

耐震 One Point Advice #6
応答軌跡/orbit で観察する構造物の地震時非線形挙動
-RC 橋脚の時刻歴応答解析-

1. まえがき

構造物の時刻歴応答解析は、耐震設計の主要な計算作業として数多く実施され、商用コードの高度化と計算環境の改善により、多くの大規模かつ精緻な解析/設計が実行されている。このような解析を実行すると、線形/非線形を問わず、通例、加速度、変位、および断面力や応力など、膨大かつ多種の情報が出力される。

本文では、質点部（頂部）の変位軌跡に着目して、動的非線形挙動の重要な見方を考えてみたい。質点部の変位軌跡は、オービット(orbit)とも呼ばれ、普段、注目されることが少ないが、提示した計算事例から、その効用を改めて認識してもらいたい。

2. 対象構造とモデル化

(1) 解析条件

ここでは、図1のようなRC単柱式橋脚を対象とし、これを片持ち梁形式の線材モデル(多質点多自由度モデルに)に置換し、実地震動を基部から直接入力し、時刻歴動的応答解析を実行する。

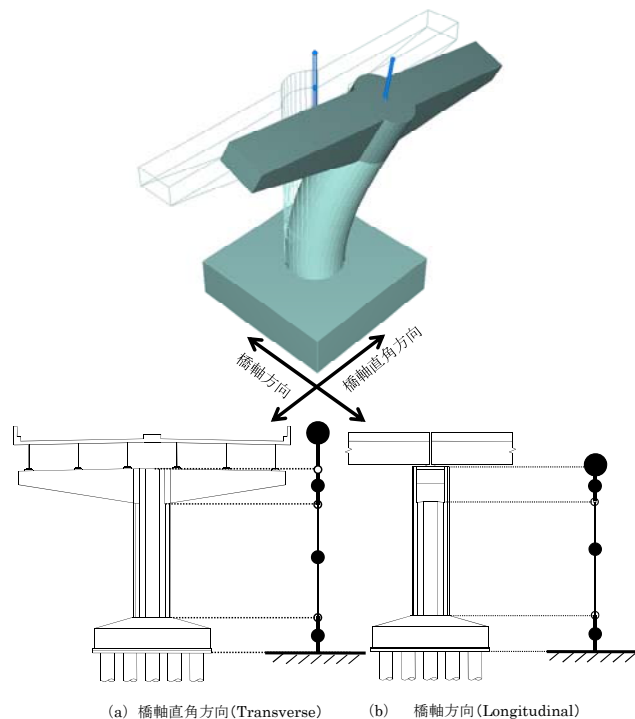


図1 対象橋脚：単柱式T型RC橋脚のモデル化（多質点多自由度モデル）

道路橋下部工の設計では、通例、橋軸方向（図(a)）と橋軸直交方向（図(b)）に分離して解析するが、両者のモデル化に際しては、上部構造物の質点位置が異なる（道路橋示方書 V 耐震設計編[1]）。本例では、断面形状が円形断面のため両方向が同一断面、上部本体質量の大きさが同一なので、質点作用位置のみが異なることになり、この結果、等価固有周期 T_{eq} は、橋軸直交方向 $T_{eq} = 0.86$ 秒，橋軸方向 $T_{eq} = 0.68$ 秒となる（橋軸直交方向の方が、若干長周期となる）。また、減衰定数は、通例、鉄筋コンクリートの場合 $h = 5 \sim 7\%$ ，鉄骨造の場合 $h = 2 \sim 3\%$ ，が用いられ、本例では $h = 5\%$ と仮定した。

なお、このような多質点多自由度系モデルは、構造物の応答性状を詳細に表現できるが、多くの計算時間を必要とし、本文では、次式のような道路橋示方書の規定に従い、等価質量 W に縮約させた。

$$W = W_u + C_p W_p \quad (\text{曲げ変形系: } C_p = 0.3, \text{せん断変形系: } C_p = 1) \quad (1)$$

(2) 解析条件

以上のような解析モデルに加えて、入力地震波を設定した。本例での解析条件を下記のように整理する。

- ・解析モデル：1 質点 2 自由度モデルに単純化。粘性減衰 $C=0.05$
- ・モデル基部：固定端とし、地震波（加速度）を直接入力
- ・数値計算法：数値積分法（Newmark- β 法， $\beta=1/4$ ），時間刻み $\Delta t = 0.001$ 秒
- ・入力地震波：神戸海洋気象台 JMA-KOBE1996，
 最大加速度：EW 成分 619Gal，NS 成分 818Gal，
- ・非線形モデル：骨格曲線：Tri-Liner 型，復元力モデル：武田モデル，

3. 解析結果

(1) 2 方向同時解析

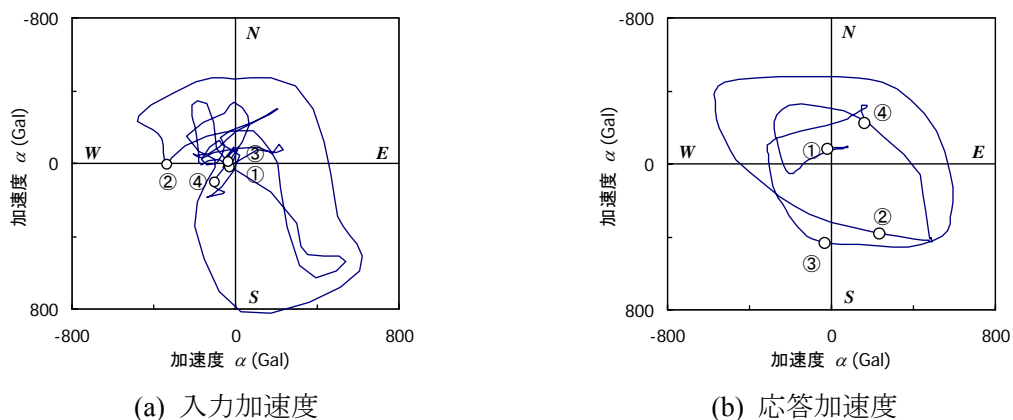


図 2 解析結果#1：入力加速度（左図）と応答加速度（右図）の軌跡

このような解析条件のもと、2方向同時入力による動的応答を実行した。解析結果として、まずは、図2に、入力加速度と応答加速度の軌跡 (orbit) を示し、図3に、質点部 (頂部) の応答変位軌跡 (orbit)、および両方向の時刻歴波形を併記した。図2、図3の両図とも、図中の①～④は、時刻 (経過時間 t) を示すもので、各図の時刻歴上での関連を確認されたい (ここでは、地震動が最も大きい $t=1.5\sim 3.0$ 秒を提示している)。

入力加速度と応答加速度の軌跡を示した図2では、入力地震波の卓越周期と構造物の固有周期の大小関係により、その応答軌跡の違いが表れている。応答加速度では、入力地震波の小刻みな変化が消失していることが観察される。

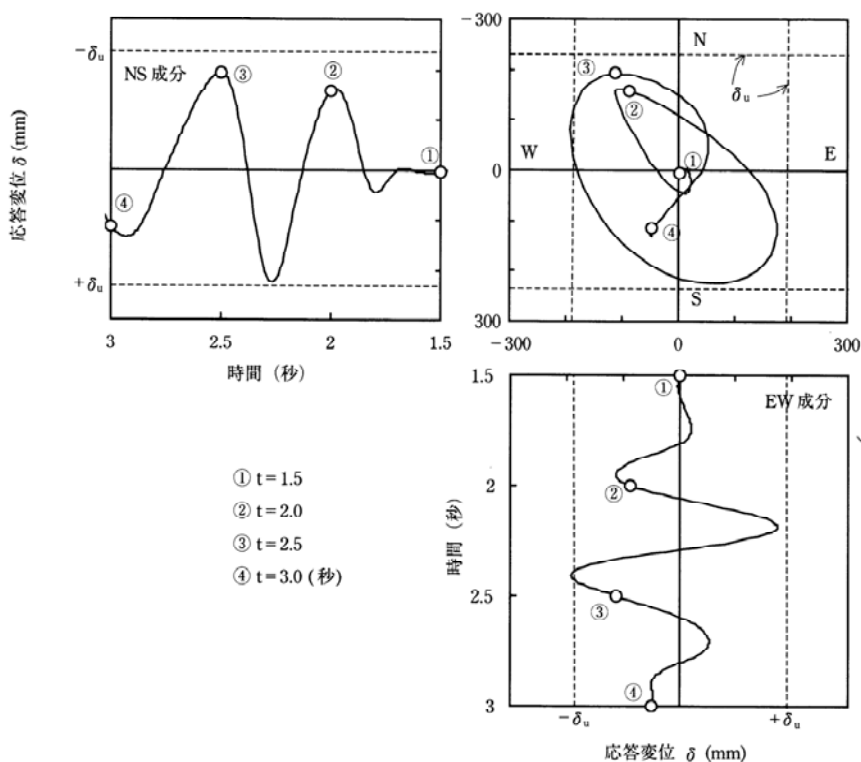


図3 解析結果#2：左上：NS成分の時刻歴応答波形，右上：応答変位の軌跡
 右下：EW成分の時刻歴応答波形

図3は、質点部 (頂部) の応答変位軌跡を示し、2方向に分離した時刻歴波形を併記/対比したもので、異なる2方向の時刻歴挙動が、合成された軌跡に反映されていることが見てとれる。

なお、当然のことながら、水平2成分を (または鉛直動も含めて) 同時入力/解析した方が、実際の動的挙動に近い結果が得られ、2方向の個別解析の重ね合せは危険側 (過小評価) になることも指摘されている (非線形解析の場合、特に顕著であるとも言える)。このようなことも、応答変位の軌跡を活用することにより、より適確な判断に繋がることを期待できる。

(2) 単振動リサージュ図との比較

上記のような 2 方向波形の合成は、いわゆる単振動（周期振動の基本形）に類似することができる。特に、合成結果を図化するリサージュ図形(Lissajous figure)と比較すると、さらに興味深い考察につながる。図 4 は、単振動による周期振動をリサージュ図によって表したもので、先述と同様に時刻を①～④にて表示している（同図中の δ_u とその点線は、先例の図 3 をそのまま残したもので、ここでは特に意味はない）。

物理問題における単振動リサージュ図は、直交 2 波の固有周期の比、および位相差によって決定され、物理問題の定番メニューでもある。例えば、単純な場合（2 波の固有周期が同一の場合）の図形は、位相差を ϕ として、 $\phi=0$: (斜め 45° 度) 直線、 $\phi=\pi/4$: 楕円、 $\phi=\pi/2$: 円、となることが知られている。図 4 の例は、2 波の固有周期は同一であるが、振幅が異なることにより長円となっている。

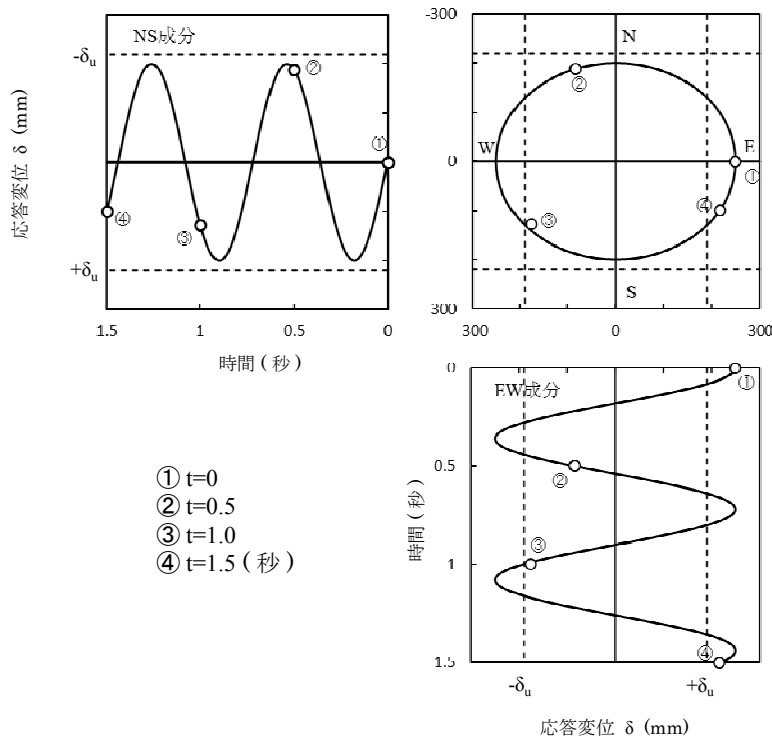


図 4 リサージュ図による単振動の応答挙動

このように、リサージュ図形を非定常ランダム振動（地震動）の場合に応用すると、新たな知見が得られることも期待でき、読者諸氏は、さらなる検討をチャレンジされたい。

4. 偏心橋脚の変位応答軌跡（逆L字型橋脚の応答解析）

次に、逆L字型橋脚の地震応答解析結果により、偏心曲げモーメントが作用する場合の応答変位の軌跡/orbit を、再度、観察/考察してみよう。逆L字型橋脚は、有効な土地利用の観点から、都市部の高架橋にて、しばしば採用される構造形式の一つである。このよう

な構造物は、その非対称性により複雑な応答性状を示すことが多い。

解析結果の一例を図5に示したが、図中には、Case1: 2方向同時解析, Case2: 一方向個別解析, の2例を併記している(判読し難いが、ピンク色太線がCase2を示し、これは、一方向の単独解析なので、対応する縦軸または横軸上に推移している)。Case2は、それぞれ縦軸または横軸上に振動しているが、その最大変位を、Case1: (2方向同時解析)の結果と比較されたい。偏心方向(δ_z 方向)は、両Caseともほぼ同等であるが、偏心直交方向(δ_x 方向)では大きく異なる(Case1は、 δ_x 方向の負側に5倍以上大きい)。このような非線形挙動の特徴も、その応答軌跡から直ちに判断することができる。

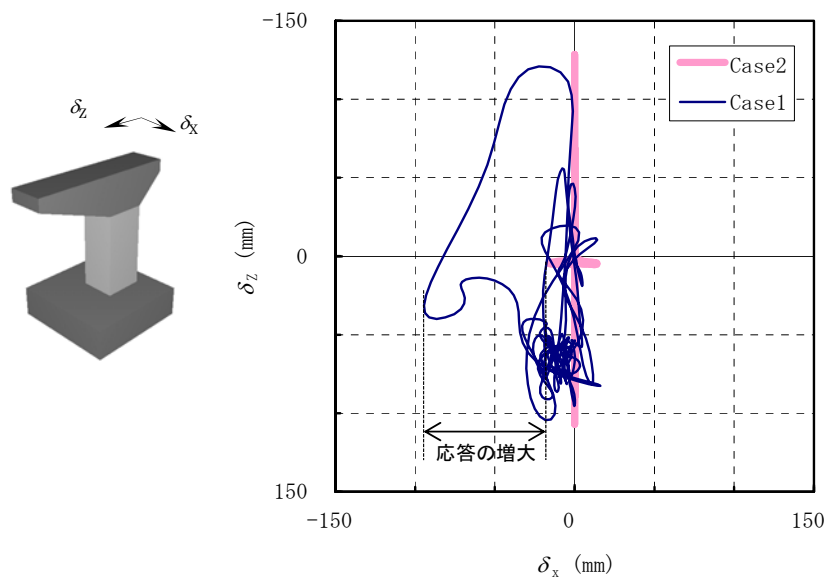


図5 解析結果：偏心橋脚の変位応答軌跡

通例、解析上の平面座標軸(ここでは、 x 軸と z 軸)は、入力地震動の強軸/弱軸方向とは合致せず、また、両方向の(構造物の)固有周期と(地震動の)卓越周期も異なり、弾性応答でも複雑怪奇な挙動を呈することになる。

このような応答変位の履歴をその軌跡により観察することは、構造物天端の動きを真上から見下ろすことになり、水平動に関する非線形挙動を、これまでと異なる視点から理解することができる。

【参考文献】

- [1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、平成14年3月