

地盤と構造物の動的相互作用を考慮した 杭基礎の耐震設計法に関する研究

岩上 憲一¹・大塚 久哲²・久納 淳司³

¹正会員 九州大学大学院工学研究科後期博士課程

(株)構造技術センター福岡支社(〒812-0011福岡市博多区博多駅前3-5-7)

²フェロー 九州大学大学院工学研究科教授(〒812-8581福岡市東区箱崎6-10-1)

³正会員 新日本製鐵(株)(研究当時:九州大学大学院工学研究科修士課程)

現在、杭基礎の耐震設計では、地盤と構造物の相互作用も含んだ水平震度を用い、杭基礎の耐力を橋脚基部の耐力との関連において照査する設計法が主流となっている。しかし、この手法では、杭に対する上部構造の慣性力の影響(慣性力相互作用)と地盤変位の影響(基礎と地盤の剛性差による相互作用)が明確にされていない。

そこで、本研究では、合理的な杭基礎の耐震設計法の確立を目指し、構造系の慣性力と地盤変位の影響を考慮できる解析手法として地盤と構造物の系全体に地震力を載荷する手法を用い、地盤条件と杭の根入れ比をパラメータとして、等しい入力地震動を想定した静的解析と動的解析の比較を行い、これら諸条件が杭の挙動に及ぼす影響について検討し、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した解析手法の適用性を探る。

Key Word : pile foundation, horizontal strength, soil displacement effect, dynamic interaction

1. まえがき

兵庫県南部地震等の被災事例を踏まえて、杭基礎においても合理的な設計法の確立が望まれている。現行指針における杭基礎の耐震設計では、周辺の地盤を非線形バネ、杭体を弾塑性体にてモデル化し静的な水平力をフーチング下端に作用させ、杭頭の水平変位、杭体の降伏、終局耐力、靱性率などを、橋脚下端の耐力との関連において照査する設計手法が主流となっている。この場合の地震力は、上部構造や橋脚の慣性力が杭体に及ぼす影響(慣性力相互作用)を主体とし地盤変位が杭体に及ぼす影響(基礎と地盤の剛性差による相互作用)を含んだ水平震度として与えられている。既存の研究では、杭基礎のように基礎の剛性が比較的柔らかいものは地盤変位が杭体に及ぼす影響は小さいとなっているが、地盤の状態、杭の形状などが異なった場合、あるいは直下型地震の場合、その影響の程度は明確にされていない。

そこで、本研究では、杭周面地盤や先端地盤、杭の根入れ比などをパラメータとして、等しい入力地震動を想定した静的解析と動的解析を行い、これらの諸条件が杭の挙動に及ぼす影響について検討す

るとともに、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した解析手法の適用性を探っている。

2. 解析条件およびモデル

(1)解析条件

解析に用いた構造物は橋梁の橋脚-基礎系であり、その形状は図-1に示すとおりである。

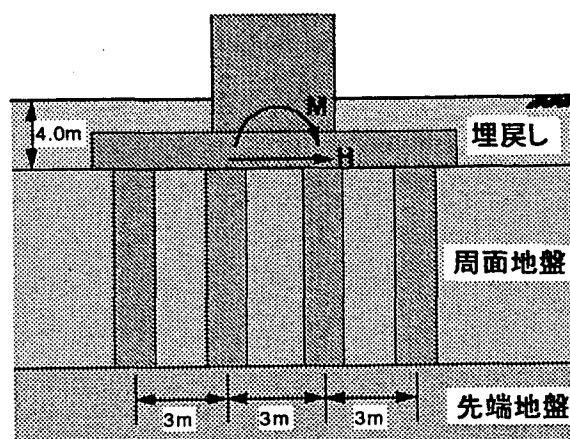


図-1 形状概要図

表-1 地盤概要

位置	地盤概要	N 値	変形係数 E_0 (*10 ¹ kN/m ¹)
周面	軟弱粘土	2	14
	緩い砂質土	15	105
	締まった砂質土	30	210
先端	先端無視	---	---
	砂質系地盤 ($q_d=3000\text{kN/m}^2$)	>30	300
	風化花崗岩	---	2000

表-2 周面地盤と先端地盤の組み合わせ

		周面地盤		
		N=2	N=15	N=30
先端地盤	摩擦杭 $E_0 = 0\text{kN/m}^2$	-----	○	○
	支持杭 $E_0 = 30000\text{kN/m}^2$	○	○	○
	支持杭 $E_0 = 200000\text{kN/m}^2$	○	○	○

表-3 根入れ比の違いによる検討ケース

	case1	case2	case3	case4	case5
杭長 L(m) (L/D)	9.0 (7.5)	12.0 (10)	18.0 (15)	24.0 (20)	30.0 (25)

地盤条件は杭周面と先端地盤に分け、それぞれ3ケースを想定し、組み合わせとして8ケースの地盤(表-1,2)を想定した。杭については、杭径をφ1200に固定し根入れ長を変化させ計5ケース(表-3)を想定した。

入力地震動は、基盤とみなせる地点で観測された、東神戸大橋(EW)-33m、神戸ポートアイランド(EW)-32m、及び(EW)-83mの3波とした。

(2)動的解析モデル

図-1に示した橋脚及び基礎を基に作成した本研究モデルの概要を図-2に示す。本解析モデルは、自然地盤の変位を別途求め、その変位を相互作用パネを介して杭体に作用させるものである。このようにモデル化すると、地震時に杭体が地盤変位により受ける影響を考慮することができ、同時に同じ地震動を構造系に入力することで、上部構造や橋脚など、構造系の慣性力による影響も合わせて考慮できる。すなわち、本解析モデルは、構造系の慣性力による相互作用と、基礎の剛性と地盤変位による相互作用を同時に考慮でき、地盤と構造物の動的相互作用を考慮した解析が可能である。

なお、今回の解析においては、自然地盤の復元力特性は Ramberg-Osgood モデルを、相互作用パネ及

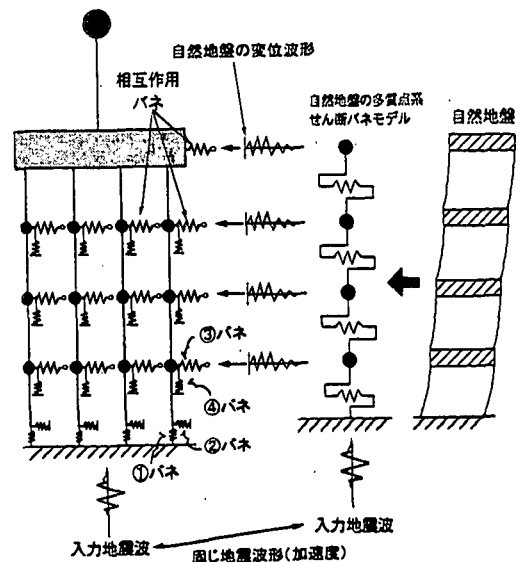


図-2 動的解析モデル

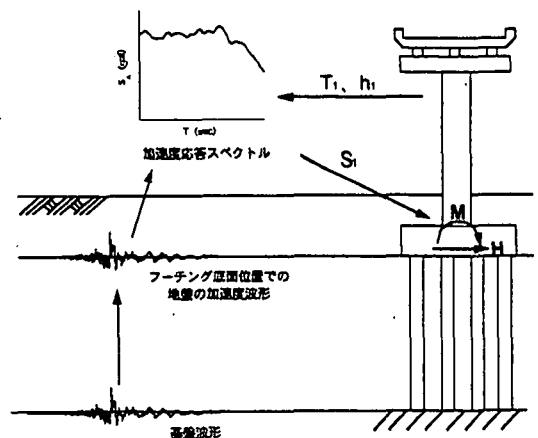


図-3 設計水平震度の考え方

び図-2に示す③、④パネの復元力特性は地盤耐力の上限値を考慮するため Hardin-Drnevich モデルを、同図①、②パネは引き抜きの影響を考慮できるバイリニアモデルを使用している。また、杭体及び橋脚躯体は曲げ破壊先行型のトリリニア型(武藤モデル)とし、M-φ曲線で定義している。

(3)静的解析モデル

静的解析では、図-3に示すように動的解析で利用したのと同じ地震波形を用い、フーチング下面位置での自然地盤の加速度波形から、周期 T_1 、減衰 h_1 (ともにフーチングより上部の構造系の1次の固有周期とモード減衰)における加速度応答スペクトルを算出し、設計水平震度 K_h を求める。この設計水

平震度が橋脚躯体及び上部構造に作用するものとし、フーチング底面位置に生じる水平力 H 、曲げモーメント M を漸増荷重¹⁾として作用させる。杭のモデル化は、図-2に示すものと同じである。

なお、静的解析においては、道路橋示方書²⁾などに示される杭体及び地盤の鉛直抵抗を一つのバネで置き換えた非分離モデルを用いた解析も追加して検討している。

3. 解析結果

(1) 杭先端地盤の影響

図-4に杭先端地盤の違いによる曲げモーメントの分布を示す。文献3)に示される静的解析の結果では、先端地盤の影響が杭の水平変位に大きく影響を与えていたが、今回の結果では、先端地盤が変化しても静的解析、動的解析ともほとんど影響がないことがわかる。これは、文献3)に示される基礎の降伏震度に比べ、今回算定した震度の方が小さかったためである。

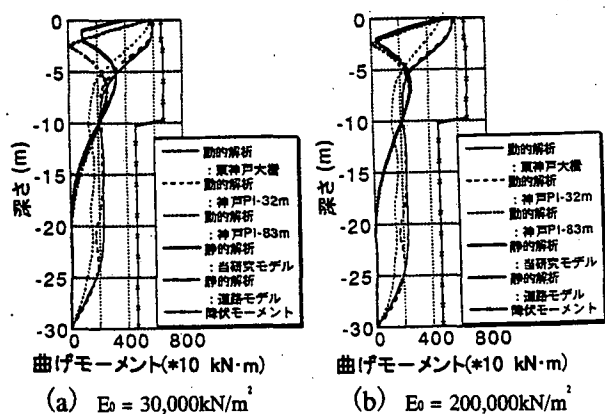


図-4 先端地盤の違いによる曲げモーメントの深度分布

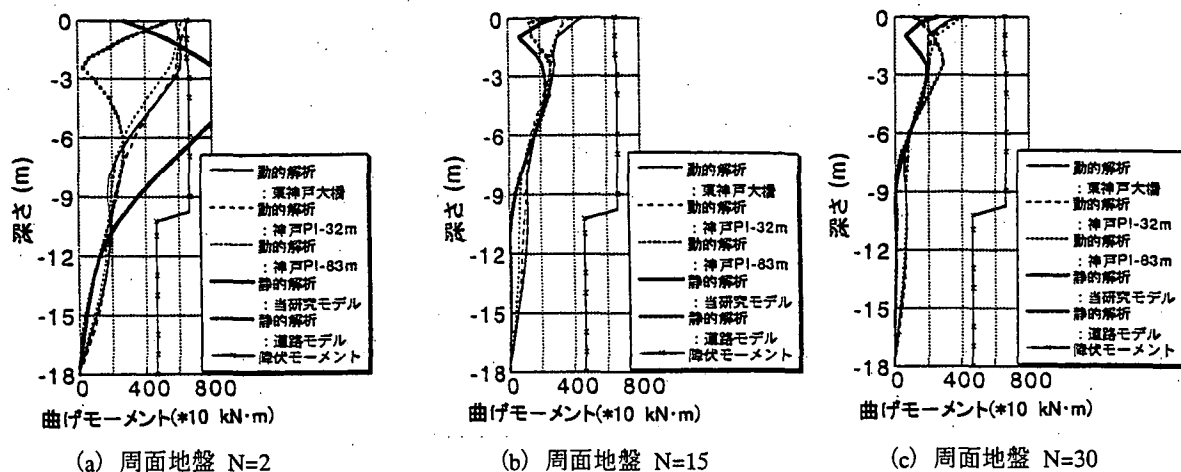


図-5 周辺地盤の違いによる曲げモーメントの深度分布

($L/D=15, E_0 = 30,000 \text{ kN/m}^2$)

(2) 周辺地盤の影響

図-5に周辺地盤種類ごとの曲げモーメントの深度分布を示す。深度方向の曲げモーメントは、周辺地盤が弱くなるにつれ動的解析、静的解析とも大きくなっており、さらに杭頭部付近の曲げモーメントが動的解析に比べ静的解析の方がかなり大きくなっていることがわかる。これは、動的解析の場合、地盤変位の影響により杭頭部ではある程度抑制の方向に働いており、地盤変位の影響が無い静的解析の場合抑制効果も現れないと解釈できる。

(3) 杭の根入れ長の影響

図-6に杭の根入れ長ごとの曲げモーメントの深度分布を示す。静的解析では、ほぼ同一の最大値と分布を示すのに対し、動的解析では根入れ長が大きくなるに従って地中部の曲げモーメントが増加しているのがわかる。これは、地盤の変位の影響であり、動的解析においては地盤変位を考慮しているため杭の根入れが大きくなればなるほど杭への影響が大きくなる。一方、静的解析ではその影響を考慮できないためほぼ同一の杭変形を杭頭部で呈するものと解釈できる。

(4) 逸散減衰の影響

図-7に減衰値の違いによる杭の曲げモーメントの深度分布を、図-8に杭頭及び上部工慣性力作用位置の水平変位の推移を示す。振動エネルギーが地下へ逸散して失われる現象を相互作用バネの減衰定数をパラメータとして行った解析では、杭頭変位や杭体に生じる曲げモーメントに及ぼす影響はほとんどないが、上部構造の応答に大きく影響を与えることがわかった。

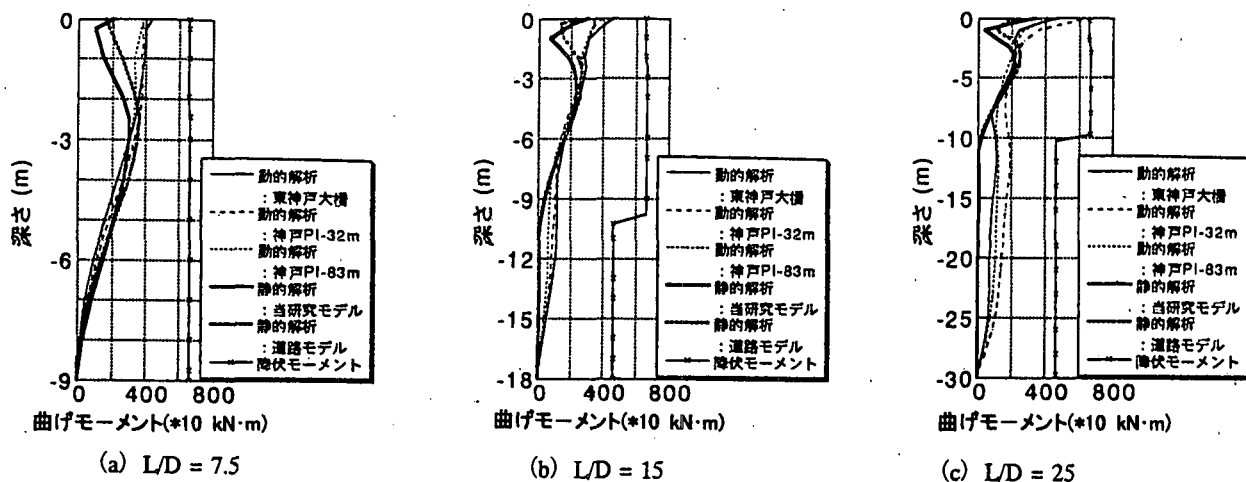


図-6 杭の根入れ比別曲げモーメントの深度分布
($N=15, E_0 = 30,000 \text{ kN/m}^2$)

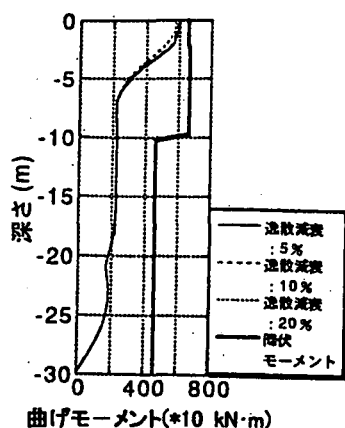


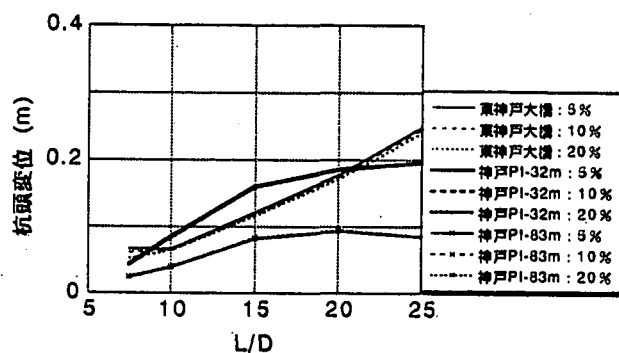
図-7 減衰値の違いによる杭体に生じる曲げモーメントの分布
($N=2, L/D=25, E_0 = 30,000 \text{ kN/m}^2$)

4. まとめ

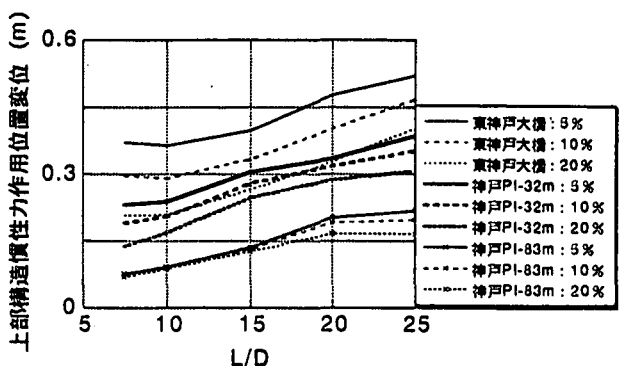
動的相互作用の影響を考慮した設計手法の適用性について検討を行った結果、現在までに判明したことを以下に示す。

(1) 静的設計では考慮できない地盤変位が、杭の断面力にかなりの影響を与える。特に、地中部の曲げモーメントの増加が著しく、実際の設計においては、杭の断面変化などにこの影響を考慮する必要があると思われる。

(2) 基礎（ここでは杭基礎）と上部構造を一体解析する場合、相互作用による逸散減衰の影響が上部構造に与える影響がかなり大きいため、減衰定数の的確な評価が必要である。



(a) 杭頭変位-根入れ比



(b) 上部構造慣性力作用位置の変位-根入れ比

図-8 減衰値の違いによる変位
($N=2, E_0 = 30,000 \text{ kN/m}^2$)

参考文献

- (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997.3
- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、1996.12
- 大塚・久納・岩上：地盤の鉛直方向抵抗力のモデル化が杭基礎の水平抵抗力に及ぼす影響、構造工学論文集 Vol.45A, 1993pp1583-pp1590