

宅地開発に適用する杭基礎パネル式擁壁の応答関数法を用いた設計試算
 Trial calculation of facing panel piled retaining wall for housing land development
 by using response function method

三浦均也¹, 松田達也¹, 鈴木恒太², 小野正², 小林睦³

- 1 豊橋技術科学大学, 建築・都市システム学系・k-miura@ace.tut.ac.jp
 2 豊橋技術科学大学, 大学院博士前期課程, 建築・都市システム学専攻
 3 豊田工業高等専門学校, 環境都市工学科

概 要

自立式看板・交通標識や擁壁において、杭を用いることによって風力や土圧のような横荷重に対して耐久性のある自立式構造物を構築できることを、筆者らは解析や載荷試験、試験施工によって示してきた。擁壁のような抗土圧構造物に杭基礎を適用する施工法においては、施工期間の短縮とコスト縮減に加えて、背後地盤の掘削を最小限に留めることによるコンパクトな施工が可能であることも明らかになっている。本研究では、杭基礎を適用したパネル式擁壁を宅地開発に用いる場合の適用性について解析的に検討する。杭基礎のたわみ解析には、層状地盤における有限長杭に適用可能な非線形応答関数法を用いた。設定した種々の地盤条件、壁高と杭間隔において杭のたわみ解析を系統的に実施し、選択可能な支柱および杭の断面を示し、必要杭長を算定した。

キーワード：擁壁，杭基礎，試設計，宅地開発

1. はじめに

道路建設や宅地造成等において土工の効率性や盛土・切土の安定性、施工・維持管理の合理性、経済性を向上させるためには、擁壁の建設技術が重要である。擁壁には種々のタイプがあり、石積み擁壁、ブロック積み擁壁、コンクリート擁壁（重力式、鉄筋コンクリート式）のように発展的に利用されてきた。重力式擁壁は構造の一体性に優れるために比較的高い壁高にも適用されるが、地震時の安定性に関しては万全ではない。一方、テールアルメや多数アンカー式補強土壁に代表される鉛直な壁面を有する補強土式擁壁は現地発生土を有効利用できるとともに、基本的に柔構造であるため重力式擁壁に比べて地震時の安定性に優れ、より高い壁高の擁壁への適用実績を有している¹⁾。

本研究で提案する杭基礎パネル式擁壁は、杭の横荷重に対する耐荷性能を活用することによってよりコンパクトな基礎を提供するため、背後地盤の乱れを最小限に抑えながら建設することを可能にするために開発した擁壁構築工法である。これにより、背後地盤の安定化、擁壁に作用する土圧の低減、土工量の縮減、その結果としての専有面積の縮小、施工期間の短縮、コスト縮減が可能になると期待できる。また、杭基礎擁壁は重力式と比べて杭のたわみによる土圧や地震力に対する反発力に余裕があり、耐震性能の向上も期待できる。

筆者らはこれまで、道路建設を想定した条件で杭基礎パネル式擁壁の適用性を検討してきた^{2,3)}。本研究では、これを盛土地盤の沈下等に対する要件がより厳しい、住宅地の開発に適用する場合を想定して、適用範囲について検討する。先ず、擁壁の基本的な構造を紹介するとともに、層構造を有する地盤における横荷重を受ける杭のたわみ解析を可能にする、応答関数法を用いた解析手法を説明する。住宅盛土としての安定性の評価に対しては、「住宅建設に

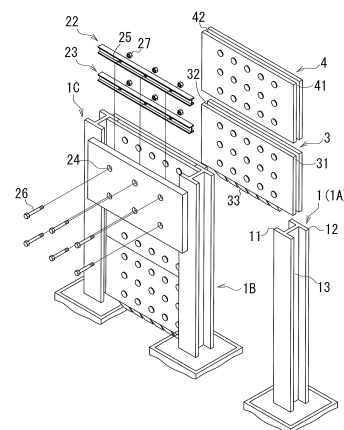


図 1 杭基礎パネル式擁壁³⁾

表 1 本研究で対象とした角形鋼管のリスト (STK400)

許容応力(長期荷重) : σ_a (N/mm ²)					140.0	無限長杭式	
						N=5	
単位	D	t	I	Z	Ma	β	$Lc=\pi/\beta$
	mm		cm ⁴	cm ³	kNm	1/m	m
Ps 150	150	12.0	1923	256.35	35.89	0.769	4.08
Ps 175	175	12.0	3214	367.36	51.43	0.683	4.60
Ps 200	200	16.0	6076	607.64	85.07	0.587	5.35
Ps 250	250	19.0	14351	1148.11	160.73	0.481	6.54
Ps 300	300	19.0	26243	1749.54	244.94	0.418	7.51
Ps 350	350	22.0	48355	2763.12	386.84	0.362	8.67
Ps 400	400	25.0	82151	4107.56	575.06	0.319	9.84
Ps 450	450	19.0	120583	5359.25	750.30	0.293	10.72

よる上載荷重の増大」および「擁壁の前面掘削」の2つの条件を設定し、その条件での杭基礎パネル式擁壁の適用性を検討する。

2. 擁壁の構成と部材の特性

2.1 擁壁の構成

図 1 は杭基礎パネル式擁壁の構造を模式的に示している。図中に示したのは、角形鋼管と H 型鋼を組み合わせた「杭・支柱一体構造」を活用し、打設後に鉄筋コンクリート製の壁面パネルを支柱に取り付ける形式のものである。本研究では、支柱に十分な剛性を持たせることによって盛土の沈下に影響する壁面のたわみを抑制するために、杭と支柱を 1 本の円形鋼管で構成する「杭・支柱単体構造」を採用した。

2.2 杭・支柱部材

杭・支柱一体構造の部材として、円形鋼管と角形鋼管を対象としたが、本報告では、スペースの制約もあるので、同じ径でもより大きな断面剛性を有する角形鋼管についての検討結果のみを示すことにする。表 1 は本研究で対象とした市販されている角形鋼管のリストを示している。長期荷重である土圧に対する許容応力 σ_a に断面係数 Z を乗じて得られる許容曲げモーメント M_a は杭径に対応して増大する。したがって、杭部分に発生する最大曲げモーメントに応じた必要杭径を選択することが必要になる。また、杭を無限長と仮定することで得られる Chang の公式から地盤の N 値が 5 の条件における特性値 β と必要杭長 Lc も列挙している。Chang の公式では、杭長を無限と仮定しているために、杭頭荷重には関係なく、特性値のみの関数として杭長が決まるということによる特徴がある。

3. 応答関数法による杭のたわみ解析

3.1 支配方程式と応答関数の誘導

杭のたわみ解析とその数式解は、弾性床上の梁としてモデル化して誘導されるのが普通である。式(1)はモデルによって導かれる支配方程式を示している。ここで、 δ を杭の水平変位 (たわみ量)、 D を杭径、 EI を曲げ剛性、 k を地盤反力係数とすると、たわみ挙動に対する支配方程式は以下のように表せる。

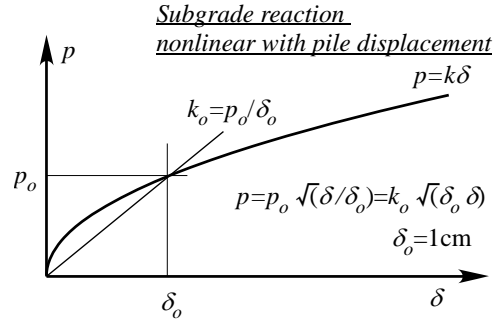


図 2 非線形な地盤反力挙動

$$-EI \frac{d^4 \delta}{dz^4} = P = pD = kD\delta \quad (1)$$

$$\theta = -\frac{d\delta}{dz}, \quad M = EI \frac{d^2 \delta}{dz^2}, \quad Q = EI \frac{d^3 \delta}{dz^3}, \quad pD = -EI \frac{d^4 \delta}{dz^4}$$

たわみ角 θ と曲げモーメント M 、せん断力 Q 、地盤反力 p はいずれも水平変位 δ の導関数である。杭に対する地盤反力は強い非線形性を示し、図 2 に示す建築学会の考え方⁴⁾に従うと、原点を通る割線で定義される地盤反力係数 k は次式のように定式化できる。

$$p = k\delta \quad \because k = k_0 \sqrt{\frac{\delta_0}{\delta}} \quad (2)$$

$$p = p_0 \sqrt{\delta/\delta_0} = k_0 \sqrt{\delta_0} \cdot \delta \quad \because k_0 = p_0 / \delta_0$$

$$k_0 = \alpha \cdot E_0 \cdot (100D)^{-3/4} \times 10^4 \text{ (kN/m}^3\text{)}; \quad \alpha = 0.2, \quad E_0 = 28N$$

基準となる k_0 は N 値から推定する方法を用いた。式(1)を線形微分方程式として解くと以下の解が得られる。

$$\delta(z) = e^{-\beta z} (a \cos \beta z + b \sin \beta z) + e^{\beta z} (c \cos \beta z + d \sin \beta z) \quad (3)$$

杭長を無限と仮定して、発散しないように係数を $c=d=0$ とすると Chang の公式と知られて無限長杭に対する解を得ることができる。

式(1,2)に基づくと、たわみ関数と係数との関係をマトリックス方程式の形で整理できる。

$$\begin{Bmatrix} \delta \\ \theta \\ M \\ Q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\beta z} \cos \beta z & e^{-\beta z} \sin \beta z & e^{\beta z} \cos \beta z & e^{\beta z} \sin \beta z \\ -\beta e^{-\beta z} (-\cos \beta z) & -\beta e^{-\beta z} (+\cos \beta z) & -\beta e^{\beta z} (+\cos \beta z) & -\beta e^{\beta z} (-\cos \beta z) \\ 2\beta^2 EI e^{-\beta z} \sin \beta z & -2\beta^2 EI e^{-\beta z} \cos \beta z & -2\beta^2 EI e^{\beta z} \sin \beta z & 2\beta^2 EI e^{\beta z} \cos \beta z \\ 2\beta^3 EI e^{-\beta z} (-\sin \beta z) & 2\beta^3 EI e^{-\beta z} (+\sin \beta z) & 2\beta^3 EI e^{\beta z} (-\sin \beta z) & 2\beta^3 EI e^{\beta z} (+\sin \beta z) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\Rightarrow \{Q\}_{(z)} = [S]_{(z)} \{A\}$$

この関係を整理することによって、均質な単一の層内における応答関数 $[R]_{(z)}$ を以下のように定義できる。

図 2 に示す非線形挙動に対して非線形な解を誘導するのは困難なため、杭を複数のセグメントに分割して多次線

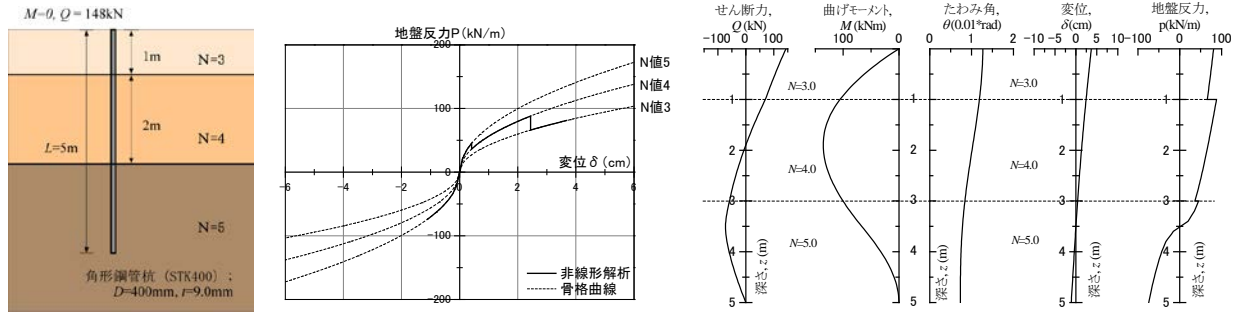


図 3 非線形応答関数を用いた層状地盤における杭のたわみ挙動

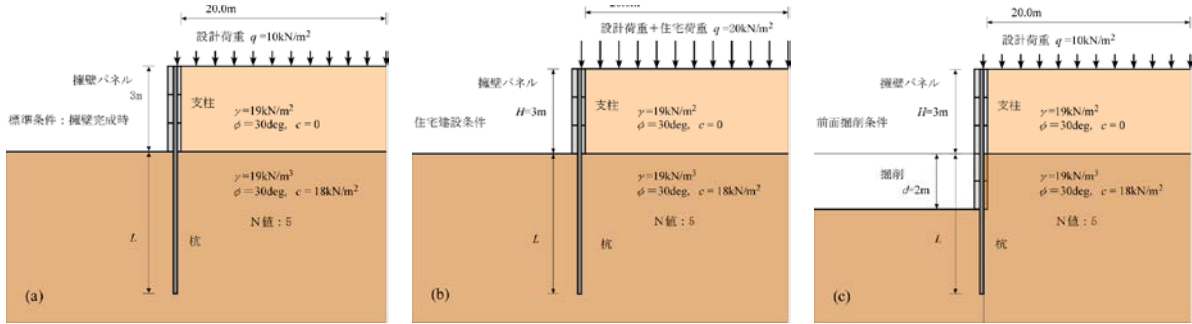


図 4 地盤と擁壁の設定条件：(a) 標準条件，(b) 住宅建設条件，(c) 前面掘削条件

形関係で表すことを考える。式(1)を以下のように修正され、解(式(4))も以下ようになる。

$$p = k^* \delta + p^* \Rightarrow -EI \frac{d^4 \delta}{dz^4} = P = pD = k^* D \delta + p^* D \quad (4)$$

$$\{Q(z)\} = [S(z)]\{A\} + \{U(z)\} \quad (5)$$

$$\therefore \{U(z)\} = \{-p\delta^* / k \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T$$

最終的に応答関数は以下のようにまとめられる。

$$\begin{aligned} \{Q(z)\} &= [Q(z)] = [R(z)]\{Q(0)\} + [V(z)] \\ \therefore [R(z)] &= [S(z)][S(0)]^{-1} \cdot [V(z)] = [U(z)] - [R(z)]\{U(0)\} \\ [R(z)] &= \begin{bmatrix} +\cosh \beta z \cos \beta z & -\cosh \beta z \sin \beta z & +\frac{\sin \beta z \sinh \beta z}{2\beta^2 EI} & -\frac{\sinh \beta z \cos \beta z}{4\beta^2 EI} \\ \beta \begin{pmatrix} +\cosh \beta z \sin \beta z \\ -\sinh \beta z \cos \beta z \end{pmatrix} & +\cosh \beta z \cos \beta z & -\frac{\cosh \beta z \sin \beta z}{2\beta^2 EI} & -\frac{\sin \beta z \sinh \beta z}{2\beta^2 EI} \\ 2\beta^2 EI (-\sin \beta z \sinh \beta z) & \beta EI \begin{pmatrix} +\cosh \beta z \sin \beta z \\ -\sinh \beta z \cos \beta z \end{pmatrix} & +\cosh \beta z \cos \beta z & +\frac{\cosh \beta z \sin \beta z}{2\beta^2 EI} \\ 2\beta^2 EI \begin{pmatrix} -\cosh \beta z \sin \beta z \\ -\sinh \beta z \cos \beta z \end{pmatrix} & 2\beta^2 EI (+\sin \beta z \sinh \beta z) & \beta \begin{pmatrix} -\cosh \beta z \sin \beta z \\ +\sinh \beta z \cos \beta z \end{pmatrix} & +\cosh \beta z \cos \beta z \end{bmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

地盤が層構造を有する場合には、各層の剛性に応じた式(6)のを連結して用い、杭頭と杭先端における境界条件を与えることによって、繰り返し計算を経てたわみ挙動を計算することが可能になる。

3.2 非線形応答関数を用いた計算例

層状地盤の杭の挙動を解析した結果の一例を図 3 に示す。図示した 3 層構造では、N 値が異なる設定とし、杭頭にはせん断力のみを与えた。図示のように、繰り返し計算の結果、たわみ量とたわみ角、曲げモーメント、せん断力は各層の境界においても連続性が満たされている結果となっている。地盤反力は層ごとに N 値に応じた値が得られている。この例では杭長全体を 50 分割し、実用的には十分な精度が得られることを確認している。

4. 宅地開発における地盤と擁壁の設定条件

4.1 3 ケースの設定条件

本研究で設定した宅地開発用擁壁の検討条件は図 4(a,b,c) に示すようである。上段に示す「(a) 標準条件」は、宅地開発の過程で盛土が完成した状態に対応している。設計上載荷重は標準値として、 $q=10\text{kN/m}^2$ とし、擁壁の背後地盤は非粘性土による盛土、基礎地盤は粘着成分を獲得した自然地盤(地山)と設定した。基礎地盤の N 値は 5 とし、他の地盤条件は図中に示すとおりである。中段は「(b) 住宅建設条件」であり、「(a) 標準条件」に住宅建設による荷重を等分布荷重($q=10\text{kN/m}^2$)として付加した。下段は「(c) 前面掘削条件」であり、「(a) 標準条件」において前面を深さ $d=2\text{m}$ 掘削すると設定した。

「(b) 住宅建設条件」においては擁壁に作用する土圧が増加するので、支柱はたわみ、壁面が前方へ変位するとともに、盛土地盤には沈下すると考えられる。一方、「(c) 前面掘削条件」では、擁壁に作用する盛土地盤からの土圧は変化しないが、基準面が 2m 下がることによって、基礎地盤から新たに土圧が作用し、加えて壁高と支柱長が長くなるための杭頭曲げモーメントの増大する。さらには、杭長が掘削深に相当する 2m 短くなるという影響によって、擁壁の荷重耐力は大幅に増大すると設定している。

4.2 擁壁に作用する土圧および杭頭荷重の算定

表 2 は、一例として(c) 前面掘削条件における土圧分布およびその結果として生じる杭頭荷重の計算結果を示している。土圧の計算には壁面摩擦角を考慮できるクーロンの土圧論を適用した。関連するパラメータの値は表中に示

表 2 擁壁に作用する土圧と杭頭荷重の算定：(c) 前面掘削条件

「盛土」				土圧強度: p (kN/m ²)				
湿潤重量, γt (kN/m ³)	19.0	上載荷重, q (kN/m ²)	10.0	壁高, H (m)	1.0	2.0	3.0	
粘着力, c (kN/m ²)	0.0	内部摩擦角, ϕ (deg)	30.0	擁壁天端	2.794	2.794	2.794	
壁面摩擦角, δ (deg)	20.0	主動土圧係数, K_a	0.29731	擁壁下端	8.102	13.410	18.718	
「基礎地盤」				掘削天端	0.0	-10.344	-5.035	0.273
湿潤重量, γt (kN/m ³)	19.0	掘削深さ d (m)	2.0	掘削下端	-2.0	0.273	5.581	10.889
粘着力, c (kN/m ²)	18.0	内部摩擦角, ϕ (deg)	30.0	曲げモーメント M (kNm)	-1.296	126.241	325.858	
壁面摩擦角, δ (deg)	20.0	主動土圧係数, K_a	0.29731	せん断力 Q (kN)	-13.868	50.249	130.292	
杭間隔, B (m)	3.00	パネル重量, W_p (kN)	3.500	軸力 F (kN)	1.952	25.289	54.422	

土圧分布 (水平成分)

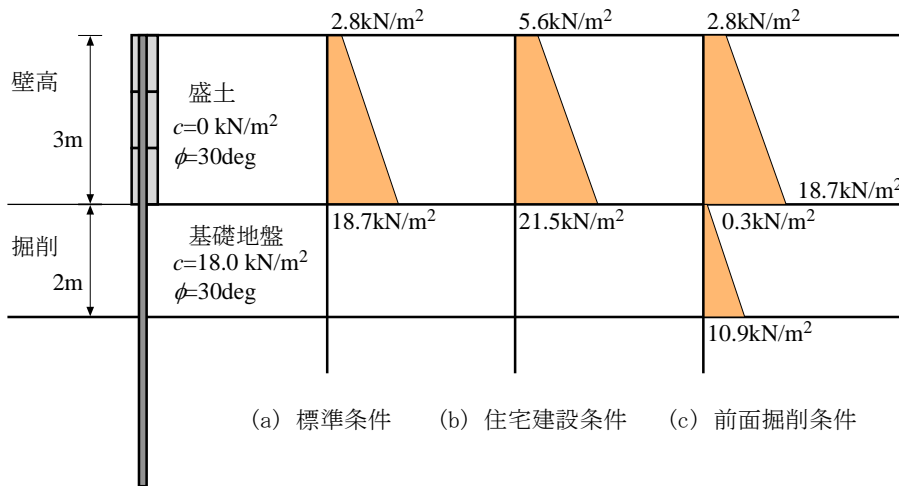


図 5 3条件において擁壁に作用する土圧の分布：壁高 3 m

表 3 各条件における杭頭荷重の算定結果：角形鋼管：左側 壁高 $H=3m$, 右側 壁高 $H=2m$

壁高 $H=3m$						壁高 $H=2m$							
条件	杭間B(m)	M (kNm)	Q (kN)	F (kN)	1.2M (kNm)	杭径 D (mm)	条件	杭間B(m)	M (kNm)	Q (kN)	F (kN)	1.2M (kNm)	杭径 D (mm)
条件(a)	3	109.4	96.8	42.2	131.3	P _s 250	条件(a)	3	38.0	48.6	24.7	45.6	P _s 175
	2.0	72.9	64.5	28.2	87.5	P _s 250		2.0	25.3	32.4	16.5	30.4	P _s 150
	1.5	54.7	48.4	21.1	65.6	P _s 200		1.5	19.0	24.3	12.3	22.8	P _s 150
	1.0	36.5	32.3	14.1	43.8	P _s 175		1.0	12.7	16.2	8.2	15.2	P _s 150
条件(b)	3	147.1	121.9	51.4	176.5	P _s 300	条件(b)	3	54.8	65.4	30.8	65.7	P _s 200
	2.0	98.1	81.3	34.3	117.7	P _s 250		2.0	36.5	43.6	20.5	43.8	P _s 175
	1.5	73.5	61.0	25.7	88.3	P _s 250		1.5	27.4	32.7	15.4	32.9	P _s 150
	1.0	49.0	40.6	17.1	58.8	P _s 200		1.0	18.3	21.8	10.3	21.9	P _s 150
条件(c)	3	325.9	130.3	54.4	391.0	P _s 400	条件(c)	3	126.2	50.2	24.7	151.5	P _s 250
	2.0	217.2	86.9	36.3	260.7	P _s 350		2.0	84.2	33.5	16.5	101.0	P _s 250
	1.5	162.9	65.1	27.2	195.5	P _s 300		1.5	63.1	25.1	12.3	75.7	P _s 200
	1.0	108.6	43.4	18.1	130.3	P _s 250		1.0	42.1	16.7	8.2	50.5	P _s 175

している。標準条件を含む3つの条件における土圧分布は図5に示すようである。

各条件において、杭・支柱の間隔を1mと3mの間で4通り設定して得られた杭頭荷重を表3にリストしている。杭頭荷重は単純に杭・支柱間隔に比例している。左右の表はそれぞれ壁高 $H=3m$ と $2m$ に対応している。杭頭の曲げモーメントは壁高のおおよそ3乗に比例するので、両者では3倍程度の杭頭荷重の違いが見られる。これらに対してどのように鋼管断面を選択し、さらには必要な杭長を算定することが設計における重要な工程となる。

最大曲げモーメントは地盤面から1m弱下がったところで現れるが、その値は杭頭曲げモーメントよりも20%程度増加する傾向がある。したがって、表3には1.2倍した曲げモーメント値を示すとともに、その曲げモーメント値

を許容できる角形鋼管断面を表1から選択し、表の右端の列に示している。表1に示す角形鋼管杭のリストでは、断面係数は杭径の3乗に比例する傾向があるので、支柱・杭の設置間隔が $B=1m$ と $3m$ では、選択された杭径 D におよそ1.5倍の差があることが分かる。一方、壁高が $H=3m$ と $2m$ では杭頭曲げモーメントにほぼ3倍の差があるのに対して、選択された杭径にはここでも約1.5倍の差があることが認められる。

5. たわみ解析による杭断面と杭長の決定

図6には本研究における検討条件を決定するために予備的に実施したたわみ解析の結果を示している。上載荷重の増大によって、曲げモーメントがおおよび擁壁の水平変位

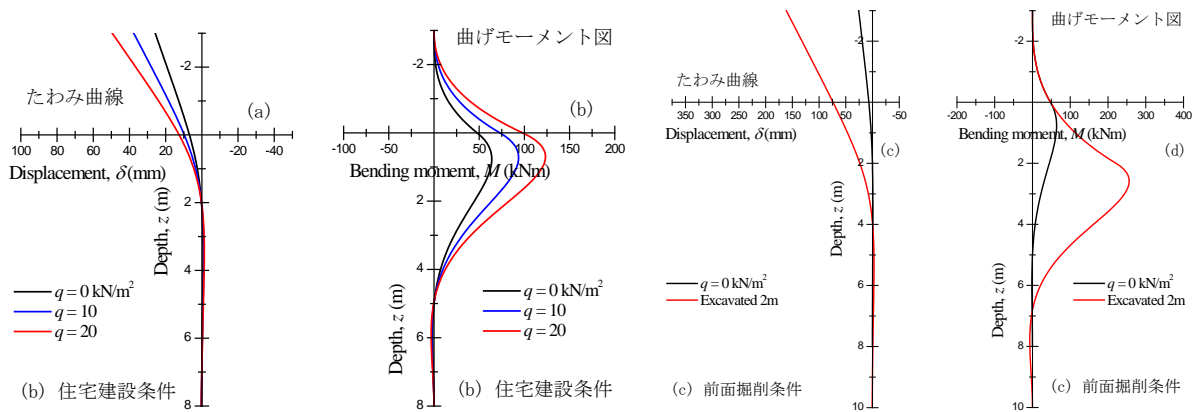


図 6 応答関数法による水平変位と曲げモーメントの分布：円形鋼管 (D=267.4, t=9.3)
 (a, b) 住宅建設条件；L=6m (c, d) 前面掘削条件；L=10m

表 4 許容応力度から決定した杭断面に対する必要杭長

(a) 標準条件	壁高 H = 3m				壁高 H = 2m			
杭間隔 B(m)	3.0	2.0	1.5	1.0	3.0	2.0	1.5	1.0
杭寸法 D(mm)	250	250	200	175	175	150	150	150
Mo (kNm)	109.4	72.9	54.7	36.5	38	25.3	19.0	12.7
Qo (kN)	96.8	64.5	48.4	32.3	48.6	32.4	24.3	16.2
無限長公式								
Lc (m)	6.54	6.54	5.35	4.60	4.60	4.08	4.08	4.08
δ t (mm)	74.9	50.0	64.0	64.6	55.7	50.9	38.2	25.5
δ o (mm)	23.0	15.3	16.0	13.7	17.8	14.5	10.9	7.3
応答関数法								
δ o (mm) = D*0.05	12.5	12.5	10.0	8.8	8.8	7.5	7.5	7.5
δ t (mm)								25.9
L(m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.20
Mmax (kNm)								16.5
(b) 住宅建設条件								
杭間隔 B(m)	3.0	2.0	1.5	1.0	3.0	2.0	1.5	1.0
杭寸法 D(mm)	300	250	250	200	200	175	150	150
Mo (kNm)	147.1	98.1	73.5	49.0	54.8	36.5	27.4	18.3
Qo (kN)	121.9	81.3	61.0	40.6	65.4	43.6	32.7	21.8
無限長公式								
Lc (m)	7.51	6.54	6.48	5.35	5.35	4.6	4.08	4.08
δ t (mm)	68.2	65.3	49.0	56.2	53.7	52.0	53.6	35.7
δ o (mm)	23.4	19.7	14.8	13.8	19.4	16.4	15.0	13.5
応答関数法								
δ o (mm) = D*0.05	15.0	12.5	12.5	10.0	10.0	8.8	7.5	7.5
δ t (mm)								
L(m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mmax (kNm)								
(c) 前面掘削条件								
杭間隔 B(m)	3.0	2.0	1.5	1.0	3.0	2.0	1.5	1.0
杭寸法 D(mm)	400	350	300	250	250	250	200	175
Mo (kNm)	325.9	217.2	162.9	108.6	126.2	84.2	63.1	42.1
Qo (kN)	130.3	86.9	65.1	43.4	50.2	33.5	25.1	16.7
無限長公式								
Lc (m)	11.84	10.67	9.51	8.54	8.54	8.54	7.35	6.60
δ t (mm)	82.4	78.1	89.2	91.7	86.5	57.7	80.9	87.3
δ o (mm)	21.3	17.6	17.0	14.7	17.0	11.4	12.3	10.9
応答関数法								
δ o (mm) = D*0.05	20.0	17.5	15.0	12.5	12.5	12.5	10.0	8.8
δ t (mm)						60.8		
L(m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.40	0.00	0.00
Mmax (kNm)						92.3		

が目に見えて増大する様子がみられる。また、擁壁の前面掘削による曲げモーメントと変位の増大は、上載荷重よりも深刻であることが分かる。

5.1 許容応力から決定した杭断面に対する検討

表 3 に示した許容応力条件を満たす杭断面に対して、応答関数を用いたたわみ挙動を検討した結果を表 4 に示

している。表中においては、杭を十分に長くとっても杭頭変位 δ_o が許容条件を満たさなく、結果として杭長を決定できないケースを赤で示している。杭頭変位の許容条件には種々の提案があり定まっていないが、本研究では杭径 D の 5% 許容値とした。杭径によらない許容変位を設定する考え方もあるが（例えば 15mm）、杭の変位によって基礎地盤に生じるひずみは水平変位の杭径に対する比 δ_o / D

表 5 杭頭の許容変位から決定した杭断面に対する必要杭長： $\delta_0/D < 5\%$

(a) 標準条件	壁高 H = 3m				壁高 H = 2m			
杭間隔 B(m)	3.0	2.0	1.5	1.0	3.0	2.0	1.5	1.0
杭寸法 D(mm)	350	300	250	250	250	200	200	150
Mo (kNm)	109.4	72.9	54.7	36.5	38	25.3	19	12.7
Qo (kN)	96.8	64.5	48.4	32.3	48.6	32.4	24.3	16.2
無限長公式								
Lc (m)	8.67	7.51	6.54	6.54	6.54	5.35	5.35	4.60
δt (mm)	37.1	34.9	37.5	25.0	24.0	41.4	19.3	18.6
δo (mm)	14.54	12.143	11.48	7.66	10.3	14.9	7.1	5.9
応答関数法								
δo (mm) = D*0.05	17.5	15.0	12.5	12.5	12.5	10.0	10.0	7.5
δt (mm)	43.5	41.7	39.7	40.4	28.5	26.8	26.6	26.6
L(m)	5.10	4.30	4.50	2.85	3.80	3.90	2.65	2.20
Mmax (kNm)	155.7	97.8	72.4	43.5	55.8	36.0	24.8	16.5
(b) 住宅建設条件								
杭間隔 B(m)	3.0	2.0	1.5	1.0	3.0	2.0	1.5	1.0
杭寸法 D(mm)	400	350	300	250	300	250	200	175
Mo (kNm)	147.1	98.1	73.5	49.0	54.8	36.5	27.4	18.3
Qo (kN)	121.9	81.3	61.0	40.6	65.4	43.6	32.7	21.8
無限長公式								
Lc (m)	9.84	8.67	7.51	6.54	7.51	6.54	5.335	4.6
δt (mm)	36.0	32.1	24.2	32.6	24.1	22.2	26.9	26.0
δo (mm)	15.4	12.4	9.5	9.9	11.3	9.4	9.7	8.2
応答関数法								
δo (mm) = D*0.05	20.0	17.5	15.0	12.5	15.0	12.5	10.0	8.8
δt (mm)	46.1	44.4	48.3	40.1	31.9	29.2	27.4	27.1
L(m)	5.25	4.30	3.30	3.60	3.90	3.40	4.25	3.30
Mmax (kNm)	208.8	130.3	94.2	61.2	80.1	50.6	38.3	23.9
(c) 前面掘削条件								
杭間隔 B(m)	3.0	2.0	1.5	1.0	3.0	2.0	1.5	1.0
杭寸法 D(mm)	450	400	350	300	300	250	250	200
Mo (kNm)	325.9	217.2	162.9	108.6	126.2	84.2	63.1	42.1
Qo (kN)	130.3	86.9	65.1	43.4	50.2	33.5	25.1	16.7
無限長公式								
Lc (m)	12.72	11.84	10.67	9.51	9.51	8.54	8.54	7.35
δt (mm)	64.3	54.9	58.5	59.4	56.7	57.7	43.3	53.9
δo (mm)	18.3	14.2	13.2	11.3	13.2	11.4	8.5	8.2
応答関数法								
δo (mm) = D*0.05	22.5	20.0	17.5	15.0	15.0	12.5	12.5	10.0
δt (mm)	75.6	73.5	72.9	73.0	61.8	60.8	57.6	60.2
L(m)	8.15	6.90	6.60	6.00	6.75	6.40	5.20	5.15
Mmax (kNm)	385.6	247.4	183.0	119.3	140.8	92.3	67.6	44.7

に直接関連していると考えられるので、ここでは、やや緩めの 5% という値を採用した。図がほとんどのケースで許容変位が満たされないことを示しているように、このタイプの擁壁の設計では概して許容応力条件よりも許容変位条件の方が厳しいと言える。

5.2 許容変位から決定した杭断面に対する検討

前節において杭頭における水平変位 δ_0 が許容変位を満足しないケースでは、杭・支柱の径を1回り大きくする必要がある。新たな径 D に対して非線形応答関数解析を実施して許容変位を満たすことを確認した後、必要最短杭長 L を繰り返し計算により算定した。その結果を表 5 に列挙している。表中には無限長杭の公式 (Chang の公式) により求めた杭長 L_c も合わせて示している。必要杭長 L は L_c よりも十分に短くてよく、半分以下でも足りるケースがあることが分かる。

擁壁の前面掘削は条件としてかなり厳しいが、杭・支柱間隔を $B=3m$ と長くした場合でも、表 1 に示した杭断面のリストの範囲で十分に設計することが可能であることが分かった。

6. おわりに

本研究では、杭基礎パネル式擁壁を宅地開発に適用することを想定して、「住宅建設による上乗荷重の増大」と「擁壁の前面掘削」を想定してその妥当性を検討した。擁壁前面が掘削されるような場合には、土圧の増大による杭頭荷重の増大に加えて、杭長が減少することにより擁壁の耐力は大幅に減少するが、市販の角形鋼管を用いることによって十分に設計・施工が可能であることが分かった。また、本研究では、非線形応答関数法を用いることにより杭・支柱のたわみ挙動を検討したが、無限長杭の公式を用いるよりも経済的な設計が可能であることを示すことができた。

参考文献

- 1) 右城猛：新・擁壁の設計法と計算法，理工図書，1998。
- 2) 岩越恭平，三浦均也，栗田和博，松田達也：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，地盤工学会中部支部，地盤工学シンポジウム，2015。
- 3) 三浦均也，松田達也，鈴木恒太，小野正，小林睦：切削式杭基礎パネル擁壁の構造と施工法および設計試算による適用性の検討，地盤工学シンポジウム，2018。
- 4) 建築基礎構造設計指針 6.6節；日本建築学会 (2001)，pp. 262-296。