

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 4 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760341

 研究課題名（和文） 振動・低周波騒音に配慮した橋梁の動的性能照査法の提案と
動的荷重モデルの構築

 研究課題名（英文） Proposal of dynamic performance-based design of a bridge and
construction of a dynamic load model in consideration of vibration and infrasound

研究代表者

深田 幸史（FUKADA SAIJI）

金沢大学・環境デザイン学系・准教授

研究者番号：10313686

研究成果の概要（和文）：

本研究では、高速道路に架設されている橋梁を対象として、一般車の走行による橋梁振動を長期モニタリングし、実際の橋梁上に同時載荷する走行荷重を推定した。その結果、走行荷重モデルとして、196kN 単独走行を提案した。また、環境振動問題に配慮した高架橋を解析から検討するとともに、IRI と地盤振動との関係から路面管理による動的性能照査方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

This study described the proposal of the loading model with the weight of 196kN using the results of the monitoring for the actual bridge. Also, highway bridges in consideration of the environmental vibration problem were investigated due to the dynamic simulation. Moreover, this study proposed one of the dynamic performance-based design methods that manage the road roughness using the relation between the IRI₁₀ and the vibration level of the ground vibration near the bridge.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：橋梁振動

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：橋梁振動，振動モニタリング

1. 研究開始当初の背景

都市内高速道路は、土地の有効利用の観点から高架構造形式を余儀なくされ、民家と近接しているため、振動、低周波音などの環境振動問題が発生し、時には住民の受忍限度を超え、社会問題にまで発展することがある。

環境振動問題が発生する要因として、大型車両が伸縮装置近傍の不陸を通過すること

によって励起するばね下振動による橋梁への加振や橋梁上を走行している際の車両のばね上振動（橋梁の振動数域によってはばね下振動）と橋梁振動との連成が挙げられる。

一方、大型車両は、ばね上とばね下に分けられ、車両ばね上振動は、板ばね構造のサスペンションを有する大型車両を例にとれば、3Hz 前後、ばね下振動は、10～15Hz に卓越する振動である。

このように板ばね構造のサスペンションの場合には3Hz付近にはばね上振動数が存在していることがわかっており、支間長 30-40mの橋梁の振動と連成して、橋梁が大きく振動している事例も報告されている。しかしながら、一般的にどの程度の荷重の車両が橋梁上を最も多く走行しているのか明らかではない。さらに、それらの車両が橋梁上を走行した場合、どの程度まで振動を許容できるのか照査できる手法もないのが現状である。

2. 研究目的

本研究では、高速道路に架設されている橋梁を対象として、一般車の走行による橋梁振動を長期モニタリングすることにより、実際に橋梁上を走行している走行荷重を推定することにした。さらに、その荷重が走行したことにより生じた振動を照査する手法について検討した。

3. 研究方法

本研究では、以下の3項目に分けて研究を行った。

(1) 載荷荷重の推定

一般的に、どの程度の荷重の車両が橋梁上を最も多く走行しているのか明らかではない。ここでは、橋梁上に同時に載荷する走行荷重群を載荷荷重として、実際の高速道路に架設されている橋梁を対象として長期モニタリングを行った。

対象とした橋梁は橋長 38.5m の単純 PC 桁橋である。測点配置を図-1 に示す。支間中央におけるそれぞれの車線にひずみゲージを設置した。また、支間中央と桁端部付近における追越車線と第1走行車線に加速度計を設置した。サンプリング周波数は100Hzとして3年間24時間計測を行った。モニタリングに用いた機器の系統図を図-2 に示す。計測したひずみ、加速度および温度データは、それぞれの機器を通して最終的にスタンドアロン計測ユニット NR-600 (キーエンス製) に集約させ、電話回線 (B フレッツ光) により大学のコンピュータへデータを転送した。

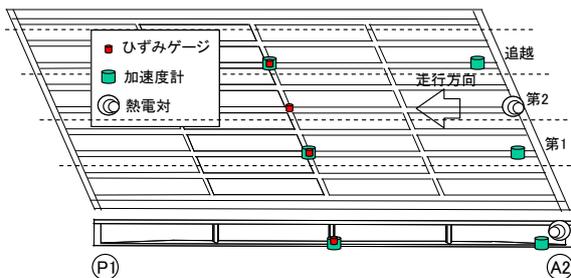


図-1 測点配置

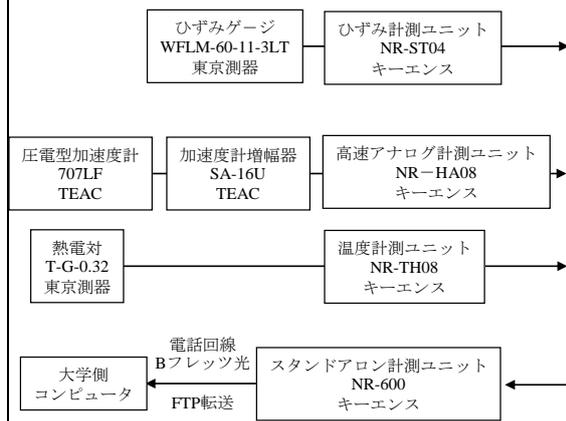


図-2 モニタリング機器の系統図

本研究において用いた走行荷重群の荷重推定方法は、たわみ変形を生じる曲げひずみを計測することにより、橋梁を一つの量りとして、走行荷重を推定するものである。図-1 に示したひずみの計測点は、主桁支間中央における各車線 (第1走行, 第2走行, 追越) の左車輪位置にあたり、主桁におけるひずみをこの3箇所の主桁ひずみで代表させている。

計測されるひずみ波形は、振動成分が含まれているため、1.0Hz のローパスフィルタを施し、動的成分を除去して準静的な時刻歴ひずみ波形を作成し、このフィルター処理された3地点の時刻歴ひずみ波形を足し合わせ、換算係数を掛けることにより、橋梁上に存在する走行荷重群を時刻歴波形のまま推定する簡易な方法である。なお、ここで推定される走行荷重群は、たわみ変形に伴い生じる支間中央のひずみ波形を形成する荷重群であり、単独走行とは限らない。

(2) 環境振動問題に配慮した PC 連結桁

まず、PC 橋に着目して環境振動問題に対して影響が少ない構造形式を選定する指標を得るために、支間長 20, 24, 30, 40m を有する、同一橋長で支間長の異なる PC 連結桁の高架橋モデルを作成し、大型車両通行時の動的応答をシミュレーション解析により、支間長、ジョイントの有無および支承剛性が交通振動に与える影響について解析的に検討した。

検討した上部構造は、支間 20m および 24m の場合はプレテンション方式 T 桁、支間 30m および支間 40m の場合はポストテンション方式 T 桁とし、中間橋脚ではプレキャスト PC 桁を RC 連結して2点支承で支持する構造とした。検討した解析モデルの断面形状を図-3 に示す。

解析モデルは、3次元骨組構造モデルとし、上部構造は、解析モデルの幅員方向の分割をプレテンション方式 T 桁とポストテンション方式 T 桁とで同等とするために、いずれの方式も5主桁に集約した格子構造とした。また、

上部構造のたわみ変形が橋脚の橋軸方向の変形に与える影響を考慮するために、主桁はオフセット部材を介してゴム支承で支持する構造とした。ゴム支承の剛性は、交通振動に与える影響を検討するために、6 ケースを設定した。なお、1 支承当りの鉛直剛性は、プレテンション桁の場合は $2.8E5kN/m$ 、ポストテンション桁の場合は $8.0E5kN/m$ を標準値とした。また、橋軸剛性は、上部構造一支承系の橋軸水平振動の固有周期が 0.2 秒、0.4 秒、0.8 秒および 1.6 秒となる値とした。

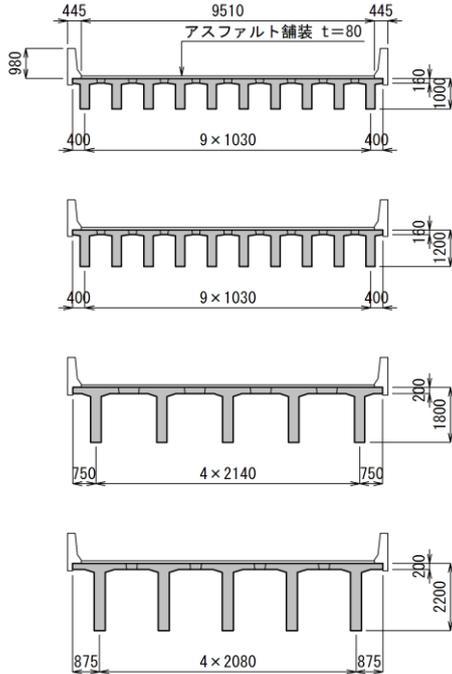


図-3 各解析モデルの断面形状
(上から支間長 20, 24, 30, 40m モデル)

動的応答の算出には、車両-橋梁系の運動方程式を直接積分する方法を用いた。車両モデルには、図-4 に示す車両の上下、ピッチングおよびローリング振動を再現できる 3 次元モデルを用い、総重量 $196kN$ および $245kN$ のリーフサスペンション車を想定したパラメータを設定した。ここで、車両モデルの軸重分配は、道路橋示方書で想定している大型車両を元に、前軸：後軸 = $0.2 : 0.8$ となるように設定している。車両モデルの後軸ばね上振動数は、 $196kN$ 車が 3.0 Hz 、 $245kN$ 車が 2.7 Hz である。

路面凹凸は、一般的な交通振動の検討ではランダム波形を用いているが、本検討では応答に寄与する路面凹凸の波長を把握するために、波長 $1\sim 15m$ の正弦波を $0.25m$ ピッチで設定して用いた。正弦波の振幅は、各波長に対して高速道路での走行快適性能からの限界値である $IRI=3.5$ (評価速度 $80km/h$ 、評価基準長 $200m$) となる振幅を標準とし、比較

として $IRI=1.0, 2.0$ となる振幅も設定した。

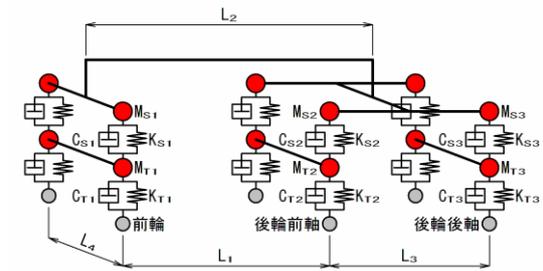


図-4 車両モデル

(3) 路面管理による動的性能照査

実際に振動問題が生じていた RC 中空床版橋を対象として、主に地盤振動環境の改善を目的とした床版上面増厚 (図-5) による補強工事を実施し、上面増厚工事前後の振動実験から振動低減効果を確認した。その結果、上面増厚工事による振動改善が、上面増厚によるものか、路面平坦性の改善によるものかを解析的に検証した。さらに、振動発生に対して影響が大きいと考えられる路面凹凸と地盤振動の関係について、国際ラフネス指数 (IRI) を用いた路面管理について解析的な検討を行った。

対象とした橋梁の上部構造は、支間長 $12.5m\sim 15.0m$ の短いスパンが連続する RC 中空床版橋である。連続桁の端部は 4 本の柱を有する立体ラーメン橋台となっており、連続桁の中間部はロッカーピアにより支持されている。橋梁全体としては橋長が $995m$ 、立体ラーメン橋台は A1~A14 まで 14 基存在している。なお、ジョイントは図-6 に示したように、すべて立体ラーメン橋台上に設置されている。



図-5 床版上面増厚

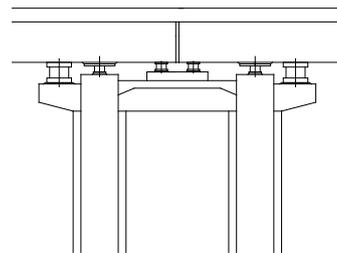


図-6 立体ラーメン橋台

4. 研究成果

(1) 載荷荷重の推定

長期モニタリングにより得られた対象橋梁における載荷荷重の結果を図-7に示す。

これより、100~200kNが一番多く、次いで200~300kNが多いことがわかる。これより、積載状態または空積み状態の単独による大型車両が多く走行していることが明らかになった。したがって、走行荷重モデルとして196kN大型車単独走行によるユニットパターンを想定したモデルで十分であると考えられる。

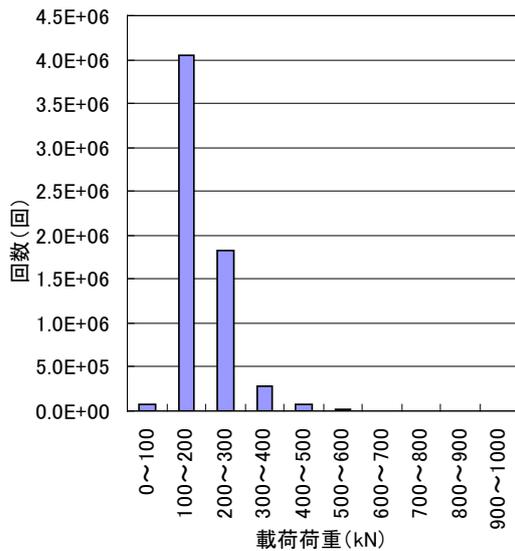


図-7 載荷荷重と載荷回数

(2) 環境振動問題に配慮したPC連結桁

PC連結桁橋を対象として、環境振動問題に配慮した、支間長、ジョイントの有無や支承剛性等が交通振動に与える影響について、正弦波の路面凹凸を用いたシミュレーション解析により検討を行った。その結果、以下の点が明らかとなった。

① 上部構造の交通振動およびその継続時間が少ないPC連結桁橋としては、上部構造のたわみおよびねじれ振動数が大型車両の後軸ばね上振動数より小さい支間を選定するのがよい。

② 上部構造の交通振動を低減するには、支間によらず、波長5~11mの路面凹凸を低減するのがよい。

196kN車が60~100km/hで走行した場合の橋脚天端での橋軸方向応答速度と路面凹凸の波長との関係として、支間24m一連の場合の橋軸方向速度 $RMS_{BL,max}$ を図-8に示す。上述したように波長5-11mの凹凸に大きく影響されていることがわかる。

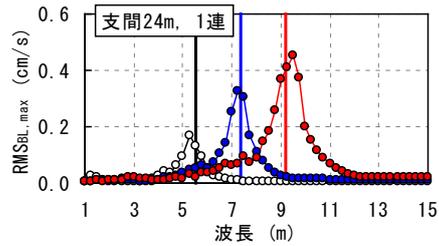


図-8 路面凹凸波長と橋脚天端での橋軸方向応答速度 $RMS_{BL,max}$ (白丸:60km/h, 青丸:80km/h, 赤丸:100km/h)

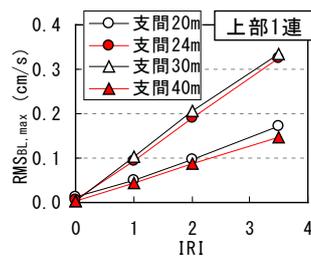
③ 橋脚の交通振動に及ぼす上部構造の支間の影響は顕著でない。

④ 地盤振動の発生源となる橋脚の交通振動をより少なくするためには、小振幅域での橋軸剛性の高いゴム支承を採用するのがよいが、橋軸水平振動の固有振動数と上部構造のたわみまたはねじれ振動数が近接しないように配慮する必要もある。

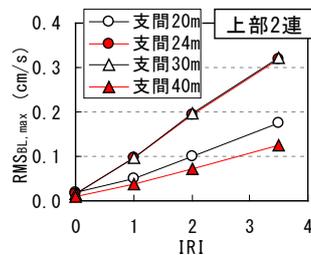
⑤ ゴム支承の鉛直剛性を小さくすると、上部構造の交通振動は大きくなるが橋脚の交通振動は小さくなる。

⑥ 上部構造および橋脚の交通振動は、支間によらず IRI にほぼ比例して増加している。

196kN車が80km/hで走行した場合の橋脚天端での橋軸方向応答速度と路面凹凸のIRIとの関係として、各支間1連と2連の場合の橋軸方向速度 $RMS_{BL,max}$ を図-9に示す。上述したように路面凹凸のIRIと全橋脚天端での応答は、いずれの値もIRIにほぼ比例して増加しているが、支間24mおよび30mの応答が大きいことがわかる。



(a) 1連の場合



(b) 2連の場合

図-9 IRIと全橋脚天端での橋軸方向応答速度 $RMS_{BL,max}$

(3) 路面管理による動的性能照査

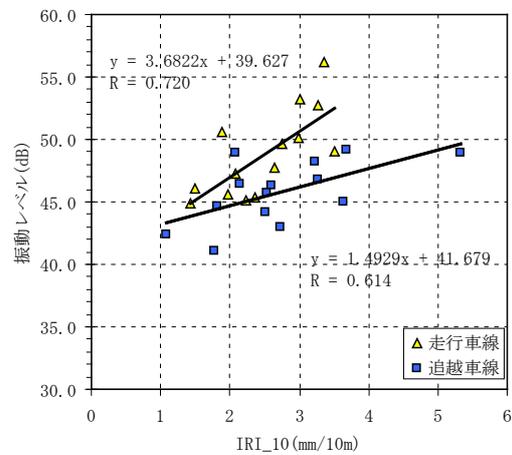
振動問題が生じていた対象橋梁において、床版上面増厚による補強工事を実施した結果、周辺地盤の振動が低減したことを確認した。その振動低減の要因として、解析上、増厚により振動数の変化が小さいことがわかり、増厚による地盤振動の低減への影響は小さく、高架橋の周辺地盤は、橋台上の路面平坦性が改善された影響の方が大きいことがわかった。このため、路面の平坦性を IRI_10、凹凸振幅、ばね下加速度のそれぞれで評価し、地盤振動との関係を検討することにした。

その検討方法としては、上面増厚後の橋梁をモデル化し、走行荷重による地盤振動のシミュレーション解析を行った。この結果については、実測結果と比較することにより、路面平坦性も含めて実橋を反映したモデルであることを確認した。橋台上の路面平坦性が地盤振動に対して与える影響については、同一の形式の橋台上で計測した数パターンの路面凹凸を用いて動的応答解析を行い、路面平坦性と地盤振動との関係を比較することにより行った。

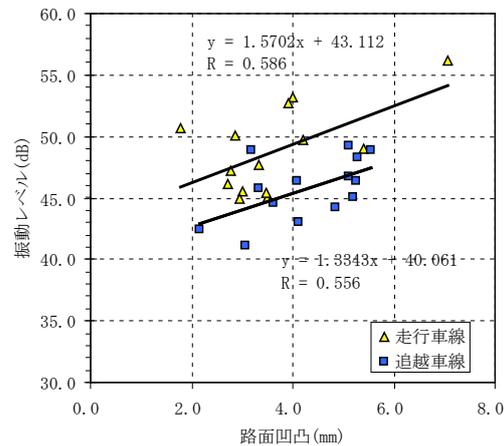
その結果を図-10 に示す。路面凹凸と地盤振動の関係について車線別にみると、いずれのケースにおいても、同一路面であれば追越車線よりも走行車線通過時の影響が大きい傾向にある。これは、遮音壁設置に伴う上部構造の死荷重が走行車線側の方が大きいことにより、振動モードの振幅が走行車線側の方が大きいことが要因として考えられる。

また、地盤振動の大きさは、いずれの指標を用いて評価しても正の相関を示すことがわかる。相関係数は IRI_10 で評価した場合が 0.6~0.7 と最も高く、次いで路面凹凸の振幅量で評価して 0.6 程度であった。バネ下振動との関係については、走行車線では 0.75 と最も高いが、追越車線では 0.26 と最も低くなった。これは、追越車線走行時のバネ下振動が全般に小さいためであるが、この原因については現時点では明確にはできなかった。ただし、いずれの指標を用いた場合でも正の相関が認められることから、いずれの指標を用いても橋台上の路面平坦性と地盤振動との関係を示すことは可能であると考えられ、全体的に相関係数が高いのは、路面を IRI_10 で評価したケースであることがわかった。これは、IRI_10 が路面凹凸だけでなく、その凹凸の形状や車両のバネ下振動特性を考慮しているためであり、車両バネ下振動を原因とする振動に対して、精度の高い指標となっていることが考えられる。この IRI_10 と地盤振動との関係を用いれば、この地域における地盤振動に対する路面管理に役立つ指標と考えられる。当該橋梁においては、現況においても法的な基準である要請限度を満足していることから、さらなる目標値を設

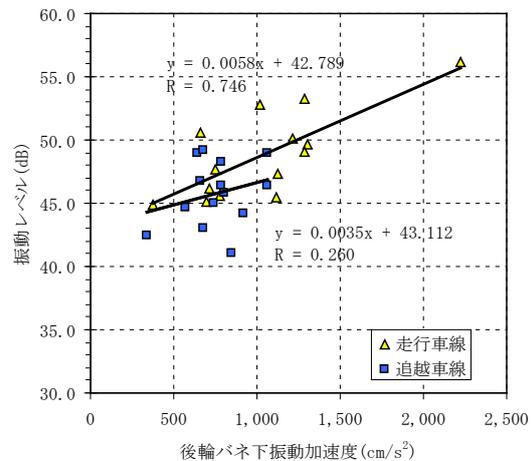
定することは難しいが、体感振動の閾値を 55dB、家屋による振動の増幅を 5dB とした場合、IRI_10 を 3 以下にすることで、これを満足できると考えられる。



(a) IRI_10 との相関



(b) 路面凹凸の振幅量との相関



(c) 車両バネ下振動との相関

図-10 路面凹凸と振動レベルの相関

ただし、このような振動問題は、車両バネ下振動と橋梁振動の連成によって発生する振動であり、両者の卓越周波数の近接程度によって、地盤上での応答が大きく異なる。また、橋梁の構造形式や支間長、立地条件によっても異なる。したがって、それぞれの場所において得られる特性は異なるため、IRI₁₀を用いた路面管理により、地盤振動を低減する方法は別の場所でも有効と考えるが、本研究で得られた相関をそのまま用いることはできないことに注意が必要である。

(4) 車両走行による動的性能照査方法

上記の路面管理による動的性能照査に加え、本研究では以下の照査方法を提案する。

- ・ 196kN車単独走行による照査を基本とし、応答値の評価では、統計値ではなく、最大値で評価する。
- ・ 橋梁モデル上を196kN車が単独走行することにより生じる橋脚下端での反力をシミュレーションから算出する。
- ・ 例えば、以下の手法などを用いて、官民境界での振動レベルを推定する。
- ・ 官民境界から家屋内までの距離減衰を仮定して、「建築物の振動に関する居住性能評価指針」を用いて、振動レベルを評価する。

高架橋の場合、橋梁周辺の地盤振動は、同時に複数の橋脚から伝播する振動を考慮する必要がある。本研究では、地盤を半無限弾性体とみなし、高架橋のフーチング底面に働く反力が基礎底面全体に分布して作用していると仮定し、これを微小の要素に分割し、各分割要素に働く3方向の反力を地盤に対する3方向の加振力と考えた(図-11参照)。なお、実橋における橋脚基礎は杭基礎、橋台部はケーソン基礎であるが、道路交通振動を扱う場合、そのエネルギーは基盤面よりも地表面が大きいことや表面波の発生は杭先端よりもフーチング底面からの影響が大きいと考えられることからフーチング底面を加振源と仮定した。

フーチング底面の各要素の反力波形は、フーリエ変換により周波数領域に変換し、Lambの解析解から得られる周波数応答関数を掛け合わせて着目点に対する影響を求め、分割したフーチング底面の各要素および各橋脚について、全要素によるスペクトルをすべて加え合わせることで複数の橋脚からの影響を考慮した。得られた周波数領域の応答値は、逆フーリエ変換により時刻歴領域に変換して加速度応答を求める。

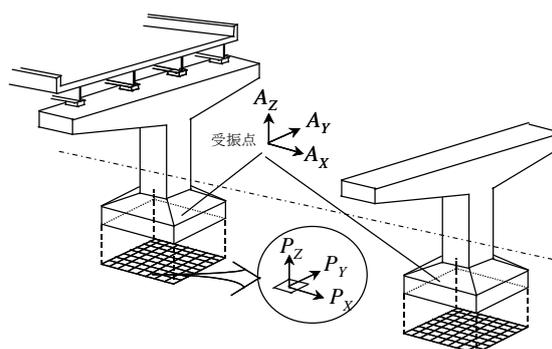


図-11 地盤振動シミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

(1) 角本周, 深田幸史, 松永昭吾, 西村一朗, PC連結桁橋の構造条件が車両走行時の動的応答に与える影響, 査読有, 構造工学論文集, 58A, 2012, 226-236

(2) 浜博和, 深田幸史, 阿川清隆, 岡田裕行, 梶川康男, 縦山好幸, RC中空床版橋周辺の地盤振動対策と路面評価, 査読有, 構造工学論文集, 58A, 2012, 237-249

(3) 深田幸史, 室井智文, 縦山好幸, 梶川康男, 路面補修前後の長期モニタリングから評価した周期性路面の橋梁に及ぼす影響, 土木学会論文集, 査読有, 67(1), 2011, 121-136

〔学会発表〕(計1件)

深田幸史, 周期性を有した路面の補修前後における橋梁の振動モニタリング, 第65回土木学会年次学術講演会, 2010年9月1日, 北海道大学(北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深田 幸史 (FUKADA SAIJI)
金沢大学・環境デザイン学系・准教授
研究者番号: 10313686

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし