

論文

RC 床版のモデル化条件が解析結果に及ぼす影響の検討

高橋正也*, 藤山知加子**, 田中泰司***

*法政大学大学院, 都市環境デザイン工学専攻 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

**工博, 法政大学, デザイン工学部都市環境デザイン工学科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

***工博, 金沢工業大学, 工学部環境土木工学科 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1)

本研究の目的は、RC 床版モデルのモデル化範囲と支持条件の違いが、解析結果に及ぼす影響の定量化である。床版上面に静的載荷及び動的載荷を実施した際の、床版のたわみ量から桁のたわみ量を差し引いた相対変位の解析値に着目した。鋼桁部分をモデル化せずに桁部分を全拘束した格間モデルでは、全橋モデルに対して半分程度の変位になった。鋼桁全体のたわみ変形の影響を考慮するために、鋼桁部分を弾性支持梁で再現したモデルでは、全橋モデルとほぼ同等の変位になった。以上より、床版の部分的なモデル化の際に必要な、床版の回転拘束と桁全体のたわみ変形の影響を考慮した支持条件を提示した。

キーワード: FEM, RC 床版, 全橋モデル, 拘束条件

1. はじめに

近年、我が国の道路橋の多くは、重交通荷重の繰り返し載荷による疲労損傷などの劣化、及び供用年数の増加に伴う経年劣化が顕在化している。特に床版は、車両の輪荷重を直接受ける部材であり、他の部材と比べても大幅に劣化が進行しているため、維持更新経費の多くが費やされている状況である。そのため、床版の余寿命予測、高耐久、長寿命化技術の開発によって、低コスト化と安全性の確保を両立することが、求められている。

既設 RC 床版の余寿命推定は、今後橋梁を合理的に維持管理していく上で、最も必要な方法の一つである。これまでに、精度向上に向けて多くの検討が報告されている。RC 床版の一部のみを再現した、床版供試体による輪荷重重走行試験の再現解析では、供試体の寸法、支持条件に応じて解析条件を設定することが可能であり、概ね実験結果を再現できることが確認されている^{1) 2)}。疲労損傷に加えて、塩害、乾燥収縮、凍害が発生し、複合劣化による早期劣化が発生した際の疲労寿命に及ぼす影響についても、同様の輪荷重重走行試験の再現解析によって、概ね実験結果を再現できることが確認されている^{3) 4) 5)}。さらに、既設 RC 床版に発生しているひび割れの情報を解析モデルに導入することで、既存損傷を有する RC 床版に対しても、余寿命推定が可能となることが確認されている^{6) 7) 8)}。

これらの方法は、いずれも RC 床版の部分的なモデル化によって検討されている。このように、RC 床版を対象

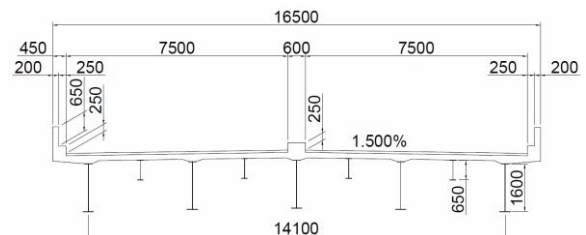


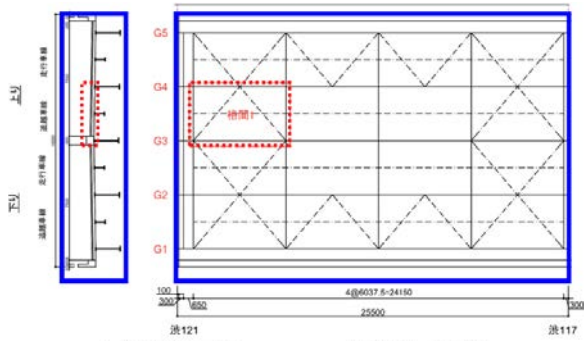
図-1 断面図

とした数値解析による検討は、モデルの簡略化による計算の効率化、及び対象橋梁の対称性を考慮して、橋梁の一部のみの部分モデルとすることが多い。

よって本研究では、3次元非線形有限要素解析ソフト COM3D を用いて、モデル化範囲及び支持条件の違いが、解析結果に及ぼす影響を定量的に示すことを目的とした。そして、モデル化範囲の床版の部分的なモデル化の際に必要な、各種影響を考慮した支持条件を提示する。

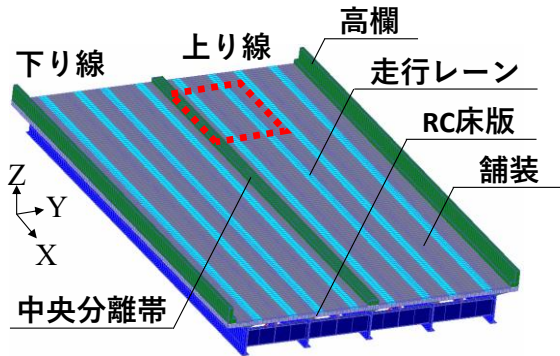
2. 対象橋梁

対象橋梁は、実在の都市内高速道路（鋼 I 桁単純合成桁 供用 51 年）の高架橋である。橋長は 25.5m、上下線一体で全幅員 16.5m、桁高は 1.6m で、供用から 10 年が経過した 1977 年に、5 主桁の主桁間 4 か所に縦桁の増設が実施された。増設桁の桁高は 0.65m である。床版厚は 180mm、舗装厚は 80mm である。断面図を図-1 に示す。本研究では、縦桁増設後をモデル化し、検討を実施した。

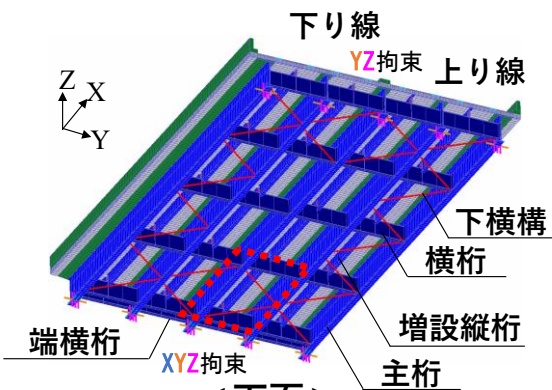


—:全橋モデル :格間モデル

図-2 計測位置図



<上面>



<下面>

図-3 全橋モデル全体図

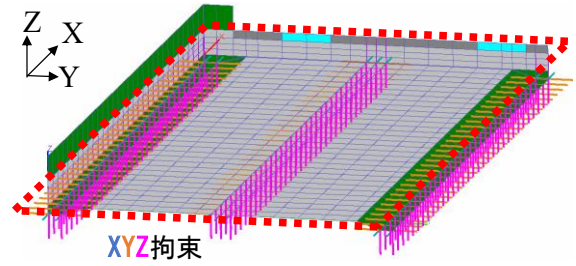


図-4 格間モデル全体図

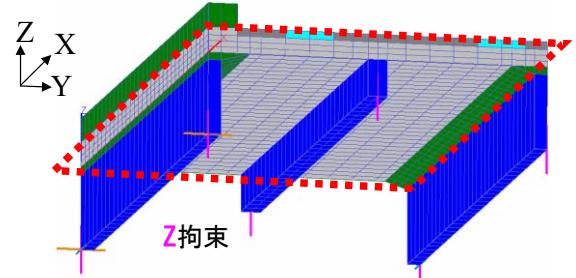


図-5 格間梁モデル全体図

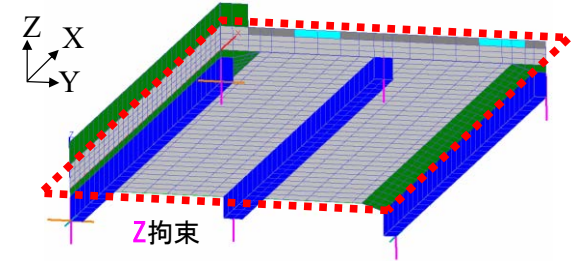


図-6 格間桁モデル全体図

わりとなる弾性支持梁を追加した。床版と弾性支持梁は完全剛結とし、横桁は床版と接していないため省略した。弾性支持梁の寸法は、③格間梁モデルでは主桁、増設桁それぞれの単体の断面2次モーメントと同じ値を取るように設定し、非合成断面とした。概形を図-5に示す。

④格間桁モデルでは、床版と主桁、増設桁を全断面有効として考えた場合の载荷に伴う床版の断面変形の中立軸が、①全橋モデルと一致し、合成断面となるように寸法と弾性係数を設定した。概形を図-6に示す

3. 解析モデル概要

3.1 解析モデル概形

解析モデルは、①全橋モデル、②格間モデル、③格間梁モデル、④格間桁モデルの4種類である。

①全橋モデルでは、図-2の実線で囲まれた部分の橋梁全体をモデル化した。下横構はトラス要素、下横構以外は主桁、増設桁を含め、すべてソリッド要素によりモデル化した。床版と支持桁は完全剛結とした。概形を図-3に示す。

②格間モデルでは、図-2の点線で囲まれた部分の格間の床版のみを再現し、すべてソリッド要素でモデル化した。概形を図-4に示す。

③格間梁モデル、④格間桁モデルでは、図-2の点線で囲まれた部分の床版を再現し、更に主桁と増設桁の代

3.2 拘束条件

①全橋モデルは、主桁端部をそれぞれピン支持、ローラー支持とし、実橋梁の支持条件を再現している。②格間モデルは、主桁、増設桁、横桁を再現していないモデルであり、主桁と増設桁で支持されていた部分の節点をフランジ幅で全拘束することで、桁の回転拘束を再現している。③格間梁モデル、④格間桁モデルは、桁を弾性支持梁で再現したモデルであり、弾性支持梁の両端を垂直方向に支持している。

なお、部分的なモデル化を行った②③④の各モデルの側面は、各方向の拘束はしておらず、連続条件を再現していない。本研究は、連続条件云々の検討ではなく、橋梁の一部のみを取り出して考えた際における再現性について検討したものである。また、本研究における解析結

表-1 材料特性

(a) 鋼材

	SD295A	SS400	SM490A	HT-60
弾性係数(kgf/cm ²)	2000000	2000000	2000000	2000000
降伏強度(kgf/cm ²)	2950	2450	3250	4500
引張強度(kgf/cm ²)	4400	4000	4900	5700
引張破断ひずみ	0.12	0.12	0.12	0.12
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.3
単位体積重量(kgf/cm ³)	0.0077	0.0077	0.0077	0.0077

(b) コンクリート

	普通コンクリート	アスファルト
弾性係数(kgf/cm ²)	320000	50000
圧縮強度(kgf/cm ²)	433	
引張強度(kgf/cm ²)	28.36	
ポアソン比	0.2	0.35
単位体積重量(kgf/cm ³)	0.0023	0.00225

果は、道路橋既設 RC 床版の疲労解析専用ソフト FABriS における解析結果との比較にも用いている。この解析ソフトは、対象橋梁の床版格間のみを再現して検討を行うものであり、本研究と同様に連続条件は再現しない仕様となっている。

3.3 材料特性値

本研究で用いる鋼材及びコンクリートの材料特性値を表-1 に示す。コンクリート強度は現在の実計測強度を使用し、ひび割れ等は再現していない。

鋼材とアスファルト舗装については線形解析、コンクリートについては非線形解析でモデル化した。

4. 静的載荷

4.1 計測条件

対象橋梁の床版下面には、変位計が設置されている。変位計設置箇所を図-7 に示す。この設置箇所 D11, D12, D21, D22 の 4 か所における相対変位を対象として、対応する節点の変位を用いて検討を行った。

RC 床版モデルにおける載荷位置及び計測位置を図-8 に示す。変位計設置箇所の直上にあたる床版上面の載荷位置に対して荷重を加えた際の、床版のたわみ量から桁のたわみ量を差し引いた相対変位を求めた。ここで、桁のたわみ量とは、図-7 において青丸で示した節点のうち、桁端部から橋軸方向に向かって各変位計の設置箇所と等しい距離にある、主桁、増設桁と接する 2 つの節点の変位の平均値である。

4.2 載荷条件

4 種類の RC 床版モデルに対して、図-8 に示した載荷位置に 1 箇所ずつ、それぞれ 25 トンの荷重を載荷した。床版全体の变形量が荷重車載荷と概ね一致するよう、荷重車相当の荷重を各モデルの載荷位置に与えた。各載荷

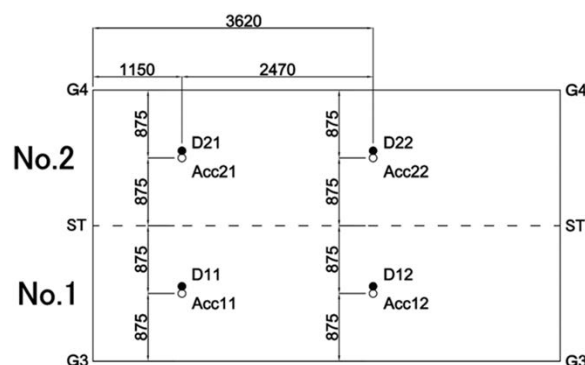


図-7 変位計設置箇所

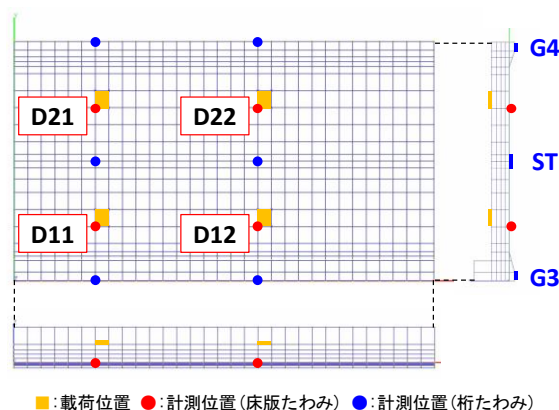


図-8 載荷・計測位置図

面は 4 節点で構成されており、25 トンを 4 分割して 4 節点に載荷し、面載荷を模擬した。

最大荷重時の、変位計設置箇所の節点に生じた床版たわみ量から、桁端部からの距離が計測位置と等しい距離にある桁のたわみ量を差し引くことで、床版の相対変位を求めた。載荷面直下の計測点、及び載荷面直下以外の計測点の相対変位より、支持条件が床版全体の变形に及ぼす影響を検討した。

4.3 解析結果

(1) 載荷面直下の変位

表-2 に、4 種類の RC 床版モデルにおける、4 か所の載荷位置にそれぞれ載荷した際の計測箇所における相対変位を示す。表の中において太字で示されている部分は、載荷面直下における相対変位を示している。

載荷面直下の計測位置では、②格間モデルは①全橋モデルの半分程度のたわみ量 (62%, 54%, 50%, 43%) になった。①全橋モデルは、桁端部をピン支持、ローラー支持している構造であるため、桁全体のたわみ変形を考慮することができる。しかし、②格間モデルは床版部分のみを再現しており、主桁と増設桁で支持されていた部分の節点をフランジ幅で全拘束している。よって、載荷に伴う桁全体のたわみ変形の影響は考慮できないため、相対変位が小さくなる傾向にあると考えられる。

③格間梁モデルは、①全橋モデルと同程度のたわみ量 (116%, 104%, 106%, 91%) を示した。また、④格間桁

表-2 相対変位

相対変位[mm]		計測位置			
載荷位置	モデル名	D11	D12	D21	D22
D11	①全橋	-0.2553	-0.0484	0.0094	-0.0257
	②格間	-0.1575	-0.0002	0.0058	-0.0002
	③格間梁	-0.2972	-0.0643	0.0252	-0.0300
	④格間桁	-0.3066	-0.0615	0.0211	-0.0334
D12	①全橋	-0.0431	-0.2887	-0.0209	-0.0158
	②格間	-0.0001	-0.1557	-0.0002	0.0057
	③格間梁	-0.0697	-0.2991	-0.0287	-0.0235
	④格間桁	-0.0616	-0.3104	-0.0312	-0.0318
D21	①全橋	0.0561	0.0110	-0.3353	-0.0539
	②格間	0.0037	-0.0002	-0.1693	0.0011
	③格間梁	0.0501	0.0083	-0.3552	-0.0690
	④格間桁	0.0634	0.0295	-0.3294	-0.0300
D22	①全橋	0.0059	0.0645	-0.0422	-0.3873
	②格間	-0.0002	0.0037	0.0008	-0.1679
	③格間梁	-0.0099	0.0395	-0.0648	-0.3508
	④格間桁	-0.0019	0.0828	-0.0269	-0.2934

モデルにおいても③格間梁モデルと同様に、①全橋モデルと同程度のたわみ量（120%、108%、98%、76%）を示した。弾性支持梁で床版を支持することで、②格間モデルでは再現することが出来なかった、桁全体のたわみ変形を考慮することができたと考えられる。

(2) 載荷面直下以外の変位

載荷面直下以外の計測箇所では、②格間モデルは①全橋モデルと比べて大幅にたわみ量が小さくなり、ほとんどの箇所に変位が発生していなかった。②格間モデルは床版部分のみの再現であり、桁で支持されていた部分の節点をフランジ幅で全拘束しているため、載荷面直下以外の計測箇所では、載荷による影響が見られなかったものと考えられる。

③格間梁モデル、④格間桁モデルでは、弾性支持梁で床版を支持したことで、各計測箇所における大きさを完全には再現できないものの、載荷面直下以外の計測箇所でも、載荷による影響を考慮することができた。ばらつきが生じた原因として、主桁及び増設桁の形状を梁で再現しているため、ねじり剛性が異なる点が挙げられる。

(3) まとめ

部分的なモデル化を行う際は、弾性支持梁で床版を支持することで、静的載荷における載荷面直下の変位は、概ね全橋モデルと同様の結果を示すことを確認した。載荷面直下以外の変位においては、載荷に伴う桁全体のたわみ変形の影響を考慮できることを確認した。しかし、発生するたわみ量についてはばらつきが生じており、弾性支持梁が実際の主桁、増設桁とは形状が異なるため、ねじり剛性が異なることが、原因として挙げられる。

静的載荷においては、③格間梁モデルと比べて、合成断面となるように寸法と弾性係数を設定した④格間桁モデルの優位性は確認されなかった。

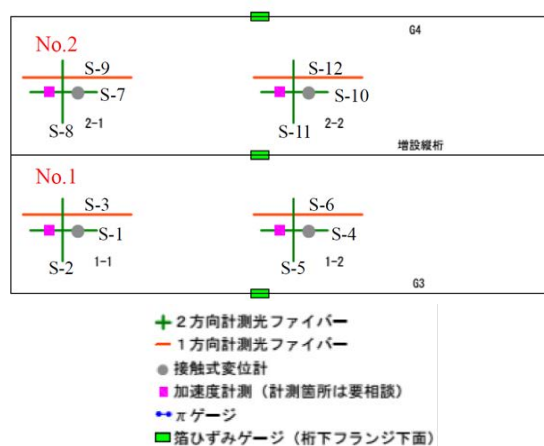


図-9 光ファイバーセンサー設置箇所

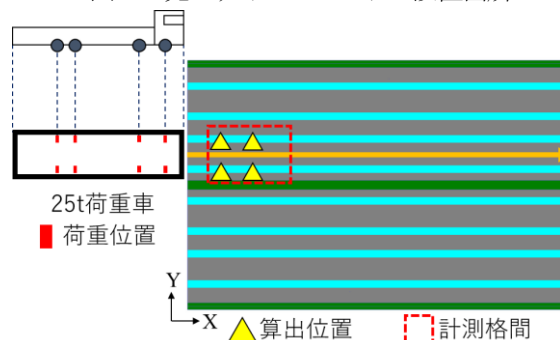


図-10 荷重車走行位置・計測位置図

5. 動的載荷

5.1 計測条件

対象橋梁の床版下面には、変位計だけでなくひずみ計測用の光ファイバーセンサーも設置されている。光ファイバーセンサーの設置箇所を図-9に示す。この設置箇所と対応する節点の変位を用いてたわみ、ひずみを算出し、検討を行った。

実際に変位計が設置されているD11、D12、D21、D22の4か所における相対変位、及びS-1からS-12の12個の橋軸方向ひずみ、橋軸直角方向ひずみを対象として、荷重車を模擬した動的載荷の解析を実施した。

変位計設置箇所の節点に生じた床版たわみ量から、桁のたわみ量を差し引くことで、床版の相対変位を求めた。ここで、桁のたわみ量とは、桁端部から橋軸方向に向かって各変位計の設置箇所と等しい距離にある、主桁、増設桁と接する2つの節点の変位の平均値である。また、光ファイバーセンサー設置箇所と対応する節点の荷重車走行時の節点変位を、載荷前の長さで除して、床版下面に発生するひずみを算出した。

5.2 載荷条件

4種類のRC床版モデルに対し、図-10に示す対象橋梁の上り線の追越車線を25トンの荷重車が時速60kmで走行する移動載荷を再現した。荷重車は4軸であり、前2軸の合計が89.4kN、後ろ2軸の合計が145.1kNである。

タイヤ1輪あたりの載荷点は6つで、1輪あたりの荷重を6分割した値を各載荷点に導入した。実際の荷重車は前輪と後輪で幅が異なるが、モデル及び計算の簡略化のため、荷重の載荷面積は全て200×500mmの寸法で統一した。

動的載荷時の各計測項目の結果を4種類のRC床版モデルで比較し、桁全体のたわみ変形の影響及び載荷位置から離れた地点における載荷の影響を検討した。

5.3 解析結果

(1) たわみ

表-3に、4種類のRC床版モデルにおける全計測箇所の解析結果を、①全橋モデルの解析値で除して割合に変換した数値の平均値を示す。表-4に、荷重車載荷時の計測箇所における相対変位を示す。また、図-11に、結果の一例として、D21における変位の解析結果を示す。

各モデルの波形は、図-11に示す実測値と比べて、大きさは異なるものの、同様の概形を示しており、解析モデルの妥当性を確認できた。実測値と比べてたわみ量が小さいのは、実測値は供用後49年が経過した際のデータであるが、解析値はいずれも、現状に相当する損傷を導入していないためである。なお、損傷を導入した解析においては、全橋モデルにおける解析結果の平均値が実測値の97%となることを既往の研究で示している⁹⁾。

②格間モデルは、床版部分のみの再現であるため、載荷に伴う桁全体のたわみ変形の影響を考慮できず、①全橋モデルと比べて37%までたわみ量が小さくなった。波形に着目すると、荷重車の4軸がそれぞれ通過する際のピークへの立ち上がり方が他のモデルと比べて緩やかであるため、計測箇所から離れた地点での載荷による影響を考慮できていないと考えられる。よって、床版のみを再現する方法では、実車両に対する適切な評価を行うことが難しいと考えられる。

③格間梁モデルは、①全橋モデルの93%のたわみ量を示した。弾性支持梁で床版を支持することで、動的載荷においても桁全体のたわみ変形を考慮することができたと考えられる。波形においても、①全橋モデルと同様の概形を示しており、計測箇所から離れた地点での載荷による影響を考慮できていると考えられる。

④格間桁モデルでは、①全橋モデル及び③格間梁モデルよりもたわみ量が小さく、69%となった。中立軸、断面2次モーメントが①全橋モデルと同程度になるように、弾性支持梁の寸法、弾性係数を設定して、合成断面としたが、桁の形状を梁で再現しているため、ねじり剛性が異なることが原因で、たわみ量が小さくなったと考えられる。波形においては、①全橋モデルと同様の概形を示しており、計測箇所から離れた地点での載荷による影響を考慮できていると考えられる。

以上より、動的載荷による各計測位置における相対変位は、弾性支持梁で床版を支持することで、概ね全橋モ

表-3 解析値一覧 (割合)

振幅 (割合)		②/①	③/①	④/①
たわみ		0.37	0.93	0.69
ひずみ	橋軸	0.67	0.82	0.94
	橋軸直角	0.44	1.26	0.98
	全体	0.59	0.96	0.96

表-4 相対変位

[mm]	①全橋	②格間	③格間梁	④格間桁
D11	0.035	0.021	0.044	0.043
D21	0.046	0.013	0.040	0.026
D12	0.047	0.020	0.041	0.028
D22	0.070	0.012	0.047	0.024

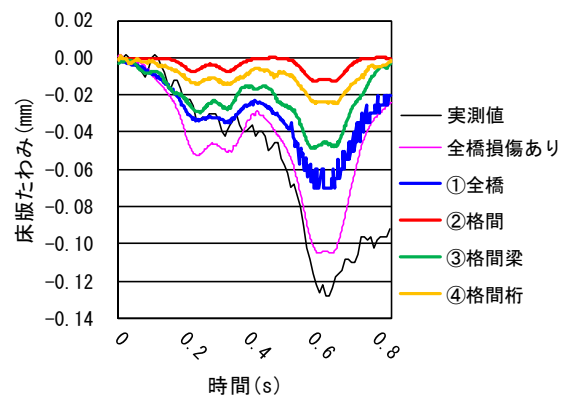


図-11 D22 床版たわみ (相対変位)

デルと同様の結果を示すことを明らかにした。③格間梁モデルの方が④格間桁モデルに比べて変位が大きくなる傾向を示した原因として、断面の剛性が非合成断面の③格間梁モデルの方が低いためだと考えられる。

(2) ひずみ

表-5に、4種類のRC床版モデルにおける、荷重車載荷時の計測箇所における各方向ひずみを示す。また、図-12に、結果の一例として、S-7における橋軸方向ひずみの解析結果を示す。

たわみと同様、各モデルの波形は、図-12に示す実測値と同様の概形を示しており、解析モデルの妥当性を重ねて確認できた。実測値と比べて値が小さい原因も、たわみと同様に、解析モデルに対して現状に相当する損傷を導入していないためである。なお、損傷を導入した解析においては、全橋モデルにおける解析結果の平均値が実測値の95%となることを既往の研究で示している⁹⁾。

②格間モデルは床版部分のみの再現であるため、①全橋モデルと比べて59%までひずみが小さくなった。本来ならば、荷重車の4軸がいずれにおいても計測箇所の直上を通過していない、計測箇所から離れた地点における載荷の状態にある時、圧縮ひずみが発生するはずである。しかし、波形に着目すると、圧縮ひずみは①全橋モデルほど発生していなかった。床版部分のみの再現で、桁で

表-5 各方向ひずみ

単位[μ]	方向	①全橋	②格間	③格間梁	④格間桁
S-1	橋軸	10.0	9.2	9.0	9.5
S-7	橋軸	8.3	5.8	6.8	8.1
S-3	橋軸	8.0	5.7	6.4	6.2
S-9	橋軸	7.0	3.8	5.8	7.1
S-4	橋軸	10.0	7.8	7.3	8.7
S-10	橋軸	8.4	4.4	6.3	7.6
S-6	橋軸	7.0	4.7	5.0	5.9
S-12	橋軸	6.0	2.9	5.8	7.3
S-2	橋軸直角	12.4	6.8	20.7	16.1
S-8	橋軸直角	10.0	3.5	12.1	9.6
S-5	橋軸直角	15.3	6.6	19.5	14.8
S-11	橋軸直角	15.0	6.6	13.3	10.3

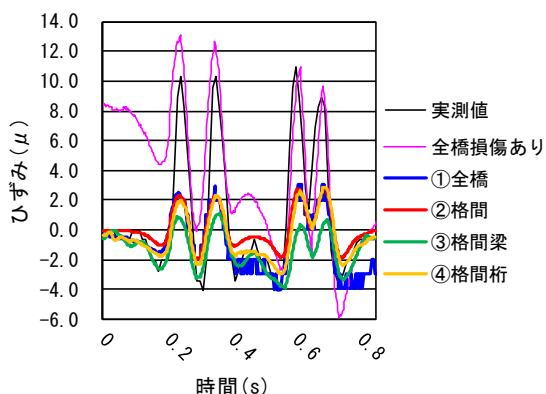


図-12 S-6 橋軸方向の平均ひずみ

支持されている部分の節点は全拘束されているため、桁全体の変形を考慮できなかったことが原因であると考えられる。よって、床版のみを再現する方法では、実車両に対する適切な評価を行うことが難しいと考えられる。

③格間梁モデル、④格間桁モデルでは、概ね①全橋モデルと同程度のひずみが発生し、いずれも96%となった。弾性支持梁で床版を支持することで、動的载荷においても桁全体のたわみ変形を考慮できたものと考えられる。波形に着目すると、軸直下の周辺部分に発生する圧縮ひずみ、及び軸直下に発生する引張りひずみを両者とも再現することができていた。よって、計測箇所から離れた地点での载荷による影響を考慮することができた。

以上より、動的载荷による各計測位置における橋軸方向ひずみ、橋軸直角方向ひずみは、たわみと同様に弾性支持梁で床版を支持することで、概ね全橋モデルと同様の結果を示すことを確認した。

6. 結論

モデル化範囲の異なる RC 床版モデルの連続条件及び支持条件の差異が解析結果に及ぼす影響について、静的载荷及び動的载荷を用いて比較し、以下に知見を得た。

1. モデル化範囲及び支持条件の違いが、解析結果に及ぼす影響を定量的に示した。床版の部分的なモデル

化の際、桁部分を弾性支持梁で再現することで、全橋モデルと同等の解析結果を得た。

2. 桁で支持された部分の節点をフランジ幅で全拘束したモデルでは、床版全体の変形を考慮できず、たわみは全橋モデルの37%、ひずみは59%となった。
3. 弾性支持梁を用いる際、合成断面となるように寸法と弾性係数を設定しなくても、概ね適当な結果が得られることを示した。非合成断面のモデルにおける動的载荷では、たわみは全橋モデルの93%、ひずみは96%となった。

今後、各モデルに対して疲労解析を実施し、モデル化範囲の異なる RC 床版モデルの連続条件及び支持条件の差異が、疲労余寿命に及ぼす影響について検討する。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X. : Three-dimensional fatigue simulation of RC slabs under traveling wheel-type loads, Journal of Advances Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.445-457, 2006
- 2) 平塚慶達, 千田峰生, 藤山知加子, 前川宏一 : RC 床版の疲労余寿命に及ぼす先行荷重履歴の影響, 土木学会論文集 E2, Vol. 72, No.4, 323-342, 2016.
- 3) 前島拓, 子田康弘, 土屋智史, 岩城一郎 : 塩害による鉄筋腐食が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.70, No.2, 208-225, 2014
- 4) 平塚慶達, 前川宏一 : 乾燥収縮過程が RC 床版の疲労寿命に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.72, No.4, 343-354, 2016
- 5) 三田村浩, 佐藤京, 本田幸一, 松井繁之 : 道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響, 構造工学論文集, Vol.55A, 1420-1431, 2009
- 6) Fujiyama, C., Tang, X. J., Maekawa, K. and An, X. : Pseudo-cracking approach to fatigue life assessment of RC bridge decks in service, Journal of Advances Concrete Technology, Vol.11, 7-21, 2013
- 7) Tanaka, Y., Maekawa, K. and Takahashi, Y. : Remaining Fatigue Life Assessment of Damaged RC Decks -Data Assimilation of Multi-scale Model and Site Inspection-, Journal of Advances Concrete Technology, Vol.15, pp.328-345, 2017
- 8) E., Fathalla, Y., Tanaka and K., Maekawa : Remaining fatigue life assessment of in-service road bridge decks based upon artificial neural networks, Engineering Structures, Vol.171, 602-616, 2018
- 9) 高橋正也, 藤山知加子, 田中泰司, 土田智, 中野聡 : 擬似クラック法を用いた既設 RC 床版のモデル化条件の検討, 平成 30 年度土木学会全国大会, I -358, 2018

(2018年7月20日受付)