エネルギー吸収を考慮した後付け部材の性能検証方法に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 4～令 6
担当チーム：橋梁構造研究グループ
研究担当者：大住道生、廣江亜紀子、
藤澤志織

【要旨】
エネルギー吸収できる後付け部材及び取付部の性能評価方法と品質管理水準の提案を目的に、後付け部材及び取付部の不確実性や設計条件が橋梁の応答に与える影響を解析的に検討した。その結果、本検討条件においては、後付け部材のモデル化方法や施工誤差が橋梁全体系に与える影響が大きいが、衝撃力の影響は限定的であることが得られた。
キーワード：エネルギー吸収できる後付け部材、ダンパー、耐震設計、衝撃力、遊間

1. はじめに

国土強靱化基本法に基づき橋梁の耐震補強が実施されている中、エネルギー吸収できる後付け部材(以下、「後付け部材」と呼称）を設置しなければ所要の耐震性能を確保できない事例が多い。そのような状況で、熊本地震において後付け部材の取付部が損傷したり，正常に働かなかった可能性のある事例が見受けられた。

後付け部材とその取付部についての性能評価方法や品質管理水準は確立されておらず、これらの新技術を橋梁に適用していくためには，後付け部材やその取付部の性能評価方法や品質管理水準のルール化が必要である。

以上を踏まえ、本研究では後付け部材及び取付部の性能評価方法と品質管理水準の提案を目的に、後付け部材及び取付部の不確実性や設計条件が橋梁の応答に与える影響を解析的に検討した。

2. 着目した不確実性及び設計条件

2.1 後付け部材のモデル化方法による不確実性

後付け部材は、部材が非線形化することでエネルギー吸収を図るものである。この部材の非線形特性のモデル化は F-V 関係（荷重－速度関係）でモデル化する方法と、P-δ 関係（荷重－変位関係）でモデル化する方法があり、この 2 つのモデル化方法の違いが橋の応答に影響を与える可能性がある。

2.2 取付部のモデル化方法による不確実性

設計時の解析モデルにおける取付部材は一般に剛体としてモデル化される。一方で実構造物の取付部材はある設計荷重に対して設計された弾性部材であり弾性変形が生じる。この取付部材の剛性差により橋梁の応答に影響が生じる可能性がある。

2.3 施工誤差による遊間の不確実性

設計時の解析モデルにおける後付け部材や取付部は、遊間は考慮されない。一方で実構造物は、施工誤差によるがたつきや可動部に微小な遊間がある。この遊間の有無により橋梁の応答に影響が生じる可能性がある。

2.4 衝撃力の影響

後付け部材が応答する際、衝撃力が生じ設計で想定しない大きな荷重が生じる可能性がある。この衝撃力の影響により橋梁の応答に影響が生じる可能性がある。

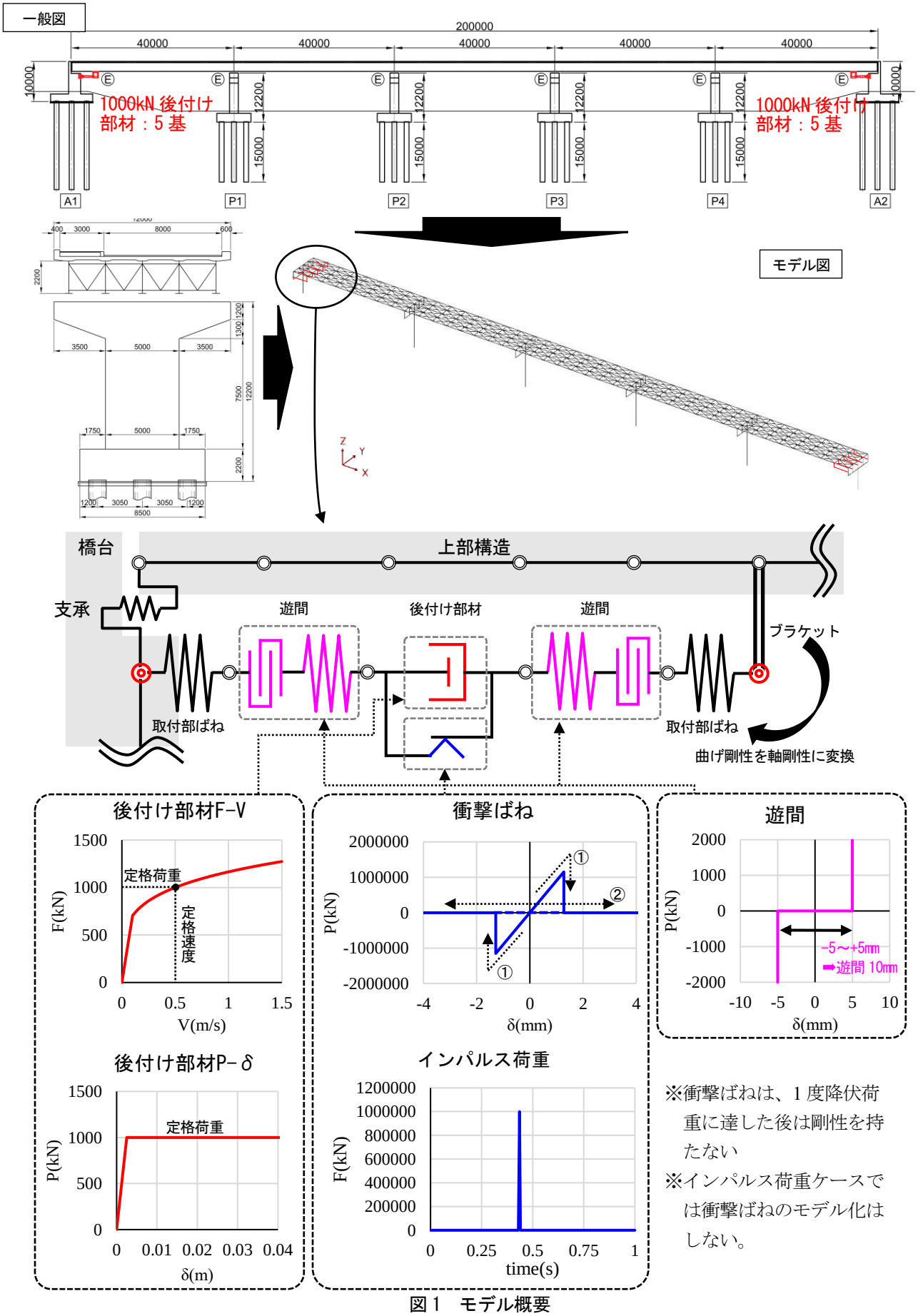
3. 動的解析の実施

3.1 解析モデル作成

検討の対象橋梁は、道路橋の耐震設計に関する資料[1)]に記載される鋼 5 径間連続版桁橋とした。橋梁諸元は同資料から変更せず、両橋台部に後付け部材を設置し、耐震性能を満足させた。解析モデルの概要と後付け部材の諸元を**図 1** に示す。入力地震動は道示[2)]のレベル 2 地震動タイプ 2 のⅡ種地盤の 3 波とした。

解析ケースは以下の通りとした。

- 後付け部材の骨格曲線は、F-V 関係とした場合と、P-δ 関係とした場合の 2 ケース。
- 取付部材を剛体とした場合と、F-V 関係の 0.5m/s（定格速度）で求められる荷重（定格荷重）の 2 倍の荷重で設計した弾性体の場合の 2 ケース。
- 遊間を 0mm とした場合と、片橋台あたり 20mm とした場合の 2 ケース。



※衝撃ばねは、1 度降伏荷重に達した後は剛性を持たない

※インパルス荷重ケースでは衝撃ばねのモデル化はしない。

図 1　モデル概要

● 衝撃力の影響は、衝撃力なしのケースと、衝撃力を衝撃ばねでモデル化し衝撃なしに比べ 1.3 倍の衝撃力が A1 側 G3 桁のみに作用する場合と、衝撃力をインパルス荷重でモデル化し衝撃なしに比べ 1.3 倍の衝撃力が A1 側 G3 桁のみに作用する場合の 3 ケース。なお、衝撃力はすべての後付け部材で生じる可能性はあるが、施工誤差等によりすべての後付け部材で同時に作用すること可能性は低いため、ひとつの後付け部材のみに生じると想定した。一方で実際に生じうる衝撃力の大きさは明らかでないため、笠井ら[3]の研究により得られた粘弾性体の後付け部材に生じる衝撃力 1.3 を参考に、本検討でも衝撃力がレベル 2 地震動タイプ 2 のⅡ種地盤の 3 波目で 1.3 倍程度となるようモデル化した。

これらの解析ケースを**表 1** に整理した。

3.2 解析結果

取付部を含む後付け部材の応答値（**図 1** の赤丸間）を**図 2**、P1 橋脚の応答値を**図 3** に示す。グラフの縦軸は、各応答値を基準ケースであるケース 1 の応答値で割った比率である。

後付け部材の骨格曲線の違いによる応答値の差について、ケース 1（F-V）とケース 2（P-δ）を比較する。P-δ関係では後付け部材の荷重は減少する。これは P-δ関係では速度に関係なく定格荷重が作用するため、定格速度以上では F-V 関係よりも後付け部材に作用する荷重（抵抗力）が小さいことが原因と考えられる。

取付部の部材剛性の違いによる応答値の差について、ケース 1（剛体）とケース 3（弾性体）を比較する。応答値はすべての指標で変わらない。これより、本検討条件において、取付部を定格荷重の 2 倍で設計した場合には、十分な剛性があり応答値に与える影響は小さいと考えられる。

遊間の有無による応答値の差について、ケース 1（遊間なし）とケース 4（遊間あり）を比較する。後付け部材の応答に着目すると、変位が大幅に増加する。遊間があることにより後付け部材が上部構造の応答を抑えることができず変位が増加したと考えられる。また、荷重は若干増加する。これは、遊間が詰まると急激に後付け部材の速度が生じるため瞬間的に荷重が増加したと考えられる。橋脚変位に着目すると、変位は増加している。これは、遊間により橋台部で上部構造の応答を抑えることができず、橋脚が受け持つ分担重量が増加したために橋脚変位が増加したと考えられる。吸収エネルギーに着目すると、後付け部材と橋脚の両方で増加している。各部材のエネルギー吸収の時刻歴を

表 1　ケース一覧

ケース	骨格曲線	取付部	遊間	衝撃	備考
1	F-V	剛体	なし	なし	基本ケース
2	**P-δ**	剛体	なし	なし	
3	F-V	**弾性体**	なし	なし	
4	F-V	剛体	**あり**	なし	
5	F-V	剛体	なし	**衝撃ばね**	A1橋台G3桁のみに衝撃ばねモデル化
6	F-V	剛体	なし	**インパルス荷重**	A1橋台G3桁のみにインパルス荷重を作用

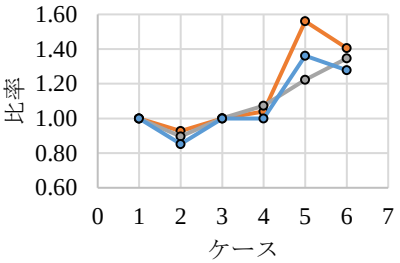


図 2-(a)　最大応答荷重

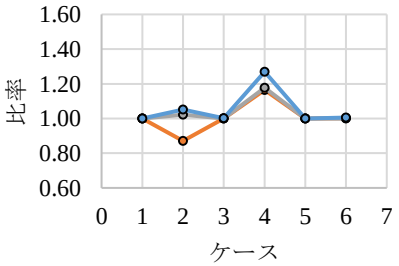


図 2-(b)　最大応答変位

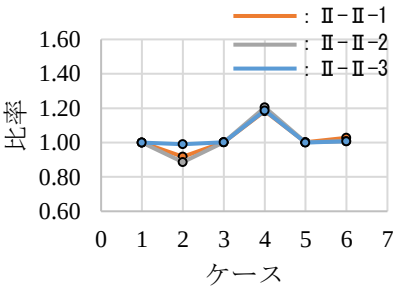


図 2-(c)　累積吸収エネルギー

図 2　後付け部材の応答値

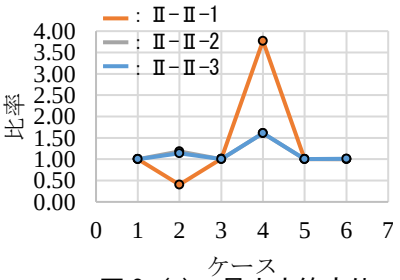


図 3-(a)　最大応答変位

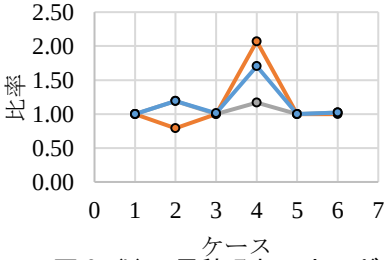


図 3-(b)　累積吸収エネルギー

図 3　P1 橋脚の応答値

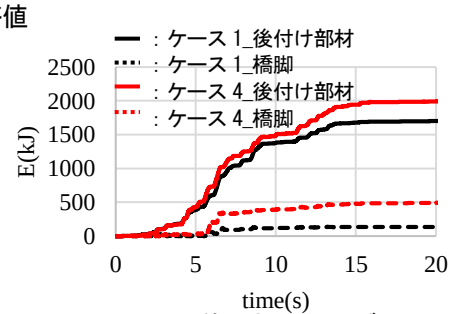


図 4　累積吸収エネルギー（Ⅱ-Ⅱ-1）

図 4、後付け部材の応答速度を図 5、後付け部材の応答変位を図 6 に示す。吸収エネルギーは 0~15s 間にケース 4 の方が大きくなり、応答速度も 0~15s 間でケース 4 の方が大きくなることから、エネルギー$E = 0.5mv^2$よりケース 4 の方が吸収エネルギーは増加したと考えられる。ここから、ケース 1 では速度が小さい段階でエネルギー吸収を発揮し応答を抑えることができたが、ケース 4 では遊間により速度が大きくなってからエネルギー吸収が発揮されるため、応答を抑えるために必要なエネルギーが増加したと考えられる。また、橋脚も同様に後付け部材が上部構造の応答を抑えることができず吸収エネルギーが増加したと考えられる。

衝撃力の有無による応答値の差について、ケース 1（衝撃力なし）、ケース 5（衝撃ばね）、ケース 6（インパルス荷重）を比較する。ケース 5、6 ともに後付け部材の荷重はレベル 2 地震動タイプ 2 のⅡ種地盤の 3 波目で概ね 1.3 であり衝撃力を想定通りにモデル化できている。一方で後付け部材の変位、吸収エネルギー、並びに橋脚の変位、吸収エネルギーは変わらない。これは、図 7 に示す通り、衝撃力が 0.95s 付近で作用するが、ケース 5 は 1.00s 付近、ケース 6 は 2.00s 付近で衝撃の影響は収束し、それ以降はケース 1 と応答が一致することが理由として考えられる。これより、本検討条件においては、衝撃力が橋梁全体系に与える影響は小さいと考えられる。一方で後付け部材の荷重が増加するため橋台への影響が懸念される。橋台は弾性体としてモデル化しているため、目安として橋台竪壁基部に生じる最大曲げモーメントからエネルギー一定測より橋台の応答曲率および応答塑性率を算出した（図 8）。その結果、応答塑性率は 4.5 程度であり、終局および限界状態 2 に対して十分余裕があった。

4. まとめ

本研究では後付け部材及び取付部の性能評価方法と品質管理水準の提案を目的に、後付け部材及び取付部の不確実性や設計条件が橋梁の応答に与える影響を解析的に検討した。その結果を以下に示す。

- 骨格曲線を P-δ 関係でモデル化すると、F-V 関係でモデル化した場合よりも後付け部材に作用する荷重を過小評価する可能性があることがわかった。
- 取付部材は定格荷重の 2 倍で設計すれば十分な剛性が確保でき応答に与える影響は小さかった。
- 意図しない遊間があると上部構造の応答を抑えることができず橋梁全体で応答が増加する可能性があるため、少なくとも意図しない遊間は生じないような設計・施工上の配慮が必要である。
- 本検討条件においては衝撃力が橋梁全体系に与える影響は小さかった。

ただし、これらはあくまで本検討条件での結果であるため、得られた知見の一般化には更なる検討が必要である。

参考文献

1) 道路橋の耐震設計に関する資料、日本道路協会、1997 年 3 月
2) 道路橋示方書・同解説、日本道路協会、2017 年 11 月.
3) 笠井和彦、所健：粘性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則（その 2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化）、日本建築学会構造論文集、第 561 号、pp.55-63、2002

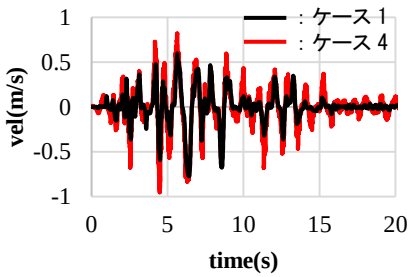


図 5　応答速度（Ⅱ－Ⅱ-1）

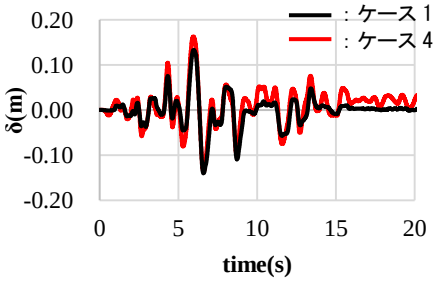


図 6　応答変位（Ⅱ－Ⅱ-1）

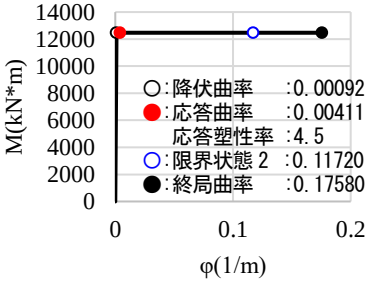


図 8　橋台応答曲率（Ⅱ－Ⅱ-1）

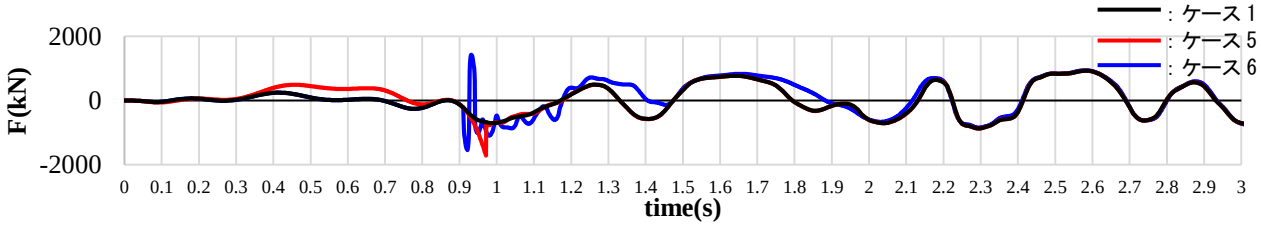


図 7　後付け部材の荷重（Ⅱ－Ⅱ-1、衝撃力の有無）

Study on performance verification method of retrofitted members considering energy absorption

Research Period: FY2022-2024
Research Team: Bridge and Structural Engineering Research Group
Author: OHSUMI Michio, HIROE Akiko, FUJISAWA Shiori

Abstract: The effects of uncertainties and design conditions of retrofit members and attachments on the response of bridges were analytically investigated in order to propose a performance evaluation method and quality control level for energy-absorbing retrofit members and attachments. As a result, under the conditions of this study, it was obtained that the modeling method and construction errors of the retrofit members have a significant influence on the overall bridge system but the impact force has a limited influence.

Keywords: Energy-absorbing retrofit members, Dampers, Seismic design, Impact forces, Gaps