

京都大学工学部 学生員 ○北 聖大 京都大学工学研究科 正会員 五十嵐 晃  
 阪神高速道路(株) 正会員 足立 幸郎 オイレス工業(株) 正会員 宇野 裕恵  
 JIP テクノサイエンス(株) 正会員 佐藤 知明 京都大学工学研究科 学生員 白石 晴子

1.はじめに

橋梁の地震時性能を確保するために、ゴム支承やすべり支承等の支承系の復元力特性の設定や、ダンパー等の適用により、動的応答特性を目標性能上望ましいものに変更する、いわゆる「免制震構造」・「免制震設計」の方法論では、構造系の設計上主に着目する特性指標は、固有周期とエネルギー吸収（減衰性能）の2つである。これらは、本来は規則的で周期的な応答が持続する、定常的な調和振動状態の特性を表現している指標であると考えられる。しかしながら、レベル2地震動など耐震設計上の課題となるタイプの入力に対する橋梁の応答は、むしろ応答の非定常性が高く、その結果として生じる最大応答値との対応が重要であると考えられる。目標性能上望ましい特性をそうした非定常応答に関して表現できる指標についても着目することが、より合理的な設計を実現する上で有効と考えられる。

動力的にそうした非定常応答と応答振幅の増加の過程を説明する上で意義があると考えられる特性指標として、本研究では、支承—橋梁系の非定常応答位相に着目した検討を行う。その適用事例として、著者らが近年提案している反重力すべり支承（UPSS）を用いた橋梁を用いた算出結果について述べる。

2.非定常位相分析

ここで着目する非定常応答位相分析は、桁（上部構造）の応答、橋脚（下部構造）および支承の3者間の応答の位相遅れまたは位相進みの関係を、時々刻々の変化として算出しようとするものである。この計算には、非線形動的応答解析により得られる応答時刻歴とその Hilbert 変換を虚部として得られる解析信号（Analytic signal）を得ることで計算する方法を用いた。位相の算出方法の考え方を、最も単純な正弦波を例として説明する。図 1 に示すように、応答時刻歴が  $x(t)=\sin(2\pi t)$  であると仮定して、それに対応する解析信号の値を複素平面上に対応付ければ原点を中心とする

円を描く形で移動していく。解析信号  $x(t) + iH[x(t)]$  の偏角を複素数平面の虚軸の負方向からの角度を、時刻  $t$  における応答の位相角と定義して算出すれば、非定常位相の時刻歴が得られる。

この考え方を、桁と橋脚の地震応答の2つの時刻歴波形に適用する。ある時刻  $t$  におけるそれぞれの解析信号をひとつの複素平面上に対応付けることで、図 2 に示すように、その時刻の桁と橋脚の位相の関係を表現できる。さらに、支承変位は両者の差であることから、2つの解析信号に対応する点同士を結んだ複素数ベクトルが表現していることになる。 $\theta, \gamma$  は、それぞれ時刻  $t$  における、橋脚と桁の位相差、橋脚から見た支承応答の位相差である。

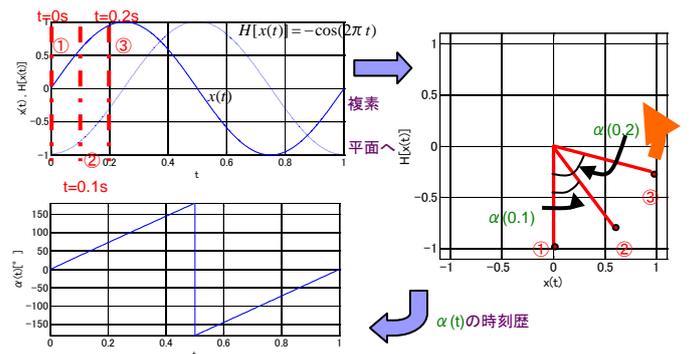


図 1 非定常位相の算出の考え方

3.反重力すべり支承（UPSS）への適用

地震時水平力分散支承を用いた橋梁では地震時の支承設計変位を大きく設定する必要があるために生じる、伸縮装置の大寸法化、初期コストや維持管理上の問題等を背景として、反重力すべり支承（UPSS）が提案されている（図 3）。UPSS を用いた橋梁の地震応答に関する上述の非定常応答位相の算出を行うとともに、設計パラメータと橋梁の地震応答の関係に関する検討を行った。

UPSS を用いた多径間連続橋の 1 スパンを対象に、桁と橋脚の 2 質点系モデルに UPSS を組み込んだ多自

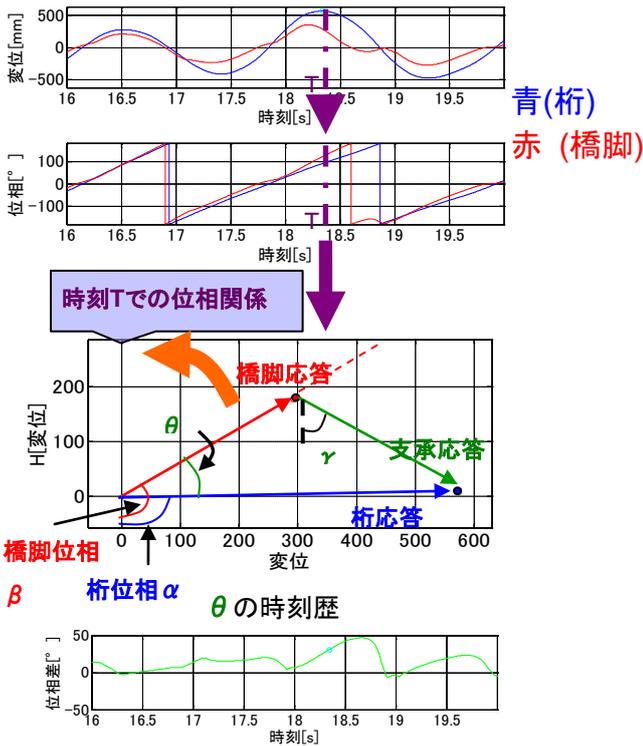


図2 桁・橋脚・支承応答の非定常位相の

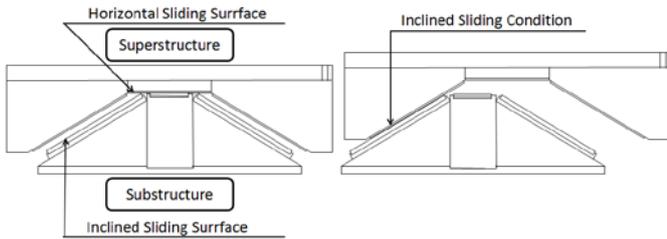


図3 反重力すべり支承(UPSS)

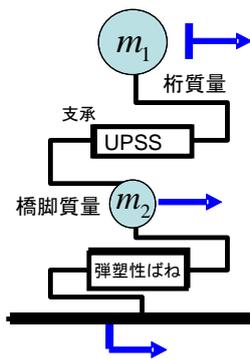


図4 UPSSの2質点モデル

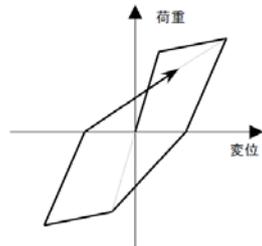


図5 橋脚の履歴法則

由度モデルを用いた地震応答解析を行った(図4)。橋脚はClough型バイリニアモデル(図5)を用い、降伏震度は0.66gとした。道路橋示方書標準波 Type I-II-1と Type II-II-1を橋軸方向に入力した。

支承固定時の固有周期と、UPSSのパラメータ(斜面角度, クリアランス)の組み合わせを変えた解析を行い、それから算出した位相の例を図6に示す。

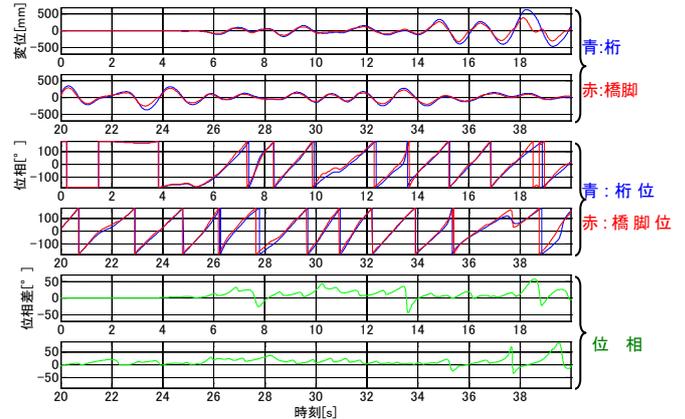


図6 応答解析結果と位相の算出例

全組み合わせの解析結果から、位相差の平均値と橋脚の塑性率の関係を整理したものを図7に示す。ここでは、桁応答の振幅が増加している時間区間について、桁と橋脚の位相差の時間平均を位相差の平均値と定義している。振幅の増加・現象は、解析信号の絶対値から得られる包絡線の微分値から判定している。

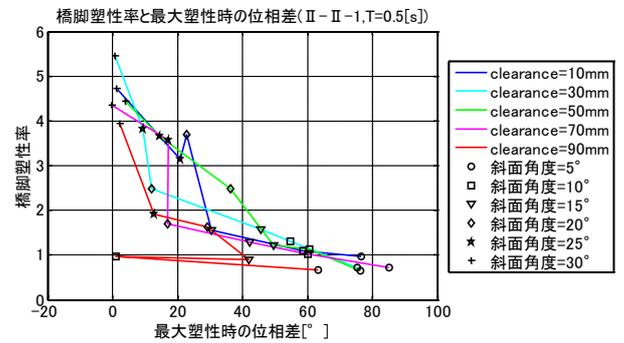


図7 位相差の平均値と橋脚の塑性率の関係

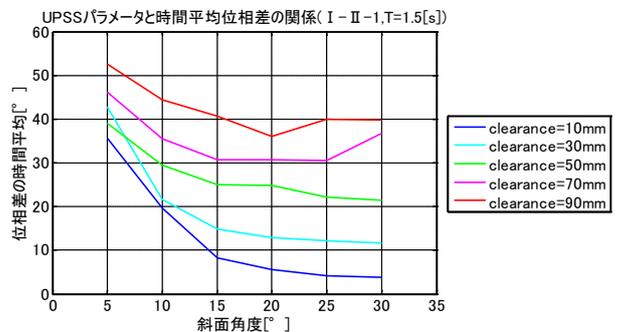


図8 UPSS設計パラメータと位相差の平均の関係

図8に示すようにクリアランス大, 斜面角度小のケース位相差が大きく, 橋梁の地震応答は小さくなる傾向が見られる。