

大規模地震時における地盤変位が 道路橋の杭基礎に与える影響

山崎俊樹¹・田嶋仁志²・石田高啓³・友光宏実⁴・吉澤努⁵

¹ 首都高速道路公団, 工務部 設計技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)
E-mail: yamazaki.to@mex.go.jp

² 首都高速道路公団, 工務部 設計技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)
E-mail: tajima.h@mex.go.jp

³ 首都高速道路公団, 民営化推進局 民営化調整課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)
E-mail: ishida.t@mex.go.jp

⁴ 大日本コンサルタント, 構造事業部 構造計画室 (〒343-0851 越谷市七左町 5-1)
E-mail: tomomitsu@ne-con.co.jp

⁵ 大日本コンサルタント, 構造事業部 解析技術室 (〒343-0851 越谷市七左町 5-1)
E-mail: yoshizawa@ne-con.co.jp

従来の杭基礎の耐震設計では、地震の影響として構造物の慣性力の影響のみを想定しており、地盤の変位の影響は無視されてきた。1995年兵庫県南部地震による大規模な橋梁の被害を契機に、基礎の地震時保有水平耐力法による大規模地震に対する照査が規定されたが、地震時の地盤変位の影響を考慮することは注釈レベルで言及されているのみであり、明確な規定とはなっていない。しかし、軟弱地盤では大規模地震時に表層地盤の変位が数十 cm ~ 1m 程度、地盤ひずみも数%のオーダーとなることがあると知られており、また、地中部での地盤剛性の急変部では基礎に局部的に大きい断面力が作用することも懸念される。このため、橋梁基礎の地震時挙動に地盤変位がどのように影響するのか、現在検討が進められている。

本検討では、表層地盤厚 60m 程度の軟弱地盤を対象に、地震時の地盤変位が杭基礎の地震時の応答に与える影響を、応答変位法と動的解析により検討した。その結果、本検討の対象橋梁のように、軟弱地盤中に深く根入れされる場合には基礎の変位は地盤変位に支配され、杭体が降伏する可能性があるが、動的解析による検討から橋の安全性に致命的な損傷とはならないことが確認された。

Key Words: *Pile Base, Ground Displacement, Dynamic Analysis, Ductility Design*

1. はじめに

地震時保有水平耐力法による基礎の耐震性能照査では、基礎に作用する荷重として、橋脚から伝達される上部構造・橋脚躯体の慣性力、フーチングの慣性力などを考慮することとしている¹⁾。これは、道路橋の構造特性上、上部構造の死荷重が大きく、また重心位置が高いため、上部構造の慣性力による水平力、転倒モーメントが、基礎頭部における部材の破断、耐力低下などの基礎の安定に大きな影響を及ぼす損傷を引き起こすおそれがあると考えられるためである。

このほかに、基礎に作用する地震の影響としては、

基礎周辺地盤の振動による変位があるが、道路橋示方書では、基礎周辺地盤の振動の影響はこれまで考慮されてこなかった。平成14年の示方書改訂において、第V編¹⁾に地震の影響として「地震時地盤変位」が追加されたが、具体的に地盤変位を設計にどのように反映させるかまでは言及されていない。

これまでの被災事例や解析事例²⁾から、根入れが深く比較的柔な部材で構成される基礎である杭基礎では、L2地震のように大きな地震動を考えると、地盤の振動変位の影響により部材に大きな断面力が生じる場合があると報告されている。

しかし、道路橋の基礎の耐震設計では、地震時に生じる地盤の振動変位の影響はまだ考慮されていない

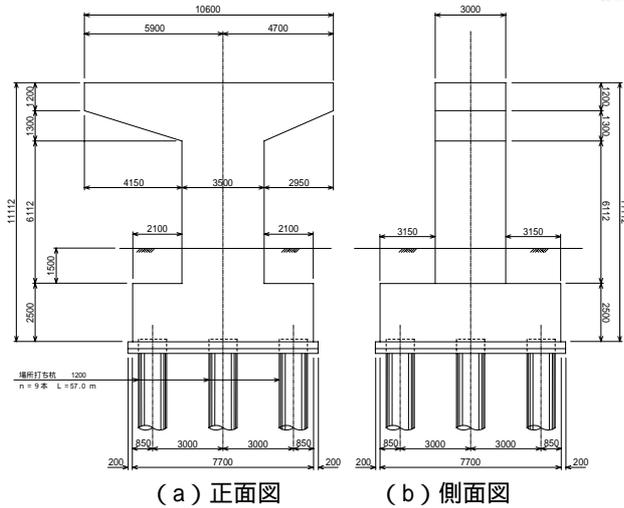


図-1 構造一般図

震時に対する応答値を解析し、地盤変位が杭基礎に与える影響を検討した。

2. 検討対象

解析対象は、図-1 に示すような軟弱地盤（道路橋示方書における種地盤）に設置される道路橋のT型RC橋脚の杭基礎を選定した。基礎は1.2mの場所打ち杭を3列×3列の9本とし、杭長は57mである。地盤条件は図-2 および表-1 のように、軟弱層が60mほど堆積している軟弱地盤である。

対象橋脚および杭基礎は、平成8年版道路橋示方書³⁾により震度法によりL1地震に対する設計がなされており、地震時保有水平耐力法によりL2地震に対する設計がなされている。ここでは、構造系が対称な橋軸方向について検討を行った。

3. 地震時保有水平耐力法による検討

地震時保有水平耐力法による解析は、道路橋示方書^{1),3)}に示された手法である静的な荷重増解析により行った。

解析モデルは応答変位法と共通な図-3 に示す2次元骨組モデルとするが、地盤バネの先端は固定とし、地盤変位は入力しない。橋脚柱およびフーチング、杭は梁要素でモデル化し、フーチング前面および杭前面の地盤はバネでモデル化した。橋脚は線形梁要素としたが、杭はM - 関係を考慮した非線形梁要素とした。

杭の曲げ耐力は軸力の影響により変化する。道路橋示方書³⁾では耐力の軸力相関を簡易的に表わす手法が示されているが、ここでは解の精度を向上させ、応答変位法および動的解析との整合を図るために、軸力を変化させて杭のM - 関係を算出し、杭の曲げ耐力 - 軸力 (M - N) 相関曲線を作成し、解析時はこれを直接参照して杭の損傷状態を判定した。

地盤バネのモデル化は、地盤反力係数および地盤反力の上限值をもとに、バイリニア型のバネとして設定した。ここで、砂質土の地盤反力の上限值は、最前列以外の杭では道路協会の計算例⁴⁾に準じて0.5倍とした。

検討に用いる地震動はL2地震とし、地震動のタイプは対象橋梁の固有周期(0.52秒)における設計水平震度 $k_{hc}^{1)}$ が卓越するタイプを用いた。

構造物に作用する慣性力は、耐震設計上の地盤面より上にある上部構造、橋脚躯体、フーチングについて考慮した。慣性力は図-4 に示すように漸増载荷した。図の縦軸における記号 k_{hc} 、 k_{hg} 、 k_{hp} は、各々道路橋示方書¹⁾における橋の設計水平震度、地表面の設計水平震度、橋脚の降伏震度を表している。フーチングに作用する震度は最終ステップで k_{hg} (本橋では0.6)に達するよう単調に漸増させる。一方、上部構造および橋脚柱部に作用する震度は最終ステップで k_{hc} (本橋では1.5)となるよう漸増させる途中で橋脚基部の降伏震度 k_{hp} (本橋では0.75)

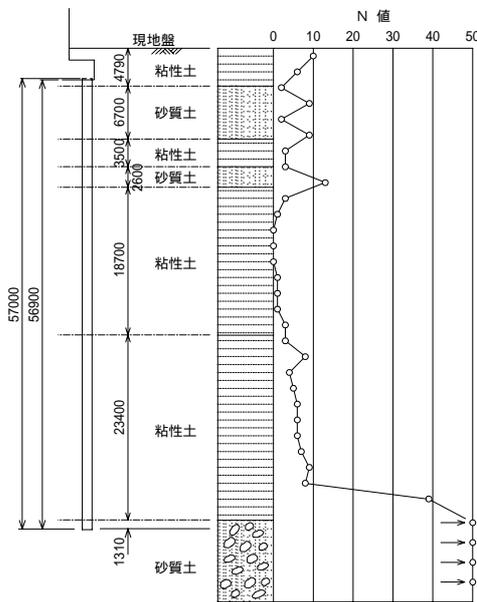


図-2 地質柱状図

表-1 地盤条件

層番号	深度	層厚	層種	土質	平均N値	単位体積重量 (tf/m ³)	せん断波速度V _{si} (m/s)
1	4.79	4.79	Bs	粘性土	6	1.65	181.7
2	11.49	6.70	Yus1	砂質土	6	1.85	145.4
3	14.99	3.50	Yuc2	粘性土	2	1.65	126.0
4	17.59	2.60	Yus1	砂質土	6	1.85	145.4
5	36.29	18.70	Yuc2	粘性土	2	1.65	126.0
6	59.69	23.40	Nac	粘性土	7	1.70	191.3
7	基礎			砂質土	50	1.80	300.0

1)3). これは、地震時の地盤の振動変位を得るために必要な基礎入力動の設定や、地盤・基礎の解析モデル、照査値などに関して、解決すべき課題が多いことによると考えられる。

そこで、地震時の地盤変位が大きいと思われる軟弱地盤に設置される杭基礎を対象に、地震時保有水平耐力法、応答変位法、動的解析などによりL2地

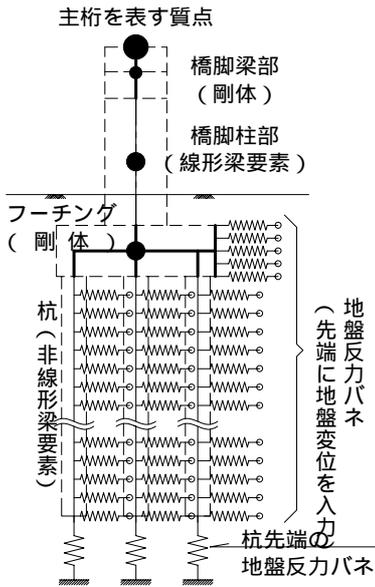


図-3 解析モデル

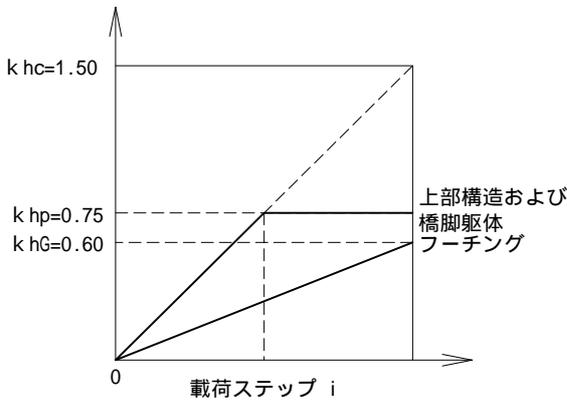


図-4 漸増荷重(地震動タイプ)

に達した時点で一定値となるものとする。

解析結果および考察は後述の応答変位法による検討結果と合せて述べる。

4. 応答変位法による検討

応答変位法による解析は、地震時保有水平耐力法における解析モデルの各々の地盤バネの先端に、深度ごとの自由地盤の変位を強制変位として入力することにより、地盤変位の影響を付加した。

ここで、砂質土の地盤反力の上限値は、最前列以外の杭では0.75倍とした。

地盤の応答変位は重複反射理論による次元応答解析(SHAKE)により算出した。入力地震動はL2地震タイプの種地盤に対する標準波¹⁾とし、これを地表面に入力して地震波の引き戻し計算を行った。標準波は3波形用意されているが、杭に与える地盤変位はこれら3波による最大応答値の平均値を用いた。地盤変位は、軟弱地盤であることから、地表面で約74cmの値を示した。

慣性力と地盤変位の組み合わせ方法は、構造物と地盤の

固有周期をもとに鉄道構造物等設計標準⁵⁾に従って決定した。橋の等価固有周期は0.518秒、地盤の固有周期は3.81秒であり、相互作用を考慮した補正係数は上限値 $u=1.0$ 、下限値 $l=0.0$ と算出される。ここから、荷重ケースは以下の3ケースを想定した。地震時保有水平耐力法による解析結果はケース1に該当する。

ケース1：構造物の慣性力のみを載荷
(=3章の地震時保有水平耐力法)

ケース2：慣性力と同方向に倍率1で地盤変位を載荷

ケース3：地盤変位のみを倍率1で載荷

解析結果より、杭の変位図を図-5に示す。ケース2および3では杭体の変位は地盤変位に追従したものであり、杭と地盤との相対変位は最大でも10cm以下であった。

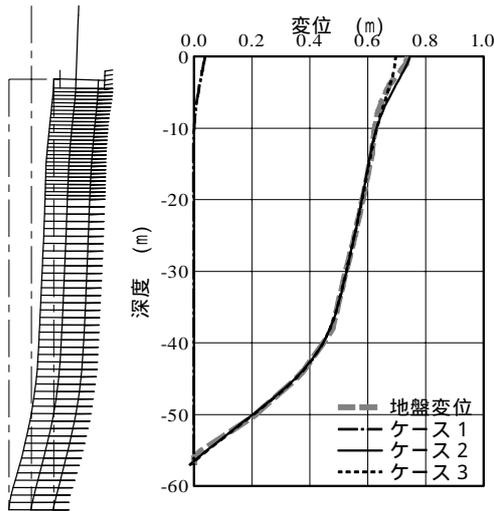
杭の発生断面力を図-6に示す。図は橋脚柱直下の第2列杭について作図している。

杭の発生曲げモーメントは、いずれの解析ケースでも杭頭部で大きい値を示しており、地盤変位を考慮する場合でも地震時保有水平耐力法と同様、杭頭近傍の断面力が設計上クリティカルであることが示されている。

杭頭から深度20m以深では、地盤変位を考慮しないケース1、地震時保有水平耐力法では曲げモーメントがほとんど生じないが、地盤変位を考慮するケース2および3では、深度40m付近で大きい値を示している。これは、地盤変位に追従して杭が変形した結果として生じた断面力であるため、ケース2と3ではほぼ同じ値であり、いずれも降伏耐力に達している。しかし、鋼材が降伏することで杭の剛性が低下し、断面力は過度に大きくなり、終局耐力には達していない。

杭の曲げ耐力は軸力によって変動するため、地震時に引抜きが生じている杭と押し込みが生じている杭とでは耐力が異なり、発生断面力も異なったものとなる。軸力の影響を受ける杭の断面力図を図-7に示す。杭の発生曲げモーメントの分布形状は図-6と類似しているが、押し込み側の杭は圧縮軸力の影響により耐力が増し、地中部に生じる断面力に対し降伏せずに弾性応答に留まっている。一方、引抜き側の杭では深度10m以深において曲げ耐力が極端に低下し、発生曲げモーメントが終局耐力を上回っている。

杭の発生せん断力は、図-6に示すようにケース1の地震時保有水平耐力法では深度20m以深でほとんど生じていないが、解析ケース2および3では地中部で有意に生じている。特に、深度55mの杭の最下端部でせん断力が大きく、せん断耐力をわずかに上回っている。これは、基盤に根入れした部分が杭の変形を拘束することに起因する。せん断耐力の発生部位が根入れ長、すなわち杭径の1~2倍の領域であることから、この部位には梁理論で算出したせん断力がそのまま生じるとは限らないため、要素の解析上のせん断力の値が杭基礎の破壊を即表すものではないと考えられる。この解析結果から基盤と軟弱な表層地盤の境界のように地盤剛度が急変する領域では、杭の断面力が大きくなる可能性が示唆されている。



(a)最大変形図(ケース2) (b)変位の深度分布
図-5 応答変位法による杭基礎の変位

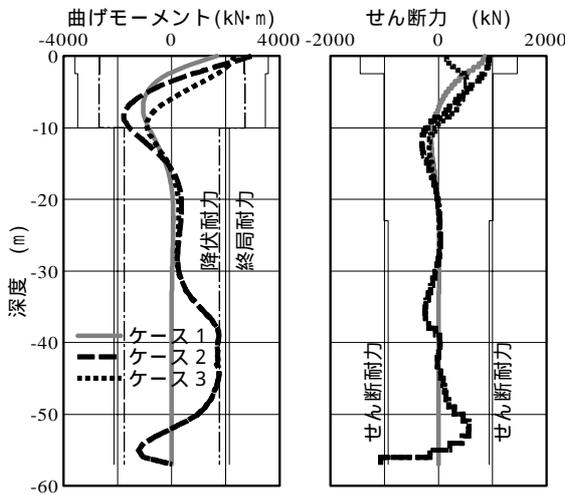


図-6 応答変位法による杭の断面力分布

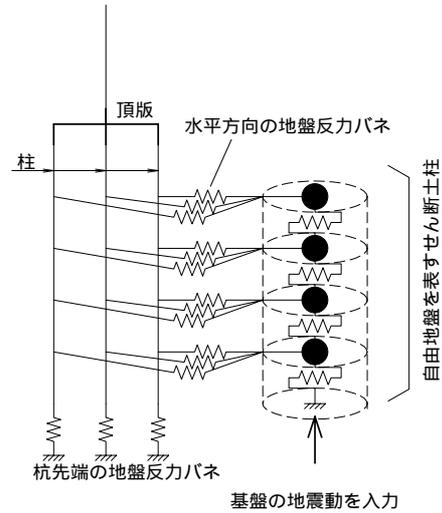
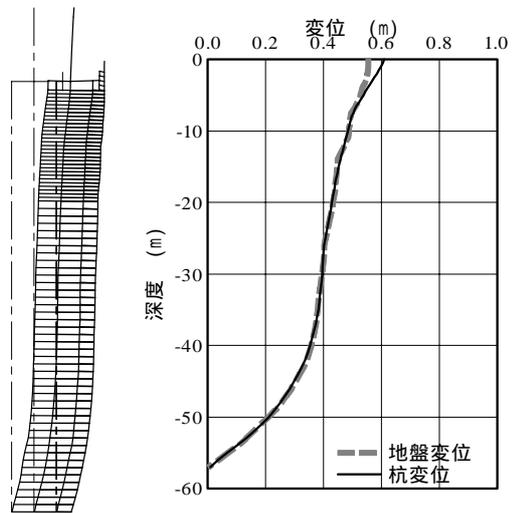
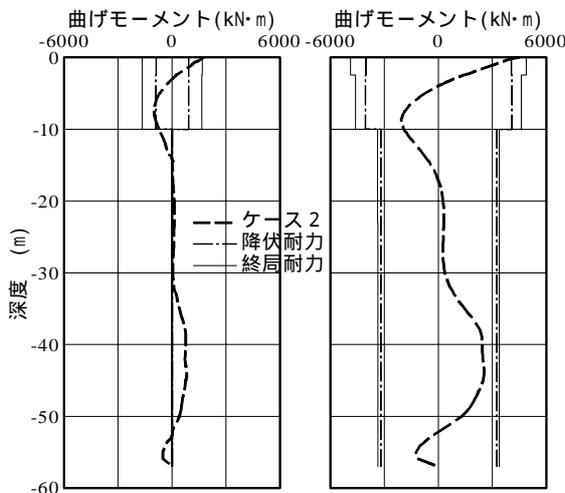


図-8 動的解析モデル



(a)最大変形図 (b)変位の深度分布
図-9 動的解析による杭基礎の変位



(a)引抜き側杭 (b)押し込み側杭
図-7 ケース2における杭の発生曲げ

5. 動的解析による検討

動的解析における解析モデルは、図-8に示すように、応答変位法に用いる骨組みモデルに自由地盤の振動を表わすせん断土柱モデルを付加した、ペンゼンモデルとした。せん断土柱の各質点間を繋ぐバネは地震時の非線形性を修正R-Oモデルにより再現した。地盤および杭基礎、橋脚の非線形応答による履歴減衰は解析上自動的に考慮されることから、それ以外の減衰の影響をRayleigh型の減衰マトリックスにより考慮するものとし、振動数と減衰定数の関係は0.5Hzに対し0.02、5Hzに対し0.05となるように定数の値を設定した。

入力地震動はL2地震タイプの種地盤に対する標準波3波のうち「1」を用い、応答変位法における地盤変位算出時に算定した基礎引き戻し波を、せん断土柱モデルの底面から入力した。

解析結果より、杭基礎の応答変位を図-9に示す。杭基

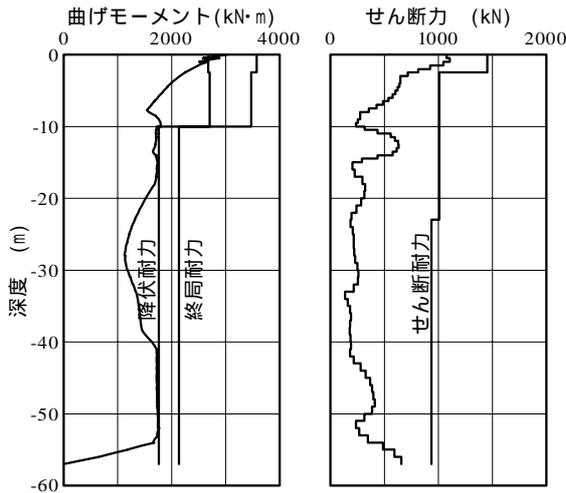


図-10 動的解析による杭の断面力分布

礎の応答変位は応答変位法におけるケース2およびケース3の結果と同様に、杭頭部付近を除いて杭の変位は地盤の変位に一致しており、地盤の変形に杭が追従している。

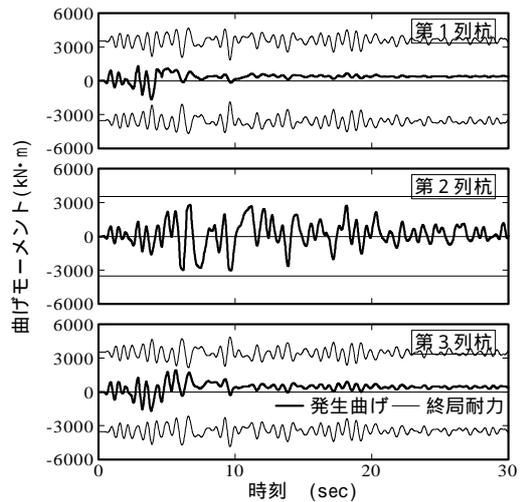
第2列杭の発生断面力を図-10に示す。曲げモーメントは杭頭部、杭頭から深度10mの段落し位置付近、深度40~50m位置で大きく、降伏耐力に達している。しかし、断面力は降伏耐力を大きく超えることはなく、終局耐力には達していない。せん断力は全ての位置でせん断耐力を下回っている。

杭に生じる曲げモーメントの時刻歴波形図を図-11に示す。第1列および第3列杭は軸力が時刻ごとに変動するため、曲げ耐力の値も変動している。杭頭部では、耐力の軸力変動を考慮しても発生曲げモーメントは終局耐力を下回っている。

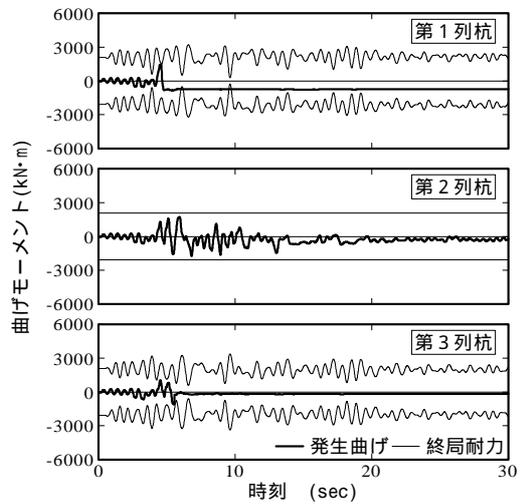
地中部では、引張軸力の影響により終局曲げモーメントが極端に低下する時刻があり、その際、第1列杭、第3列杭ともに発生曲げモーメントが終局耐力を上回っている時刻がある。しかし、本検討では杭の終局状態は圧縮側コンクリートの限界ひずみにより定義しており、杭に引張軸力が生じている状態では中立軸が圧縮縁に極端に近くなることから、終局時の杭の損傷状況は鋼材の塑性伸びと、コンクリートの局所的な圧壊であると推定される。

引張軸力作用時の杭の地中部における応答曲率は最大で 0.0067m^{-1} であった。この曲率に対し鉄筋に生じる曲げ引張ひずみは0.3%程度と算定され、破断伸びに達するにはまだ余裕があると考えられる。また、コンクリートの圧壊は局所的であるため、軸力が圧縮側に転じた際には、杭は十分な耐力を保有していると考えられる。これらから、地中部での杭の損傷は橋の機能に致命的な影響を与えるものではないと判断される。

6. 考察



(a) 地表面



(b) 杭頭から深度43m

図-11 杭の発生曲げモーメントの時刻歴図

表-2 解析手法による応答値の比較

タイプ	最大変位 (m)			杭の最大曲げ(kNm)
	上部構造	杭頭	地盤	
地震				
保耐法	0.077	0.034	-	1669
応答変位	0.831	0.782	0.761	4304
動的解析	1.093	1.065	1.048	3012

(1) 解析手法の違いによる結果の相違

解析手法ごとの応答値を表-2に比較して示す。

地震時保有水平耐力法では、構造物の応答変位が8cm程度であり、杭の曲げモーメントも最も小さい。

応答変位法では、構造物の変位が地盤の変位に支配されており、80cm近い変位が生じている。また、杭の曲げモーメントは4304kNmと保耐法の2倍以上の値となっており、解析対象とした基礎では杭頭の耐力に余裕があったため杭頭部の照査に問題が生じていないが、ケースによっては応答変位法の照査により杭の断面が決定される可能性が生じる。

動的解析でも応答変位法同様構造物の変位が地盤の変位に支配されており、最大変位は 1m 以上と応答変位法を上回っている。しかし、杭の曲げモーメントは 3012kNm と約 3/4 に低減されている。

応答変位法では、鉄道構造物等設計標準⁵⁾に従い慣性力と同方向に地盤変位量を当倍で重ね合わせた解析を行っているが、断面力に対しては安全側の荷重条件となっていると考えられる。また、動的解析では杭の断面力と耐力が軸力の影響により刻々と変化するため、断面力が終局耐力を超えることがあっても、その時間はほんのわずかである。

杭の断面力の値から、今回のような軟弱地盤層が厚く堆積する地盤条件においては、地盤と構造物の相互作用を的確に再現できる解析により、杭基礎の耐震設計に地盤変位の影響を考慮することが望ましい。照査方法は、応答変位法の場合安全側となる傾向があるため、動的解析を行うのが望ましいと考えられる。

(2) 杭の限界状態に関する考察

動的解析に対する照査結果より、今回検討した杭基礎はレベル2地震に対し限定的な損傷に留まり、十分な耐震性能を有すると判断される。しかし、杭に生じた損傷は地中部であることから、地震後の点検および補修が極めて困難であり、補修限界状態としては、杭基礎の許容できる損傷レベルは、地上部における鉄筋コンクリート構造物より厳しくするべきという考え方もとることができる。このような考え方に基づいて限界状態を定める場合、今回検討対象としたような軟弱地盤の杭基礎では、地中部での鉄筋の段落しを行わないなどの対策が必要となると考えられる。

逆に、地中部では杭の曲げ損傷が大きく生じても杭体が座屈することは考えられない。例えば、杭の曲げ耐力が負勾配域にあっても、軸力を伝達することができれば、

構造物の保有性能は被災後の緊急の使用に耐え得るものと期待される。この考えに基づくのであれば、杭基礎の設計において地盤変位の影響は特に配慮する必要はない。

このように相反する要素があるため、杭の限界状態の設定については、なお一層の議論が必要である。

7. おわりに

軟弱地盤における杭基礎を対象に、応答変位法と動的解析により、地盤変位を考慮した解析を行い、レベル2地震に対する耐震性の検討を行った。検討結果より、道路橋示方書に従って地震時保有水耐力法による耐震性照査を行った杭基礎は、地盤変位の影響を考慮する場合、応答変位法による照査を満足しなくても動的解析を適切に行うと耐震性を満足する場合があることが分かった。今後は、地盤の剛性が杭の中間部で硬～軟と急変するような地盤でも杭の局所的な損傷が生じると考えられ、多様な地盤条件に対する杭基礎の地盤変位の影響について、検討ケースの蓄積が必要と考えられる。今回の解析ケースが今後の杭基礎の耐震設計において参考となれば幸いである。

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，2002.3.
- 2) 地盤工学会，土木学会 etc: 阪神淡路大震災調査報告，1998.6.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 下部構造編，2002.3.
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.3.
- 5) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計，1999.10.

(2003. 6. 30 受付)

Effect on Pile Base of Highway Bridge Caused by Ground Displacement at Major Earthquake

Toshiki Yamazaki, Takahiro Ishida, Hitoshi Tajima, Hiromi Tomomitsu, Tsutomu Yoshizawa

The ground displacement is omitted at the conventional seismic design of pile base of highway bridge. Since the 1995 Hanshin Awaji big earthquake disaster, The ductility design method of the bridge foundation is employed, but the details of the treatment of the ground displacement is not described on the seismic code. It is known that the displacement of the ground is reached to 1m-order at the soft ground with major earthquake. And it is known that the local bending occurred at the border of the stiffness differential layers. The studies of the seismic design of bridge foundation are carried out to research the effect of the ground displacement caused by major earthquake.

In this study, the effect on the seismic response of a pile base caused by the seismic ground displacement of the 60m thick soft ground is estimated. The response of the pile base is dominated by the ground motion, and the pile bending increased toward yielding, and the ductility of the pile are checked with the dynamic analysis. It is thought that the dynamic analysis is required at the design of the pile base on the thick soft ground.