第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

鉄道橋りょう・高架橋を対象とした上部工反力の簡易推定式の提案

和田　一範[1]・小野寺　周[1]・宇佐美　敦浩[2]・坂井　公俊[3]

[1]正会員　修士（工）　鉄道総合技術研究所　鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
[2]正会員　修士（工）　ジェイアール東海コンサルタンツ　土木事業部
（〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅五丁目33番10号 アクアタウン納屋橋）
[3]正会員　博士（工）　鉄道総合技術研究所　鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

鉄道構造物は，数十～数百kmに亘って線状に連続しているため，局所的な地震被害であっても，広い範囲で鉄道の輸送機能が停止する可能性がある．このような事態を可能な限り防ぐためには，路線全体の地震被害シミュレーションを行って，耐震上の弱点箇所を抽出して地震対策を優先的に実施することや，弱点箇所を踏まえた復旧シナリオを事前に策定することなどが重要である．

路線全体の地震被害シミュレーションを行うためには，鉄道構造物を個別にモデル化する必要がある．一般的な鉄道橋りょう・高架橋については，「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）[1)]」に準拠した2次元もしくは3次元の骨組みモデルがよく用いられるが，そのモデル化には構造物図面や土質柱状図等から詳細な構造諸元や地盤情報を取得する必要がある．路線全体における膨大な数の橋りょう・高架橋に対してこうした情報を取得するには多大な労力を要し，シミュレーションを行う際の障壁となっていた．そこで，著者らの一部は鉄道橋りょう・高架橋を対象とした効率的なモデル化手法[2)]を提案している．この手法では，橋りょう・高架橋の地震時挙動への感度が大きいパラメータを事前に抽出することで，構造形式や柱高さ，上部工反力（桁や軌道の重量）等の限られたパラメータのみからモデル化を可能にしている．

ここで，上記パラメータの大半は図面等から容易に取得可能であるが，上部工反力については，詳細な荷重計算が必要となる．提案したモデル化手法の実用性をより高めるためには，上部工反力を簡易に評価可能な手法を構築し，必要なパラメータをさらに効率的に取得可能とすることが重要である．

そこで本稿では，鉄道橋りょう・高架橋の上部工反力を簡易に評価するための推定式を提案する．2章では，桁種別や軌道形式に応じた単位長さあたりの重量を既往の文献等から整理することで，上部工反力の推定式を構築する．3章では，推定式の妥当性検証として，上部工反力が詳細に計算されている桁を対象に，推定式と詳細計算の結果を比較する．

2. 上部工反力の簡易推定式

本章では，鉄道橋りょう・高架橋における上部工反力を簡易に評価するための推定式について述べる．まず，(1)において対象とする桁種別を示すとともに，上部工反力として考慮する各種重量と推定式の形状を整理する．続いて，(2)，(3)において，既往の文献[3), 4)]および著者らが所有する設計事例を調査することで，桁種別や軌道形式に応じた各種重量の推定式を作成する．

(1) 対象とする桁種別と上部工反力の簡易推定式

対象とする桁種別を**図-1**に示す．鉄道橋りょう・高架橋で一般的に用いられている鋼桁，RC桁，PC

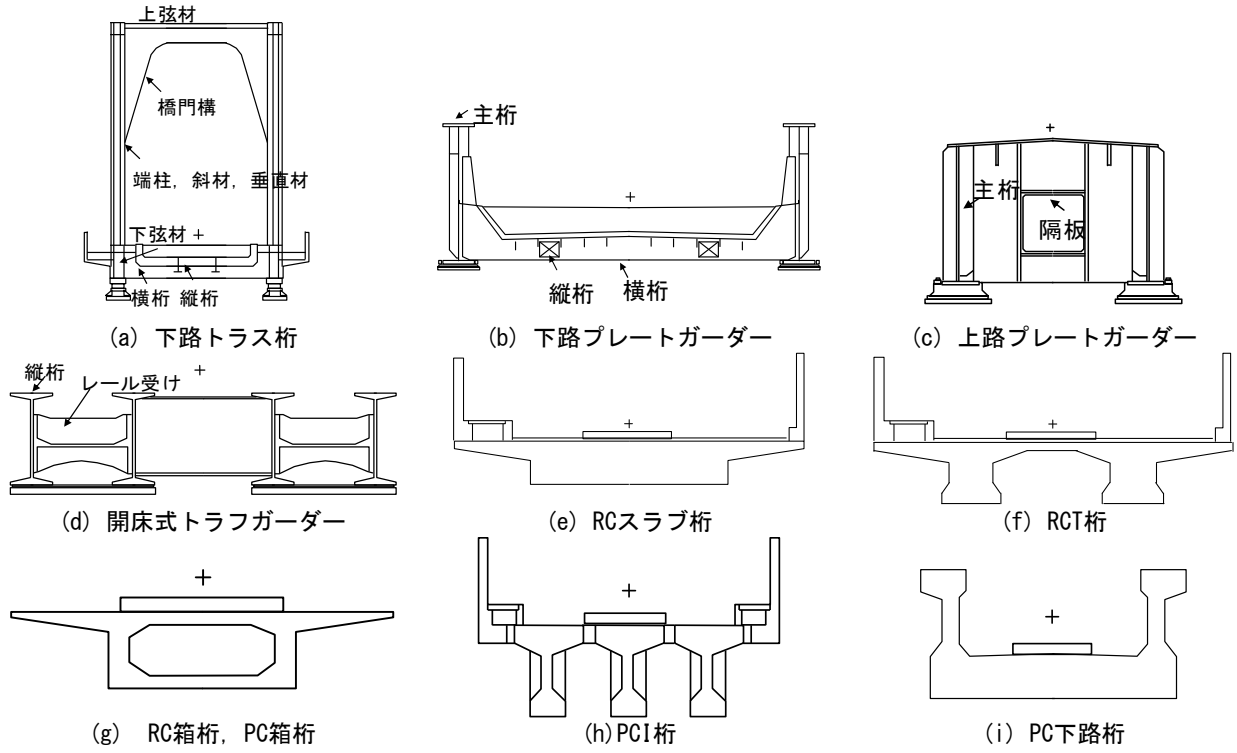


図-1 上部工反力の推定を行う桁種別

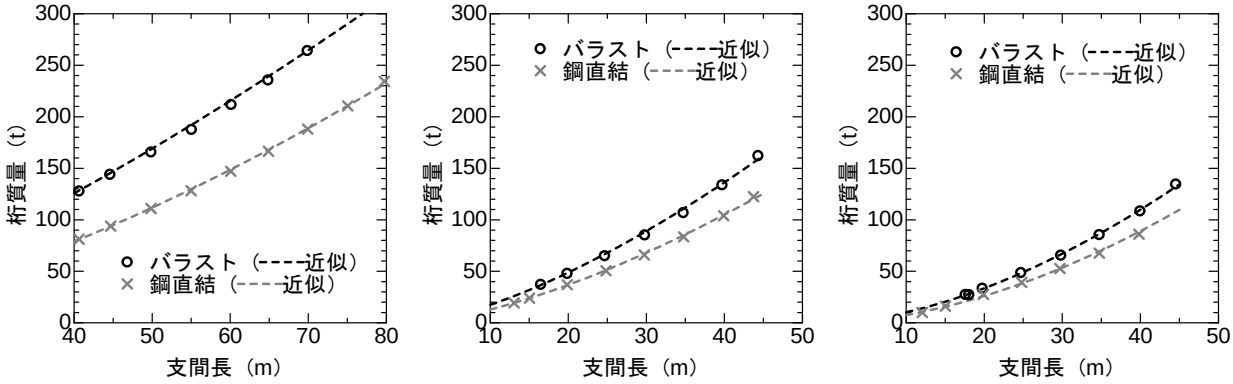


図-2 トラス，プレートガーダーの支間長と桁質量の関係

桁を対象とした．

上部工反力Mは桁長Lの関数として次式(1)で推定する．

$$M(L)= M_G(L)+ M_T(L)+ M_A(L) \quad (1)$$

ここで，M_G：桁重量，M_T：軌道重量，M_A：その他重量である．なお，上式は単線を想定したものであり，複線の場合は推定結果を2倍する．以降では式(1)を構成する各重量の簡易推定について述べる．

(2) 桁重量M_Gの簡易推定

桁重量の推定は桁種別に応じて次式(2)～(4)のいずれかにより行う．

$$M_{G1}(L) = m_g(L)\, g \quad (2)$$

$$M_{G2}(L) = \{\rho_c V_c(L)+ m_s(L)\}\, g \quad (3)$$

$$M_{G3}(L) = \{\rho_c V_c(L)+ m_s(L) + m_{PS}(L)\}\, g \quad (4)$$

ここで，M_{G1}：鋼桁およびRCスラブ桁の重量，M_{G2}：RCT桁，RC箱桁の重量，M_{G3}：PC桁の重量，m_g：鋼桁およびRCスラブ桁の質量，ρ_c：コンクリートの密度，V_c：コンクリートの体積，m_s：鉄筋質量，m_{PS}：PC鋼材質量，g：重力加速度である．

式(2)～(4)の右辺の中で，桁長Lの関数となっている変数について，文献3)，4)および設計事例に示されているデータを取得することで，桁種別ごとの近似曲線を算定する．

まず，鋼桁について，支間長（起点と終点の支承間の長さ）と桁質量の関係を**図-2**，**図-3**に示す．**図-2**にはトラス，プレートガーダーの関係，**図-3**には開床式トラフガーダーの関係を示している．いずれ

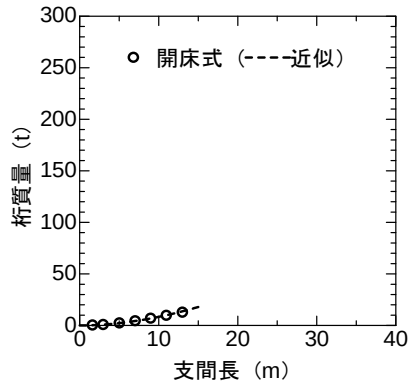
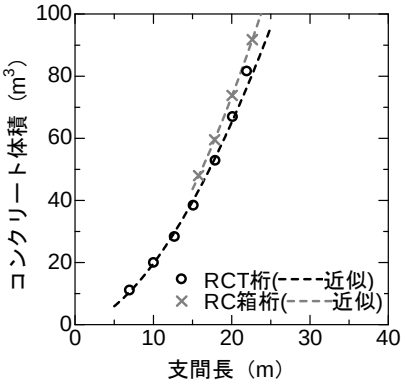
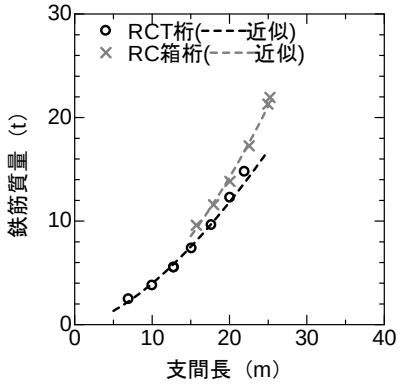


図-3　開床式トラフガーダーの支間長と桁質量の関係



(a) コンクリート体積との関係



(b) 鉄筋質量との関係

図-4　RCT桁，RC箱桁の支間長と各種諸元の関係

の桁種別でも支間長と桁質量の間に明瞭な正の相関があることがわかる．図中には各結果について累乗関数で近似した曲線を併記しており，各結果を良好に表現できている．なお，軌道形式がバラスト軌道の場合と鋼直結軌道の場合のデータがある．各図を見ると，バラスト軌道の方が鋼直結軌道よりも桁質量が大きい．これは(3)で後述するが，バラスト軌道の方が，軌道重量が大きく，同一支間長での桁断面も相対的に大きくなるためである．

続いて，RCT桁，RC箱桁について，支間長とコンクリート体積および鉄筋質量の関係を**図-4**に示す．本図よりコンクリート体積，鉄筋質量のいずれについても支間長と明瞭な正の相関が見られる．また，RCスラブ桁について，支間長と桁質量の関係を**図-5**に示す．こちらも支間長と桁質量に正の相関がある．さらに，**図-4**，**図-5**の各結果は累乗関数で評価した近似曲線によって良好に表現できている．

最後に，PC桁について，支間長とコンクリート体積，鉄筋質量，PC鋼材質量の関係を**図-6**に示す．本図よりコンクリート体積，鉄筋質量，PC鋼材質量のいずれについても桁長と明瞭な正の相関が見られる．また，一般的にPCI桁よりも断面が大きいPC下路桁の方が同じ支間長でもコンクリート体積，鉄筋質量，PC鋼線量が多いことがわかる．さらに，図中には各データを累乗関数で近似した曲線も併記しており，いずれも良好に近似できている．

以上を踏まえ，各桁における桁重量M_Gの推定式を整理した結果を**表-1**に示す．なお，表中において，ρ_c = 2.5 t/m^3，g = 9.8m/s^2，桁重量の単位はkNとしている．また，**表-1**の推定式は，**図-2**～**図-6**に示した支間長と各物理量の関係に基づいて構築されているが，上部工反力を算定するためには支承間の距離である支間長ではなく，桁長が必要となる．そこで，**表-1**の推定式は桁長L(m)の関数として整理している．

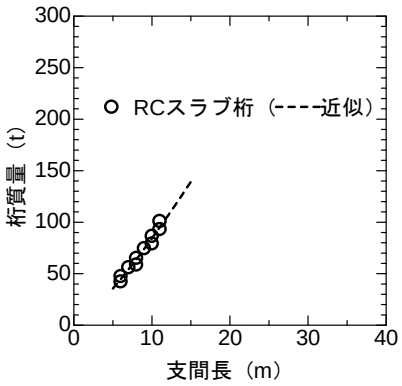


図-5　RC スラブ桁の支間長と桁質量の関係

(3) 軌道重量M_Tおよびその他重量M_Aの整理

軌道重量M_Tは，鉄道構造物の設計標準[5), 6)]に記載されている標準値を用いる．軌道形式ごとの単位長さあたりの軌道重量M_Tを**表-2**に示す．

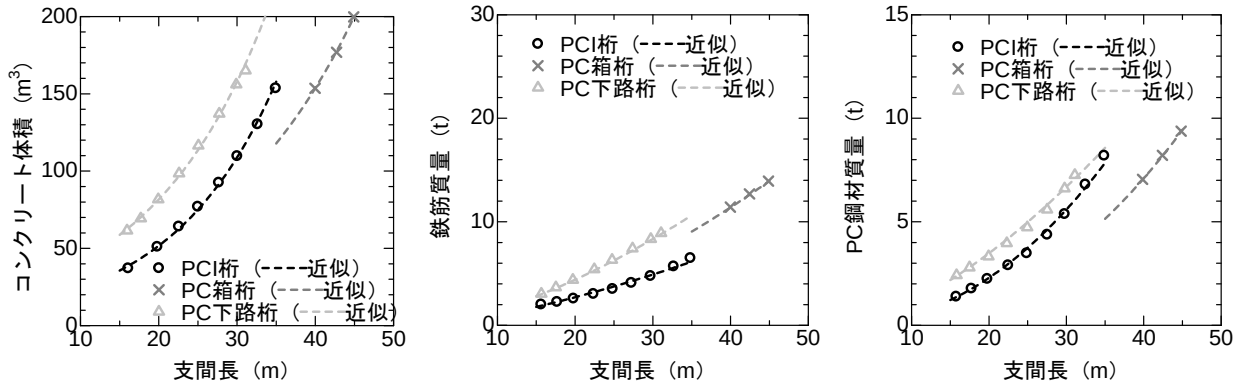
次に，その他重量M_Aとして以下の2つを考慮する．

- 道床砂利，砕石の重量M_{A1}（バラスト軌道のみ）
- 軌道下検査用通路や橋側歩道M_{A2}（鋼桁のみ）

道床砂利，砕石の重量M_{A1}については文献6)に記載の単位体積重量γ=17kN/m^{3}に断面積Aを乗じることで算定する．断面積Aについては，経験的に道床砂利，砕石の厚みを0.4m，幅を4.0mと設定し，次式(5)で算定することとする．

$$M_{A1} = \gamma A = 17 \times 0.4 \times 4.0 \times L \fallingdotseq 27L \qquad (5)$$

また，軌道下検査用通路や橋側歩道 M_{A2} については，文献 3)を参考にすると，軌道下検査用通路 1.5kN/m，橋側歩道 1.5kN/m と考えられるため，M_{A2}=3.0L（kN/m）で評価する．



(a) コンクリート体積の関係　　(b) 鉄筋質量の関係　　(c) PC鋼材質量との関係

図-6　PC桁の支間長と各種諸元の関係

表-1　桁重量M_Gの推定式

桁種別	軌道形式	推定式
下路トラス	鋼直結	$M_{G1} = 9.8\times0.25\,L^{1.56}$
	バラスト	$M_{G1} = 9.8\times0.93\,L^{1.33}$
下路プレートガーダー	鋼直結	$M_{G1} = 9.8\times0.40\,L^{1.51}$
	バラスト	$M_{G1} = 9.8\times0.58\,L^{1.48}$
上路プレートガーダー	鋼直結	$M_{G1} = 9.8\times0.12\,L^{1.77}$
	バラスト	$M_{G1} = 9.8\times0.20\,L^{1.71}$
開床式トラフガーダー	鋼直結	$M_{G1} = 9.8\times0.11\,L^{1.88}$
RC スラブ桁	コンクリート直結	$M_{G1} = 9.8\times10.23\,L^{1.23}$
RCT 桁	バラスト	$M_{G2} = 24.5\times0.36\,L^{1.72}+9.8\times0.10\,L^{1.57}$
RC 箱桁	バラスト	$M_{G2} = 24.5\times0.33\,L^{1.81}+9.8\times0.07\,L^{1.77}$
PCI 桁	バラスト	$M_{G3} = 24.5\times0.22\,L^{1.83}+9.8\times0.03\,L^{1.46}+9.8\times0.003\,L^{2.20}$
PC 箱桁	バラスト	$M_{G3} = 24.5\times0.04\,L^{2.25}+9.8\times0.02\,L^{1.72}+9.8\times0.001\,L^{2.42}$
PC 下路桁	バラスト	$M_{G3} = 24.5\times0.92\,L^{1.51}+9.8\times0.04\,L^{1.57}+9.8\times0.027\,L^{1.61}$

3. 簡易推定式の妥当性検証

前章で構築した上部工反力の簡易推定式の妥当性を検証するために，詳細な荷重計算が行われている事例について，簡易推定式での評価結果と詳細な計算結果とを比較する．

比較を行うケースを**表-3**，**図-7**に示す．文献7)～12)に示されている桁種別や軌道形式，線路本数が異なる6ケースを対象に検討する．なお，いずれのケースも軌道重量は在来線として算定する．また，文献12)は桁断面の情報が記載されていないため，**図-7**にはCase1～5の断面を示している．

詳細な荷重計算の例として，Case4の単位長さ当たりの重量の内訳[10]を**図-8**に示す．本図より，桁重量としては桁本体（図中の主梁，片持スラブ）の他に地覆，高欄，ダクトなどの重量も含まれることがわかる．このような詳細な荷重計算が各事例で実施されている．

簡易推定式を用いた上部工反力および文献7)～12)に示される詳細な荷重計算に基づく上部工反力の比較を**図-9**，**表-4**に示す．図中には，相対誤差±10%の線も併記している．本図を見ると，桁種別や軌道形式，線路本数が異なる各ケースについて，簡易推定式によって推定された上部工反力が詳細な計算結果に対して相対誤差±10%程度の範囲に位置してい

表-2　軌道重量 M_Tの標準値

軌道形式	在来線(kN/m)	新幹線(kN/m)
バラスト軌道	4.5L	7.5L
スラブ軌道	15.0L	18.0L
コンクリート直結式	5.0L	6.5L
鋼直結式	2.0L	2.0L

表-3　検討ケース

Case	桁種別	軌道形式	線路本数
1[7]	下路トラス桁	鋼直結	単線
2[8]	下路プレートガーダー	バラスト	単線
3[9]	上路プレートガーダー	鋼直結	単線
4[10]	RC スラブ桁	スラブ	単線
5[11]	RCT 桁	スラブ	単線
6[12]	PCI 桁	スラブ	複線

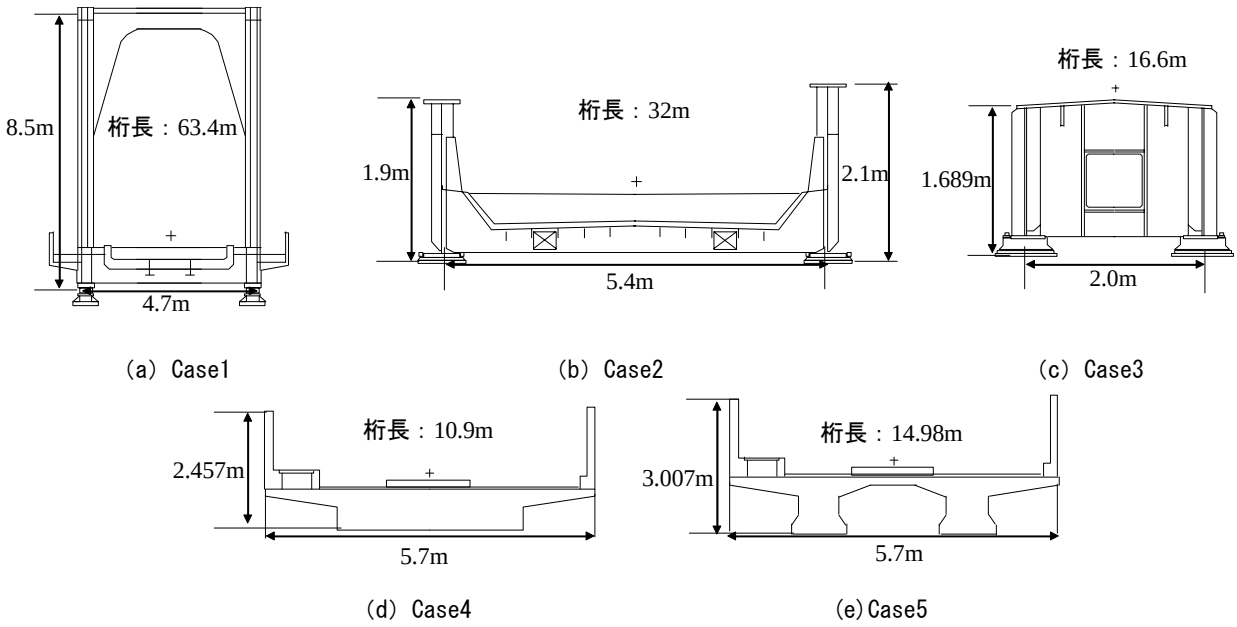


図-7　検討ケースの桁断面

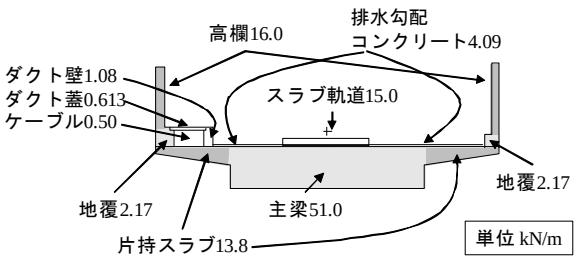


図-8　詳細な重量計算の例（Case4：RC スラブ桁）

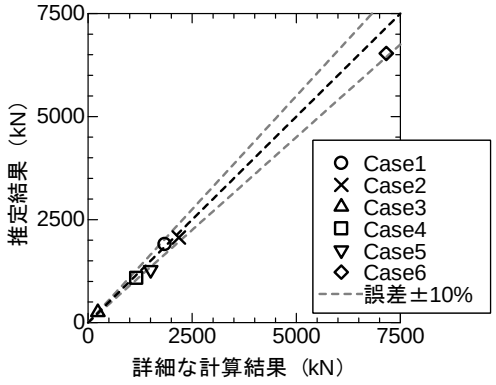


図-9　簡易推定式の妥当性検証結果

る．

以上より，限られたケースでの検証ではあるものの，提案する手法によって上部工反力を概ね推定可能であることがわかった．

4. おわりに

本稿では，橋りょう・高架橋の地震時挙動への感度が大きい上部工反力を簡易に評価するための推定式を提案した．具体的には，既往の文献等から桁種別に応じた単位長さあたりの桁重量，軌道形式に応じた軌道重量等を整理することで，多様な桁種別，軌道形式に応じた上部工反力の推定を行った．

本稿で得られた結果を以下に示す．

・　鉄道橋りょう・高架橋で一般的に用いられる桁種別である鋼桁，RC桁，PC桁について，桁長のみを変数とした上部工反力の推定式を構築した．

表-4　簡易推定式の妥当性検証結果一覧

Case	詳細な計算結果（kN）	推定結果（kN）	詳細な計算結果に対する相対誤差（%）
1	1840	1903	3.47
2	2178	2064	-5.23
3	235	253	7.49
4	1160	1083	-6.62
5	1503	1280	-14.86
6	7162	6531	-8.81

・　上部工反力が詳細に計算されている事例を対象に，簡易推定式による評価結果と詳細な計算結果を比較した．その結果，提案する手法によって，相対誤差±10%程度の範囲で上部工反力を推定できることを確認した．

本手法と文献2)の技術等を組み合わせることで，

鉄道路線全体の地震被害シミュレーションに必要な多数の橋りょう・高架橋群のモデルをより効率的に構築可能となる．

参考文献

1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計，丸善出版，2012.
2) 小野寺周，和田一範，坂井公俊，室野剛隆：インベントリー法による橋りょう・高架橋の被害推定法，鉄道総研報告，Vol.33，No.12，pp.29-34，2019.
3) 橋梁研究会：鋼橋設計資料（第五版），技報堂出版，1986.
4) コンクリート構造設計研究会：コンクリート構造設計資料，技報堂出版，1976.
5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　コンクリート構造物，丸善，2004.
6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　鋼・合成構造物，丸善，2009.
7) 鉄道総合技術研究所：限界状態設計法による設計計算例　下路トラス，研友社，1993.
8) 鉄道総合技術研究所：限界状態設計法による設計計算例　下路プレートガーダー　道床式，研友社，1997.
9) 鉄道総合技術研究所：限界状態設計法による設計計算例　上路プレートガーダー　鋼直結式，研友社，1997.
10) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　コンクリート構造物　照査例　鉄筋コンクリート　単純スラブ桁，研友社，2007.
11) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　コンクリート構造物　照査例　鉄筋コンクリート　単純T形桁，研友社，2004.
12) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計　設計計算例　鉄筋コンクリート橋脚（杭基礎），研友社，2001.