

列車の使用時繰り返し載荷を想定した RC および PRC 梁部材の振動特性評価

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○徳永宗正 渡辺勉 池田学 曾我部正道

1. 目的 高速鉄道における列車運行速度の向上、PRC、SRC 桁等の低剛性桁の普及、さらには測定技術の向上等により、列車通過時の共振現象¹⁾が確認されている。コンクリート部材のひび割れの進展に伴う剛性低下が要因と考えられる顕著な共振が発生している例²⁾も報告されており、部材の動的応答評価における衝撃係数の一層の精緻化³⁾が求められている。コンクリート部材の動的応答は部材の固有振動数、即ち部材剛性に大きく依存するが、使用時には設計で一般的に想定する全断面剛性ではなく、設計耐用期間中に発生が想定される荷重の大きさ、繰り返し回数を経験後の剛性を考慮する必要がある。RC 部材に対しては使用状態を想定した剛性評価の検討⁴⁾が実施されているが、特に PRC 部材の履歴特性は建築分野において地震時を想定した検討⁵⁾が一部なされている程度で、使用状態を想定した振動特性は過去に検討されていない。本稿では、RC および PRC 梁部材の使用時の振動特性評価を目的として、疲労試験に基づき 200 万回程度の繰り返し載荷による梁の剛性および減衰の変動を評価した。

2. 実験手法 図-1 に、供試体概要を示す。本稿では RC 部材に加えて近年鉄道分野で多く採用されている PRC 部材を対象とし、鉄筋比や導入プレストレス量は一般的な鉄道橋の諸元を想定した。

図-2 に示すように、静的繰り返し載荷では部材の基本的な履歴特性を評価することを目的として、引張鉄筋の降伏までは荷重制御で 20kN の増分、降伏以降は変位制御として 2mm の増分で荷重レベルを増加させた。各荷重レベルにおける繰り返し回数は 3 回とした。除荷時には 5kN 程度の載荷荷重を維持した。動的載荷試験では加振周波数は 5Hz を基本として、死荷重程度の鉄筋応力(100MPa 程度)を想定した 50kN を下限荷重として、上限荷重を 70, 120, 170kN と増大させた。各荷重レベルにおける繰り返し回数は 200 万回とした。

3. 実験結果 図-3 に、静的載荷から得られる荷重-変位関係を示す。図から、ひび割れが発生し骨格曲線上で剛性が低下する領域(図中 δ_c 以降)において、除荷時および再載荷時の剛性(有効剛性 K_{eq})も低下することが分かる。RC 部材は PRC 部材と比較して荷重の増加と共に除荷時の残留変位が大きくなることが分かる。PRC 部材の履歴特性は RC 部材と比較して除荷時に原点付近を指向する傾向にあり、残留変位が小さくなる一方、有効剛性は低下する傾向となる。即ち、ひび割れ幅を低減することを目的として導入されるプレストレスは、梁全体系の剛性を低下させる効果を与えることとなることが分かる。

図-4、5 に載荷試験より得られた RC 部材および PRC 部材の有効剛性および等価減衰をそれぞれ示す。横軸の変位は、各載荷ステップにおける過去に経験する最大変位である。有効剛性は繰り返し載荷時の荷重-変位関係上のループの最大荷重点と最小荷重点を結ぶ活線剛性とした。等価減衰比は同ループの面積から算出される履歴減衰を等価粘性減衰として算出した。

静的載荷による試験結果から、 δ_c 以降では荷重レベルの増加とともに有効剛性が低下することが確認できる。RC 部材の有効剛性 K_{eq} は RC 部材の静的繰り返し載荷試験による再載荷時剛性 $K_{s,RC}$ ⁴⁾と整合的な結果である。PRC 部材

静的載荷による試験結果から、 δ_c 以降では荷重レベルの増加とともに有効剛性が低下することが確認できる。RC 部材の有効剛性 K_{eq} は RC 部材の静的繰り返し載荷試験による再載荷時剛性 $K_{s,RC}$ ⁴⁾と整合的な結果である。PRC 部材

キーワード：鉄道高架橋、共振、疲労試験、RC 部材、PRC 部材、使用時、有効剛性、等価減衰

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 構造力学研究室 TEL:042-573-7290

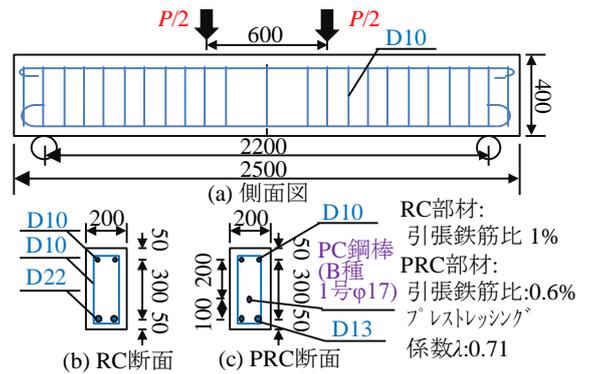
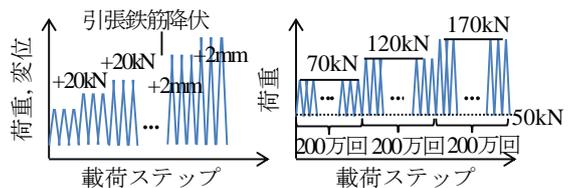


図-1 供試体の概要 (単位:mm)



(a) 静的繰り返し載荷 (b) 動的繰り返し載荷

図-2 載荷方法の概要

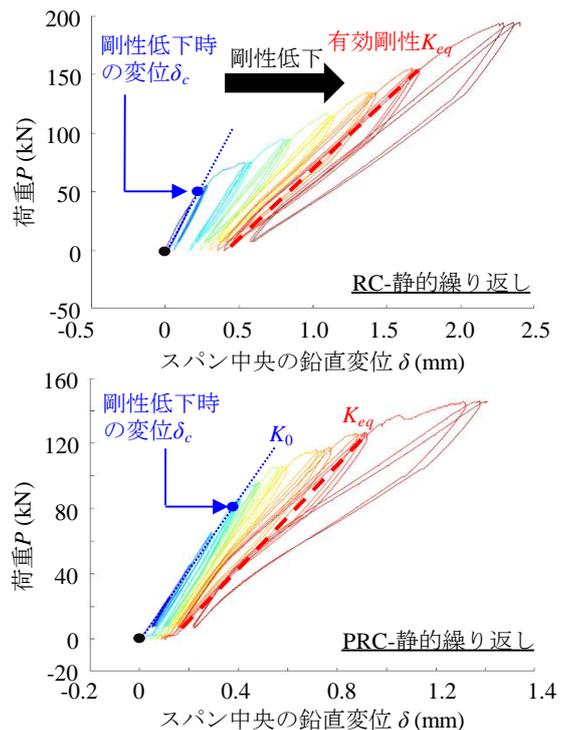


図-3 荷重-変位関係 (静的載荷)

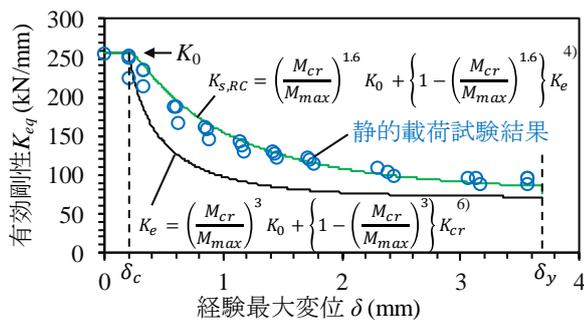


図-4 有効剛性および等価減衰 (RC部材)

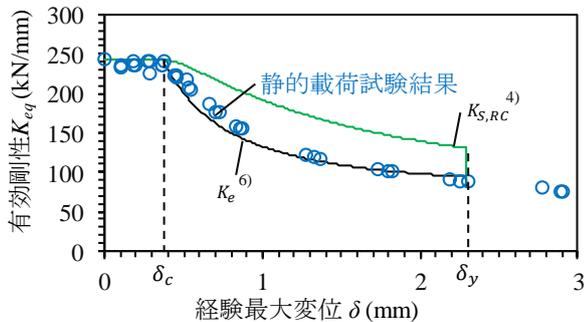
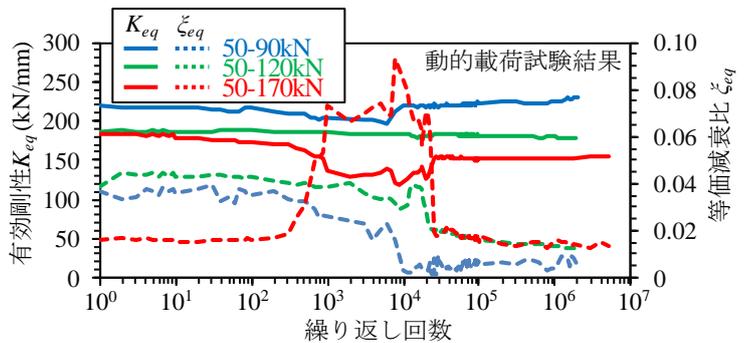
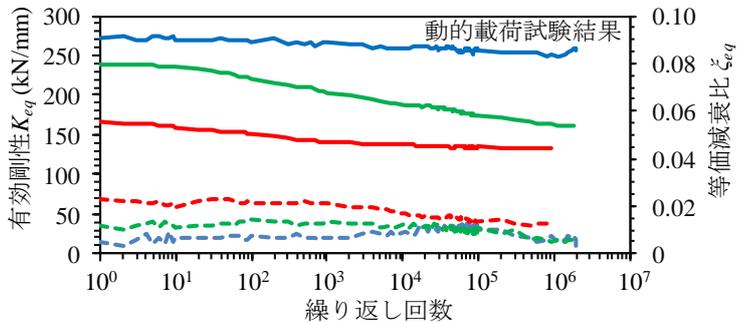


図-5 有効剛性および等価減衰 (PRC部材)



においてはブランソンの3乗則により得られる剛性 $K_e^{(6)}$ と整合的な結果であり、 $K_{s,RC}$ では過大評価となることが分かる。

動的載荷による疲労試験から、RC部材の場合、200万回の繰返し載荷により K_{eq} は、50-90kN時は220kN/mmから11%程度、50-120kN時には189kN/mmから6%程度、50-170kN時には184kN/mmから16%程度低下している。 ζ_{eq} は、載荷荷重の増加と共に増加、繰返し載荷回数の増加と共に低下する傾向にあり、50-90kN時には4.0%から0.5%程度に低下、50-120kN時には167kN/mmから4.5%から1.2%程度に低下、50-170kN時には1.5%程度で変化は小さい。50-170kN時の500回から2万回程度の繰返し回数では、 K_{eq} が25%程度急激に低下し、 ζ_{eq} が1.5%から9%程度まで急激に増加している。この領域では同時にひび割れ幅や残留変位も増大していることから、ひび割れ箇所においてコンクリート中の骨材相互の噛み合わせが悪化した可能性があり、以降の繰返し載荷により噛み合わせが改善され、 K_{eq} 、 ζ_{eq} は繰返し載荷回数500回以前の値に落ち着いたものと考えられる。PRC部材の場合、 K_{eq} は50-90kN時には275kN/mmから10%程度、50-120kN時には240kN/mmから33%程度、50-170kN時には167kN/mmから20%程度低下しており、RC部材と比較して低下幅が大きい。 ζ_{eq} は載荷荷重の増加と共に増加、繰返し載荷回数の増加と共に低下する傾向にあり、50-90kN時には0.5%から1.5%の範囲、50-120kN時には1.5%から0.5%に低下、50-170kN時には2.3%から1.2%に低下している。RC部材、PRC部材共に程度の差はあるものの繰返し載荷により剛性および減衰が低下する傾向にあることから、特にPRC部材に対しては列車通過に伴う繰返し載荷により動的応答は増大する方向に推移するものと予想される。

4. まとめ 本稿では、疲労試験に基づきRCおよびPRC梁部材の使用時の振動特性を評価し、以下の結論を得た。

- ・静的載荷試験により、荷重の増加と共に低下するRC部材の有効剛性は既往の評価式⁴⁾と整合である一方、PRC部材の有効剛性は既往の評価式⁴⁾の場合過大評価となり、ブランソンの3乗則と整合的である。
- ・疲労試験から、荷重の大きさに応じて、有効剛性はRC部材の場合は6~16%程度、PRC部材の場合は10~33%低下し、等価減衰はRC部材の場合は4.0%から0.5%程度、PRC部材の場合は1.5%から0.5%に低下する。即ち、列車通過に伴う繰返し載荷は、特にPRC部材に対して影響度が大きく動的応答を増大させる方向に寄与する。

今後は非線形有限要素解析を併用し、鉄筋/コンクリート間の付着の劣化と全体系の関係に着目した検討の深度化を図る。

参考文献 1) 伊藤雄郷, 大野雄史, 吉田幸司, 西山誠治, 田辺篤史: 複鉄筋版桁鉄道橋の健全度評価のための簡易指標の提案, 構造工学論文集 A.63, pp.876-887, 2017. 2) 千頭啓司, 杉田清隆, 築嶋大輔: 新幹線 PRC 桁の共振動現象に関する調査分析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.40, No.2, pp.443-438, 2018. 3) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計に関する研究, 土木学会論文集, No.724/I-62, pp.83-102, 2003. 4) 涌井一, 渡辺忠朋, 松本信之: たわみ量の算定に用いるコンクリート桁の曲げ剛性評価法, 鉄道総研報告, Vol.5, No.11, 1991. 5) 杉本訓祥, 伊藤央, 塩原等, 小谷俊介: プレストレスト鉄筋コンクリート造部材の履歴復元力特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1143-1148, 1997. 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・解説 (コンクリート構造物), 丸善, 2004.