

論文 コンクリート桁の支承部の変状と性能に及ぼす影響に関する解析的検討

松崎 晋一朗*1・渡辺 健*2

要旨：支承の据付不良や経年劣化で可動不良が生じたコンクリート桁において、供用中の環境や作用の経時的な組合せが支承部付近のひび割れ等の発生時期や性能に与える影響を検討するために、非線形有限要素解析を実施した。プレストレストコンクリート（PPC）桁では、収縮・クリープ、温度および可動不良の時期をパラメータとして、ひび割れ形状と損傷イベントの時期および剛性の低下の傾向から性能の照査を行った。また、鉄筋コンクリート桁では、上記に加えて水掛かりによる湿度分布や列車荷重、ロングレール縦荷重を経時的に作用させ、ひび割れ性状や損傷イベントの時期への影響を確認した。

キーワード：維持管理，支承，長期変形，劣化予測，健全度評価，桁，非線形 FEM

1. はじめに

社会インフラの老朽化や高齢化に伴う技術者不足により、効率的なインフラマネジメントシステムの構築が不可欠である。一方、目視を基本とした調査では、背の高い構造物や河川を跨ぐ構造物の調査に時間と労力を要している。特に支承部は、死荷重や列車荷重等の鉛直荷重に加え、風や地震等による水平荷重を上部工から下部工へ伝達するとともに、温度変化や収縮・クリープ等による桁の伸縮による水平移動、たわみによる回転等の変位・変形等に追従する重要な部位であることから、支承部付近は支承本体、移動制限装置、落橋防止装置および桁座、桁端で構成され、狭隘な環境であるにもかかわらず、近接等による入念な目視¹⁾が必要である。

支承本体については、昭和 30 年頃の鉄道および道路の整備拡充に伴い、支承板支承やゴム支承が用いられるなど、様々な構造が採用されてきた^{2,4)}。しかしながら、支承据付時の各支点の高さの管理やサイドブロックとソールプレートの角度調整および遊間管理の煩雑さから、施工に起因したと考えられる支承部の変状が多数報告されている^{5,6)}。また、列車の高速化や 200m 以上に溶接されたロングレールの使用等による支承への作用の増加や、桁座面の排水不良による支承の錆や砂等の異物の混入、地震等の外力による支承の破損による可動不良等により、主桁にひび割れが発生する事例も報告されている^{7,9)}。支承部付近のひび割れは、鉄道構造物等維持管理標準¹⁰⁾（維持管理標準）においても、ひび割れ形状や幅によって健全度判定が区分されており（図-1）、これらの目視情報と変状の発生原因や時期、進行性および性能への影響を把握することで、調査の効率化につながると考えられる。

近年、無人航空機（UAV）や画像解析技術等の活用により、安全かつ効率的に表面情報の把握が可能になりつつある。また、鉄道構造物等設計標準¹⁾（設計標準）では、非線形有限要素解析（非線形 FEM）を用いた照査法が整備されている。非線形 FEM で目視変状を再現することで変状要因を把握し、さらに鉄筋の応力状態や耐荷力、剛性等の情報と結び付けておくことができれば、桁の健全度判定や維持管理計画の策定が可能である。

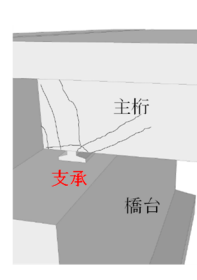
本研究では、据付不良や経年劣化により支承の可動不良を想定したプレストレストコンクリート桁（PPC 桁）や T 形断面の RC 桁（RCT 桁）に対して、主桁の支承部のひび割れ開口や鉄筋の応力に着目し、供用中の作用が損傷イベントの進行性や損傷レベル等の照査結果に与える影響を把握することを目的とした。

本研究では、据付不良や経年劣化により支承の可動不良を想定したプレストレストコンクリート桁（PPC 桁）や T 形断面の RC 桁（RCT 桁）に対して、主桁の支承部のひび割れ開口や鉄筋の応力に着目し、供用中の作用が損傷イベントの進行性や損傷レベル等の照査結果に与える影響を把握することを目的とした。

2. PPC 桁を対象とした FEM による検討

2.1 解析モデル

解析はスラブ軌道ポストテンション PPC 単純 T 形 4 主桁（支間長 24.0m）の 1 主桁（G2 桁）を抜き出し、3 次元でモデル化した（図-2）。解析では DIANA10.5 を用い、コンクリートの応力-ひずみ関係は、Hordijk 曲線（引張側）と、Parabolic 曲線（圧縮側）を使用した¹¹⁾。また、ひび割れ部のせん断伝達には Al-Mahaidi のモデルを適用した。コンクリートの弾性係数、引張強度、引張



状態の例	判定
・斜めひび割れが、支点方向に軸方向鉄筋に沿って進行し、幅の大きいもの	AA
・斜めひび割れの幅が、0.3mm程度以上のもの	A
・斜めひび割れの幅が、0.2mm程度以下のもの	B,C
・支点から垂直にひび割れが生じているもの	A
・支点部のコンクリートが圧壊しているもの	A

図-1 RC 桁健全度判定例¹⁰⁾

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 副主任研究員（正会員）

*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 室長 博士（学術）（正会員）

破壊エネルギー、圧縮破壊エネルギーは、圧縮強度から算出した¹⁾。鉄筋および主ケーブルは、コンクリートと完全に付着を前提とした埋込み鉄筋要素としてモデル化し、主ケーブルは緊張直後のプレストレス力を導入した¹⁾。支承は支承範囲の中心を拘束し、それ以外の節点を接続した剛梁要素でモデル化した。

2.2 検討ケース

解析は、死荷重作用後に、プレストレス力を導入した。図-2、表-1の部材寸法、材料諸元と気象条件を基に橋りょう条件に配慮された算定式¹⁾で算出した収縮ひずみおよびクリープ係数を図-3に示す。クリープ係数は一軸とし、緊張時のヤング係数で除して単位応力当たりのクリープひずみとした。収縮・クリープひずみの時間増分は、対数軸上で等間隔となるように100年作用させた後、支間中央に漸増載荷し、剛性を確認した。緊張後のクリープひずみは、Witneyの法則¹²⁾を基に算出し、応力の経時変化に対して重ね合わせが成立するものとして解析している。また、ロングレール縦荷重および制動・始動荷重や、材料劣化、疲労等による影響についてはモデル化していない。水掛かりや収縮・クリープ係数の設定に必要な外気相対湿度(RH)は、当該PPC桁が位置する地域の降雨の状況や平年値を参考に設定した。

温度変化についても同様に地域近傍の気象観測所における最高温度と最低温度を参考に設定した。具体的には、春季の打設を想定して初期温度を15.9℃とし、91日後(夏季)に38.5℃まで上昇させ、その0.5年後(冬季)に-6.7℃まで下降させる過程を1サイクル/年とした。なお、収縮・クリープおよび温度変化によるひずみは桁の橋軸方向で一律に設定し、G2桁は雨掛かりによる湿度変化が小さいため、断面内のひずみ分布は一様とした。

可動支承のY方向の固定時期は、架設時の据付不良を想定して、打設と同時に桁を架設した極端な時期(材齢0)と打設後にプレストレス導入し、架設時までの時期を考慮して0.25年(91日)、0.5年(180日)で支承範囲の中心を固定した。さらに、経年劣化での錆や砂等の異物による可動不良を想定して10年、20年で固定した。

2.3 解析結果

(1) ひび割れ形状

図-4に、Case1 (FF0_400D)における支承部を主桁側面から見た際の偏差ひずみ第2不変量 $\sqrt{j_2}$ (偏差ひず

み)の関係を示す。収縮・クリープ(7日後)(図-4(a))により、支承前面の要素が設計標準¹⁾における損傷レベル1(無損傷)の限界値(1000 μ)に達し、桁端部に向かってひび割れが開口している。過年度の研究¹³⁾においてRC桁で収縮・クリープ後に列車荷重を載荷させた際は、支承前面から支間中央側の斜めひび割れへ移行したのに対して、PPC桁で列車荷重を載荷させた際(図-4(b))は、支間中央側へひび割れに比べて桁端部のひび割れが顕著であった。これは既往の変状事例⁶⁻⁸⁾と同一の形状であり、PPC桁ではプレストレス力により支間中央側のひび割れが抑制されることが確認できた。

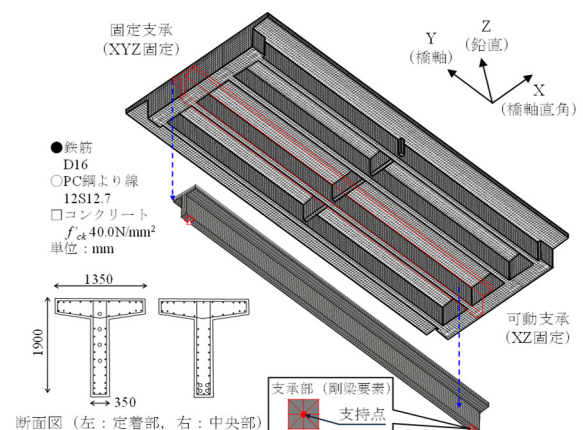


図-2 PPC 桁解析モデル

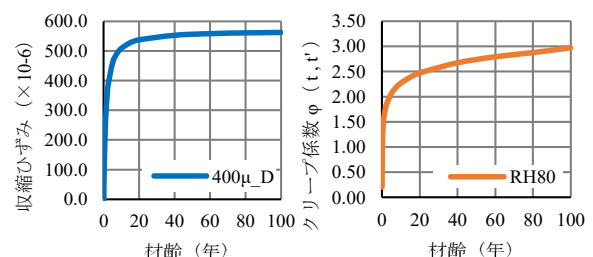
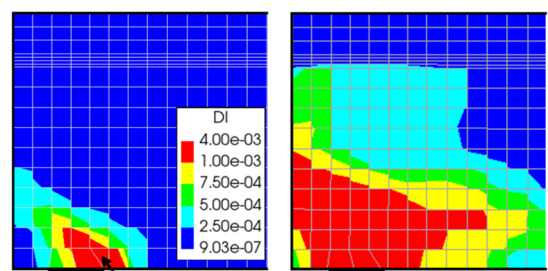


図-3 収縮・クリープ (PPC 桁)



(a) 収縮・クリープ (7日) (b) 列車荷重載荷時

図-4 偏差ひずみ (Case1:FF_400D)

表-1 PPC 桁検討ケース

Case	強度	ヤング係数	骨材	水掛かり	気象条件		可動支承固定時期						
					f'_{ck}	E_c	ϵ_{ag}	相対湿度	温度変化	※表記○は固定時期			
										RH	年		
	表記	N/mm ²	kN/mm ²	×10 ⁻⁶	%								
Case0	FM_400D	40	55.0	400	常時乾燥	80	-	-	可動不良なし				
	FM_400D_tem								○				
Case1	FF00_400D	40	55.0	400	常時乾燥	80	-	0	0.25	0.5	10	20	
	FF00_400D_tem							○	0	0.25	0.5	10	20

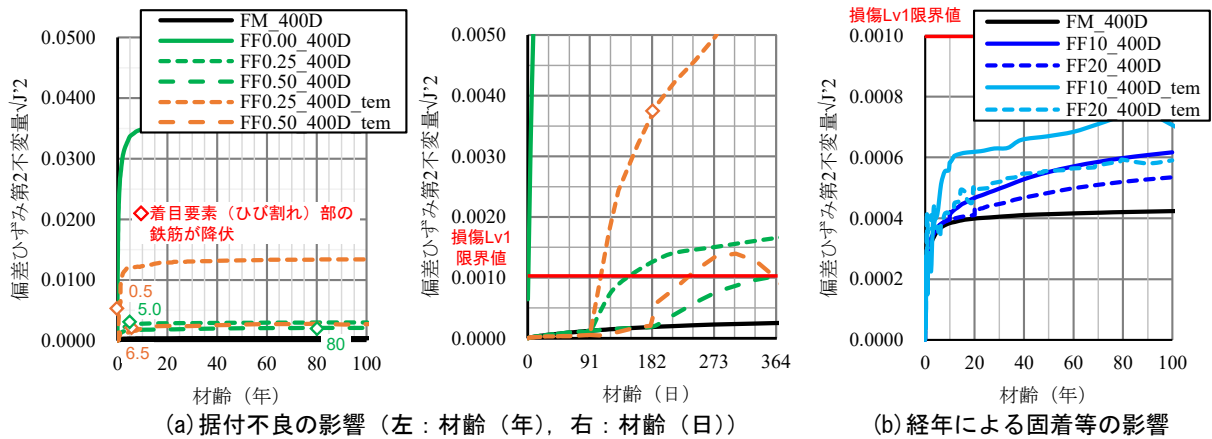


図-5 温度変化によるひび割れ開口時期の影響

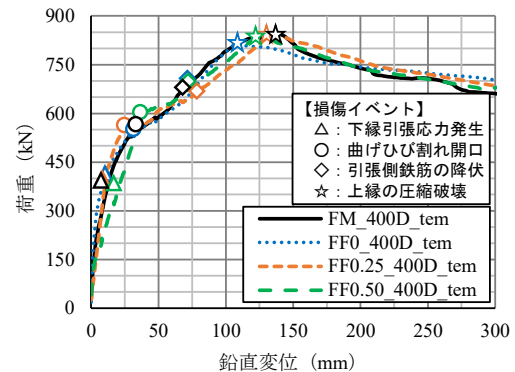
(2) ひび割れ開口と鉄筋の降伏時期の推定

図-4(a)において、最初にひび割れが開口した支承前面の要素に着目し、材齢と偏差ひずみの関係を図-5に示す。据付不良を模擬した場合(図-5(a)), 打設から架設までの期間によらず、支承を固定してから0.25年以内に損傷レベル1の限界値(ひび割れ開口)に達している。温度変化の影響を考慮した場合(表記: _tem), 打設後、最初に気温が下降する0.25(91日)~0.75年(273日)において、収縮・クリープと温度ひずみの相加効果によって偏差ひずみが急激に上昇し、ひび割れが開口も早期化すると推定できる。一方、経年による固着等を模擬した場合(図-5(b))は、固定時期や温度変化の有無によらず損傷レベル1の限界値には達していない。

次に、ひび割れ部の鉄筋の応力に着目すると、据付不良を模擬して0.25年で固定した場合(FF0.25_400D_tem)はひび割れ開口後0.25年以内に鉄筋の損傷レベル1(無損傷)の限界値(降伏強度)に達しているのに対して、0.5年で固定した場合(FF0.5_400D_tem)は6年後と損傷イベント間の期間が長くなった。なお、支間中央部での曲げひび割れは発生していない。つまり、打設から架設までの収縮・クリープおよび温度を適切に管理することで、損傷リスクを低減できると考えられる。また、UAV等を用いてひび割れの開口等の目視情報を早期に把握することで、桁上り等による残留ひずみの解放など、鉄筋が損傷レベル1の限界値(降伏)に至る前に対策すること可能だと考えられる。

(3) 性能の照査

(2)で損傷レベル1となった据付不良を模擬したCase(FF0~FF0.50)の荷重と鉛直変位の関係を図-6に示す。各損傷イベント時の荷重に着目すると、支承の固定時期によらずほぼ同等であった。解析では、収縮・クリープにより支承前面に発生したひび割れが、荷重載荷による上反り量の減少に伴い閉じたため、桁の剛性の低下は確認できなかった。既往の変状事例^{7,8)}においても同様に、支承前面のひび割れ発生時点での列車通過時のたわ



設計耐力 (対応する損傷イベント)	曲げひび割れ Mcr (○)	曲げ降伏耐力 My (◇)	曲げ耐力 Mu (☆)
解析 _{FM} /設計 _{FM}	1.1	1.2	1.1

図-6 荷重・鉛直変位の関係

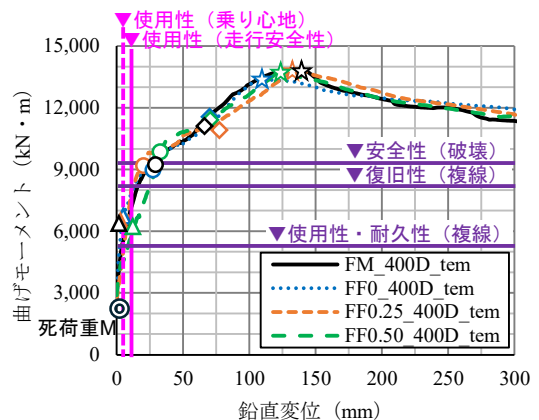


図-7 曲げモーメントによる性能の照査

み量は小さく、剛性は低下していない。一方、変状事例⁷⁾では、その後の桁端部へのひび割れの進展や開口幅の拡大に伴い、鉄筋の破断およびひび割れ界面で縁切れが報告されている。したがって、建設年が古く、丸鋼の使用や最小鉄筋量等の鉄筋に関する構造細目¹⁴⁾を満足しない構造物は、ひび割れ幅の拡大による、性能の低下の有無を確認する必要がある。

健全(FM)な単純はりに対して、はり理論¹⁾に基づく曲げひび割れ(Mcr), 曲げ降伏(My)および曲げ耐力(Mu)は比較的精度よく算定できると考えられる。そこで、こうして算定した値(設計値)に対する解析値の比を算出

した結果、耐力比は 1.1~1.2 程度であった。

本稿では、この耐力比の最大値 (=1.2) を安全係数 (限界係数¹⁾) とし設定した。図-7 に安全係数で補正した支間中央の曲げモーメントを用いた性能の照査結果を示す。各要求性能時の部材の状態に着目すると、使用性・耐久性の限界値では引張応力は発生しない。また、復旧性の限界値では下縁に引張応力が発生しているものの曲げひび割れが発生していない。安全性の限界値に対しては、ひび割れは発生しているものの支間中央の鉄筋が降伏しておらず損傷レベル 1 を満足しており、PPC 桁の要求性能を満足していると判断できる。本解析では、便宜的に PPC 桁の 4 主桁のうち 1 主桁のみを抜き出して解析を実施したが、実施工においては打設から架設までの期間に加え、主桁間の間詰めコンクリートや横梁等の現場打設、その他付加死荷重の載荷時期等を考慮することが必要である。

3. RC 桁を対象とした FEM による検討

3.1 解析モデル

対象は、過年度の研究¹³⁾と構造形式および桁長が類似している鉄筋コンクリート (RC) 単純 T 形 4 主桁 (支間長 14.95m) であり、図-8 のように 3 次元でモデル化した。解析では DIANA10.5 を使い、コンクリートの応力-ひずみ関係は、Hordijk 曲線 (引張側) と、Parabolic 曲線 (圧縮側) を使用した¹⁾。また、ひび割れ部のせん断伝達には Al-Mahaidi のモデルを適用した。コンクリートの弾性係数、引張強度、引張破壊エネルギー、圧縮破壊エネルギーは、圧縮強度から算出した¹⁾。鉄筋は完全付着の埋込み鉄筋要素とし、支承は支承範囲の中心を拘束し、それ以外の節点を接続した剛梁要素でモデル化した。

3.2 検討ケース

表-3 に検討ケースを示す。材料諸元と気象条件を基に算出した収縮・クリープ (図-9) を 2.2 同様に 50 年間作用させた。温度は、春季に打設した場合を想定して図-10 のように外気温を設定した。水掛かりによる影響を再現するために Case1~3 は相対湿度 (RH) を図-11 のように設定した。ロングレール縦荷重は、気温に合わせて高温時と低温時で 180 度回転させて作用させた。また、列車荷重は建設から 4.75 年後以降に移動荷重として

上り線に 1 回、下り線に 1 回、上下線同時に 1 回を 1 サイクルとして、気温の高温時と低温時に 1 サイクルずつ与えた (図-12)。可動支承の Y 方向の固定時期については、現場打設時の据付不良を想定して材齢 0 日で固定した場合と経年劣化による固着を想定して材齢 10 年と 20 年で固定した。

なお、本解析では列車の制動・始動荷重や、材料劣化、疲労等はモデル化していない。

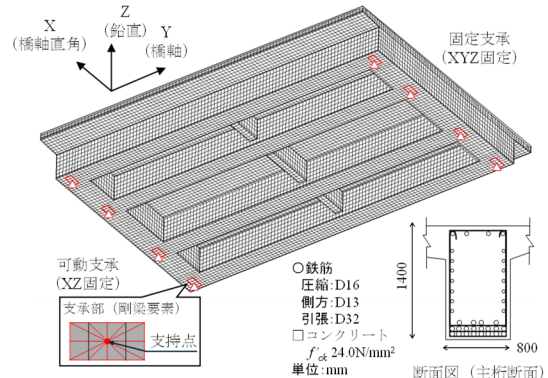


図-8 RC 桁解析モデル

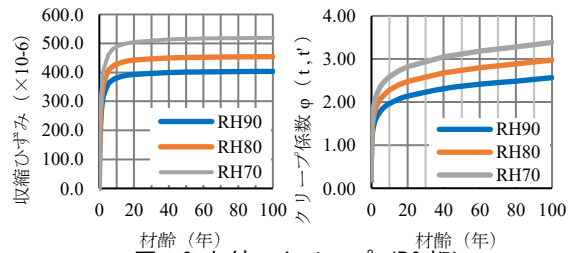


図-9 収縮・クリープ (RC 桁)

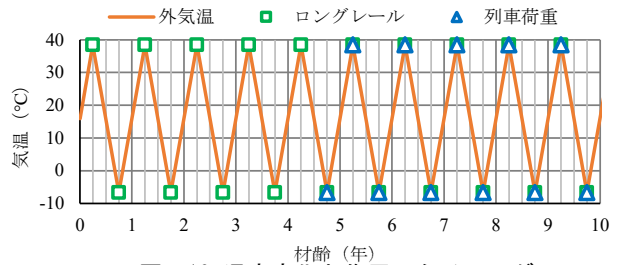


図-10 温度変化と作用のタイミング

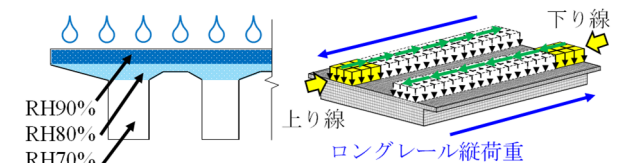


図-11 相対湿度 図-12 列車荷重とロングレール縦荷重

表-3 RC 桁検討ケース

Case	強度 f_{ck} N/mm ²	ヤング係数 E_c kN/mm ²	骨材 ϵ_{ag} $\times 10^{-6}$	環境条件			載荷条件 列車荷重	可動支承固定時期 ※表記○○は固定時期				
				収縮・クリープ	温度変化	ロングレール縦荷重		年				
case0	24	25.0	400	RH70-90	○	○	夏冬	可動不良なし				
case1								○	○	0	10	20
case2								○	○	0		
case3								○	○	0		
case4								○	○	0		

3.3 解析結果

(1) ひび割れ形状

Case2 (FF0_RH70-90_TL)において、最初(4.75年)に列車が通過する際の支承部を主桁側面から見た際の偏差ひずみを図-13に示す。PPC桁(2.3(1))では、収縮・クリープの影響で支承前面から桁端部に向かって斜めにひび割れが開口していたのに対して、RC桁では明確なひび割れ開口方向が確認できない。これは、温度収縮やロングレール縦荷重等の影響で定期的にひび割れが閉合している影響だと考えられる。一方で、列車通過時には、支承前面から支間中央側へひび割れ開口が進展した。これは、2.3(1)で言及した通りである。

(2) ひび割れ開口時期と鉄筋の状態

2.3(2)同様に、最初にひび割れが開口した支承前面の要素に着目し、材齢と偏差ひずみの関係を図-14に示す。据付不良を想定して初期に支承を固定した場合、収縮・クリープと温度やロングレール縦荷重の相加効果により、0.25~0.5年で偏差ひずみが急激に増加し、損傷レベル1の限界値(ひび割れ開口)を超過した。一方で、経年劣化を想定して場合は、支承固定後に偏差ひずみが増加するが、初期に固定した場合に比べて非常に小さい値となった。これは、経年により収縮・クリープによるひずみ量が減少したためと考えられる。

次に、水掛かりによる相対湿度の影響に着目(Case3: FF0_RH70-90_T)すると、相対湿度を一律で80%に設定した場合(Case4: FF0_RH80_TL)と同時期に偏差ひずみが損傷レベル1の限界値(ひび割れ開口)に達していた。本解析で対象とした橋りょうは、桁長が短く、湿度分布による影響が小さいと考えられる。

最後に、鉄筋の応力状態に着目すると、今回設定した供用年数(50年)では、全Caseで鉄筋は損傷レベル1(降伏)に達していなかった。つまり、各種作用によりひび割れの開口はあるものの部材としては損傷レベル1と判定できる。なお、今回は損傷レベル1であったため安全性の照査は省略した。

(3) 列車荷重の影響

列車荷重通過時の偏差ひずみ(G4主桁)とたわみの関係

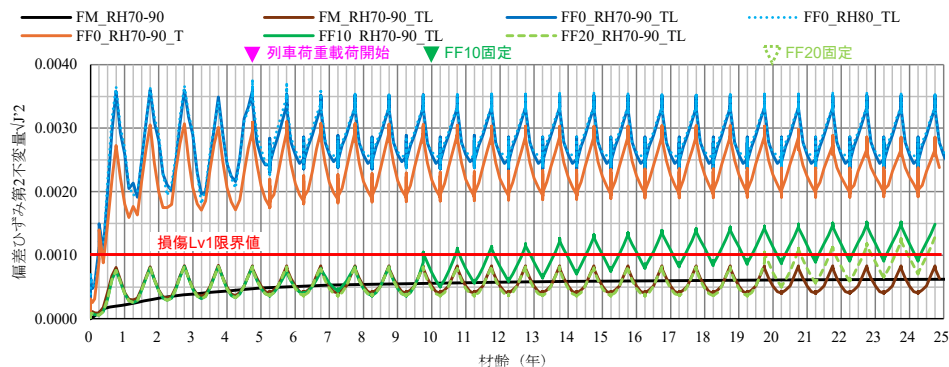
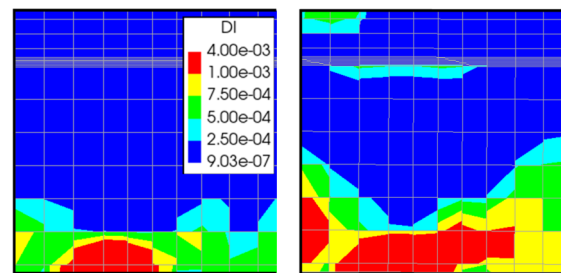


図-14 環境条件の影響

を図-15に示す。列車通過時の偏差ひずみとたわみは相関があり、反対線通過時は変動が小さく、当該線通過時は移動荷重に合わせて変動する。次に、各主桁のたわみに着目すると、列車載荷パターンによらずたわみによる乗り心地の限界値以下であり、使用性の照査を満足することを確認した。一方で、同線であっても列車通過時に0.2~0.5mm程度のたわみ差が生じている。ここで、列車通過時の下り線の支承部付近の偏差ひずみを図-16に示す。外側主桁(G4)の横梁のない側面ではソールプレートから支間中央へひび割れが開口しているのに対して、線間主桁(G3)では横梁と主桁の交差部に沿ってひび割れが開口した。これは、横桁によりソールプレート位置の断面が増加したことに加え、線間側主桁(G2,3)と外側主桁(G1,4)の列車通過時のたわみによる支承の可動量の差の影響で、主桁と横桁の交差部に応力が集中したためと考えられる。本研究では、全可動支承を同時期に固定したが、外側主桁(G1,4)のみ固定化した場合は、線間側主桁(G2,3)のひび割れ開口が大きくなる可能性があるため、今後、各可動支承の固定時期の違いによる使用性への影響については確認が必要である。

(4) ロングレール縦荷重の影響

図-14において、ロングレール縦荷重の有無によりひび割れ開口の時期には差がないが、高温時において偏差ひずみが1.15~1.3倍となった。ここで、ロングレール縦荷重の有無による線間側主桁(G3)支承の橋軸方向(Y方向)の反力の差分を支承に作用する荷重とした場合、列車荷重が載荷するまでの期間の低温時と高温時の作用荷重を図-17に示す。低温時はひび割れの開口により応



(a) 列車荷重載荷前 (b) 列車荷重載荷時

図-13 偏差ひずみ (Case3: FF0_RH80_TL)

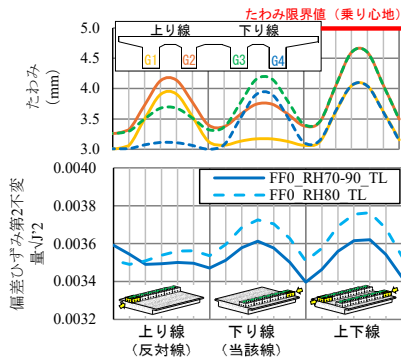


図-15 列車通過時の偏差ひずみとたわみの関係

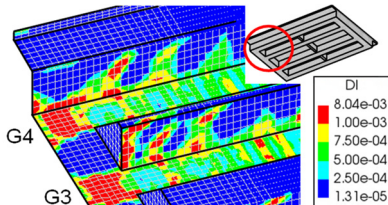


図-16 列車通過時の偏差ひずみ (下り線: G3, G4)

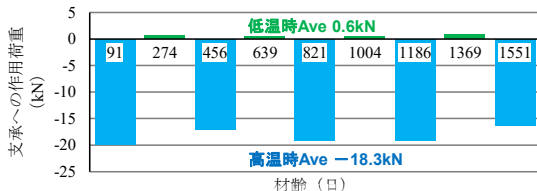


図-17 ロングレール化による支承部への作用荷重

力が解放されるため作用荷重は小さくなるのに対して、高温時はロングレール縦荷重により平均 18.3kN が支承に作用すると推定できる。現設計標準¹⁾では、ふく進抵抗 γ に桁長を乗じた設計特性値 L_R (74.8kN) を与えることで安全側の作用荷重としているが、鉄道橋の設計においては、新幹線では1961年、その他鉄道では1970年以前はロングレール縦荷重が考慮されていない^{15,16)}。つまり、非線形 FEM によりロングレール縦荷重およびその他の荷重の相互作用を考慮することで、ロングレール化に伴う支承への作用荷重やその付近の変状発生の時期や損傷レベル、性能を推定できると考えられる。

4. まとめ

- (1) 非線形 FEM 解析および設計標準¹⁾により算定した各設計耐力 (M_{cr} , M_y , M_u) の比の最大値を用いて安全係数を補正して用いる性能の確認をする方法を提案した。
- (2) 支承部付近の変状は、収縮・クリープ初期における温度やロングレール縦荷重等の同一方向の作用との相加効果で早期に顕著となることがわかった。そのため、駅部等では上記に加えて、制動・始動荷重の作用を考慮する必要があると考えられる。
- (3) PPC 桁では、プレストレス力により支間中央側のひび割れの開口が抑制されるため、RC 桁とはひび割れ

形状が異なる。

- (4) 本研究のように、最小鉄筋量等の鉄筋に関する構造細目¹⁴⁾を満足し、支間長が比較的小さく、収縮ひずみの小さい骨材が用いられた場合には、供用後概ね10年目までの可動不良を防止することで、損傷を軽減できる。また架設までの温度や・クリープを管理することで、性能の低下のリスクや維持管理の負担を低減できると考えられる。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説構造物編 コンクリート構造物一，R5.1
- 2) 櫛谷拓馬：橋梁の支承，RRR，Vol.79，No.1，2022.1
- 3) 小池晋，手塚民之祐：コンクリート橋の支承構造（1），構造物設計資料 No.3，pp.96-100，1965.9
- 4) 小池晋，手塚民之祐：コンクリート橋の支承構造（2），構造物設計資料 No.4，pp.144-147，1965.12
- 5) 小須田紀元，大坪正行：橋りょうの支承部の機能と検査（上），鉄道土木 22-11，pp.799-803，1980.11
- 6) 小須田紀元，大坪正行：橋りょうの支承部の機能と検査（下），鉄道土木 22-12，pp.873-878，1980.12
- 7) 支承部変状橋りょうの効果的な対策事例—小丸川橋りょうの支承部の変状対策について—，日本鉄道施設協会誌，P390-393，2008-5
- 8) 松崎晋一郎：庄内川橋りょうの PC 桁支承部の変状対策，鉄道施設協会，第 27 回総合技術講演会概要集，2012.10
- 9) 更谷圭吾：庄内川橋りょう桁端ひび割れ発生に伴う変状対策，鉄道施設協会，第 37 回総合技術講演会概要集，2022.10
- 10) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説構造物編 コンクリート構造物，R4.5
- 11) Collins, M. P. and Mitchell, D.: Shear and Torsion Design of Prestressed and Non- Prestressed Concrete Beams, PCI Journal, Vol.25, No.5, pp.32-100, Sep./Oct.1980
- 12) 村田二郎，岡田清著，“フレッシュコンクリートのレオロジー・コンクリートの弾性とクリープ”，山海堂，pp.155，1981.5
- 13) 松崎晋一郎，渡辺健：RC 桁の支承部のひび割れ発生に関する解析的検討，土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，V-580，2024.9
- 14) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成 3 年版】設計編，1991.7
- 15) 日本国有鉄道：新幹線構造物設計基準（案），1961.6
- 16) 日本国有鉄道建造物設計標準（鉄筋コンクリート構造物及び無筋コンクリート構造物），1970.3