

液状化地盤中の橋梁基礎に対する 応答変位法に関するパラメータスタディ

谷本俊輔¹・林和幸²・高橋章浩³・杉田秀樹⁴

¹正会員 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ振動チーム（〒350-8516 茨城県つくば市南原 1-6）

²正会員 独立行政法人土木研究所交流研究員 耐震研究グループ振動チーム（同上）

³正会員 工博 独立行政法人土木研究所主任研究員 耐震研究グループ振動チーム（同上）

⁴正会員 工博 独立行政法人土木研究所上席研究員 耐震研究グループ振動チーム（同上）

1. はじめに

液状化が生じる地盤における橋梁基礎の地震時応答に対しては、上部構造からの慣性力のみならず、地盤の振動変位が強く影響を及ぼす。道路橋示方書¹⁾（以下、道示という）における液状化地盤中の杭基礎の照査法では、地盤の振動変位の影響を力学モデルの上で取り扱っていないものの、液状化による橋全体の長周期化や慣性力の低減を考慮していないことから、照査時の外力設定は実現象に対して必ずしも過小であるとは言えない。また、地盤の振動変位の影響が懸念される場合は、スパイラル鉄筋を用いた補強や配筋上の工夫等によって対処することとなっていることから、地盤の振動変位に対する杭基礎の安全性は担保される形となっている²⁾。

一方、近年の研究においては、液状化地盤中の杭基礎の耐震性能を評価するモデルとして応答変位法を用いる場合が一般的となっており、応答変位法が構造物の杭基礎の設計法として実務的に用いられているもの

もある³⁾。

構造物の杭基礎に対する応答変位法では、図-1のようなモデルを考える。すなわち、地盤バネによって支持された梁要素からなる杭基礎モデルに対し、基礎天端には上部構造からの慣性力、地盤には振動変位を強制変位として作用させることにより、地盤変位の影響を陽な形で取り入れた照査モデルである。

応答変位法は、地盤の振動変位の影響を考慮していることが直感的に理解しやすい手法である。しかし、液状化時における地盤変位、上部工慣性力、地盤バネなど、計算に必要な多くのパラメータの設定方法に検討の余地が残されている⁴⁾。これらの問題に対して優先順位をつけ、今後の研究で各々を解決していく必要があるが、応答変位法はモデルが複雑である上に、計算結果が与える全てのパラメータのバランスから決まるため、各パラメータの重要度や定性的傾向を理解しにくい。

本研究では、各パラメータの設定方法や計算方法が杭の断面力、変形に及ぼす影響を把握するためのパラメータスタディを行うことにより、それらが杭の断面力や変形に及ぼす影響について検討した。

2. 解析条件

(1) 解析対象とした橋梁と基本ケース

本研究では、地震時水平力分散構造を有する5径間連続桁橋のうち、ある1基の橋脚⁵⁾の橋軸方向を解析対象とした。以下、基本ケースの条件について述べる。

地盤条件を図-2に示す。GL-5mから13mまでの土層は液状化に対する抵抗率 F_L が全体的に0.3程度であり、液状化が生じうる土層と見なされる。以降では、フーチング下面から地下水位までを層1、地下水位からGL-7mまでを層2、GL-7mからGL-13mまでを層3と呼ぶこととする。

水平方向、鉛直方向ともに、地盤バネにはバイリニア型の非線形性を考慮し、そのパラメータは道示に基

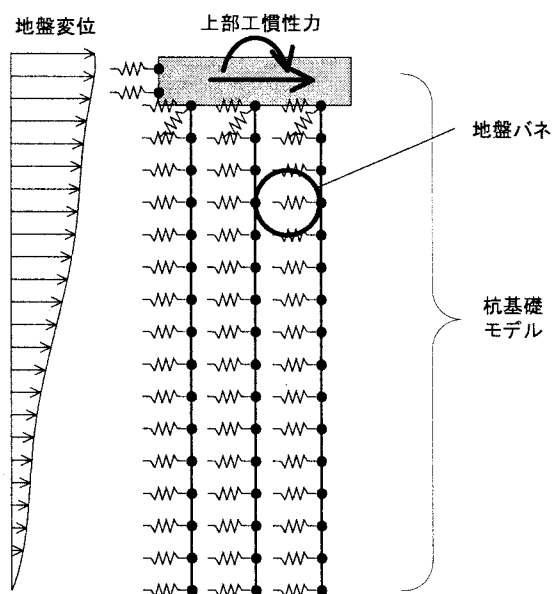


図-1 応答変位法のご概図

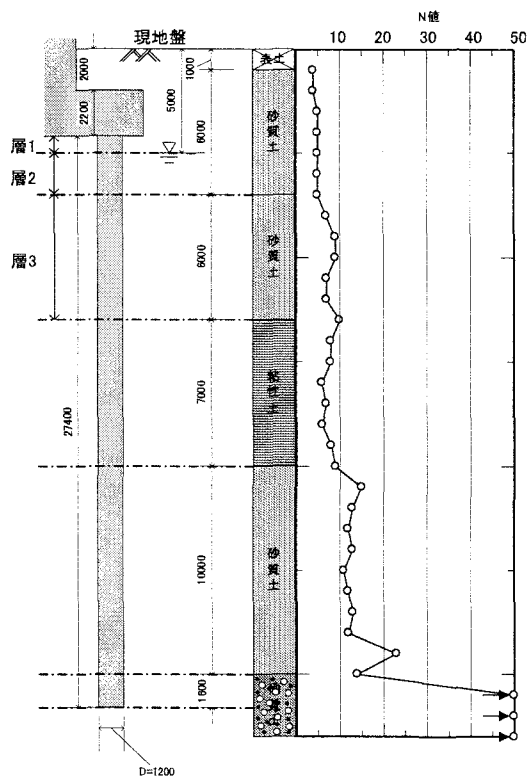


図-2 土質柱状図

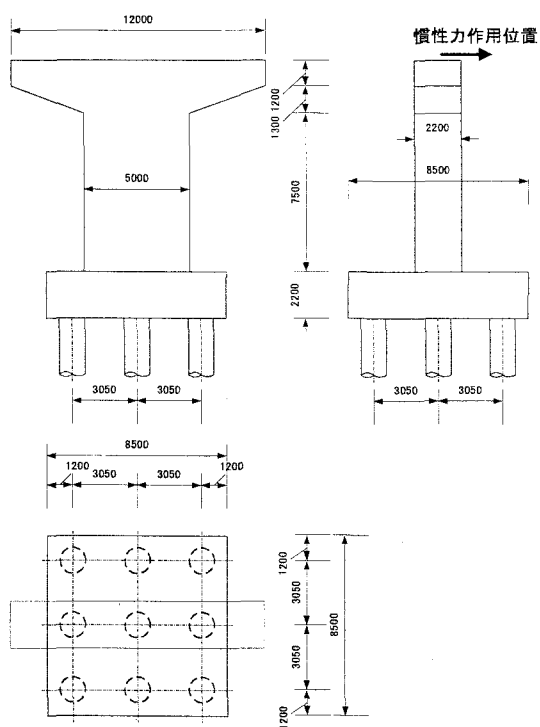


図-3 解析対象橋梁の橋脚

づいて算出したものを用いた。ただし、水平方向の地盤バネについては、フーチング天端以深に配置した。また、液状化層における土質定数の低減係数 D_E は層2で0、層3で1/10とした。

杭基礎は杭径1.2m、杭長27.4mのRC場所打ち杭であり、3列×3本の配列となっている。杭体の非線形

表-1 解析ケース

ケース名	慣性力	地盤の平均せん断ひずみ	地盤変位の分布形状	外力の載荷順序	フーチング前面抵抗	層1の水平抵抗	層3の D_E
基本ケース	あり	2.5%	直線	同時	考慮	考慮	1/10
ケース1	あり	0%	直線	同時	考慮	考慮	1/10
ケース2	なし	2.5%	直線	同時	考慮	考慮	1/10
ケース3	あり	2.5%	直線	慣性力→地盤変位	考慮	考慮	1/10
ケース4	あり	2.5%	直線	地盤変位→慣性力	考慮	考慮	1/10
ケース5	あり	5.0%	直線	同時	考慮	考慮	1/10
ケース6	あり	2.5%	余弦の1/4周期	同時	考慮	考慮	1/10
ケース7	あり	2.5%	直線	同時	無視	考慮	1/10
ケース8	あり	2.5%	直線	同時	無視	無視	1/10
ケース9	あり	2.5%	直線	同時	考慮	考慮	0
ケース10	あり	2.5%	直線	同時	考慮	考慮	1/3

性はトリリニアでモデル化した。ただし、杭体の非線形性が卓越し、計算不能となる解析ケースを少なくするため、杭体の耐力およびじん性に余裕を持たせた。すなわち、杭の主鉄筋径をD22からD25に変更するとともに、鉄筋の段落しをなくすこととした。

杭基礎に作用させる地盤変位の大きさは、兵庫県南部地震において実際に液状化が生じたポートアイランドの強震観測記録を参考に決めた。すなわち、観測波形から算出した液状化層の最大平均せん断ひずみが強軸方向で約2.5%程度であったことから、本研究においても液状化層のせん断ひずみを仮に2.5%とした。非液状化層のせん断ひずみはゼロとし、各層の変位分布が直線状であると仮定して深度方向に積分し、求めた変位分布を地盤の振動変位として与えた。この場合、地表面変位の値は20cmとなる。

対象橋梁のうち、耐震設計上の地盤面以上の位置には、道示のレベル2地震動に相当する設計水平震度を作用させた。また、地盤変位と慣性力は、最終的に両者が同時に所定の値となるよう、静的非線形解析の各増分ステップにおいて、一定の割合で増加させることによって与えた。

(2) 解析ケース

表-1に解析ケースを示す。各ケースの解析条件のうち、網掛け部が基本ケースと異なる。本研究では、計算結果に対する慣性力と地盤変位の寄与、慣性力と地盤変位の載荷順序の影響、地盤変位の大きさ・分布形状の影響、ごく表層の地盤の水平抵抗の影響および土質定数の低減係数の影響に関して、パラメータスタディによる検討を行った。

3. 解析結果

(1) 計算結果に対する慣性力と地盤変位の寄与

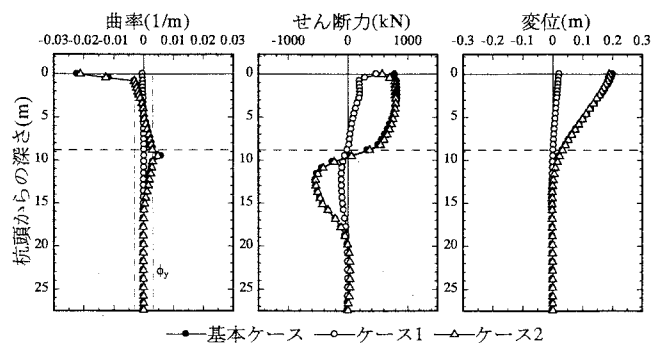


図-4 計算結果に対する慣性力と地盤変位の寄与

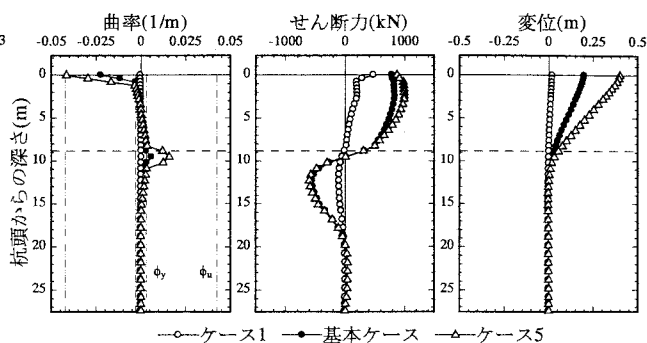


図-6 地盤変位の大きさの影響

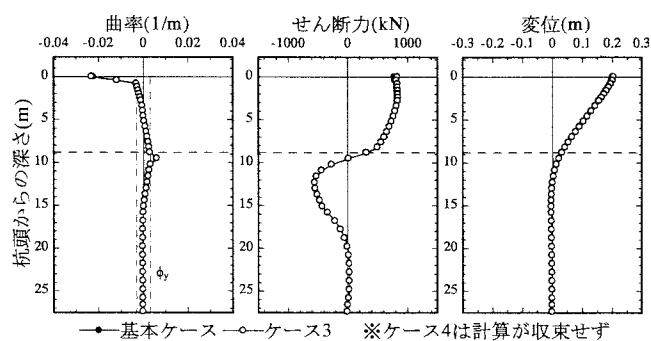


図-5 地盤変位と慣性力の载荷順序の影響

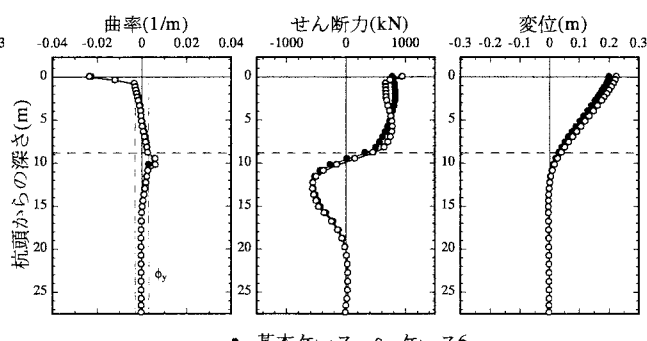


図-7 地盤変位の分布形状の影響

まず、杭基礎に対する2つの外力である慣性力と地盤変位のそれぞれの計算結果に対する寄与について調べた。解析結果を図-4に示す。

慣性力と地盤変位の両者を作用させる基本ケースと、地盤変位のみを作用させるケース2では、計算結果にほとんど差が見られない。一方、慣性力のみを作用させたケース1は、他の2ケースに比べて杭の曲率、せん断力および変位は極めて小さい。このことから、本解析の条件の下では、地盤変位の影響が計算結果に対して支配的であるといえる。

(2) 慣性力と地盤変位の载荷順序の影響

レベル2地震動に対する設計時に解くべき問題は非線形問題であるため、2つの外力を作用させる場合、作用させる順序によっても得られる解が異なる。この影響について検討した結果を図-5に示す。

慣性力を先に作用させ、その後に地盤変位を作用させたケース3は、両者を同時に作用させた基本ケースと比べ、解析結果にはほとんど差が生じていない。载荷順序は異なるが最終的な力の釣合いが同じであることを考えれば、この結果は当然かもしれない。

一方、地盤変位を作用させた後に慣性力を作用させるケース4では、杭基礎の過大な応答により計算が収束しなかった。これは、地盤変位のみを作用させた段階で、杭頭が大きく非線形領域に入っていたため、後から作用させる慣性力に対して抵抗できなかったことによるものである。

(3) 地盤変位の大きさ・分布形状の影響

液状化層のせん断ひずみ γ を0%としたケース1、2.5%とした基本ケース、5%としたケース5の解析結果を図-6に示す。各ケースにおいて与えた地表面の変位はそれぞれ0cm、20cm、40cmであるが、杭頭の変位は作用させた地表面変位とほぼ一致している。ただし、この一致の度合いは、慣性力や液状化層以浅の地盤の水平抵抗の大きさにも依存すると考えられる。また、地盤変位の大きさの影響は、杭の曲率に対しては液状化層下面付近だけでなく杭頭付近にも顕著に現れ、せん断力に対しては、液状化層から液状化層以深にわたって広範囲に現れていることが分かる。

次に、地盤変位の分布形状を直線状とした基本ケースおよび余弦の1/4周期分としたケース6の解析結果を図-7に示す。この場合、図中に破線で示す液状化層底面付近において、杭の曲率に若干の差が見られる。これは、与える地盤の変位分布が急激に変化する点に杭の曲げが集中したことによるものである。また、液状化層底面以浅において杭の変位に差が生じているが、杭の変位は曲率の二回積分であることから分かるように、この差は液状化層底面付近における曲率の差が累積した結果である。

(4) ごく表層の地盤の水平抵抗の影響

図-2における地下水位以浅のごく表層の地盤は、フーチング周辺の埋戻し材の不均質性や長期安定

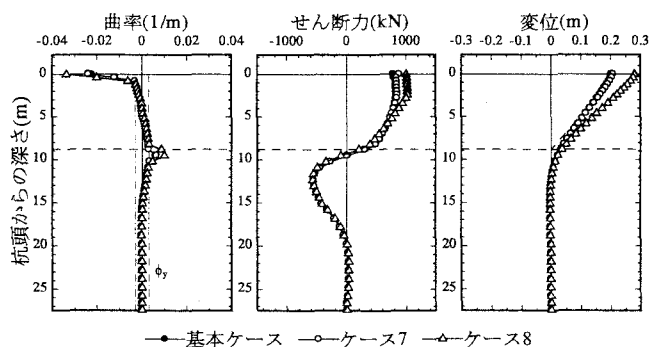


図-8 ごく表層の地盤の水平抵抗の影響

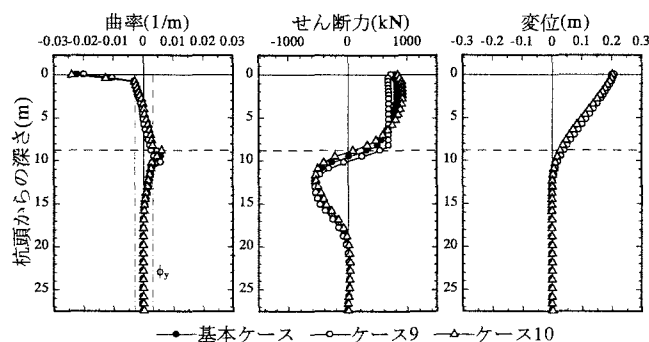


図-9 土質定数の低減係数の影響

の問題等により、設計上での取り扱い方が難しい。また、応答変位法でこのような土層の水平抵抗を考慮することは、慣性力に対する抵抗として必ずしも作用するわけではなく、地盤変位の影響を伝達する媒体となり、外力となることもある。ここでは、厚さ2.2mのフーチングの前面抵抗と厚さ80cmの層1の有無が計算結果に及ぼす影響について検討した。解析結果を図-8に示す。

基本ケースおよびフーチング前面の水平抵抗のみを無視したケース7には、杭の断面力、変位ともにほとんど差が生じていない。しかし、フーチング前面の水平抵抗と層1の水平抵抗を無視したケース8では、他のケースに比べて杭の曲率、せん断力および変位が1.2～1.5倍程度大きくなっている。これは、ごく表層の水平抵抗が得られないため、慣性力に対する抵抗として寄与しなかったことによるものである。(1)節で述べたように、本解析の条件の下では、地盤変位の影響が計算結果を圧倒的に支配しているかのように見えたが、ごく表層の水平抵抗の取り扱い方によっては、計算結果に対する慣性力の感度が大きくなる。

(5) 土質定数の低減係数 D_E の影響

応答変位法の計算結果は、2つの外力の設定とモデルに与えるパラメータのバランスによって決まる。したがって、現行道示における地盤パネの設定方法をそのまま応答変位法に準用することができない可能性がある。ここでは、 D_E の変化が計算結果に及ぼす影響

について検討した。図-9に解析結果を示す。

ケース9、10では、層3の土質定数の低減係数をそれぞれ0、1/3としたが、いずれのケースを比べても、計算結果にほとんど差が生じていない。ただし、本解析では液状化層を挟む上下の土層が杭の変形を拘束するように作用しているため、液状化層の中では、杭と地盤の相対変位が生じにくい。液状化層の D_E が計算結果に対して感度を持たないのはこのためであり、例えば、地表面まで液状化が生じる河床のような地盤条件の下では、 D_E が計算結果に及ぼす影響は大きくなるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、液状化地盤中の橋梁基礎に対する応答変位法において、計算方法や各パラメータが計算結果に及ぼす影響について検討するためのパラメータスタディを行った。本研究により得られた結果を以下に示す。

- 1) 本解析のように、ごく表層の地盤の水平抵抗を考慮した場合、計算結果に対して地盤変位の影響が支配的となる。この場合、杭頭変位は与える地表面変位とほぼ一致し、液状化層の D_E は計算結果に対して影響を及ぼさなくなる。
- 2) 液状化層以浅の地盤の水平抵抗は、抵抗または外力のいずれとして作用する場合もあるが、材料の不均質性や長期安定の面から評価が難しい。しかし、応答変位法の計算結果に与える影響は大きく、その評価は重要である。
- 3) 応答変位法の計算結果は、外力の载荷順序や与える地盤変位の分布形状にも依存する。

当然のことながら、外力となる地盤変位や慣性力自体の設定方法も応答変位法による計算を行う上で重要であり、今後の研究における重要な検討課題である。

5. 謝辞：本研究で用いたポートアイランドの強震観測記録は、神戸市みなと総局よりご提供いただいた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2002.3
- 2) 白戸真大：基礎の耐震設計法，基礎工，pp.49-56，2002.6
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2002.4
- 4) 谷本俊輔，杉田秀樹，高橋章浩，林和幸：液状化時の地盤変位を考慮した橋梁基礎の耐震性能照査法に関する試算検討，液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム発表論文集，pp.185-188，2004.12
- 5) 日本道路協会：6.地震時に不安定となる地盤がある場合の設計計算例，道路橋の耐震設計に関する資料，1997.3