

擁壁のための杭基礎の許容変位を考慮したたわみ挙動解析 (Deflection analysis of pile foundation for retaining wall regarding acceptable displacement)

岩越恭平¹，三浦均也²，栗田和博³，松田達也²

- 1 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 建築・都市システム学専攻 k133508@edu.tut.ac.jp
2 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 地盤防災講座
3 株式会社サインファースト

概 要

擁壁は、主要部材の材料や形状、力学的なメカニズムなどにより様々に細分化されており、用途や場所によって使い分けられる。一般的によく採用される形式は重力式擁壁や片持ばり式擁壁などであるが、周辺環境によっては施工法や経済性において問題点がある。代表的な基礎構造の一つに杭基礎があげられるが、水平荷重を受ける杭のたわみ挙動を解析する際に広く用いられるのが Chang の公式である。Chang の公式はこれまで多くの設計で実績を残しているが、条件によっては必要以上に杭長が長くなる傾向があり、また杭の剛性を大きくするほど杭長が長くなるという不合理な点も有する。それらの問題点を解消するために重複反射法を用いた杭基礎の設計法が既往の研究で提案された。本研究では、杭基礎の設計法を擁壁に応用するための基礎的研究として、擁壁における許容杭頭変位、および対応した地盤反力係数の低減方法、杭断面と杭長の妥当な決定方法を検討する。

キーワード：擁壁，杭基礎，許容杭頭変位

1. はじめに

起伏が多い山岳部や、都市部の住宅地や道路周辺におけるまで、種々の土木構造物の建設に関連して擁壁は日常的によく見かける。擁壁は、主要部材の材料や形状、力学的なメカニズムなどにより様々に細分化されており、用途や場所によって使い分けられる。

一般的によく採用される形式は重力式擁壁や片持ばり式擁壁などである。道路土工一擁壁工指針によると、支持地盤や背後の盛土と一体となって挙動する直接基礎が望ましいとされている。しかし、擁壁を支持する地盤が軟弱地盤である場合、地盤の支持力は十分に期待できない。その場合、良質な支持層が現れるまで地盤を掘削し、良質な置き換え土やコンクリート底版（フーチング）を設けて、その上に擁壁を設置する。上記の方法は比較的容易であり経済的に有利になりうるが、しかし以下のような問題点も挙げられる。

- ① 地盤掘削による斜面崩壊
- ② 施工による交通規制
- ③ 工期の長期化
- ④ 地下構造物などの障害

代表的な基礎構造の一つに杭基礎があげられるが、他の工法に比べて地盤条件・周辺環境条件の影響を受けやすい。

水平荷重を受ける杭のたわみ挙動を解析する際に広く用いられるのが Chang の公式である。Chang の公式はこれまで多くの設計で実績を残しており、実際に多数の杭の設計において使用されてきた。しかし、Chang の公式は条件によっては必要以上に杭長が長くなる傾向がある。これは、地盤を均質、そして杭の長さを半無限大と仮定し、計算を簡略化しているからである。杭を必要以上に長くすることは不経済であり、設計においてあまり適さない。

これらの問題点を解消するために重複反射法を用いた杭基礎の設計法が既往の研究¹⁾された。重複反射法を用いることで多層地盤における水平荷重を受ける有限鉛直杭のたわみ挙動解析法を誘導することができる。

そこで本研究では、重複反射法を用いた杭基礎の設計法を擁壁に応用し、重力式基礎がもつ施工面や経済面の問題点を解消するために杭基礎を用いた擁壁の設計法を提案する。通常重力式基礎では大量なコンクリートを使用するため、工期が長いなどの根本的な問題がある。本研究で用いる擁壁はプレキャストパネル化して薄型とし、土圧を杭で支持することによって、盛り土の拡幅や傾斜地での利用等において優位性が期待できる。看板や交通標識などが考慮する風荷重は交番して作用するため、設計では通常許容応力度 F を用いる。擁壁では、土圧は長期荷重であるため設計では長期許容応力度 $F/1.5$ を用いる。

看板や交通標識の設計において許容杭頭変位は検討すべき項目の一つであるが、一般の擁壁では杭頭の許容変位量は規定しないものとされている²⁾。そこで、擁壁における許容杭頭変位の設定方法、および対応した地盤反力係数の低減方法、杭断面と杭長の妥当な決定方法を検討する。

2. 重複反射法を用いたたわみ挙動解析法

2.1 重複反射理論の適用

本研究では、地震波のS波が基盤とその上部地表層との境界面や地表面で反射と透過を繰り返す現象を利用した、鉛直下方から入射する任意波動から地盤振動を解く重複反射理論を採用する。よって重複反射法とは、地盤を水平成層構造としてモデル化し、その中を層境界で重複的に反射を繰り返しながら、鉛直方向に一次的に伝播する地震動を波動方程式に基づいて解析する。

地盤を層状地盤に、また有限長杭と考慮するため、地盤の層構造に合わせて杭を各要素に分割し、要素数に合わせた境界条件から四次のマトリックス方程式を誘導し、数値的にたわみ解析を行う。杭断面と杭長を使用して杭のたわみ量を計算するため、杭と地盤の相互作用を考慮し、かつ地盤条件・周辺環境に最適な杭断面と杭長を決定できる。

2.2 重複反射法と Chang の公式の比較

どちらの設計方法も水平荷重を受ける杭は弾性床上の梁理論を適用している。地盤を連続したバネに置き換えることによって、荷重に対する抵抗力は杭のたわみに比例する。また、杭のたわみ挙動方程式は以下ようになる。

$$-EI \frac{d^4 \delta}{dz^4} = p = kD\delta \quad (2.1)$$

ここで、杭材料のヤング率 E 、断面 2 次モーメント I 、杭のたわみ δ 、地表面からの深さ z 、杭の長さあたりの土圧 p 、地盤反力係数 k 、杭の外径 D とする。上記の微分方程式を解くと、杭のたわみ δ の一般解は以下の式であらわされる。

$$\delta(z) = e^{-\beta z} (a \cos \beta z + b \sin \beta z) + e^{\beta z} (c \cos \beta z + d \sin \beta z) \quad (2.2)$$

ここで

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kD}{4EI}} \quad (2.3)$$

であり、 β は杭の特性値と呼ばれる。また、たわみ角 θ 、曲げモーメント M 、せん断力 Q は以下ようになる。

$$\theta = -\frac{d\delta}{dz}, \quad M = EI \frac{d^2 \delta}{dz^2}, \quad Q = EI \frac{d^3 \delta}{dz^3} \quad (2.4)$$

【Chang の公式】

Chang の公式は杭を無限長と仮定しており、その時の杭先端のたわみとたわみ角は 0 とする。上記の仮定により式(2.2)は簡略化され、2つの未定定数のみが残り、境界条件によって容易に杭のたわみ δ の式が求まる。また、Chang の公式は以下のような性質がある。

- ・地盤調査結果を平均化し、一様地盤モデルとする

- ・杭のたわみ量は杭断面の関数
- ・杭の剛性を大きくするほど、杭長は長く計算される

【重複反射法】

重複反射法は地盤を層状に、かつ有限長杭と設定し、その時の杭先端の曲げモーメントとせん断力は 0 とする。また、地盤層境界においてたわみ、たわみ角、せん断力、曲げモーメントは連続である。式(2.4)に式(2.2)を代入し整理すると、杭のたわみ挙動を表すマトリックス方程式が得られる。杭頭の載荷条件から杭の各断面における挙動を力学的に解いていくことが可能である。重複反射法にみられる特徴は以下のようなものがある。

- ・地盤調査結果に基づいた地盤モデルを設定
- ・たわみ量は杭断面と杭長の関数
- ・杭の剛性を小さくするほど、杭長は短く計算される

3. 地盤反力の変位依存性を考慮した重複反射法の拡張

地盤は様々な要素が絡み合い複雑である。特に軟弱地盤などは抵抗力が劣るため、強いせん断力が作用することで地盤構造が崩壊し、即座に破壊にまで至る。地盤は微小なひずみの領域から非線形性を示すため、解析する際には見過ごしてはならない特性である。

看板や交通標識の杭基礎の設計では、上部工において自

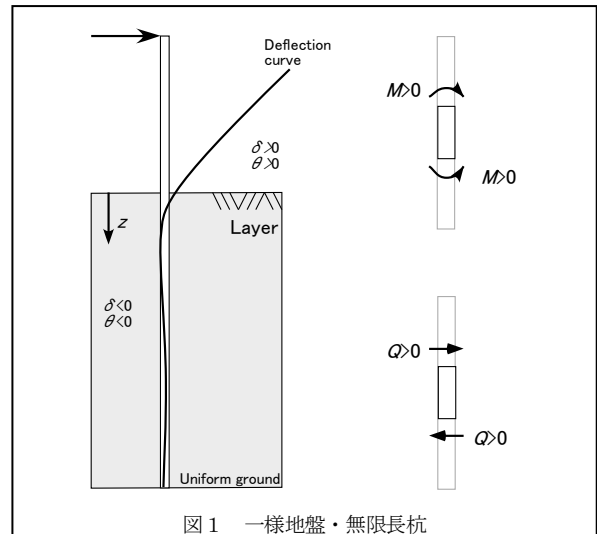


図1 一様地盤・無限長杭

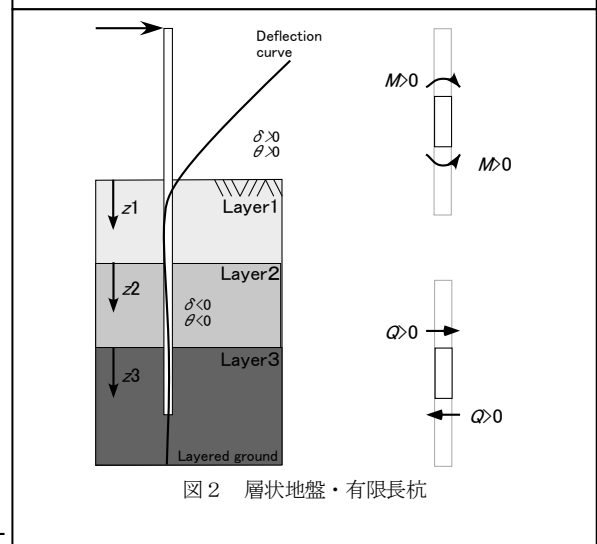


図2 層状地盤・有限長杭

重よりも板面が受ける風荷重である交番荷重を対象にしている。基礎の設計においては鉛直荷重の支持力よりも、水平荷重および回転モーメントに抵抗できるように設計される³⁾。そのため、地盤に顕著な塑性変形を生じない基準として、杭頭変位の許容値は1cmと規定されている²⁾。

しかし、擁壁が設計対象としている荷重は土圧や上載荷重など、一方向のみに作用する長期荷重である。また、擁壁の杭基礎の設計において一般の擁壁では、橋梁基礎のように上部構造から定まる許容変位量を規定する必要がないとして、杭頭における許容変位量を規定されていない⁴⁾。そこで本研究では、看板や交通標識の設計に定められている許容杭頭変位量よりも大きく設定し、設計範囲を拡大する。また、許容変位の拡張に伴って地盤反力係数も更改する必要がある。

3.1 地盤反力係数の変位依存性

杭頭に水平力を受けた時の杭頭の変位と、変位によって生じる水平地盤反力の関係を図3に表す。 δ_0 は杭頭変位の許容値である。杭と地盤の相互作用は杭頭の微小な変位から、弾塑性的で非線形性をもつ。杭頭変位と地盤反力の関係を以下に示す。

$$p/D = k\delta \Rightarrow p/D = k_0\sqrt{\delta_0} \cdot \sqrt{\delta} \quad (2.5)$$

$$\therefore k = \frac{k_0}{\sqrt{\delta/\delta_0}}$$

ここで、 p は杭の長さあたりの土圧、 D は杭径、 k は地盤反力係数、 δ は杭頭の変位、 k_0 は許容変位の時の地盤反力係数であり、以下の式で表す。

$$k_0 = \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4} \quad (2.6)$$

$$\alpha = 0.2, E_0 = 28N \text{ (from SPT test)}$$

ここで、 α を評価法によって決まる定数、 E_0 を変形係数、 N を標準貫入試験から得られたN値とする(道路橋示方書)。

式(2.5)より、変位の増加に対して地盤反力は非線形的に増加することがわかる。図4は杭の変位の増加に伴い地盤反力係数が減少している様子(変位依存性)を示している。図より、杭頭変位が1mmまでは地盤反力係数は一定であるが、それを超えると地盤反力係数は非線形な挙動を示している。杭頭変位の数式解の誘導は不可能であるため、数値解析における反復計算を行う必要がある。また、図5には上記のように杭と地盤の相互作用を弾性内に収める微小な変位を示しており、ここでは1mmと設定しており²⁾、それ以下では線形、それ以上では非線形として解析を行う。

$$k = \sqrt{10}k_0 \quad (\delta \leq 1\text{mm})$$

$$k = \frac{k_0}{\sqrt{\delta/\delta_0}} \quad (\delta > 1\text{mm}) \quad (2.7)$$

3.2 割線法による定式化とその解法

割線法とは非線形方程式を解く方法の一つである。挙動途中の曲線部分を無視して、最初の地点と任意の許容変位の時の地盤反力とを直線で結び、そのときにできた傾きをその許容変位に対する基準の地盤反力係数とみなす。

杭に作用する水平荷重が大きければ杭頭変位も増大するため、土圧などの大きな荷重が作用する場合、上記に示した許容変位1cm内に収めることは困難である。

図6に示すように、許容変位を大きくすると地盤反力係数は小さくなる。したがってある許容変位を設定し解析を行った結果、許容変位を超えるときは許容変位を再設定し解析を行い、許容変位内に収まるまで繰り返す必要がある。

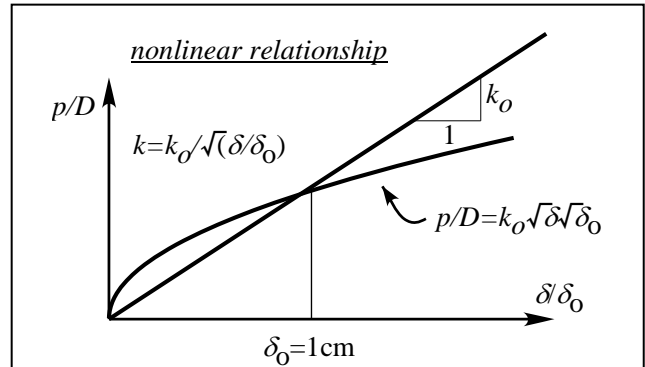


図3 地盤の変位—反力関係

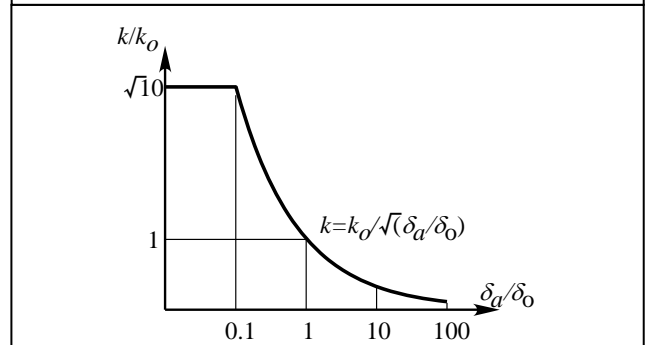


図4 地盤反力係数の変位依存性

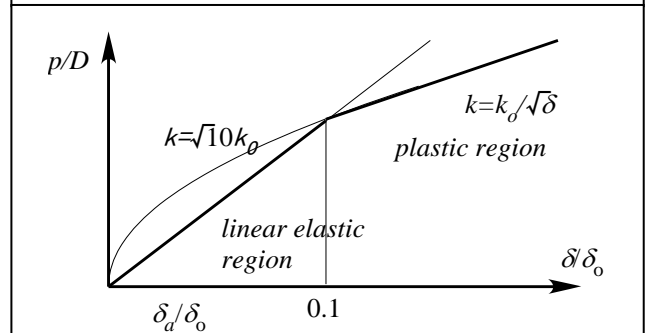


図5 微小変形における線形挙動

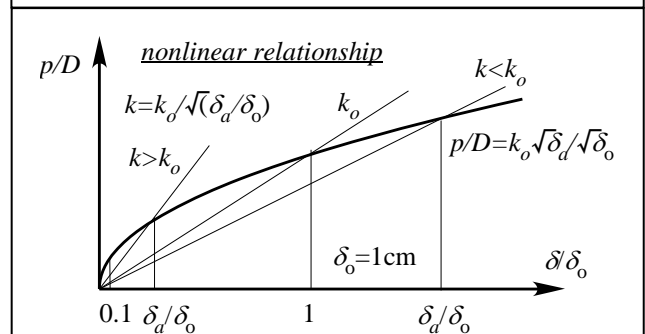


図6 割線法による地盤反力係数の決定

4. 擁壁の設計概説

研究室では看板や交通標識において、Chang の公式によってかわる重複反射法を用いた杭基礎の設計法を提案した。本研究では重複反射法を用いた杭基礎の設計法を擁壁に応用し、杭基礎の擁壁における新たな杭挙動解析法を提案する。この試みは前例が無く、よってまずは基礎となるもっとも単純、かつ理想的な条件を想定する。

本研究では水平荷重がかかる杭の水平抵抗を、弾性法を使用して評価している (図 7)。弾性床土上の梁として解析する方法であり、水平地盤反力係数と杭の変位を乗じて地盤反力を算定する。杭の変位が最大となるのは杭頭であり、また、地盤を弾性として扱うため水平地盤反力係数は地中のどこをとっても一定である。ゆえに杭頭で地盤反力が最大となる。ときに、杭に作用する受働土圧は三角形分布であり、深さが深くなるほど土圧は作用する。よって、杭頭付近で地盤反力が受働土圧よりも大きくなるという不合理が生じる。

また、解析における各条件は以下に示す。

【擁壁条件】

本研究で扱う擁壁の形式は取り扱いやすいように、直立で背面に摩擦が生じないパネル式擁壁とする (図 8)。擁壁高は 1~5m の 1m 毎に変化させ、荷重の変化による杭のたわみ挙動を検討する。

【杭基礎条件】

杭は角形鋼管で鋼材の規格を STK400 とする。杭の肉厚を 20mm、杭外径を 300~500mm の範囲で変化させる。杭断面の各定数の計算方法は、同研究室の柴田の論文を参考とする。杭の配置間隔を 2m とし、お互い均等に土圧を支持するものとする。

【地盤条件】

地盤は地層構造ではなく単層地盤とし、地盤の剛性は N 値で与えられるものとする。擁壁の背面に水平な裏込土をかかえており、乗載荷重は考慮しない。地下水位は十分に低いとして水圧は作用せず、裏込土のみによって一様な水平荷重が擁壁に作用する。裏込土の主な地盤定数を表 1 に

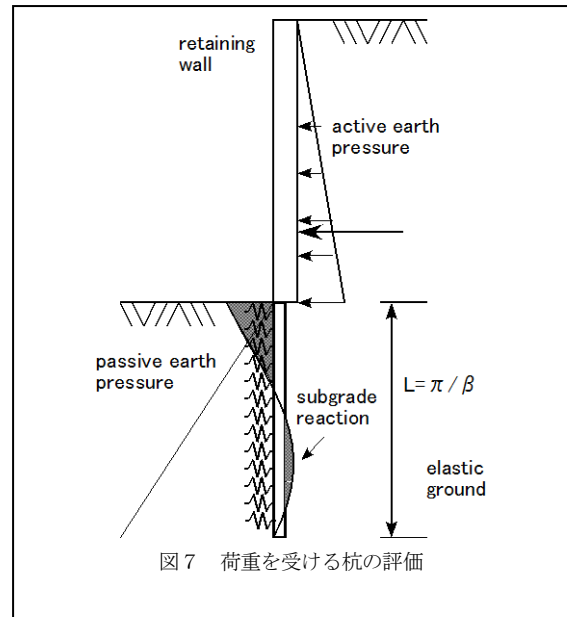


図 7 荷重を受ける杭の評価

示す。また、土圧はランキンの公式より算定する。

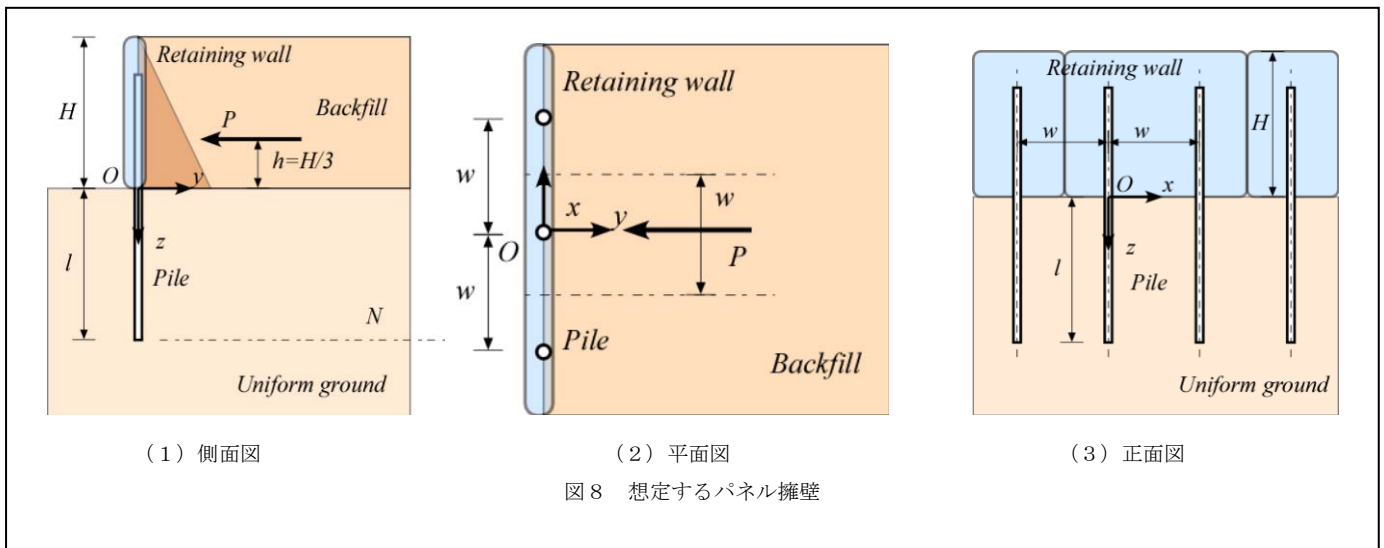
表 1 裏込土の地盤定数

密度	1900kg/m ³	地盤構造	均質地盤
内部摩擦角	30°	壁面摩擦角	0
粘着力	0		

5. 擁壁の試設計とその比較

本研究は 4 章に既述した条件を用いて、許容杭頭変位 1cm とした時、擁壁高さや杭の形式を変更し、杭頭変位が設定した許容値に達しないかを検討した。また、許容杭頭変位を拡大した時、杭のたわみ挙動を解析した。そして、それらの条件を満たすことのできる杭長を算出した。

5.1 許容値として、基準変位 1cm を用いた時の検討 看板や交通標識の設計に用いられる許容杭頭変位 1cm



(1) 側面図

(2) 平面図

(3) 正面図

図 8 想定するパネル擁壁

を本研究で考えるパネル擁壁へ応用した。図 9.1 は壁高を 1~5m まで変化させて、杭の外径を 400mm、杭の肉厚を 20mm、N 値を 5 とした時の縦軸が杭長、横軸が杭頭変位を表す。図より壁高が 1~3m のときは、杭頭変位を基準変位 1cm 以内に収められる杭長を算出できた。しかし壁高がそれ以上高くなると、杭長を 10m まで伸ばしても杭頭変位を 1cm 以内に収めることができない。杭長を長くしても基準許容杭頭変位以下にならないときは設計不能を表す。

壁高を 5m、杭の外径を 400mm、杭の肉厚を 20mm、と設定し N 値を 3, 5, 10 と変化させたときの杭長—杭頭変位の関係を図 9.2 に、壁高を 5m、杭の肉厚を 20mm、N 値を 5 と設定し、杭の外径を 300~500mm まで変化させたときの杭長—杭頭変位の関係を図 9.3 に示す。本研究で考える一番大きな N 値、杭の外径に設定しても杭頭変位を 1cm に収めることができない。図より許容変位以内に収めるためには、実際に考えるとあまり考えられない N 値や杭の外径にしなければならないことがわかる。

表 2 は N 値、杭の肉厚は一定で壁高と外径を変化させ解析を行い、必要杭長とその時の曲げモーメントに関連する圧縮応力の許容応力に対する比を表す。これより杭の外

径を大きくするほど必要杭長の決定や、杭長を短く設計できることがわかる。しかし杭長は決定できたが、応力比が図示するように、部材の本来持つ力がまったく使用されていないことがわかる。このような設計では一方の条件がまだ十分余裕があるため、実際の現場ではあまり経済的でない。

このように基準変位 1cm を許容変位として擁壁の設計に用いることは難しいことがわかる。看板や交通標識の場合は標準許容変位 1cm を採用することで、交番する短期的な風荷重に対して地盤の塑性変形の蓄積を抑止する合理的な設計をする必要がある。一方、擁壁の場合には荷重が大きいが一方方向の長期荷重であるので、許容応力を低下させた上で許容変位を広げることによって合理的な設計が可能であると考えられる。

5.2 許容杭頭変位の拡大

基準となる許容杭頭変位をパラメータとして変化させ、解析を行った。図 10 は壁高を 5m、杭の肉厚を 20mm、N 値を 5、杭の外径を 400mm と設定し、許容杭頭変位は 1cm~8cm までをパラメトリックに変化させたときの必要杭長と杭頭変位を表す。4cm まで拡大してようやく杭頭変位

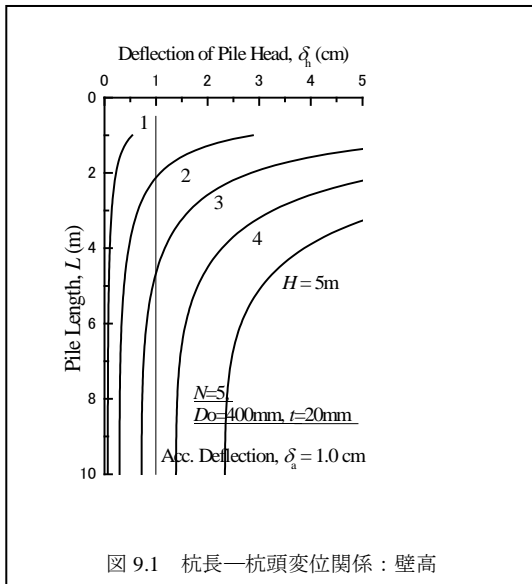


図 9.1 杭長—杭頭変位関係：壁高

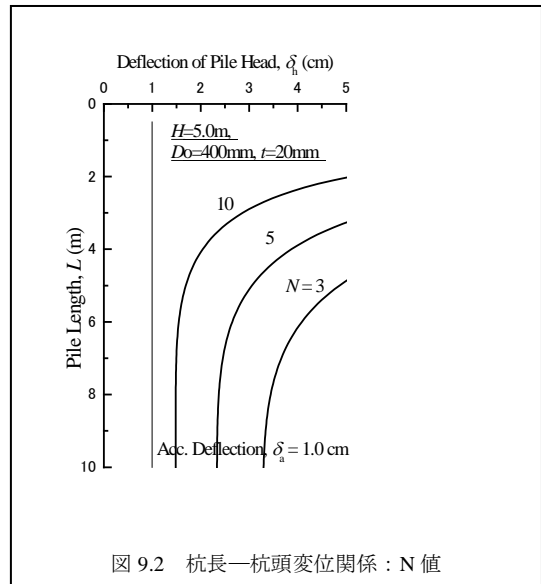


図 9.2 杭長—杭頭変位関係：N 値

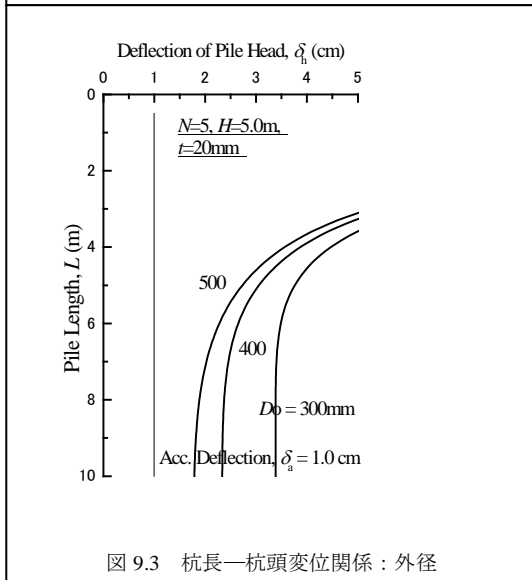


図 9.3 杭長—杭頭変位関係：外径

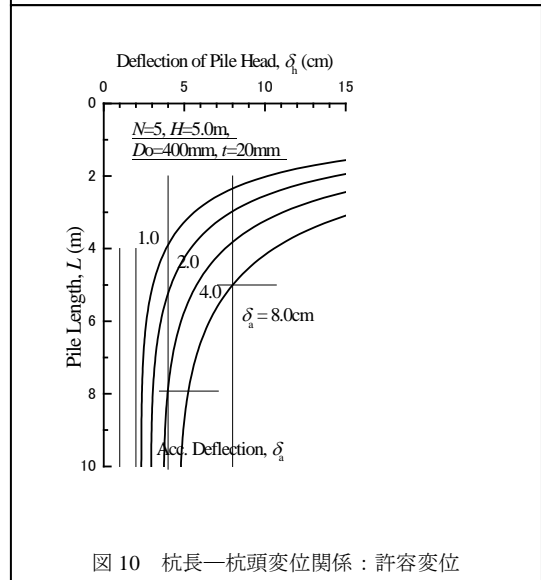


図 10 杭長—杭頭変位関係：許容変位

表2 許容変位 1cm_N=5

外径 Do (mm) = 300 / 400 / 500 ; 肉厚 t (mm) = 20 ; N = 5

許容杭頭変位 $\delta a = 1.0\text{cm}$

壁高 H(m)	必要杭長 L (m)			曲げ圧縮応力動員率 $\sigma / \sigma a$		
5	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
4	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
3	0.00	4.66	4.28	0.000	0.154	0.092
2	2.26	2.13	2.04	0.079	0.040	0.025
1	0.68	0.65	0.62	0.009	0.004	0.003

表3 許容変位 8cm_N=5

外径 Do (mm) = 300 / 400 / 500 ; 肉厚 t (mm) = 20 ; N = 5

許容杭頭変位 $\delta a = 8.0\text{cm}$

壁高 H(m)	必要杭長 L (m)			曲げ圧縮応力動員率 $\sigma / \sigma a$		
5	5.81	5.00	4.70	1.205	0.616	0.373
4	3.53	3.30	3.16	0.585	0.301	0.183
3	2.11	2.00	1.93	0.235	0.121	0.074
2	1.06	1.01	0.98	0.066	0.034	0.021
1	0.35	0.33	0.32	0.008	0.004	0.003

を許容値内に収めることでできた。さらに許容値を拡大することで必要杭長を十分に短く算出できた。図のように許容杭頭変位を拡大するほど所定の杭長に対する杭頭変位が大きくなっているのは、第3章に既述したように割線法を用いた地盤反力—杭頭変位の関係を用いているからである。許容変位を大きくすると地盤反力係数が小さくなり、地盤の抵抗力も低減される。これによって、所定の杭頭変位を保つための杭長は許容変位の増大に伴って増えることにもなるが、それでも杭の有限長を考慮した解析によって適切な長さにすることが可能になる。

許容杭頭変位が大きくなるにつれて、必要杭長が求まり設計の範囲が広がった。しかし、杭頭において許容変位を大きく許すと、擁壁天端部のたわみがさらに大きくなり、それによって設計時よりも早々に破壊につながる損傷が与えられる可能性があるため、施工時には考えるたわみを考慮した設計が必要となる。

表3はN値を5、杭の肉厚を20mm、許容杭頭変位を8cmとし、壁高と外径を変化させた時の必要杭長と応力比を表す。図示のように赤く表示している部分が、杭長を求めることができたが、応力比をみると許容値を超えていることがわかる。本研究で扱うプレストレス化されたパネル擁壁は、あらかじめパネル一枚当たり杭の本数が決まっているため、杭の杭頭の変位ばかりにとらわれず曲げに対する応力も両方考慮しなければならない。

6. まとめ

本研究は、重複反射法を用いた杭基礎の設計法を擁壁の設計に応用し、重力式基礎がもつ施工面や経済面の問題点を解消するために杭基礎を用いた擁壁の設計法を提案する。擁壁における重複反射法を用いた杭基礎の設計は前例がないため、基礎となるもっとも単純、かつ理想的な条件を想定する。まずは看板や交通標識の設計に用いられる許容杭頭変位1cmを擁壁にも応用し、擁壁の設計においても明確な基準となるか検討した。そして、許容杭頭変位を拡大、およびそれに対応した地盤反力係数の低減することで、擁壁の必要杭長を検討した。そして、杭断面と杭長の妥当な決定方法を検討した。以上のことをまとめると

- ・ 許容杭頭変位として基準値1cmを用いた擁壁の試設計では、壁高が3mを超える場合、杭断面寸法を50mmとしても適切な杭長を決定することが困難である。
- ・ 許容杭頭変位をパラメータとした試設計においては、種々の壁高、地盤条件において設計が合理的に行えることが分かった。
- ・ 許容杭頭変位を拡大すると同時に、割線法を用いることでそれに対応して低減された地盤反力係数を表現することができ、妥当な方法である。
- ・ 杭頭変位を許容値内に収めることができて、曲げモーメントに関連する圧縮応力の許容応力に対する比が規定を満たさないケースがあるため、両方を考慮した設計が必要である
- ・ 所定の杭断面と地盤条件に対しては、杭頭変位（許容杭頭変位）と必要杭長の関係を求めるアルゴリズムを検討し、図示することができた。これにより設計を妥当に行えることが分かった。

参考文献

- 1) 三浦均也, 松田達也, 羽柴慶太, KEODUANGCHITH Somchith : 風荷重を受ける看板・交通標識を支持する杭基礎の重複反射法を用いた設計法, 第23回調査・設計・施工技術報告会, 地盤工学会中部支部, 2014
- 2) 日本建築学会 : 建築基礎構造設計指針, pp.262-296, 2001,
- 3) 日本道路協会 : 道路標識設置基準・同解説, 1987
- 4) 日本道路協会 : 道路土工—擁壁工指針, pp.115-118, 1999