

杭基礎の地震時挙動に関する考察

久納淳司¹・松尾浩二¹・大塚久哲²・比江島慎二³

¹学生員 九州大学工学部建設都市工学科 (〒812福岡市東区箱崎6-10-1 tel:092-642-3268)

²フェロー 工博 九州大学工学部建設都市工学科 (〒812福岡市東区箱崎6-10-1 tel:092-642-3266)

³正会員 工博 九州大学工学部建設都市工学科 (〒812福岡市東区箱崎6-10-1 tel:092-642-3268)

平成8年の道路橋示方書の改訂により基礎構造に対しても地震時保有水平耐力法による耐震設計が規定された。本研究では杭基礎－地盤系の地震時挙動を、自然地盤の応答変位を考慮した動的解析により明らかにし、杭基礎の深さ方向曲げモーメント等に関し、道路橋示方書の解析モデルによる静的解析との比較を行い、さらに地震時保有水平耐力法により規定された設計水平震度、応答塑性率について考察する。

Key Words : *dynamic behavior of soil-long pile system, ductility factor, Design Ultimate Horizontal Strength*

1、目的

平成8年の道路橋示方書¹⁾の改訂で地震時保有水平耐力法による耐震設計が杭基礎を含む多くの基礎構造に対して規定された。本研究では地震時保有水平耐力法により定められたタイプⅠ及びタイプⅡの設計水平震度を作用させたときの杭基礎の応答を求め、つぎにタイプⅠ及びタイプⅡレベルに修正した地震波形による自然地盤の応答変位を考慮した動的解析を行い、その結果を杭の深さ方向曲げモーメント、応答塑性率などで比較、検討を行うものである。

2、静的解析

(1) 静的解析モデル

静的解析モデルは、地盤の抵抗特性、杭体の曲げ特性を取り込んだ非線形フレームモデルである。フーチングは剛体とし、杭頭部分はフーチングに剛結とした。杭の軸方向抵抗特性、杭周辺地盤及びフーチング前面地盤の水平抵抗特性は弾塑性型とする。杭体の曲げモーメント-曲率関係には杭体が鉄筋コンクリートであるためトリリニア型を用いた。水平方向及び鉛直方向地盤バネは道路橋示方書の下部構造編よりN値から求め、その上限値は耐震設計編における地震時土圧より求めた。また橋脚および上部構の慣性力によって生じる曲げモーメントMの作用方向

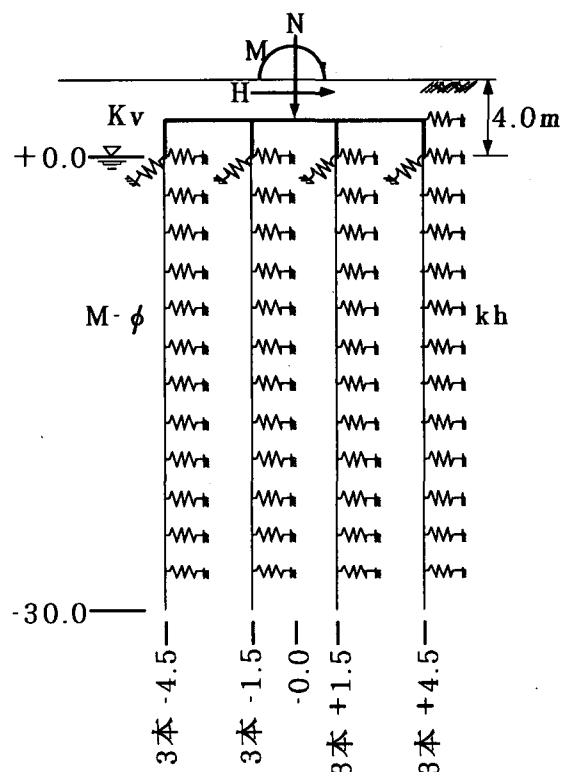


図-2.1 静的解析モデル（数値は単位 m）

により、押し込まれる杭と引き抜かれる杭とがあるが、押し込まれる杭の方に初期軸力として鉛直方向死荷重を、押し込み杭本数で除した値を考慮した。図-2.1 にそのモデル、表-2.1 に地層構成と土質定数を示す。

表-2.1 地層構成表

地層	層厚 (m)	平均N値	ϕ (deg.)	C (tf/m ²)	γ (tf/m ³)	γ' (tf/m ³)
埋土	4.0	-	-	-	-	-
粘性土	10.0	2	0	2	1.7	0.8
粘性土	14.0	8	0	8	1.8	0.9
砂質土	4.0	16	31	0	1.9	1.0
砂質土	2.0	50	42	0	2.0	1.1

また耐震設計上の地盤種別を求める式よりⅢ種地盤であることがわかる。

(2) 解析方法

地震時に作用する上部構造及び橋脚の慣性力を、フーチング重心位置に静的に漸増荷重として作用させる。水平力 H 、曲げモーメント M とすると、

$$H = W_U + 0.8(W_P + W_F) \quad (2.1)$$

$$M = W_U h_0 + 0.8W_P \left(\frac{h_P}{2} + h_F \right) + 0.8W_F \frac{h_F}{2} \quad (2.2)$$

ここで、 W_U 、 W_P 、 W_F はそれぞれ上部構造、橋脚、フーチングの重量(tf)。 h_0 、 h_P は耐震設計上の地盤面から上部構造慣性力作用位置及びフーチングの高さ、 h_F は下部構造躯体の高さである。この水平力 H 、曲げモーメント M にタイプⅠの設計水平震度1.0、タイプⅡの設計水平震度1.5を乗じた荷重を作用させたときの杭体及び上部構造慣性力作用位置での応答を見る。ここでⅢ種地盤におけるタイプⅠ、Ⅱの設計水平震度は、道路橋示方書耐震設計編より求めた。また杭基礎の降伏状態の判定は道路橋示方書の規定に従い、すべての杭体が降伏する場合とした。杭体の降伏の判定は曲げモーメントー曲率関係より判断した。

3、動的解析

(1) 動的解析モデル

動的解析を行うに当たり、バネー質点系モデルでは群杭の影響をうまく取り入れられないこと、また計算時間の短縮を考え、単杭の多質点系モデルで解析を行った。モデルを図-3.1に示す。

杭体の曲げ特性には静的解析と同じく非線形性を考慮し、トリリニア型の曲げモーメントー曲率関係を用いた。フーチングには回転バネがとりつけてあり、その値は参考文献²⁾により算出した。地盤の相互作用バネは道路橋示方書の耐震設計編より次式で求めた。

$$k_H = k_{H0} \left(\frac{B_H}{30} \right)^3 \quad (3.1)$$

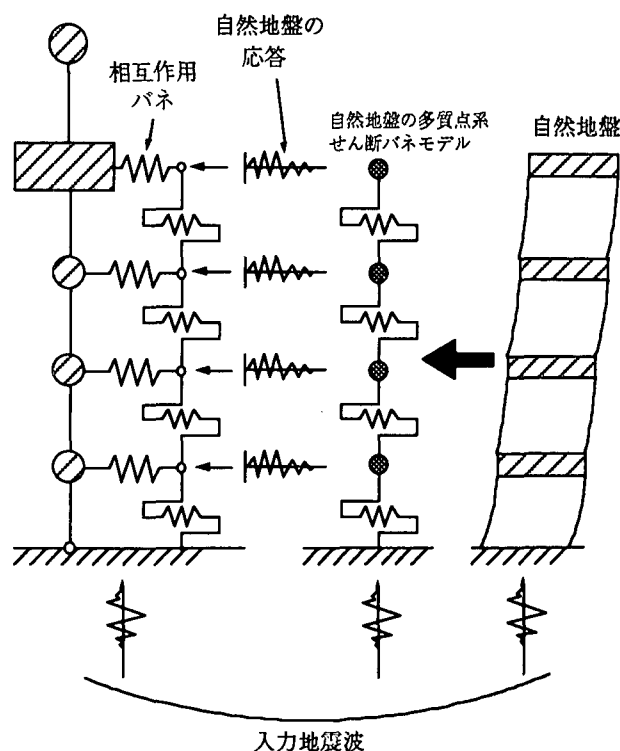


図-3.1 動的解析モデル

ここで、 B_H は荷重作用方向に直交する基礎の換算載荷幅である。 k_H が収束するまで繰り返し計算を行うことによって求めた値を相互作用バネ定数として用いた⁴⁾。その上限値は道路橋示方書耐震設計編の地震時受動土圧とした。フーチング及び橋脚は剛体とし、杭頭部分はフーチングに剛結とした。また減衰定数は、杭体0.2、相互作用バネ0.1、せん断バネ0.1、フーチングにとりつけた回転バネ0.1、フーチングおよび橋脚は0.1とした。

(2) 解析方法

まず解析の対象となる地盤を多質点系せん断バネモデルに置き換え、動的解析に用いるのが適当とされているタイプⅠおよびタイプⅡの地震波形を作用させ、このときの各質点位置での応答を時刻歴の変位として求める。このせん断バネの非線形特性には、R-Oモデルを用いた³⁾。このとき得られた変位を自然地盤の応答変位として、動的解析モデルの各節点に相互作用バネを介して入力を行う。相互作用バネの非線形特性にはH-Dモデルを用いた。それと同時にタイプⅠおよびタイプⅡの地震波形を解析モデルに作用させ、その時の杭体の応答および上部構造慣性力作用位置での変位を見る。杭体の降伏状態の判定には曲げモーメントー曲率関係より判断した。

(3) 入力地震波

検討対象地盤がⅢ種地盤であるので、タイプⅠでは[1983 TSUGARU BRG.TR]、タイプⅡでは[1995

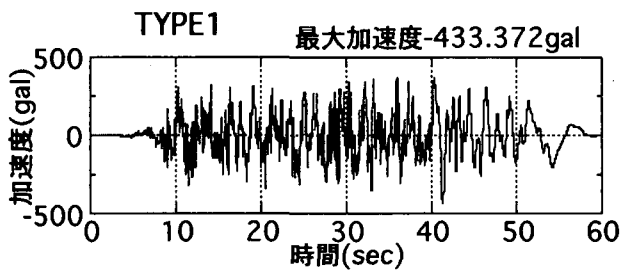


図-3.2 1983 TSUGARU BRG.TRの時刻歴波形

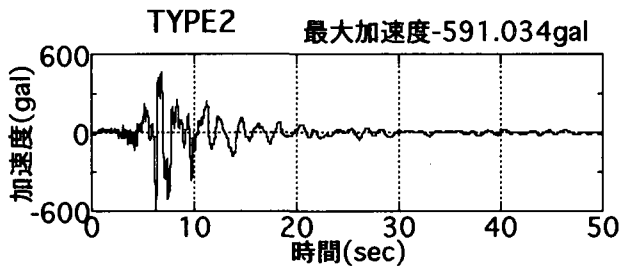


図-3.3 1995 HEPC HIGASHI KOB N12Wの時刻歴波形

HEPC HIGASHI KOB N12W]を用いた。図-3.2,3.3にその波形を示す。タイプⅠに用いる地震波は、プレート境界に生じる海洋性の大規模な地震を想定したものであり、タイプⅡは内陸直下型地震を想定したものであるため、この2つの地震波形はかなり違った性質を持っている。また地震波の作用時間は、タイプⅠで60(s)、タイプⅡで25(s)である。タイプⅡで地震波の後半部分を使わないのは、図-3.3より後半は長周期振動であり、直接積分法などでは結果が発散してしまうためである。

4. 結果の比較

(1) 静的解析の結果

図-4.1に上部構造慣性力作用位置での水平震度 k_h —水平変位 δ を表す。この結果によれば、降伏点以前で明らかに剛性の低下が生じているが、道路橋示方書では全杭降伏状態を基礎の降伏とみなしているため、それ以前に杭体に降伏が生じ剛性が低下していることをよく表す結果となっている。またすべての杭体において最初に降伏するのは杭頭部であった。また上部構造慣性力作用位置における降伏変位は0.105mとなった。基礎が降伏に達するときの水平震度は図より0.734で、基礎の応答塑性率を算出する場合のタイプⅠの設計水平震度0.67(減衰定数別補正係数 $c_p=2/3$)より大きく、基礎は弾性域にあると判断され、応答塑性率は算出できないが、同じくタイプⅡの設計水平震度1.0($c_p=2/3$)に対しては降伏震度より大きいため、基礎が塑性域にあり、応答塑性率が1.43と計算される。

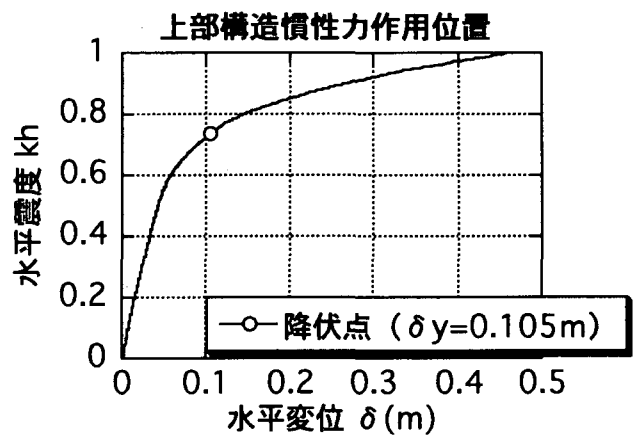


図-4.1 静的解析による k_h — δ 曲線

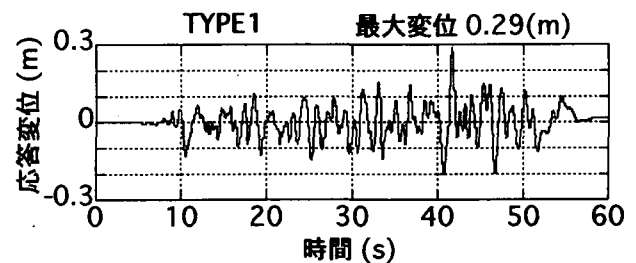


図-4.2 上部構造慣性力作用位置における応答変位(タイプⅠ)

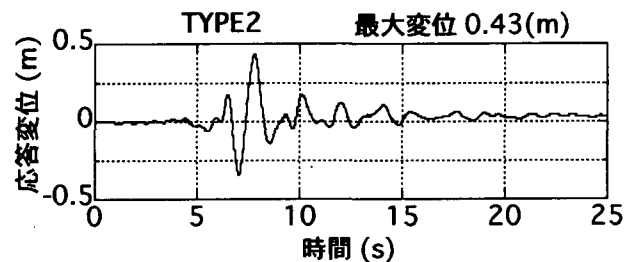


図-4.3 上部構造慣性力作用位置における応答変位(タイプⅡ)

表-4.1 応答塑性率の比較

方法		応答塑性率
静的解析	タイプⅠ	—
	タイプⅡ	1.43
動的解析	タイプⅠ	2.76
	タイプⅡ	4.10

(2) 動的解析の結果

図-4.2, 4.3にタイプⅠおよびタイプⅡの地震入力を行ったときの上部構造慣性力作用位置における応答変位を示す。ここで、最大応答変位はタイプⅠで0.290m、タイプⅡで0.433mとなった。

(3) 応答塑性率による両結果の比較

表-4.1に応答塑性率での比較を示す。静的解析については道路橋示方書の規定に従い、動的解析についてはその最大変位を静的解析で求めた降伏変位で除した値を用いた。タイプⅠ地震動に対しては、静的解析では応答塑性率が1.43であるのに対し、動的解

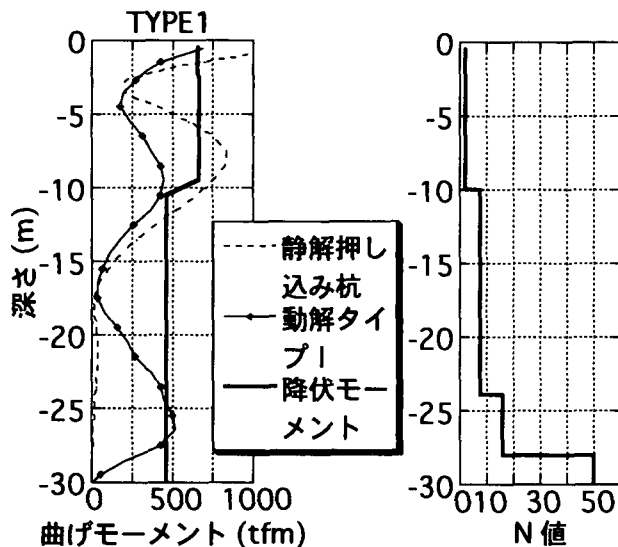


図-4.4 杭の深さ方向曲げモーメント分布 (タイプ I)

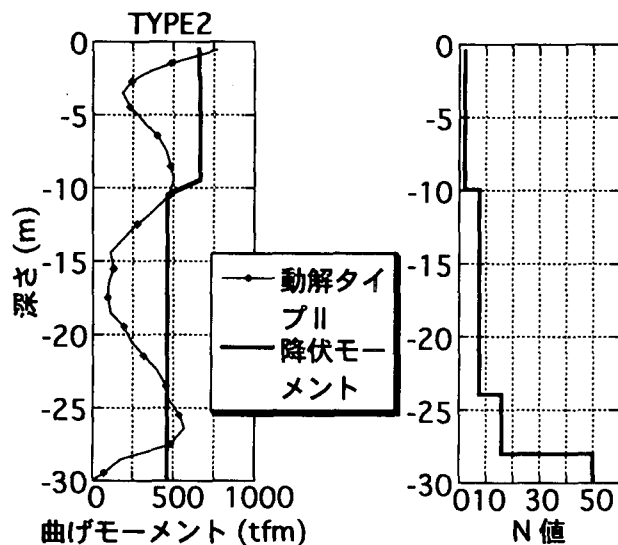


図-4.5 杭の深さ方向曲げモーメント分布 (タイプ II)

析では応答塑性率4.10が求められている。このように動的解析結果は静的解析結果より大きくなっており、合理的な設計のためには動的解析による安全性の照査が必要であることを示している。

(4) 深さ方向曲げモーメントによる両結果の比較

図-4.4にタイプ I の時、図-4.5にタイプ II の地震力を作用させたときの結果を示す。静的解析の押し込み杭は、引き抜き杭に比べて応答が大きいの、押し込み杭は引き抜き杭に比べて応答が大きいの、押し込み杭で静的解析の杭体の応答を代表させた。また降伏モーメントも押し込み杭での値である。これらの図から、地層の変わり目付近で両解析法とも曲げモーメントの値が増大しているのがわかる。また杭先端付近での曲げモーメントについては、静的解析と動的解析で大きな差が生じている。杭先端付近において、静的解析では非常に小さい曲げモーメ

ントを示しているが、動的解析ではタイプ I、タイプ II の両方で降伏に至っているのがわかる。これは、静的解析のモデル化では、杭先端部において杭体に生じる曲げモーメントを表現できないことを示している。

また静的解析では、杭頭付近および杭中間付近において、かなり大きな曲げモーメントが発生しているが、動的解析の結果はそれほど小さく、その部分では必要以上に大きな曲げモーメントを想定した結果となっている。

5. おわりに

本文では、杭基礎の静的解析と動的解析の結果の比較を中心に述べた。動的解析については相互作用パネ定数や解析方法など、様々な方法が存在するためこの結果が唯一であるとはいえないが、定性的な判断材料にはなりうると考えられる。また本文では示せなかったが、動的解析においてタイプ I、タイプ II の両方ともに橋脚が非線形域に入ることが確認できた。よって、橋脚の塑性化によるエネルギー吸収を想定した基礎構造の地震応答解析の必要性があると考えられる。

謝辞：本研究を行うに当たって、有益な討議をいただいた、(株)建設技術研究所 松井謙二氏、五瀬伸吾氏、澤田吉孝氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編、V 耐震設計編、1996
- 2) 土木学会：動的解析と耐震設計 [第2巻] 動的解析の方法、p277、技報堂出版、1989
- 3) 土木学会：新体系土木工学 18 土の力学 (Ⅲ)、技報堂出版、1981
- 4) 矢作、和田、五十嵐、五瀬：橋梁下部構造物の耐震設計、p66~68、山海堂、1996