

平成 23 年 6 月 20 日現在

機関番号：82658

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760303

研究課題名(和文) 動的ハイブリッド実験による支承部の進行性破壊過程の解明

研究課題名(英文) Evaluation of bearing's failure process through real-time hybrid experiment

研究代表者

豊岡 亮洋 (TOYOOKA AKIHIRO)

公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造 副主任研究員

研究者番号：80425917

研究成果の概要(和文)：本研究では、橋梁を想定した構造物モデルの応答解析と支承部の載荷試験を結合し、支承部と橋梁との動的相互作用を再現する動的ハイブリッド実験システムを構築するとともに、分散支承を有する橋梁を想定した2自由度系動的ハイブリッド実験を行った。その結果、構築した実験システムにより、桁と橋脚の動的相互作用下における支承の動的特性を直接実験により把握しモデル化を行うことが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this research, a real-time substructure hybrid experiment system was developed. This system enables the dynamic loading test of the bearing, considering the dynamic interaction between girder and pier. A 2DOF hybrid tests assuming the pier, bearing and girder were carried out using the developed loading system, in order to comprehend the behavior of the rubber bearing under earthquake excitation. It was confirmed that the dynamic characters of the bearing was experimentally obtained, considering dynamic interaction between structure and bearing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 20 年度	1,100,000	0	1,100,000
平成 21 年度	1,300,000	0	1,300,000
平成 22 年度	800,000	0	800,000
総計	3,200,000	0	3,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：振動台、動的ハイブリッド実験、支承部

1. 研究開始当初の背景

橋梁の支承部は、橋梁の桁と橋脚を接続する重要部材であり、地震時においては桁と橋脚との応答がこの支承部の非線形挙動を介して相互に連成する、いわゆる動的相互作用が生じる。橋梁の大規模地震時の応答や損傷を正確に把握するためには、桁や橋脚、基礎などに加え、支承部についてもその動特性を

考慮する必要がある。特に、近年では支承部にエネルギー吸収性能を持たせて地震応答の低減を図る免震支承や制震構造などが鉄道橋に適用される事例もあるが、これらの装置は地震時に変位や速度の影響を受けて複雑な挙動を示す。そこで、こうした装置の導入にあたっては地震時動特性を事前に実験等により詳細に確認し、装置の非線形挙動を

表現可能な数値モデルを構築して応答解析および設計を行う必要がある。

しかし、この数値モデルを構築する際に実施する試験は、あらかじめ振幅や振動数などを設定して実施することが多く、これらの条件は必ずしも実際の構造物において装置が受ける応答とは一致しないという問題がある。数値モデルが想定する荷重条件と、実際の荷重条件の違いが解析結果に及ぼす影響は、装置の非線形特性が複雑なほど大きくなり、応答解析の結果が実際の地震時の挙動を十分表現できない可能性もある。そこで、こうした構造物と支承部の連成を考慮した荷重試験を実施し、支承部の地震時挙動を明らかにすることが求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、地震時に構造物と試験対象である支承部との間に生じる動的相互作用を再現する動的ハイブリッド実験と称する実験システムを構築し、実際に支承部が構造物に組み込まれた状態における地震時挙動を、モデル化を経ることなく直接実験により把握することを目的とする。

通常、支承やダンパーなどの装置を構造系に適用する際には、まず図 1(a)のような対象構造物全体を図 1(b)のようにモデル化し、装置単体について図 1(c)のように正弦波や地震波を用いた荷重試験により荷重-変位関係などの基本特性を把握する。この結果を数値モデル化して図 1(b)の構造物の応答解析を実施し、効果を検証することが一般的である。しかし、この装置の数値モデルを構築する際に用いる入力波は、あらかじめ振幅や振動数などを設定して作成するため、実際の地震時に構造物と装置との間に相互作用が生じる状態での装置の応答とは必ずしも一致しないという問題がある。

これに対して、ハイブリッド実験は図 2(b)のように、挙動を把握したい構造の全体系を、計算により評価する部分（以下、計算部）および実験により非線形性を直接計測する部分（以下、実験部）に分離し、両者の間に生じる相互作用力をやり取りすることで構造全体系の挙動を算定する手法である。例えば、橋梁を対象とすると、構造全体系を桁・支承部により構成される実験部と、橋脚・地盤系よりなる計算部に分離した上で、計算部に地震動を作用させたときの橋脚天端の応答を計算し、これをもとに実験部の加振を行い、実験で得られた応答をさらに計算にフィードバックする。実際の構造物においては、支承部を介して桁と橋脚との間に相互作用力のやりとりが生じるが、ハイブリッド実験手法はこの相互作用力のやりとりを計算部と実験部の間で行うものである。

この手法によれば、実際に装置が構造物に

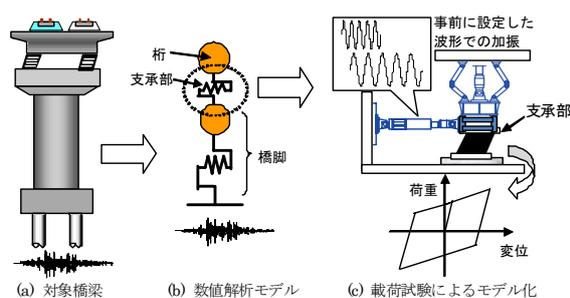


図 1 一般的な荷重試験の概念図

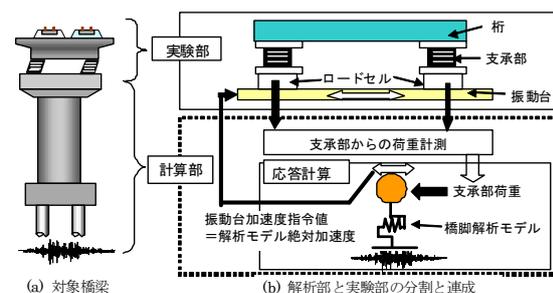


図 2 ハイブリッド実験の概念図

組み込まれた状態を再現して荷重実験を行うことが可能であり、数値モデルを介することなく装置および構造物の実挙動を把握することができる。また、地盤や実大橋梁などを模型で精密に製作することは、相似則や費用の観点から困難な場合が多いが、ハイブリッド実験手法では、構造系の一部のみを取り出して試験を行うことができるため、実大もしくは実大に近いサイズの免震支承やダンパー等を用い、これらを組み込んだ構造物が地震を受けた際の挙動を得ることができる。また、金属支承や金属系ダンパーのように、荷重履歴の影響を受け、モデル化を行うために荷重条件を変えた試験を繰り返し行うことが難しい装置の地震時挙動を直接把握することも可能である。

実験部の荷重方法については、図 2 に示すように支承部の荷重において、桁と橋脚の間に生じる慣性力相互作用を再現するため、本研究では振動台を用いた加速度加振による方法を採用した。本研究で提案するハイブリッド実験システムは、振動台による慣性力荷重を前提として構築しているが、実験部への入力を加速度から変位に変更することで、変位制御アクチュエータを用いた動的および静的ハイブリッド実験にも同様に適用することができる。

3. 研究の方法

以上の背景および目的をふまえ、本研究は以下の手順により実施した。

① 応答計算と荷重の連成手法の開発

ハイブリッド実験においては、計算部と実験部を個別に評価し、両者を相互作用力に

よって結合する必要がある。そこで、実験部と計算部が水平力（ベースシア）を介して連成する構造を対象に、動的ハイブリッド実験システムの実装方法を開発した。

② 実験システムの性能確認試験

構築した実験システムを用いて、振動台を用いた動的ハイブリッド実験を行い、実験システムの動作確認および性能試験を実施した。これにより、構築したシステムにより動的ハイブリッド実験が実施可能であることを確認する。

③ 支承部のハイブリッド実験

②の結果をふまえ、桁の支承部を模擬した実験部を構築し、この試験体に対して動的ハイブリッド実験を行った。これにより、桁と下部構造（計算部）の動的相互作用を考慮した形で支承部の載荷試験を実施し、ゴム支承の地震時における非線形動特性を直接実験により把握し、支承部のモデル化を実施した。

4. 研究成果

(1) 応答計算と載荷の連成手法の開発

図3(a)に示す2自由度系、すなわち実験部1自由度と計算部1自由度が水平力（ベースシア）を介して連成する構造を対象に、動的ハイブリッド実験システムの実装手法を開発した。図3(a)を解くべき全体構造系とし、運動方程式を計算部（図3(b)）および実験部（図3(c)）の2つに分離することを考える。実験部分のベースシア f_{bs} は

$$f_{bs} = c_e \dot{x}_e + k_e x_e = -m_e (\ddot{z} + \ddot{x}_e + \ddot{x}_s) \quad (1)$$

であるので、計算部分（図3(b)）の運動方程式は以下となる。

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s - f_{bs} = -m_s \ddot{z} \quad (2)$$

同様に実験部分（図3(c)）の運動方程式は、

$$m_e \ddot{x}_e + c_e \dot{x}_e + k_e x_e = -m_e (\ddot{x}_s + \ddot{z}) \quad (3)$$

となる。ここに、 x_s は計算部の変位、 x_e は計算部と実験部の相対変位、 m_s 、 c_s 、 k_s は計算部の質量、減衰、剛性、 m_e 、 c_e 、 k_e は実験部の質量、減衰、剛性である。

ここで、式(3)の左辺を供試体の加振実験に置換すればハイブリッド実験システムが実現される。すなわち、計算部の応答計算により得られた絶対加速度を実験部に入力し、ベースシア f_{bs} を測定して計算部にフィードバックすれば、図3(a)の状態を再現できる。 f_{bs} を直接載荷実験で得るため、供試体特性 (k_e 、 c_e) は非線形でもよい。

実際の動的ハイブリッド実験においては式(2)に示した運動方程式を離散化した上でリアルタイムに解く必要がある。このため、本研究では計算部分のハードウェアとして、高速演算および信号処理が可能な高速信号

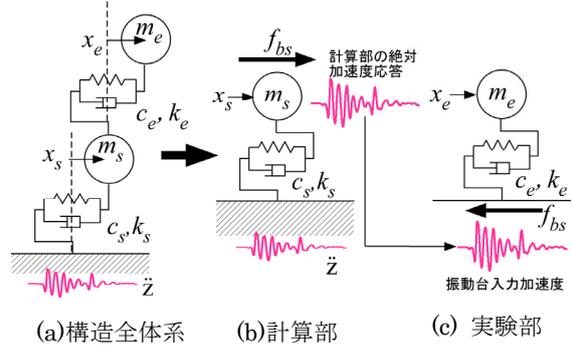


図3 ハイブリッド実験の概念図



図4 検証実験用試験体の概要

表1 実験ケース

Case	入力	剛性 k_s (kN/m)	減衰 c_s (kN/m/s)	固有振動数 (Hz)
1	帯域制限 ホワイトノイズ	6540.2	44.30	2.01
2		14673.7	66.35	3.01
3		26160.8	88.59	4.02
4	神戸海洋 気象台記録	6540.2	44.30	2.01
5		14673.7	66.35	3.01
6	NS成分	26160.8	88.59	4.02
7	L2地震動	6540.2	44.30	2.01
8	スペクトル	14673.7	66.35	3.01
9		II(G3)	26160.8	88.59

処理システム (Digital Signal Processor, DSP) を用いている。また数値解析法としては、収束計算を行うことなく非線形運動方程式の高速な求解が可能な Operator Splitting 法 (以下、OS法) を用いている。

(2) 実験システムの性能確認試験

① 実験概要

構築した実験システムを用いて、振動台を用いた動的ハイブリッド実験を行い、実験システムの動作確認と性能試験を実施した。

実験対象としては、図3において質量 m_s を有する1自由度線形構造物に、質量 m_e を有する実験部を剛結した系を想定する。ハイブリッド実験においては、実験結果は加振時間

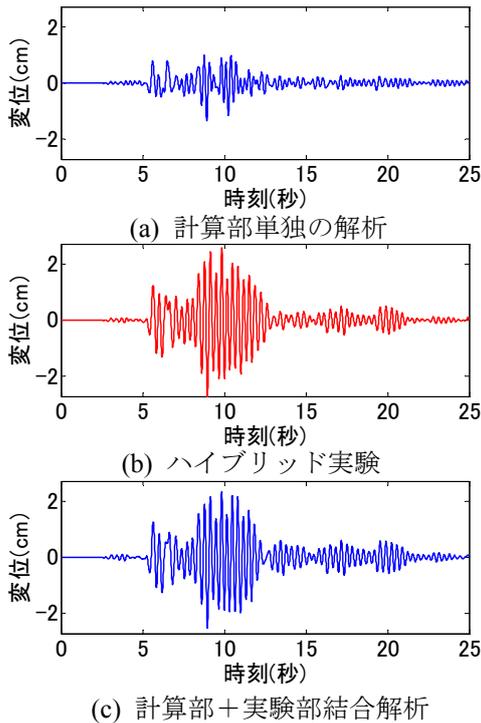


図5 ハイブリッド実験と解析の比較
(計算部変位の時刻歴応答)

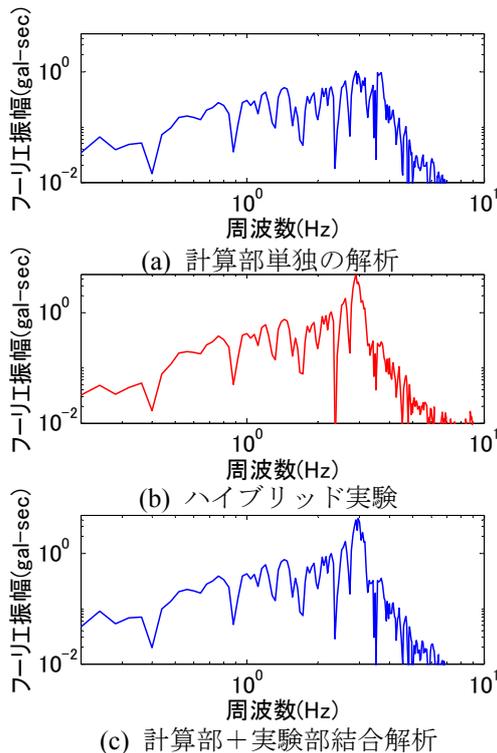


図6 ハイブリッド実験と解析の比較
(計算部変位の周波数特性)

遅れなど実験システム自体に起因する要素と、実験供試体の非線形特性に起因する要素の二つの影響を受けるが、実験供試体に非線

形特性を生じさせないよう剛体拘束することで、前者の要因が結果に与える影響のみを抽出した実験を行った。

実験では、計算部分の固有振動数をパラメータとし、桁からのベースシア f_{bs} を計算に反映させることによる影響を検討するものとする。すなわち、ハイブリッド実験により桁からのベースシアを計算部に取り込んだ場合、計算部を単独で解いた場合と比較して、構造系の固有振動数およびこれに伴う応答が変化すると予想される。

②供試体概要

剛体支持の状態を実験的に表現するため、図4に示す桁模型(3.6m×3.3m)を振動台上に固定した試験体を用意した。桁はフレーム上に鋼製錘を8(t)上載し、これを3分力計、および固定治具を介して振動台に4点で固定した。3分力計とは水平2軸+鉛直荷重を同時に計測できるロードセルである。桁と錘の重量は11.07(t)である。

実験では、3分力計で測定した桁のベースシアを、動ひずみアンプを介してDSPに取り込み、これをもとに運動方程式を解き振動台の加振加速度を決定する。この処理を、地震動の時間刻みごとにリアルタイムに行う。

実験で設定する計算部(図3(b))のモデルは、質量30(t)、減衰定数5%を有する線形系とし、計算部単独の固有振動数をパラメータとして表1のように設定した。前述のように、動的ハイブリッド実験システムが有効に機能した場合、この固有振動数が卓越振動数として発現することになる。

地震動としては、帯域制限ホワイトノイズ(0.1~20Hz)、および神戸海洋気象台記録NS成分、耐震設計標準で規定されるL2地震動スペクトルII(G3地盤用)を、それぞれ最大加速度を300galに設定して用いた。これらの地震動、運動方程式の求解、加振制御装置への指令信号のサンプリング周波数は、1kHzを設定した。

③実験結果

図5および図6には代表的な実験ケースとして、ケース5の神戸NS波を用いた場合について、実験により得られた計算部の時刻歴変位波形およびフーリエスペクトルを示す。この図から、実験結果(図5(b)および図6(b))は、再現すべき図3(a)の1自由度系の解析結果(図5(c)および図6(c))と比較して、時刻歴、周波数特性ともに良好に一致しており、卓越振動数が3Hz付近で生じていることが分かる。また、他の载荷実験ケースについても、同様な一致が得られることを確認している。

以上により、構築した実験システムが有効に機能することを確認した。

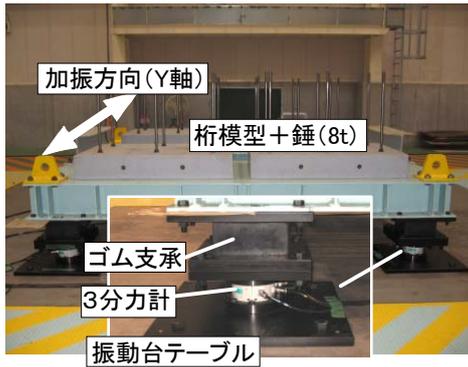


図7 ハイブリッド実験用試験体の概要

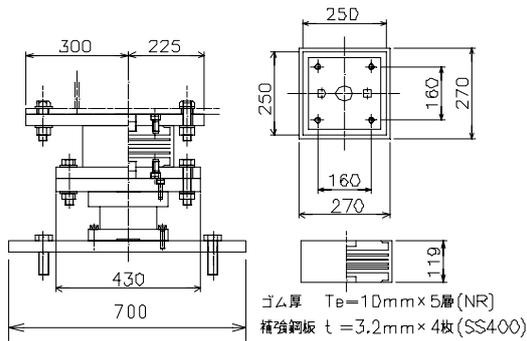


図8 支承試験体の概要

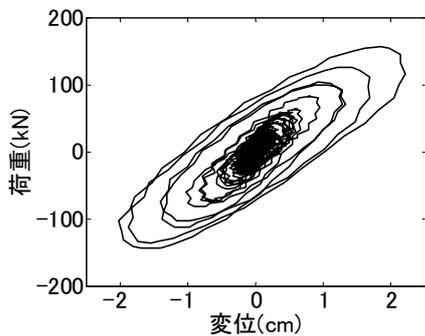


図9 支承の荷重-変位応答 (ケース5)

表2 ハイブリッド実験から同定したゴム支承の剛性および減衰

ケース	最大せん断ひずみ	等価剛性 (kN/m)	減衰係数 (kN/m/sec)
1	20.23	7179.31	297.64
2	13.49	6807.69	347.74
3	15.11	3912.57	281.15
4	39.31	6267.68	263.88
5	44.13	5720.62	250.01
6	28.56	6006.88	276.99
7	28.90	6700.26	278.21
8	19.44	6817.28	310.95
9	17.79	6533.27	317.75

(3) 支承部の動的ハイブリッド実験による地震時挙動評価

①実験概要

構築したシステムにより動的ハイブリッド実験が実施可能であることを確認したため、ここでは桁の支承部としてゴム支承を用い、図3において実験部も振動系を構成する2自由度動的ハイブリッド実験を行った。これにより、桁と下部構造(計算部)の動的相互作用を考慮した形で支承部の载荷試験を実施し、ゴム支承の地震時における非線形動特性を直接実験により把握することを目的とする。

試験体は、振動台上に桁模型と錘(8t)を設置するが、支承部にはゴム支承を用い、3分力計を介して振動台に接続した。この3分力計の水平荷重の測定値が、実験部と計算部の動的相互作用力(ベースシア)となるため、ゴム支承からの荷重を計算部にフィードバックして応答計算を行い、次ステップの振動台加速度指令値をリアルタイムに計算して入力した。試験体の設置状況を図7に示す。

②支承模型

本実験では、支承部の模型として図8に示すような天然ゴム支承を用いた。これは、ゴム支承が可逆性を有しており、繰り返し载荷に対して剛性および履歴特性の再現性が良好であることから、実験条件を何度も変更して実施する検証実験用の供試体として適切であると考えたためである。

なお、天然ゴム支承を用いた分散橋梁などの設計計算では、この剛性を線形バネ要素などにモデル化して応答計算を行うことが一般的である。また、減衰については、天然ゴムの材料減衰は小さいと考え、これを考慮しない場合が多い。一方で、天然ゴム支承を含むゴム支承は、厳密には変位(せん断ひずみ)応答のレベルに応じて剛性が変化するせん断ひずみ依存性、および使用材料によりばらつきはあるが一定の減衰特性を有するとされている。今回の実験では、このようなゴム支承の非線形特性、およびこれが構造系の応答に及ぼす影響を、実験部と計算部との動的相互作用を再現することにより直接把握することを目的とする。実験条件は、桁固定の場合の実験ケース(表1)と同じ条件を設定した。

③実験結果

代表的な実験結果として、ゴム支承に比較的大きな変位応答を生じたケース5について、ゴム支承の荷重-変位履歴を図9に示す。この図9より、今回使用したゴム支承は剛性の他に履歴減衰特性を有していることが分かる。表2には表1の各実験ケースについて、実験結果をもとに同定した等価剛性、減衰の

値を示す。このように、ゴム支承の等価剛性にはせん断ひずみ依存性があり、減衰も载荷速度に応じて変化していることが分かる。通常は、このせん断ひずみと等価剛性の関係、载荷速度と減衰の関係をモデル化して計算に組み込むことになるが、今回構築したハイブリッド実験システムにより、こうした支承の非線形特性、およびこれが構造系に与える影響を、支承をモデル化することなく直接実験で把握することが可能となった。

(4)研究総括

本研究で得られた成果を以下に示す。

- ①動的ハイブリッド実験の基礎理論を構築するとともに、高速信号処理システム(DSP)を用いた計測・制御ソフトウェアを実装した。
- ②橋梁の桁・支承部・下部工を想定し、計算部線形1自由度および実験部から構成される2自由度構造系を実験対象として設定し、実験部としては桁模型を振動台上に剛結して载荷実験を行った。その結果、実験部のベースシアを計算部にフィードバックする機構が有効に機能し、計算部に実験部の質量が加算された1自由度系の振動応答が得られ、構築したハイブリッド実験システムが有効に機能することを確認した。
- ③実験部の桁支持条件を固定からゴム支承に置換し、計算部1自由度線形系と実験部1自由度を結合した2自由度系ハイブリッド実験を行い、構築した実験システムにより、桁と橋脚の動的相互作用を考慮した支承の地震時特性を直接実験により把握することが可能であることを確認した。
- ④今回構築した実験システムは、本研究で対象としたゴム支承だけでなく、速度依存性の強いダンパー装置の試験などにも適用することができる。今後は、制御から計算までの時間遅れの影響を補償し、より広い周波数帯域で実験精度向上を図るとともに、計算部の構造物として、多自由度非線形系を考慮可能なシステムに拡張し、実験システムの性能向上を図る予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ①豊岡亮洋・室野剛隆：慣性力および地盤変位による相互作用が免震橋の動的挙動に与える影響、第12回地震時保有耐力法シンポジウム講演論文集(査読あり), Vol.12, p.157-162, 2009年.
- ②豊岡亮洋：大型振動試験装置の製作と加振実験, JREA(査読なし), Vol53, No.12, p.12-15, 2010年.

[学会発表] (計4件)

- ①Hirokazu Iemura, Osamu Kochiyama, Akihiro

Toyooka and Ikuo Shimoda: Development of the friction-based passive negative stiffness damper and its verification tests using shaking table, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008年10月14日発表(中国北京市).

- ②豊岡亮洋, 室野剛隆: 免震橋の動的挙動に与える慣性力および地盤変位相互作用の影響, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009年9月2日発表(福岡大学).
- ③神田政幸, 館山勝, 渡辺健治, 豊岡亮洋: 地震時の鉄道施設の大変形・破壊挙動解明を目的とした2次元振動試験装置, 土木学会第64回年次学術講演会 2009年9月3日発表, (福岡大学).
- ④Akihiro Toyooka and Yoshitaka Muroto: Effects of the Inertial and Kinematic Interactions on Dynamic Behavior of an Isolated Bridge, 14th European Conference on Earthquake Engineering, 2010年8月30日発表(マケドニア・オブリド).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

豊岡 亮洋 (TOYOOKA AKIHIRO)
公益財団法人鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部 耐震構造
副主任研究員
研究者番号: 80425917

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし