

軟弱地盤上の杭基礎構造物に対する 応答変位法の適用方法に関する一考案

青島 亘佐¹・中野 聡¹・丸山 泉¹

¹正会員(株) 福山コンサルタント(〒136-0071 東京都江東区亀戸2-25-14立花アネックスビル)

1. まえがき

鉄道構造物の特殊地盤での基礎構造物の設計は、地震時に表層の軟弱層に生じる支持層に対する大きな相対変位が基礎構造物に影響を及ぼすと考え、地震時の地盤の水平変位量の影響を考慮した応答変位法での検討を行うことが規定されている。この応答変位法による地震時の部材断面力の算定は、図-1の荷重状態図に示すように構造物の慣性力と地盤変位による荷重を同時に作用させ、かつ図-2に示すように地盤を弾塑性体（バイリニア型）と仮定した静的非線形解析により行わねばならないため、地盤変位を増分させる変位増分法でなければ、厳密な応答変位法の解析結果が得られない。本稿は、杭基礎構造物について変位増分法の検討を行い、他の応答変位法の手法との比較および杭を等価線形部材とした場合と非線形部材とした場合の比較を行った結果について紹介する。

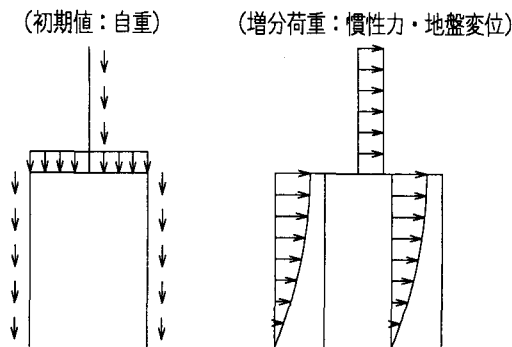


図-1 応答変位法の荷重状態図

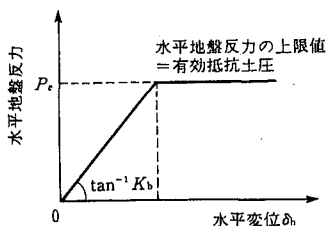


図-2 杭の水平方向地盤抵抗特性

2. 応答変位法の解析手法について

応答変位法の解析手法としては、これまでは主として次の2つが用いられてきた。

① イテレーション法

② 荷重増分法

これに対して、杭体を非線形部材と考慮するために、

③ 変位増分法

が必要となってくる。

この内、イテレーション法は、一括で応答変位法の荷重を載荷するため、杭を非線形部材とした場合の解析には適応しない。また荷重増分法も、厳密には地盤変位を増分と共に有効抵抗土圧を増分させなければならないが、初期設定の段階で地盤変位による荷重全てを上乗せして解析を行わざるを得ないため、イテレーション法と同様に杭を非線形部材とした場合の解析には適応しない。変位増分法は、杭を非線形部材とした場合の解析にも対応しており、地盤の非線形性を最も適切に考慮した解析手法といえる

以下にそれぞれの手法の具体的な解析方法について説明する。

(1) イテレーション法

イテレーション法は、従来から用いられている解析手法であり、図-3に示すように、地盤反力が有効抵抗土圧を越える点をイテレーション法で見つけ、地盤反力と有効抵抗土圧の差を地盤変位と逆方向に荷重として載荷する方法である。

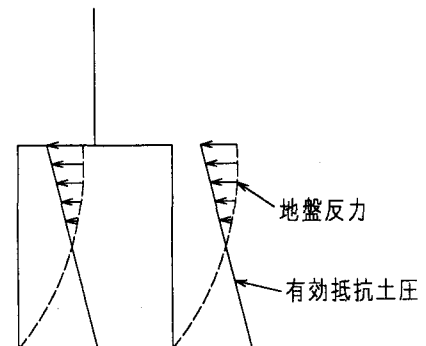


図-3 イテレーション法の解析手法

次に、図-4にイテレーション法のフローを示す。

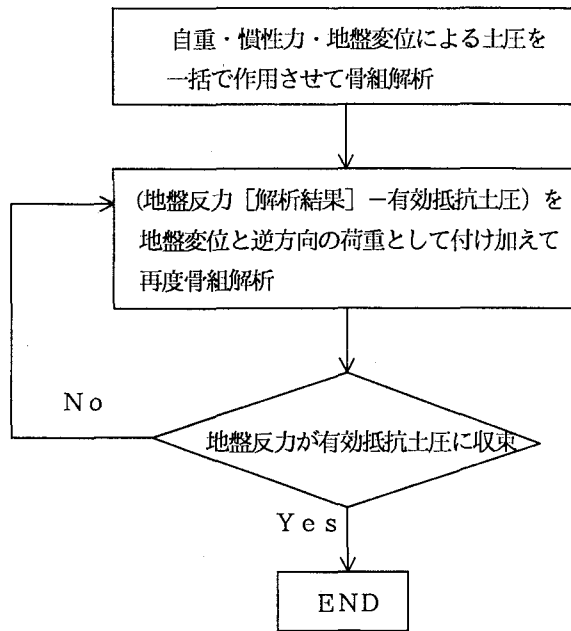


図-4 イテレーション法の解析方法

(2)荷重増分法

荷重増分法は、震度法の検討でも用いられている手法であるが、応答変位法の検討に用いる場合には、地盤変位の影響を有効抵抗土圧に加味せねばならない。

上部工慣性力と地盤変位による土圧に対する地盤反力が有効抵抗土圧以下である状態は式(1)により表される。

$$-Pe \leq Kh \cdot \delta_B - Kh \cdot \delta_A \leq Pe \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 Pe ：有効抵抗土圧

Kh ：水平方向の地盤バネ定数

δ_A ：地盤変位

δ_B ：杭体の変位

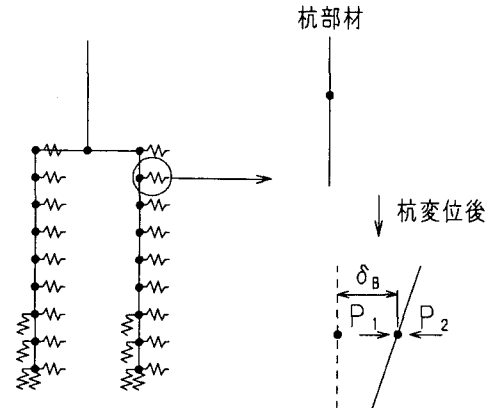
式(1)を変形すると、

$$-Pe + Kh \cdot \delta_A \leq Kh \cdot \delta_B \leq Pe + Kh \cdot \delta_A \quad \dots\dots(2)$$

となる。この式は、杭の変位により生じる地盤反力は、有効抵抗土圧と地盤変位により生じる地盤反力を加えた土圧を越えないことを表している。

図-5に荷重増分法の解析手法について示す。有効抵抗土圧以上の地盤反力が発生すると地盤が塑性化するが、地盤変位による土圧が地盤反力と逆方向に作用しているので、力のつり合い上、地盤反力が地盤変位による土圧の分キャンセルされる。その結果、見かけ上、水平方向の地盤バネの上限値である有効抵抗土圧は、地盤変位による土圧分を上乗せした値となる。ただし、この上乗せ分は、地盤変位の最大値（増分法の最終値）を用いて算出するため、有効抵抗土圧を越えた以降については増分荷重の最終ステップのみしか正

しく表すことができない。そのため、杭を等価線形部材とした場合の解析には適応するが、杭を非線形部材とした場合の解析には、地盤の塑性化の途中段階が問題となるため適応しない。



P_1 ：地盤変位 δ_A による荷重 ($=K_h \cdot \delta_A$)

P_2 ：杭の変位 δ_B に対する地盤反力 ($=K_h \cdot \delta_B$)

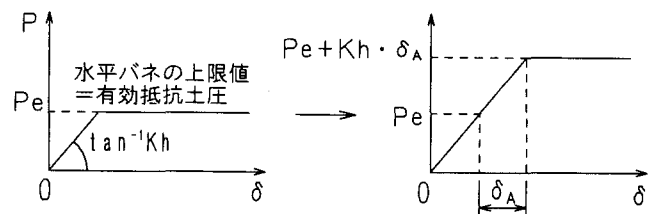
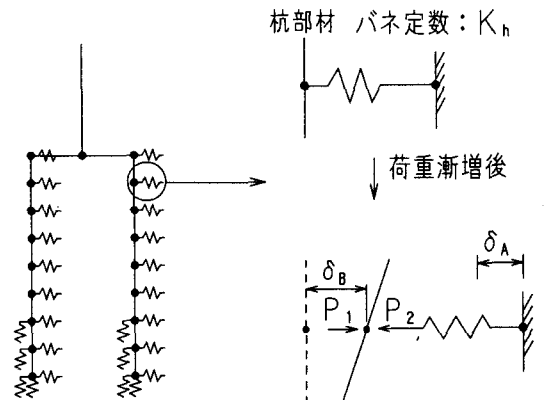


図-5 荷重増分法の解析手法

(3)変位増分法

変位増分法は、地盤変位による土圧を、地盤変位を増分させることによって与える方法である。この方法では、地盤の塑性化と同時に地盤変位による荷重の増分を停止させて、地盤の塑性化を適切に考慮でき、杭を非線形部材とした場合の解析にも適応している。図-6に変位増分法の解析手法について示す。



P_1 ：地盤変位 δ_A による荷重 ($=K_h \cdot \delta_A$)

P_2 ：杭の変位 δ_B に対する地盤反力 ($=K_h \cdot \delta_B$)

図-6 変位増分法の解析手法

地盤変位による荷重は、水平方向の地盤バネの結合先の節点（固定点）を強制変位させて与える。

強制変位 δ_A が水平バネを介して外力 $K_h \cdot \delta_A$ として載荷される。強制変位 δ_A の増加と共に、地盤変位による土圧 $K_h \cdot \delta_A$ も増加する。 δ_A と δ_B の差分が、地盤が塑性域に達する相対変位を上回ったと同時に地盤変位による土圧の増加は停止する。

3. 解析条件

これまで説明した解析手法の比較を行うための解析条件を以下に示す。

(1) 解析対象構造物

解析対象構造物は、図-7に示す複線用壁式橋脚を想定した。

構造形式：複線用壁式橋脚

上部工：RC桁 $L=20.00\text{m}+20.00\text{m}$

支 承：ゴムシュー（可動+固定）

杭：場所打杭 杭径 1.8m、杭長 21.5m

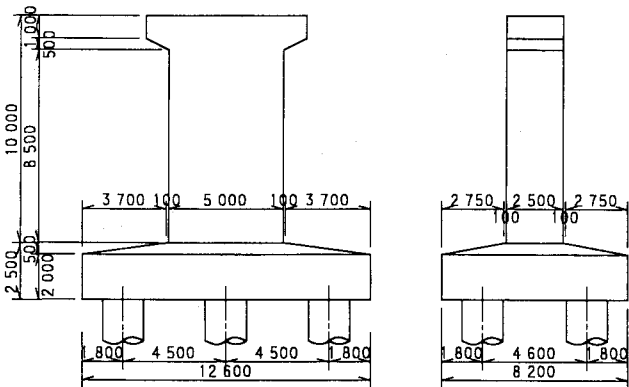


図-7 構造物の形状寸法

(2) 地盤条件

地盤条件は表-1および図-8に示す軟弱地盤（特殊地盤）を想定した。

表-1 土質定数

	平均 N値	一軸圧縮 強度 q_u (tf/m^2)	設計せん断 弾性波速度 V_{sd} (m/s)	変形係数 E_o (kgf/cm^2)	単位体積 重量 γ (t/m^3)
第1層	0	4	42	70	1.30
第2層	0	3	42	76	1.40
第3層	3	12	42	100	1.85
第4層	5	—	42	100	1.85
第5層	30	50	132	998	1.90
第6層	50	150	—	1250	1.95

※第1層、第2層は地震時の周面摩擦力を無視する。

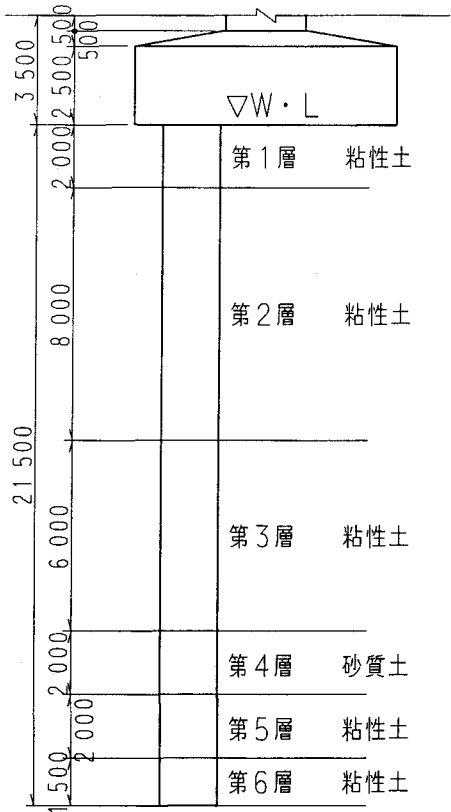


図-8 地下水位と層厚

(3) 骨組解析モデル

解析モデルは、図-9に示す橋脚躯体と杭を含めた全体系の骨組みモデルを用いた。なお、杭には水平方向と鉛直方向の非線形バネを取り付けている。

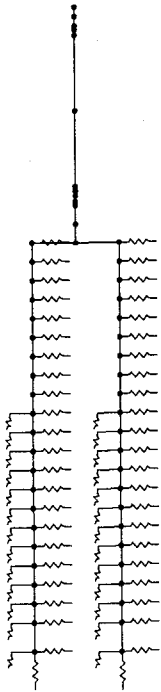


図-9 骨組解析モデル図

(4)設計水平震度

設計水平震度は、以下を想定した。

構造物の慣性力算定 $K_h=0.40$

耐震設計上の基礎面 $K_h=1.00$

4. 荷重増分法と変位増分法の解析結果の比較

杭部材の剛性を等価剛性とした条件で、荷重増分法と変位増分法の二つの手法によって解析を行った結果の比較について示す。なお、従来から用いられているイテレーション法と荷重増分法は、同様の結果が得られることが既に確認されているため、イテレーション法の結果は割愛した。杭部材の等価剛性は、表-2の通りとする。

表-2 杭部材の等価剛性

杭	等価剛性
押込み側の杭	$1/2EI$
引抜き側の杭	$1/3EI$

※ 1) EI は全断面有効として計算した杭の

曲げ剛性 (E : コンクリートのヤング係数、 I : 杭体の断面2次モーメント)

2) 押込み側杭 …… 杭頭軸力が圧縮の場合

引抜き側杭 …… 杭頭軸力が引張の場合

表-3に地盤変位量と杭部材の変位量の比較を図-10～図-12に杭の変形図の比較と断面力図の比較を示す。

表-3 地盤変位量と杭(引抜き側)の変位量の比較

深さ (m)	地盤 変位 (mm)	杭体の変位 (mm)	
		荷重 増分法	変位 増分法
0.00	271	295	296
1.00	270	287	287
2.00	267	277	277
3.00	261	266	266
4.00	253	253	253
5.00	243	240	240
6.00	230	225	226
7.00	216	210	210
8.00	199	195	195
9.00	181	178	178
10.00	161	162	162
11.00	145	145	145
12.00	128	128	128
13.00	109	111	111
14.00	89	94	94
15.00	69	78	78
16.00	48	61	62
17.00	26	46	46
18.00	4	31	31
19.00	2	17	17
20.00	0	4	4
21.50	0	-16	-16

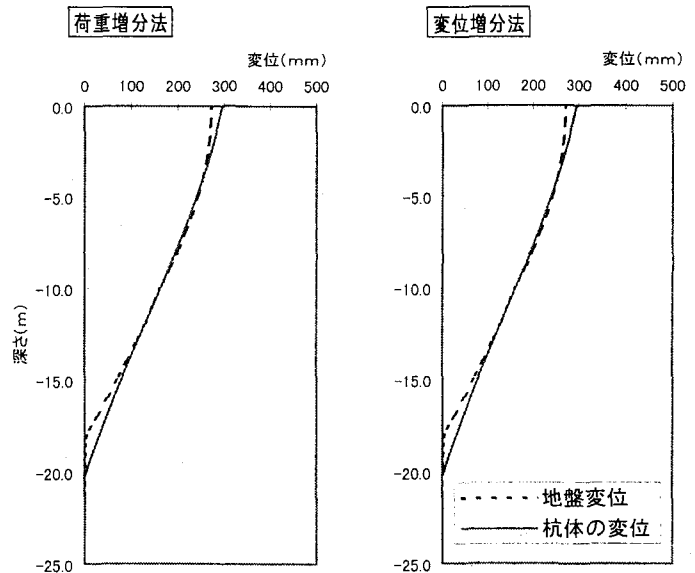


図-10 引抜き側杭の変形図の比較

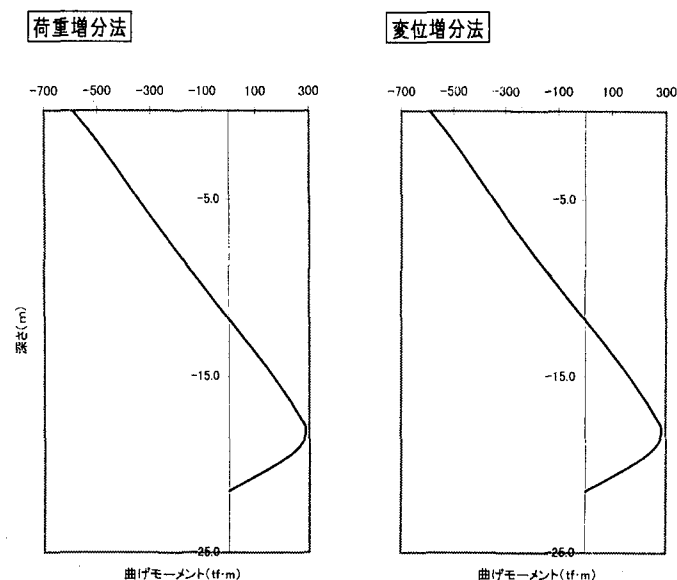


図-11 引抜き側杭の曲げモーメント図の比較

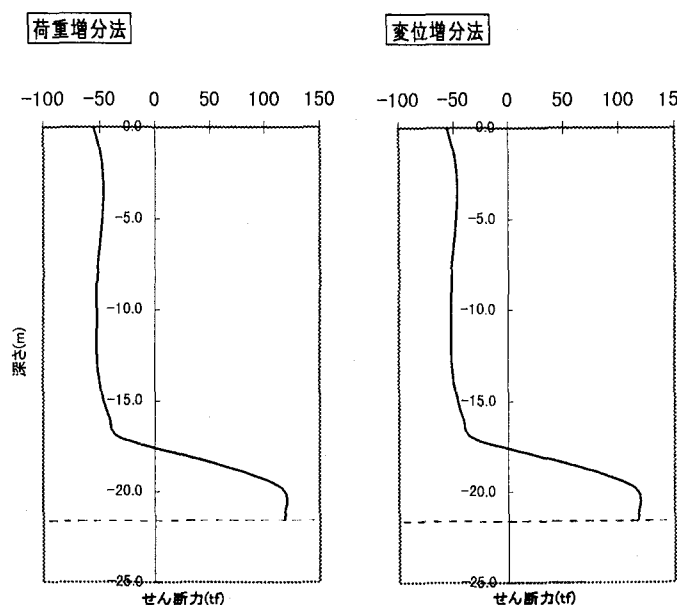


図-12 引抜き側杭のせん断力図の比較

変位量の算出結果と変形図・断面力図の形状は、ほぼ一致しており、荷重増分法と変位増分法の両手法間の結果の整合性が確認できた。

5. 杭を非線形部材とした場合の解析

杭を非線形部材とした場合の解析結果を示す。

(1)非線形特性の設定

まず、杭部材の断面剛性の非線形特性として、図-13に杭の降伏耐力のN-M相関図を示す。さらに、降伏耐力以降の勾配率は、M-φ関係から算出を行った結果より、初期勾配に対して3.9%とした。

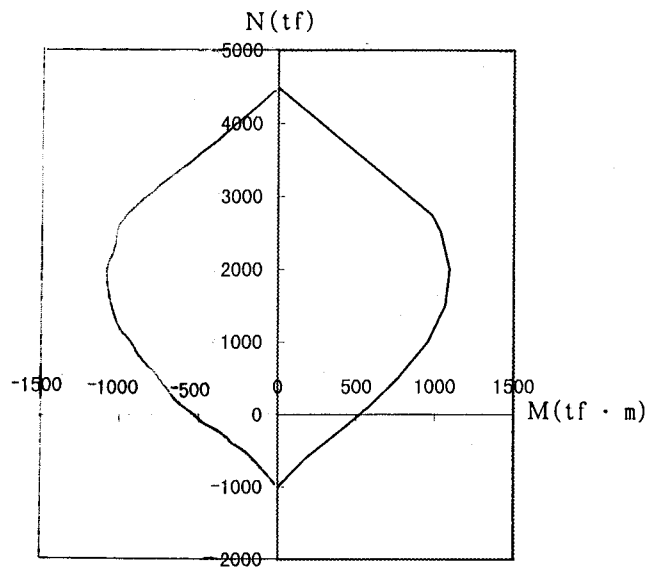


図-13 杭の降伏断面耐力のN-M相関図

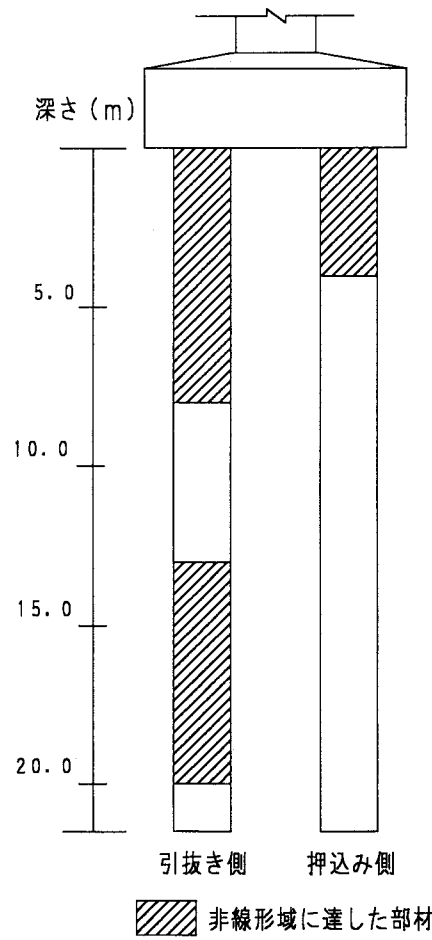


図-14 杭の剛性が非線形域に達した部材

(2)等価線形部材と非線形部材の解析結果の比較

杭を等価線形部材とした場合と非線形部材とした場合について、変位増分法による応答変位法の解析結果の比較を示す。

杭を非線形部材として解析を行った結果、非線形域に達した杭部材の範囲を図-14に、杭を等価線形部材とした場合と非線形部材とした場合の杭体の変位量の比較を表-4に示す。

引抜き側杭は杭頭から深さ 8.0mまでの範囲と深さ 13.0mから 20.0mの範囲で、押込み側杭は杭頭から深さ 4.0mの範囲で非線形域に達している。表-4から、非線形部材の変位量は、等価線形部材の変位量と比べて地中部では小さいが、杭頭部の非線形域では逆に大きくなっていることが解る。

表-4 地盤変位量と杭(引抜き側)の変位量の比較

深さ (m)	地盤 変位 (mm)	杭体の変位 (mm)	
		等価 線形	非線形
0.00	271	296	308
1.00	270	287	300
2.00	267	277	289
3.00	261	266	276
4.00	253	253	261
5.00	243	240	245
6.00	230	226	229
7.00	216	210	212
8.00	199	195	195
9.00	181	178	178
10.00	161	162	160
11.00	145	145	143
12.00	128	128	126
13.00	109	111	109
14.00	89	94	91
15.00	69	78	74
16.00	48	62	58
17.00	26	46	42
18.00	4	31	28
19.00	2	17	15
20.00	0	4	3
21.50	0	-16	-14

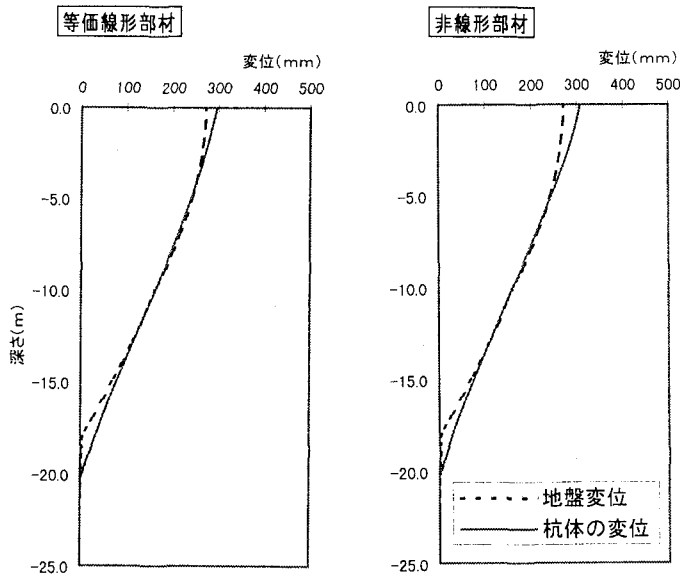


図-15 引抜き側杭の変形図の比較

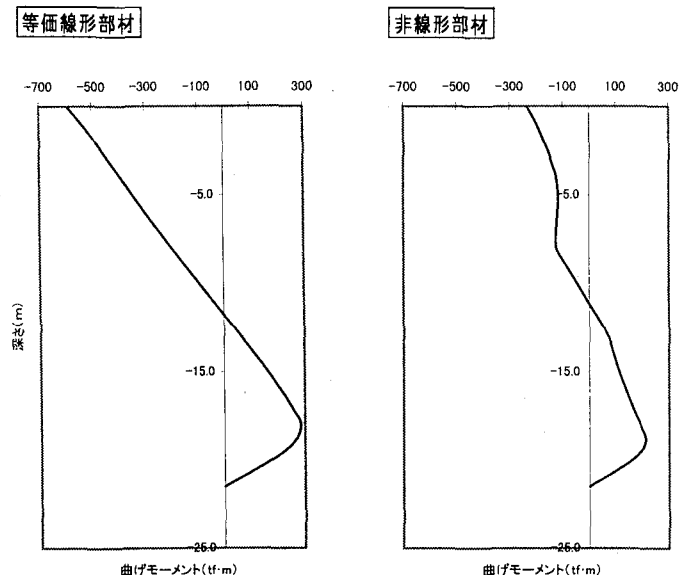


図-16 引抜き側杭の曲げモーメント図の比較

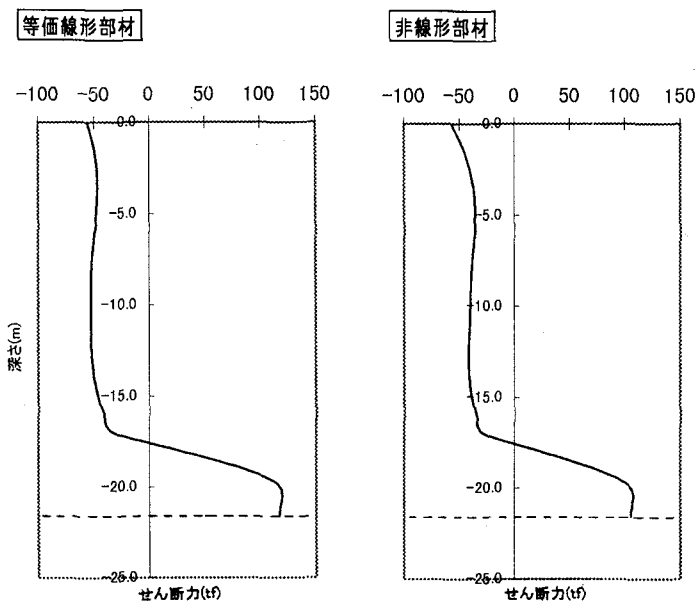


図-17 引抜き側杭のせん断力図の比較

図-15～17 は、等価線形部材と非線形部材の引抜き側杭の変形図・曲げモーメント図・せん断力図の比較を示したものである。

非線形部材の曲げモーメント図は、等価線形部材の曲げモーメント図の形状と類似しているが、杭頭部・地中部共に部材の降伏の影響により、曲げモーメントは小さくなった。非線形部材のせん断力図は、等価線形部材のせん断力図とほぼ一致した。

(3)荷重増分法と変位増分法の杭非線形解析結果の比較

杭を非線形部材とした場合について、荷重増分法と変位増分法の比較を行った。荷重増分法の曲げモーメントは、変位増分法の曲げモーメントと形状は類似したが、杭頭および地中部での曲げモーメントは小さくなった。また、非線形域に達した部材の範囲も荷重増分法と変位増分法とで異なる結果となった。荷重増分法では、有効抵抗土圧を越えた以降については増分荷重の最終ステップのみしか正しく表すことができないため、その影響が出たものと思われる。荷重増分法は、杭を非線形部材とした解析には適応しないといえる。

6. 結論

軟弱地盤上の杭基礎構造物に対する応答変位法について検討を行った結果、杭を非線形部材として取り扱うためには、変位増分法による非線形解析を行う必要があることが明らかとなった。この変位増分法は、杭を等価線形部材とした場合の荷重増分法による解析結果とほぼ一致しており、従来からの方法とも整合のとれた解析手法といえる。さらに、杭の靱性能を期待して経済的に優位な設計を行うためには、杭を非線形部材として応答変位法の解析を行う必要がある。

7. 謝辞

最後に、応答変位法の手法の検討に当たり、(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(基礎担当)西村 昭彦担当部長には多大な御指導を頂きました。末尾ながら謝意を表します。

参考文献

- 1) 鉄同構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・抗土圧構造物)