スラブの限界値に関する検討を行う他、軌道スラブの変位から補修が必要なCAモルタルを選定する方法の開発に活用していく予定である。



(a) 荷重-隅角部変位 (b) 荷重-鉄筋ひずみ

図-19 スラブ軌道の解析結果

表-5 実物大スラブ軌道の解析結果

		解析結果	静的輪重 85kN との比
ひび割れ	軟化開始時	69kN	0.8
	完全開口時	202kN	2.4
鉄筋の疲労強度		208kN	2.5
鉄筋の降伏強度		455kN	5.4

参考文献

- 1) 山岸明：軌道と構造物，土木学会誌，Vol.96，No.7，pp.69-72，2011.7
- 2) 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) 高橋貴蔵，瀧上翔太，桃谷尚嗣，谷川光：スラブ軌道てん充層の大断面補修に関する研究，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.20，pp.111-118，2016.7
- 4) 瀧上翔太，高橋貴蔵，吉川秀平，桃谷尚嗣：高流動 CA ミルクを適用したスラブ軌道てん充層隙間注入補修に関する研究，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.20，pp.119-124，2016.7
- 5) 高橋貴蔵，吉川秀平，桃谷尚嗣，瀧上翔太：底面支持された鉄筋コンクリート梁の耐力に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.506-510，2017.7
- 6) 安藤勝敏，堀池高広：スラブ軌道定着突起構造の改良，鉄道総研報告，No.1.3，No.9，pp.8-15，1989.9
- 7) Len Schwer: The Winfrith Concrete Model : Beauty or Beast? Insights into the Winfrith Concrete Model, 8th European LS-DYNA Users Conference, Apr.2001
- 8) 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.119-144，2012
- 9) Niels Saabye Ottosen: A Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, Volume 103, Number 4, pp.527-535, Aug.1977
- 10) 大阪工事局編：山陽新幹線工事誌 岡山・大門間，日本国有鉄道，1975
- 11) 吉川秀平，高橋貴蔵，小滝康陽：軌道スラブ下に隙間が生じたスラブ軌道の挙動特性把握，土木学会年次学術講演会概要集，Vol.72，pp.929-930，2017.9