

論文 乾燥収縮・鉄筋腐食と温度・荷重作用の経時的な組合せが RC 構造物の性能に及ぼす影響

佐藤 浩二*1・渡辺 健*2

要旨：乾燥収縮および鉄筋腐食の発生・進行と、供用時の環境を想定した温度変化および列車荷重、ロングレール縦荷重といった作用の組合せが、鉄筋コンクリート (RC) ラーメン高架橋および T 形断面 RC (RCT) 桁 (4 主桁) のひび割れ発生や耐荷力に与える影響を検討するため、有限要素解析を実施した。そして、RC ラーメン高架橋では、乾燥収縮・クリープ式、鉄筋腐食の発生時期、漸増載荷時の温度をパラメータとして、ひび割れ性状と水平方向の耐荷力および剛性の低下の傾向を確認した。また、RCT 桁については、上記に加え、温度変動の有無、部材の温度差をパラメータにひび割れ性状と鉛直方向の剛性への影響について確認した。

キーワード：作用の組合せ、RC ラーメン高架橋、RCT 桁、有限要素解析、鉄筋腐食、温度、曲げ剛性

1. はじめに

供用中の鉄筋コンクリート (RC) 構造物に生じるひび割れや鉄筋の腐食等には、管理・抑制が困難な材料劣化として扱われているものもある。構造物を供用する限りは、必要な耐荷力や剛性を保持し続ける必要があり、補修・補強の判断に寄与することを目的とした諸々の研究が行われている。特に、非線形有限要素解析 (FEM) の発展は目覚しく、腐食を考慮した鉄筋の力学モデルも提案されている¹⁾²⁾。実験結果に対する再現解析が多数実施されており、構造物の性能に対する数値解析を用いた予測の下地は整備されつつあると考える³⁾。しかし、現状は、鉄筋の腐食の予測モデルを用いた RC 構造物の耐荷力低下の予測に留まっていることが多い。

一方、鉄道構造物には、列車の走行安全性を確保するため、地震時の RC ラーメン高架橋の橋軸直角方向の変位や、梁などのたわみ量に厳しい制限値が設けられており、ひび割れの進展や鉄筋の腐食に伴う剛性および耐荷力の予測が重要である。しかし、耐荷力の低下やひび割れの発生には、コンクリートの乾燥収縮・クリープ、載荷除荷の繰返し、温度変化、降雨といった様々な事象が、同時に、あるいは順序を変えて構造物に作用していることにも依存している。発生しうる作用の全ての組合せや順序に対応することは、数値解析の計算負荷が大きく、予測を行う上での一つの課題である。因果関係を明らかにして、検討すべき焦点を絞り、数値解析による RC 構造物の予測を実務の場で積極的に実施することが重要である。ひび割れの発生を促す環境要因を特定することは、かぶりの剥落といった公衆安全上の予測にも有用である。

本研究では、乾燥収縮および鉄筋の腐食の発生・進行と、供用時の使用環境を想定した温度変化および列車荷重、制動荷重、ロングレール縦荷重といった作用の組合せが、RC ラーメン高架橋および T 形断面 RC (RCT) 桁

(4 主桁) の剛性および耐荷力に与える影響を把握することを目的とした。具体的には、FEM を用いて橋軸直角方向または鉛直方向への漸増載荷で検討を行った。なお、主に耐震設計で性能が定められる鉄道 RC ラーメン高架橋の検討では、橋軸直角方向に着目し、RCT 桁の検討では、鉄道の走行安全性に関わる桁のたわみを指標としているため、鉛直方向に着目した。

2. 解析の条件

2.1 解析モデル

図-1、図-2 に、対象とする RC ラーメン高架橋と RCT 桁の概要を示す。RC ラーメン高架橋のモデルは、地中梁より上部の構造を橋軸方向に 2 等分した 1/2 を対象としており、RCT 桁のモデルは 4 主桁の全てを対象としている。横桁を含む構造全体を対象とすることで、損傷の進行に伴う部材間の荷重分担の変化にも着目するものである。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⁴⁾。また、鉄筋は埋込み鉄筋要素を用いてモデル化し、応力-ひずみ関係は、降伏強度に達するまでは弾性とし、降伏強度に達した後は剛性が初期剛性 E_s に対する 0.01 倍に変化するバイリニアモデルとした。なお、FEM は汎用構造解析コード DIANA10.1 を用いた。

2.2 鉄筋とコンクリートとの付着

本検討で用いたツールでは、経年による腐食にあわせて鉄筋とコンクリートとの付着を低減させることは困難であった。変状が発生する前から鉄筋とコンクリートの付着を低減させた構成則を適用した場合、ひび割れ発生に影響すると考えられる。そこで、鉄筋とコンクリートの付着低下による剛性と耐荷力への影響を、図-3 に示す RC 版桁のモデルを用いて検討した。ここで、付着の構成則は、島ら¹⁾のモデルに、鉄筋の質量減少率に応じ

*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 主任研究員 博 (学術) (正会員)

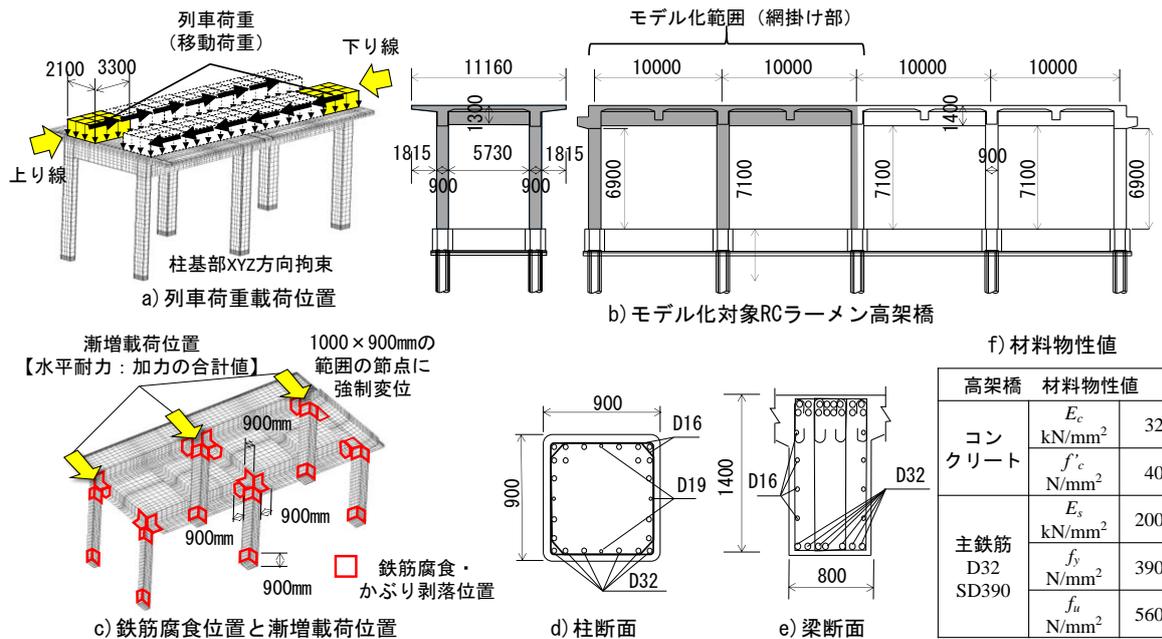


図-1 RC ラーメン高架橋のモデル

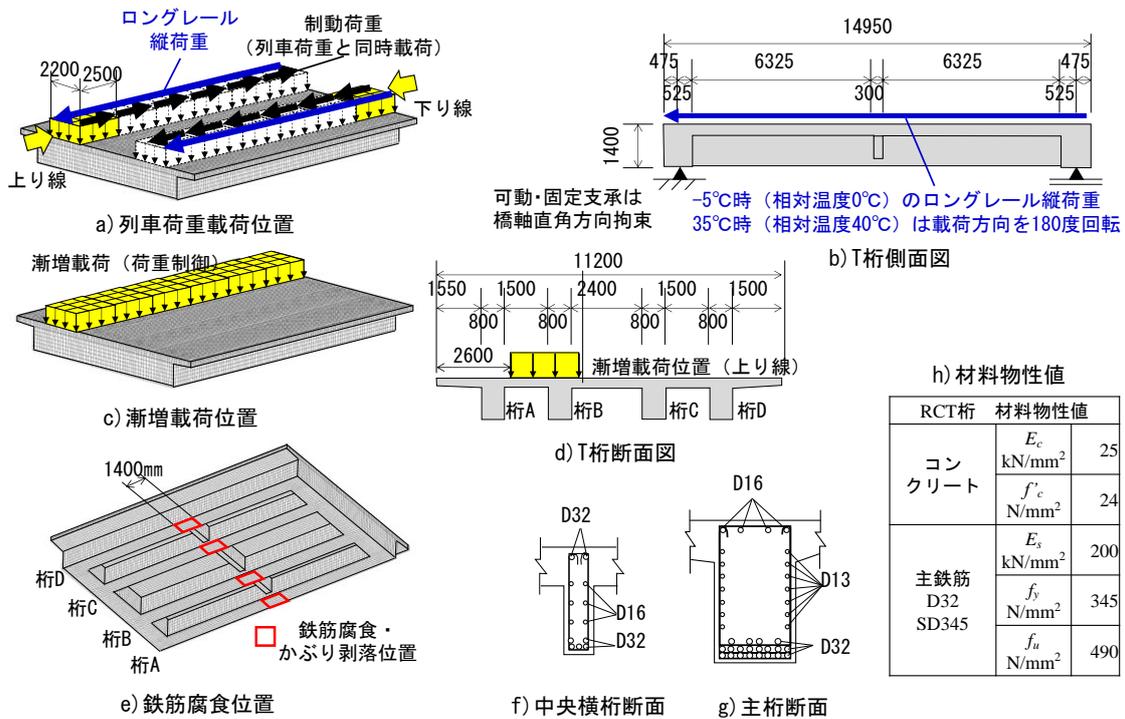


図-2 RC T桁のモデル

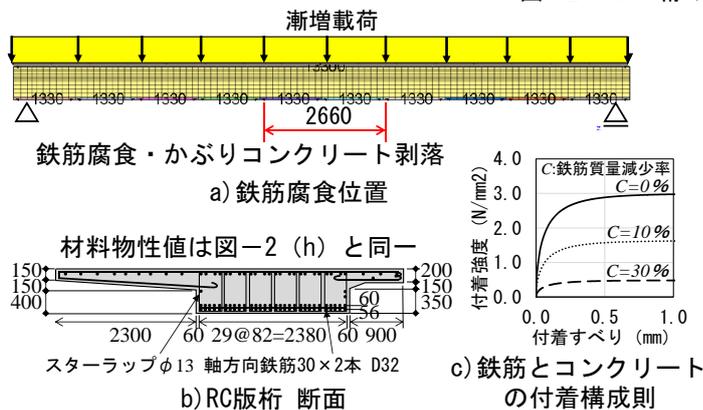


図-3 RC 版桁のモデルと腐食後の鉄筋とコンクリートの付着

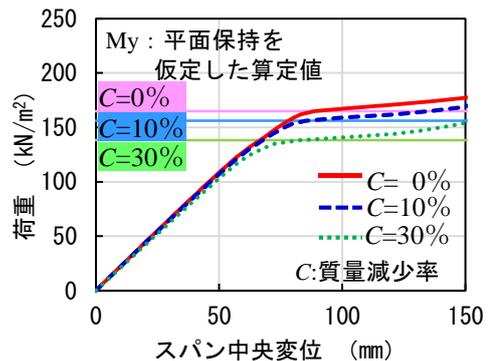


図-4 付着劣化時の荷重-変位関係

た係数³⁾を乗じることで、付着の低下を考慮した(図-3 c))。腐食量は断面積に対して0, 10, 30%とし、分布荷重を鉛直方向に荷重制御で漸増载荷した。図-4に解析結果の荷重-変位関係を示す。鉄筋の腐食量に応じて、曲げ降伏耐荷力は低下するが、その低下率は、曲げ理論によって求める曲げ降伏耐荷力と同等である。一方で、剛性については腐食後にわずかに低下する程度であることを確認した。このことから、本検討で取り扱う腐食量と腐食範囲では、鉄筋とコンクリートの付着の劣化が剛性および耐荷力に与える影響は少ないと考え、以後のRC T桁の検討では完全付着で検討を行った。なお、RCラーメン高架橋は、梁と柱の基部の鉄筋を腐食させているが、鉄筋の定着部を含む接合部自体は腐食させていないため、RC T桁の腐食と同様に取り扱った。

2.3 検討ケース

表-1に、解析時の検討ケースを示す。乾燥収縮・クリープに適用する式、鉄筋の腐食時期、温度をパラメータとして、50年または100年の経時変化の後に漸増载荷を行い、ひび割れ性状と耐荷力や剛性への影響の検討を行った。なお、耐荷力や剛性は、RCラーメン高架橋が図-1に示す橋軸直角方向、RC T桁は図-2に示す鉛直方向への漸増载荷による荷重-変位関係から評価した。

RCラーメン高架橋の検討ケース(Crシリーズ)では、鉄筋の腐食を、水平方向の耐荷力への影響が大きいと考えられる柱上下の基部900mmの軸方向鉄筋と縦・横梁基部900mmの主鉄筋に設定した。また、RC T桁の検討ケース(Tシリーズ)では、耐荷力への影響が大きい桁中央部の引張り側主鉄筋を、線路方向1.4mの範囲に設定した。鉄筋の腐食時期は、Cr-1, Cr-2, およびTシリーズでは、材齢25, 50, 75, 100年の25年毎に鉄筋の断面積を段階的に減じる方法とした。一方、Cr-3, Cr-4では、100年間に生じる鉄筋の断面を、材齢100年の漸増载荷直前に一度に減じることで、腐食開始時期の影響を確認することとした。また、全てのケースで材齢50年に主鉄筋外側のコンクリート要素を除去することで、かぶりコンクリートの剥落を表すこととした。

乾燥収縮・クリープは、図-5に示すモデルA⁵⁾とモデルB⁶⁾を用いた。なお、モデルAを適用する際は、スラブ上面の相対湿度(RH)を90%、スラブ下面を80%、梁・柱を70%と設定することで、雨水によるスラブ上面の水環境を考慮した。モデルBでは、全ての部位に対して唯一のRHを設定した。

温度は、図-6に示す通り、初めにスラブを-5℃とし、0.5年で35℃まで上昇させた後に列車荷重を载荷・除荷し、その後0.5年で-5℃まで下降させて、再度、列車荷重を载荷・除荷する過程を1サイクル/年とした。これは、-5℃~35℃で気温が変動することを想定して定めたもの

表-1 検討ケース

ケース	乾燥収縮・クリープ式		鉄筋の腐食方法		温度 -5~35℃ (相対湿度 0~40%)	スラブと 梁・柱の 温度差 3℃	20℃一定 (温度変動 なし)
	モデルA ⁵⁾ (長期の変位 変形の算定に 用いる式)	モデルB ⁶⁾	段階 腐食 25年毎	総じて 腐食 漸増載 荷直前			
RC 高架橋	Cr-1	○	—	○	—	○	○
	Cr-2	—	—	—	—	○	○
	Cr-3	○	—	—	○	○	—
	Cr-4	—	—	—	—	○	—
RC T桁	T-1	○	—	○	—	○	—
	T-2	—	—	—	—	○	—
	T-3	—	○	○	—	—	—
	T-4	—	—	—	—	—	○

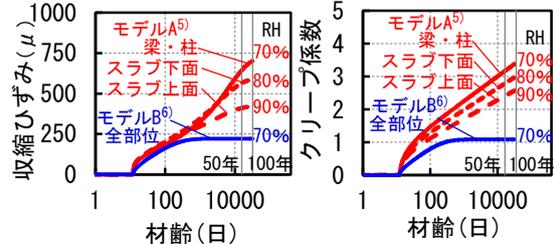


図-5 乾燥収縮・クリープ式

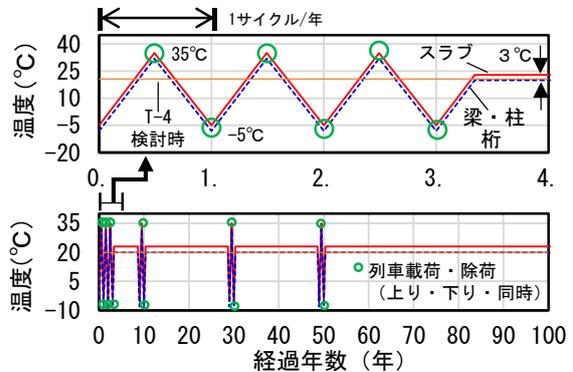


図-6 温度と列車荷重の载荷タイミング

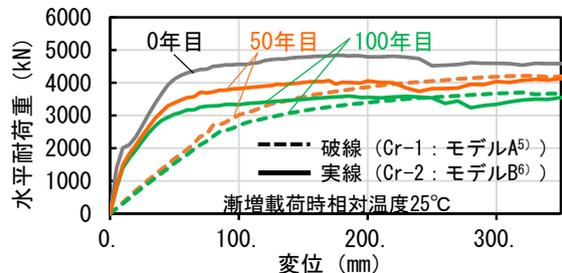


図-7 漸増载荷時の水平耐力-変位関係

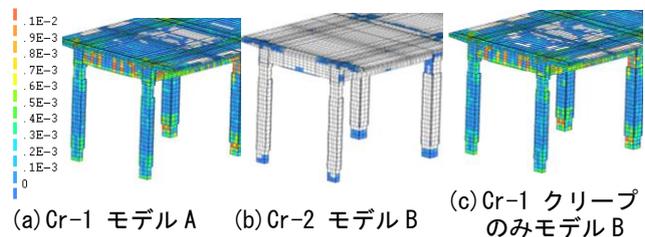


図-8 100年目のひび割れひずみ分布

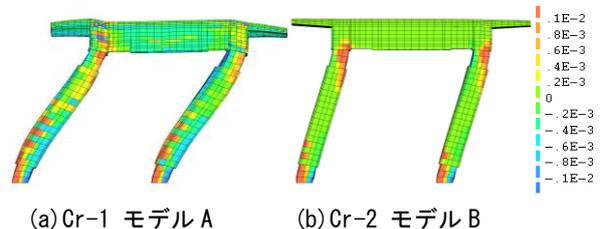


図-9 鉄筋降伏時の鉛直方向のひずみ分布

である。以上のサイクルを、材齢 1, 2, 3, 10, 30, 50 年に実施し、それ以外の期間はスラブを 23℃とした。このときに作用させた列車荷重は、図-1, 図-2 に示す通り、分布荷重を列車進行方向に順番に、上り線および下り線に同時に載荷し、0.2 日で除荷した。なお、日射による部材毎の温度差を想定して、供用下にある桁で測定した実測値を参考に、梁および柱はスラブより 3℃低い温度を設定している。

また、RCT 桁のモデルでは、上記に加えて、橋軸方向に作用するロングレール縦荷重^⑨を、作用方向を高温時と低温時で 180 度回転させて作用させると同時に、列車荷重載荷時には制動荷重^⑩を列車進行方向に与えた(図-2)。ただし、T-3 では上記条件からスラブと桁の温度を同一とし、T-4 ではこの温度を 20℃に一定とすることで、ひび割れの発生状況を確認した。

3. 解析結果

3.1 乾燥収縮式の影響

(1) RC ラーメン高架橋

図-7 に、モデル A を用いた Cr-1 とモデル B を用いた Cr-2 の、材齢 50 年と 100 年の漸増載荷時の水平荷重-変位関係を示す。なお、本検討では腐食の進行によるひび割れはモデル化できておらず、Cr-1 と Cr-2 の温度条件は同じであるため、乾燥収縮・クリープ式のみが異なる。図-7 に示すいずれの材齢も、モデル B を用いた Cr-2 に対して Cr-1 の初期剛性が大きく低下した。これは、図-5 に示す通り、モデル B では材齢約 50 年以降ひずみが概ね一定値を示すが、モデル A では継続するため、図-8(a) に示すひび割れ発生以後に増加したひずみ(ひび割れひずみ)の分布のように、乾燥収縮・クリープ式の違いによってひび割れが卓越して発生したことが要因である。材齢 50 年および 100 年の初期剛性に有意な差がみられないことから、いずれも材齢 50 年までに生じる損傷に依存していると考えられる。また、図-8(c) に示す Cr-1 のクリープ係数にモデル B を用いた際のひび割れひずみ分布は、図-8(a) と比較して概ね変化がないことから、100 年目でのひび割れに対しては、クリープ係数の影響は乾燥収縮に比べて小さいと考えられる。

図-9 に、材齢 100 年の漸増載荷により柱の主鉄筋が降伏した際の、鉛直方向のひずみ分布を示す。なお、鉄筋の降伏は、いずれも柱下端部で発生している。Cr-1 は、柱上下端付近の要素でひずみが卓越しているのに対し、Cr-2 では柱上下端以外の要素でもひずみが増加していることが確認できる。これは、収縮により柱全体に生じたひび割れの開口を示すものであり、このことが漸増載荷時の初期剛性の低下の一因となったと考えられる。

耐荷力は、Cr-1 および Cr-2 で差異がみられるものの、

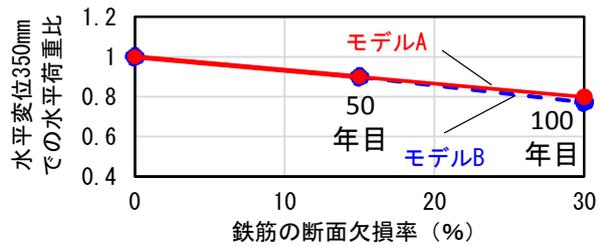
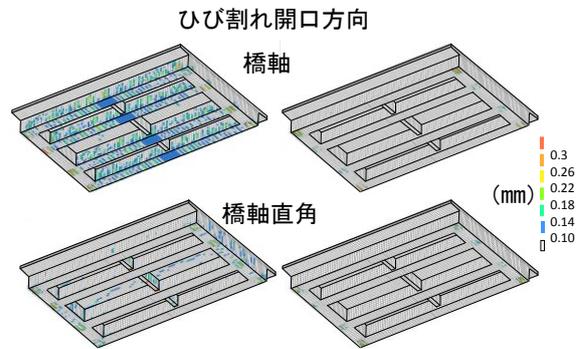


図-10 モデル毎の水平耐力の低下傾向



(a) T-1 モデル A (b) T-2 モデル B

図-11 モデル毎のひび割れ幅分布

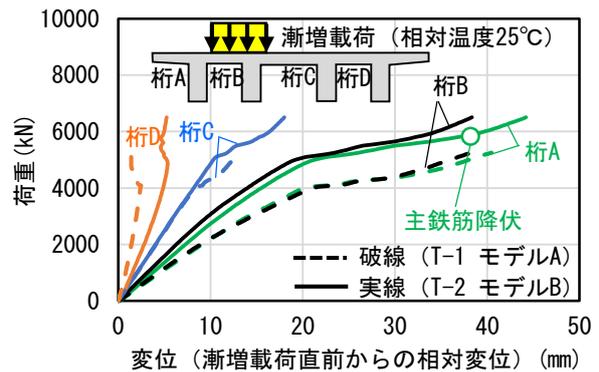


図-12 T 桁の漸増載荷時の荷重-変位関係

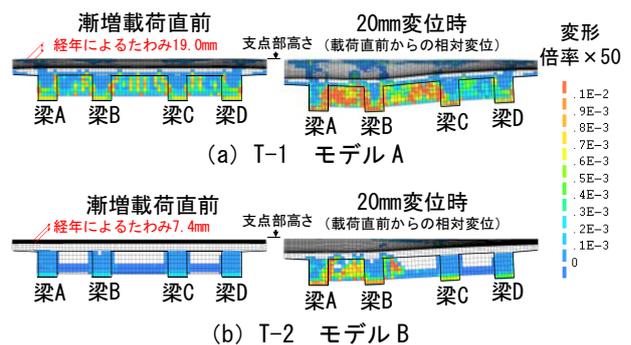


図-13 載荷直前と 20mm 時の横梁のひび割れひずみ分布

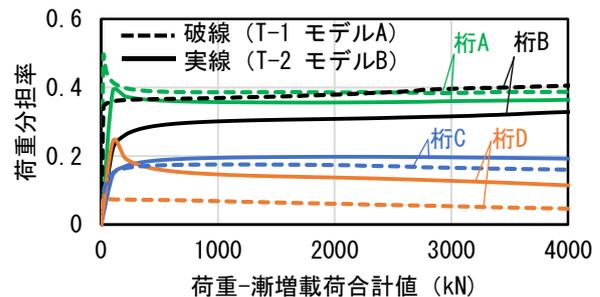


図-14 横梁損傷前の各桁の荷重分担率

図-10 に示す、材齢の増加に伴う水平変位 350mm での水平荷重比（荷重変位関係が概ね横ばいになる水平変位 350mm での材齢 50 年または 100 年の水平荷重／材齢 0 年の水平荷重）をみると、低下の傾向は概ね一致した。このことから、耐力の低下は、モデル A、モデル B に依存せず、同様の傾向を示すと考えられる。

(2) RC T 桁

図-11 に、T-1 と T-2 の材齢 100 年のひび割れ幅分布を示す。なお、ひび割れ幅は、ひび割れひずみを各要素長で除すことで算出した。RCT 桁においても、モデル A を用いた T-1 において、主桁のひび割れと横桁のひび割れが卓越して発生した。また、図-12 に、材齢 100 年の漸増載荷時の荷重－変位関係を示す。なお、荷重の最大値はモデル A で 4500kN、モデル B で 6500kN と異なっている。また、経時変化で漸増載荷直前のたわみ量は、図-13 の通り異なるため、鉛直変位は漸増載荷直前からの相対変位で示している。荷重－変位関係より、桁 A、桁 B では、T-1、T-2 とともに変位 20mm 付近で剛性が大きく低下した。これは、図-13 に示す支間中央の横桁の損傷が原因である。一方、横桁の損傷が生じる前の変位 20mm 以前では、T-2 に比べて T-1 の桁 A、B の剛性が低下した。

図-14 は、変位 20mm で横桁が損傷するまでは、各桁の剛性が等しいと仮定して求めた荷重分担率である。荷重分担率は、載荷位置近傍の桁 A、B では、T-1 が T-2 に対して高く、一方、桁 C、D については、T-1 が T-2 に対して低下している。これは、図-13 の漸増載荷直前のひび割れ分布に示す通り、T-1 は T-2 よりも 100 年目経過時に横桁のひび割れが進展しており、横桁の剛性が低下したことで、載荷位置近傍の桁 A、B の荷重分担率が増加した結果である。ただし、桁 A では、T-1、T-2 の荷重分担率は概ね 0.35～0.4 程度で大きな差はない。このことから、横桁が損傷する変位 20mm 以前に、T-2 に比べて T-1 の桁 A、B の剛性が低下するのは、主桁に発生したひび割れによる影響が大きいと考えられる。すなわち、RCT 桁のモデルでは、収縮・クリープ（モデル A、モデル B）の設定方法に依存したひび割れ発生状況が、剛性に影響する可能性があることが分かった。

3.2 鉄筋の腐食時期による影響

図-15 に、鉄筋の断面積を 25 年毎に段階的に減少させた Cr-1、2 と、漸増載荷直前の材齢 100 年に総じて減少させた Cr-3、4 の水平荷重－変位関係を示す。なお、両者の鉄筋の断面積の減少量は同一である。図-15 に示す通り、腐食発生時期の違いによる水平荷重－変位関係には差がみられず、ひび割れの分布にも変化は見られなかった。このことは、温度変動、水平荷重による損傷、および収縮クリープといった事象と、鉄筋量との相互作用

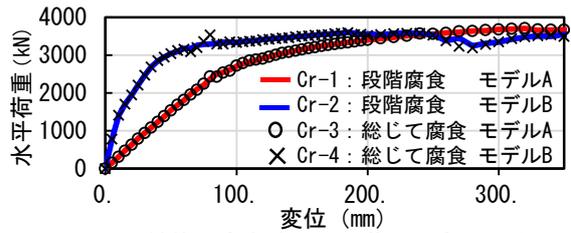


図-15 鉄筋の腐食時期毎の荷重－変位関係

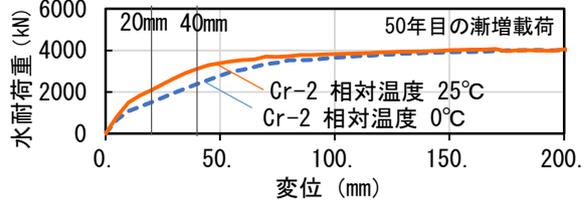


図-16 相対温度毎の漸増載荷時の荷重－変位関係

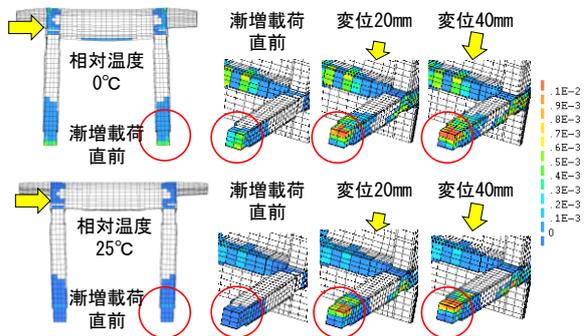


図-17 漸増載荷時のひび割れひずみ分布

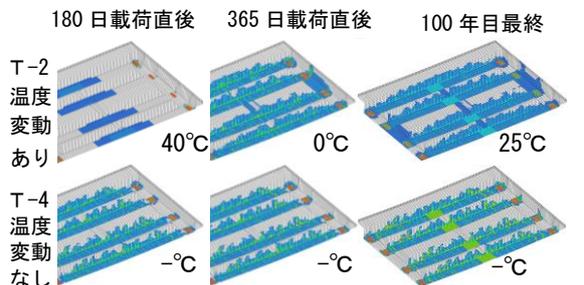


図-18 温度変動の有無によるひび割れひずみ分布

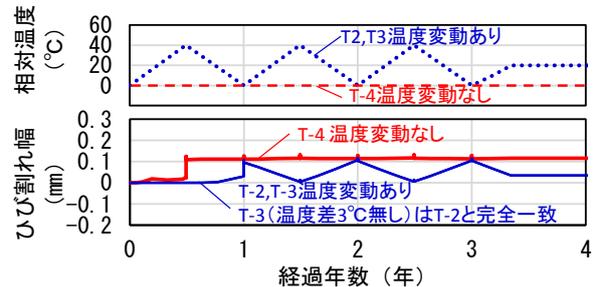


図-19 梁中央部のひび割れ幅の推移

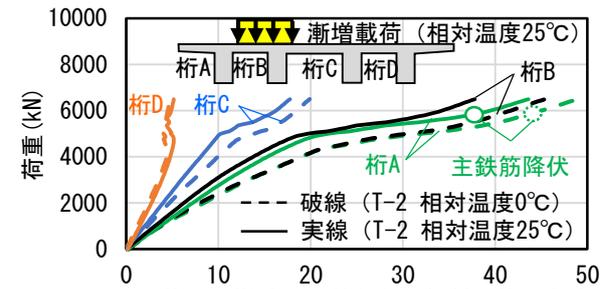


図-20 温度の異なる漸増載荷時の荷重－変位関係

用が小さいことを示唆するものである。

すなわち、本検討の作用の組合せおよび腐食量の範囲では、漸増載荷直前に総じて鉄筋の断面積を減じる方法でも、RC ラーメン高架橋の水平方向の耐力や剛性を評価できる可能性があることが分かった。

3.3 荷重と温度の併用効果

(1) RC ラーメン高架橋

図-16 は、Cr-2 の漸増載荷に加えて、相対温度 0℃および相対温度 25℃を組合せた場合の水平荷重-変位関係を比較して示す。両者は漸増載荷時の相対温度のみ条件が異なるが、相対温度 25℃に比べて相対温度 0℃の漸増載荷では剛性が低下する傾向があることが確認できる。そこで、図-17 に漸増載荷直前と水平変位 20, 40mm 時の柱基部のひび割れひずみ分布を示す。漸増載荷直前の柱基部を比較すると、相対温度 0℃では相対温度 25℃に比べてひずみが大きいことが確認できる。これは、漸増載荷直前に、乾燥収縮により内側に押むように RC ラーメン高架橋のモデルが変形しているため、この変形に伴い柱基部のひび割れが開くことが原因である。この状態で漸増載荷を実施すると、図-17 に示す通り、ひび割れひずみが相対温度 25℃の時に比べて、進展する傾向がみられた。このことから、温度と乾燥収縮の併用により、柱基部のひび割れひずみが増加する場合には、水平方向への剛性が低下することが確認できた。

(2) RC T 桁

図-18 に、0~40℃の温度変動を考慮した T-2 と、20℃一定（温度変動なし）を想定した T-4 のひび割れひずみ分布を示す。また、図-19 に T-2, T-3, T-4 の桁中央付近のコンクリート要素のひび割れ幅の経時変化を示す。なお、スラブと桁の温度差 3℃を考慮していない T-3 と、考慮した T-2 は、ひび割れ幅の推移およびひび割れひずみ分布共に差はみられなかった。

次に、20℃一定（温度変動なし）とした T-4 では、乾燥収縮・クリープの進展に併せてひび割れが増加し、1 回目の列車荷重が載荷する材齢 180 日でひび割れの進展が確認できた。一方、温度変動を考慮した T-2 では、材齢 180 日ではひび割れは進展しておらず、列車荷重載荷後もひび割れは進展していないことが確認できた。これは、温度変動を考慮したケースでは、相対温度 40℃の温度上昇による膨張が、乾燥収縮・クリープを打ち消す方向に作用したためと考えられる。

すなわち、温度低下時では、乾燥収縮・クリープと温度低下による収縮が同時に作用するため、温度下降時にひび割れ幅が増加する状況が確認できた（図-19）。このことから、評価では、乾燥収縮・クリープおよび温度低下による収縮を組み合わせることで、温度によるひび割れ幅とひび割れ発生時期の影響を加味した評価が実施で

きると考えられる。また、温度によるひび割れ幅の変動は大きく、図-20 に示す通り、ひび割れ幅が大きくなる相対温度 0℃の漸増載荷時の剛性は 25℃時より低下することが分かった。なお、両ケースとも桁 A の荷重分担率は 0.35 程度である。このため、剛性低下は、荷重分担よりも温度低下による主桁のひび割れ幅増加の影響が大きいと考えられる。このことから、温度と列車荷重を併用した解析では、温度低下による収縮と列車荷重の組み合わせで、複数の作用に起因したひび割れ幅の増加と、構造物の剛性低下への影響を考慮した評価が実施できると考えられる。これは、構造物の維持管理において、ひび割れ幅が最も大きくなると考えられる冬季に点検を実施するのが効果的であるとの知見を示唆するものである。

4. まとめ

- (1) 乾燥収縮・クリープのモデル（モデル A, モデル B）の選定は、RC ラーメン高架橋の水平耐力への影響は小さいが、剛性には寄与した。また、RC T 桁は、横桁の剛性低下に伴う複数の主桁の荷重分担が生じること、および主桁の剛性低下に影響した。
- (2) RC ラーメン高架橋は、収縮による柱基部のひび割れひずみの増加によって、水平方向への剛性が低下するため、低温を考慮することで温度による影響を最大限に考慮した評価可能であった。
- (3) RC T 桁のスラブと梁に 3℃の温度差が生じていても、ひび割れの分布には差がみられなかった。
- (4) RC T 桁のひび割れは、温度変動によりひび割れ幅の増加と剛性の低下が生じるため、乾燥収縮・クリープや荷重載荷と温度低下を組み合わせることで、桁剛性の評価が可能となった。

参考文献

- 1) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異型鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, Vol.378/V-6, pp165-174, 1987.2
- 2) 長岡和真 et al.: 主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価, コンクリート工学論文集, Vol24, No.2, pp29-42, 2012.9
- 3) 日本コンクリート工学会: 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化研究委員会報告書, 2013.11
- 4) DIANA-10.0 User's Manual -Material Library first ed.2015.12
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 6) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造, 丸善, 2004.4