

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 Construction and Design Method for Cutting Facing Panel Piled Retaining Wall

三浦均也¹，松田達也¹，鈴木恒太²，東洗成³，
栗田和博⁴，小浪岳治⁵，林豪人⁵，小林睦⁶

- 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 豊橋技術科学大学，建築・都市システム学課程
- 4 株式会社 サインファースト
- 4 株式会社 岡三リビック
- 4 豊田工業高等専門学校，環境都市工学科

概 要

重力式擁壁に代表される既往の擁壁においては，建設する際に背後の地山を一度掘削し，その後裏込め土を盛り立てる必要がある。この際、既存の地山が有していた一体性，剛性，強度が減少するため，設計外力である擁壁に作用する土圧が増大し，擁壁を不安定にするという問題がある。加えて，施工過程においては，切土および盛土の工程による土工量の増大，擁壁本体の施工における掘削工，型枠工，鉄筋工，コンクリート打設工など一連の工程が施工期間と施工費用の増大の主要因となっている。提案する，切削式杭基礎擁壁では，地山保存しながら切削することで，これらの問題点を改善できることが期待できる。本研究では切削杭基礎擁壁の設計・施工法を紹介するとともに，設計試算を行うことによってその適用範囲と可能性を示すことを目的としている。さらには，上段に補強土擁壁を構築する複合構造についても試設計を実施することでその適用可能性について検討する。

キーワード：擁壁，杭基礎，切削式，施工法，試設計

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⁾。

重力式擁壁や補強土擁壁に共通する課題としては，擁壁を設置する際に，重力式では本体の打設やユニットの設置のため，また，補強土壁では十分な長さの補強材を設置するため，既設の盛土や地山を一時的にせよ切り崩す必要に迫られるということである。このことにより地山が有している，あるいは既設の盛土が年数を経て獲得した土体の一

体性が切り崩しによって失われてしまう。このことは材料のせん断強度の低下を意味し，粒度の良い砂礫材料に対して法面の傾斜が，盛土では1.5～2.0であるのに対して切土では0.8～1.5としていることなどにも表れている²⁾。このような擁壁背後地盤の切り崩しとそれに伴うせん断強度の低下は擁壁に作用する土圧を増大させるので擁壁を不安定にし，同時に工事の専有面積を広くして土工量を増大させることになっている。

本研究で提案する切削式杭基礎パネル擁壁は，既設の盛土内や切土内に擁壁を，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。

本研究では，切削式杭基礎パネル擁壁単独の場合と，背後地盤上面に補強土盛土を載せる場合の2ケースについてたわみ解析を実施し，支柱－杭一体構造の断面の選択，

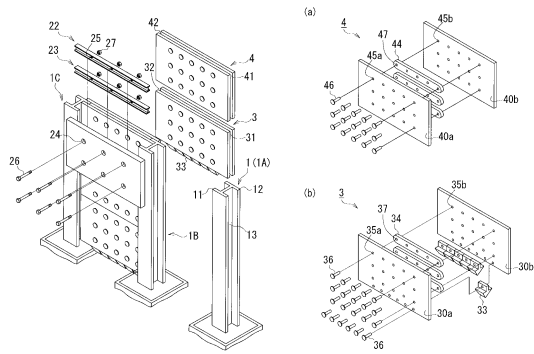


図 1 杭基パネル擁壁
(a) 切削パネル, (b) 切削パネル最下端

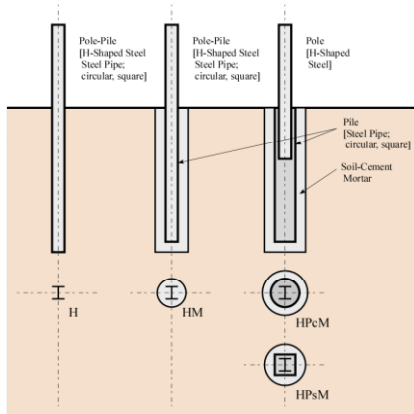


図 2 H 型鋼・円形鋼管, 角形鋼管, 柱状改良体を組み合わせた支柱-杭一体構造の選択肢

杭長の決定を含む構造設計手法を検討するとともに、杭基礎パネル擁壁の適用範囲について検討する。

2. 擁壁の構成と施工方法

2.1 擁壁の構成

図 1 は擁壁を構成する杭-支柱一体構造と壁面パネル、および切削パネルを示している。支柱には H 型鋼を採用している。切削パネルは H 型鋼支柱のフランジをガイドとして上下にスライドする鉄製の版であり、下部には硬質金属製の地盤を切削するための直線刃を備えている。

支柱-杭一体構造には種々の組み合わせが可能である (図 2 参照)。壁高が低く地盤が比較的良好 (N 値が高い) 場合には杭と支柱を一本の H 形鋼とすることができる; H, HM。一方、壁高が高く地盤が比較的良好でない (N 値が低い) 場合には、打設した鋼管杭 (円形鋼管または角形鋼管) に H 形鋼支柱を差し込む形式とすることが可能である; HPcM, HPsM。市街地において騒音と振動を避けるためには、地盤改良技術によって施工した地盤改良柱体に杭を立て込むことを選択することができる; HM, HPcM, HPsM。

壁面パネルは土圧に耐えられる鉄筋コンクリート製のプレキャスト部材とし、補強土擁壁で使用されている既存の壁面パネルを利用することも選択肢である³⁾。

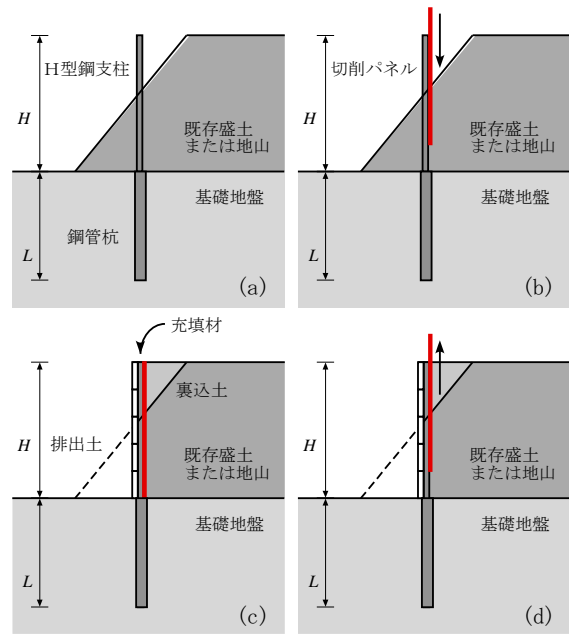


図 3 切削式杭基礎パネル擁壁の施工手順

2.2 施工手順

図 3 は既設の盛土または地山の法面に切削式杭基礎パネル擁壁を構築する場合の施工手順を示している。以下では、鋼管杭と H 型鋼の組み合わせる場合 (HPsM) を示した。(a) 余擁壁構築位置に杭-支柱一体構造を所定の間隔で設置する。(b) H 形鋼支柱の奥側フランジをガイドとして切削パネルを圧入する。(c) 切削パネル前面の土砂を排出し、壁面パネルを支柱手前側フランジに取り付ける。排土を転用するなどして、裏込め土を uploads し、壁面パネルと切削パネルの間には砕石や発泡剤などの充填材を投入する。(d) 切削パネルを引き抜いて撤去する。

試設計で対象とする単独の杭基礎パネル擁壁と補強土擁壁を uploads する杭基礎パネル擁壁の概形を図 4 と図 5 に示す。下段に杭式パネル擁壁を設置することによって基礎地盤の支持力が十分に得られない場合や、支持地盤が深い場合などに補強土擁壁の適用範囲が広がられると考えられる。

3. 擁壁の設計方法

3.1 横荷重を受ける杭のたわみ解析手法

著者ら⁴⁻⁷⁾はこれまでに、応答関数を用いた横荷重を受ける杭のたわみ解析手法を提案し、看板、擁壁自立式鋼矢板の設計に適用してきた。また、試験施工と載荷試験を実施して解析手法の妥当性を検証した。広く用いられている Chang の公式が均質地盤における無限長を仮定した杭を対象としているのに対し、提案している応答関数を用いた解析により、有限長の杭や矢板のたわみ解析が層状地盤において可能になる。このことにより、杭の変位が杭の曲げ剛性と地盤反力のみならず杭長の関数として算定できるため、より合理的で経済的な杭断面と杭長の設計が可能に

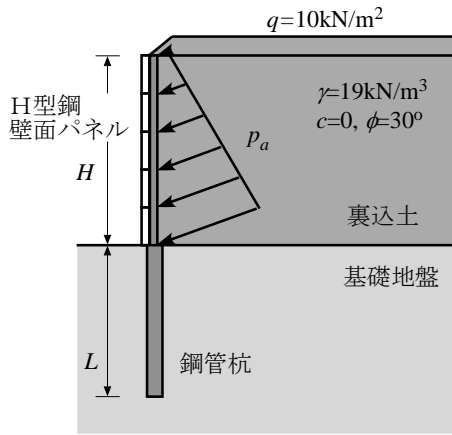


図 4 杭基礎パネル擁壁の概形

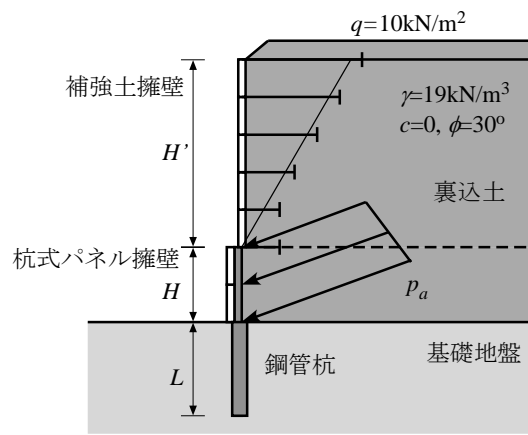


図 5 補強土壁を有する杭基礎パネル擁壁の概形

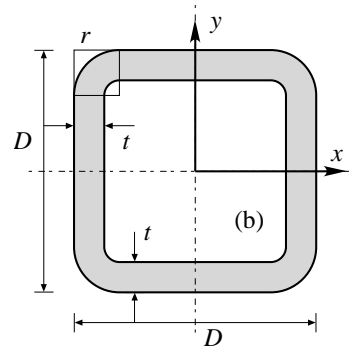
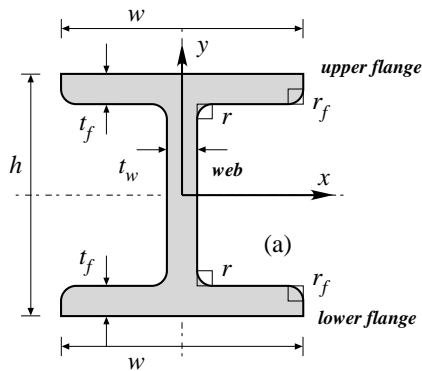


図 6 鋼材断面の定義 (a) H型鋼, (b) 角形鋼管

なる。本研究では均質地盤を想定しているが、この解析手法によって有限長杭のたわみ解析を実施する。

3.2 設計手順

杭と支柱の選択および、杭長の決定に関する設計手順を説明する。

- 1) 壁面パネルに作用する土圧の算定：裏込め土の単位体積重量，せん断強度に加えて，擁壁の高さ H ，上載荷重 q を考慮して Coulomb の土圧論による主働土圧を計算する。壁面パネルの位置に対応して個々のパネルに作用する土圧強度を計算し，壁面パネル耐力を選択するための条件とする。
- 2) 支柱断面の選択：壁面パネルに作用する主働土圧の分布から支柱間隔 B を考慮して支柱一杭一体構造 1 本あたりの荷重を計算する。支柱に作用する断面荷重が最も厳しいのは基部（杭との接合部）であり，その断面力に基づいて支柱断面を選択する。支柱には曲げモーメントに加えて，せん断力，軸力も作用するが，圧倒的に大きな曲げ圧縮応力が鋼材の長期許容応力度を下回ることを条件として H 型鋼の断面を選択する。必要に応じて鑄代を考慮する必要がある。
- 3) 杭長の算定；施工上の制約から，角形鋼管の内径は支柱 H 形鋼の外径を 100mm 程度上回るように，杭の断面を選択する。N 値の関数となる地盤反力と土圧分布に対して，支柱と杭の全体に対して応答関数法による

たわみ解析を実施する。地表面下における最大の曲げモーメント発生位置における曲げ応力度が杭の長期許容応力度を下回ることを確認し，杭頭水平変位が杭径 D の 5% を上回らないように，最短の杭長を決定する。杭には軸力も作用するが，通常は極限鉛直支持力の数%程度であるので，本研究では鉛直荷重を検討対象としなかった。また，必要に応じて支柱天端における変位に対しても許容値を設定するが，ここでは除外した。

4. 杭基礎パネル擁壁の試設計

4.1 設計条件

試設計を行った条件を以下に整理して示す

- 1) 擁壁の形状：図 4 に擁壁の概形と条件を示す。補強土擁壁で用いられる標準的な壁面パネルは高さ 1m，幅 1.5m であり，壁高は $H=1\sim 7\text{m}$ まで 1m ごとにパラメトリックに変化させた。裏込め土は砂質土 ($\gamma=19\text{kN/m}^3$, $c=0$, $\phi=30^\circ$) を想定し，上載荷重を $q=10\text{kN/m}^2$ とした。壁面パネルに作用する土圧は Coulomb の土圧論により主働土圧として算定し，壁面摩擦角は $\delta=2\phi/3$ とした。支柱間隔は $B=1.5, 2.25, 3.0\text{m}$ の 3 通りについて検討した。地盤の特性は N 値が 3, 5, 10 の 3 通りを条件とした。
- 2) 使用材料：図 6 には H 形鋼と角形鋼管の断面の定義

表 4 杭頭荷重の整理と支柱と杭の断面選択

支柱・杭の選択		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
杭間隔, B(m)								
1.50	杭頭 M(kNm)	3.42	19.00	54.69	118.46	218.27	362.08	557.85
	H型鋼	H 100	H 150	H 200	H 300	H 350	H 400	H 414
	Ma(kNm)	8.06	24.32	55.26	163.31	284.93	422.25	583.00
	角形鋼管	Ps 250	Ps 300	Ps 350	Ps 450	Ps 500	Ps 550	Ps 550
2.25	杭頭 M(kNm)	5.13	28.50	82.03	177.69	327.40	543.11	836.78
	H型鋼	H 100	H 200	H 250	H 350	H 400	H 414	H 458
	Ma(kNm)	8.06	55.26	103.26	284.93	422.25	583.00	1098.12
	角形鋼管	Ps 250	Ps 350	Ps 400	Ps 500	Ps 550	Ps 550	Ps 600
3.00	杭頭 M(kNm)	6.84	38.00	109.38	236.91	436.53	724.15	1115.70
	H型鋼	H 100	H 200	H 300	H 350	H 414	H 428	H 498
	Ma(kNm)	8.06	55.26	163.31	284.93	583.00	735.09	1626.79
	角形鋼管	Ps 250	Ps 350	Ps 450	Ps 500	Ps 600	Ps 600	Ps 650

表 5 たわみ解析により決定した杭長および鋼材重量

杭のたわみ解析	N値	5	短期許容応力	腐食代なし	Lo (m)	1.5	7.0	
壁高, H (m)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	
杭間隔, B(m)	3.00							
杭頭荷重	M (kNm)	6.845	37.996	109.377	236.914	436.531	724.153	1115.704
	Q (kN)	16.344	48.612	96.805	160.923	240.965	336.932	448.824
	F (kN)	12.949	24.693	42.234	65.571	94.704	129.633	170.359
支柱	H形鋼	H 100	H 200	H 300	H 350	H 414	H 428	H 498
	Ma(kNm)	8.06	55.26	163.31	284.93	583.00	735.09	1626.79
	m (kg/m)	12.47	40.78	79.22	118.84	213.28	264.26	584.14
	mt(kg)	31.18	142.73	356.49	653.62	1386.32	1981.95	4965.19
杭	角形鋼管	Ps 250	Ps 350	Ps 450	Ps 500	Ps 600	Ps 600	Ps 650
	Ma(kNm)	160.73	386.84	750.30	948.86	1415.97	1415.97	1684.52
	δ t(mm)	29.09	43.58	56.09	67.76	83.35		
	δ o(mm)	7.47	17.34	22.38	24.99	29.82		
	L	1.20	2.55	4.10	6.30	8.45		
	zmax	0.27	0.61	1.01	1.58	2.11		
	Mmax	8.98	52.14	155.97	357.39	675.41		
	m (kg/m)	130.52	216.80	320.99	360.24	438.74	438.74	478.03
	mt(kg)	156.62	552.84	1316.06	2269.51	3707.35	0.00	0.00
	支柱+杭	mt(kg)	187.80	695.57	1672.55	2923.13	5093.67	1981.95

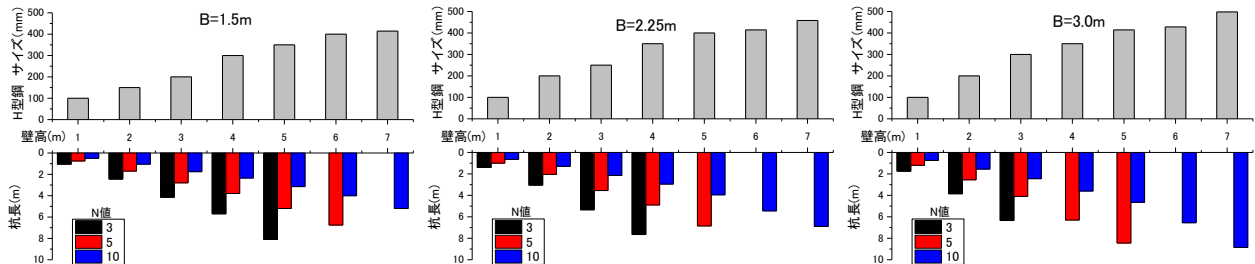


図 7 試設計により決定した杭断面および杭長

値の条件に対してたわみ解析を実施して決定した必要杭長 L と支柱と杭に対する鋼材重量を計算した。表 5 はその代表例として、支柱間隔 $B=3m$ 地盤 N 値=5 の場合について示している。杭としての鋼管杭は支柱 H 型鋼よりも一回り大きなものを選定しているの、許容曲げモーメントには十分な余裕があり、問題はなかった。一方、荷重条件と地盤受験が厳しい場合には、杭長を長くしても杭頭変位を設計条件とした杭径の 5% 以下にできないケースがあり、表 5 ではその部分を空白としている。壁高 H が高くなるとこのように杭長を決定できないケースが増えるが、この場合には杭断面をさらに一回り大きくすることによって、対応することが可能である。ただし、本研究ではそのような試算を割愛した。

4) 図 7 は検討したすべてのケースの試算結果を棒グラフで示した。必要杭長 L は壁高 H と支柱間隔 B に

じて決まり、壁高が高く、支柱間隔が広い場合には荷重場厳しくなるので必要杭長は長くなる。地盤 N 値が大きくなると地盤の反力係数が上がるので必要杭長は短くなり、 N 値が 3 から 10 へ増大すると必要杭長は半分以下に抑えられると言える。杭式擁壁の設計では、他の擁壁に比べて、地盤条件を適切に評価する必要がある。

5. 補強土擁壁を上載する杭基礎パネル擁壁の試設計

5.1 設計条件

試設計を行った条件を以下に整理して示す

1) 擁壁の形状：図 5 に擁壁の概形と条件を示す。杭式パネル擁壁の背後地盤に補強土擁壁を上載した複合形式を検討した。地盤材料や土圧の算定条件等は 4.1

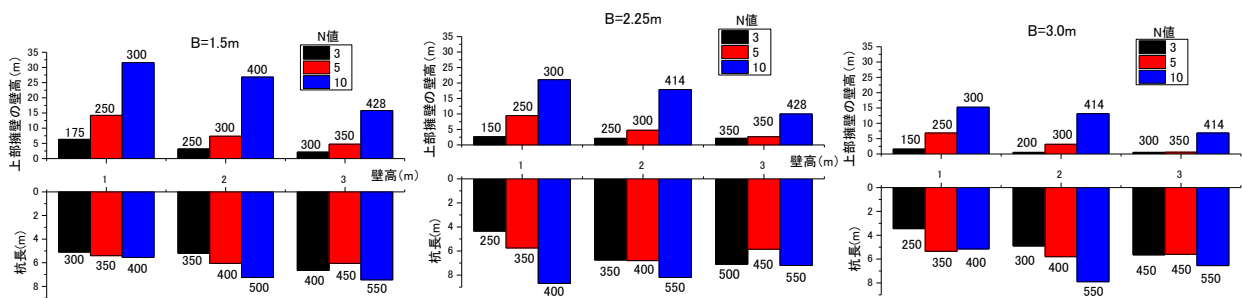


図 8 試設計により算定した上載補強土擁壁の壁高（上段）と杭長（下段）；
棒グラフ先端の数値は支柱または杭長の断面寸法

で示した杭式パネル擁壁を単独で用いる場合と同様である。補強土擁壁の設計は設計・施工マニュアル⁴⁾に基づいて行うこととし、ここでは特に検討をしていない。補強土擁壁の重量は杭式パネル式擁壁の背後地盤に上載荷重として作用し、擁壁に作用する土圧、支柱と杭に作用する外力を増大させることになる。

- 杭式パネル擁壁：壁高は $H=1, 2, 3\text{m}$ の3通りとしてパラメトリックに変化させ、その際に補強土式擁壁の壁高が最大どのくらいまで到達できるかを試算により求めた。設計条件としては支柱間隔は $B=1.5, 2.25, 3.0\text{m}$ の3通り、地盤 N 値は $3, 5, 10$ の3通りとした。

5.2 設計の結果と検討

試算の結果を以下に説明し、検討する。

- 図 8 は試算したすべてのケースの結果を棒グラフで示しており、支柱間隔ごとに整理した各図において、上段は建設可能な補強土擁壁の壁高、下段はその際の必要杭長 L を示している。棒グラフの先端の数値は支柱（上段）と杭（下段）の断面寸法を示している（表 1, 2）。
- この試算では、上載補強土擁壁と杭式パネル擁壁の条件から得られる土圧および支柱と杭への作用面力を算定することになる。その結果に基づいて、最初に支柱断面、次いで杭断面を決定することになる。したがって、杭式パネル擁壁の壁高 H が低いものほど支柱と杭の断面は小さく抑えられている。このような部材断面の違いにもかかわらず、杭式パネル擁壁の壁高 H が低い場合の方が支持能力は高く、上載補強土壁の最大壁高は高くなる。
- 上記の傾向は、壁高 H が低いほど上載荷重の増加による土圧および支柱と杭への作用外力を小さく抑えられるためである。また、支柱間隔 B が狭いほど土圧および支柱と杭に作用する外力は比例して小さくなるので、上載補強土擁壁の壁高をより高くとることが可能である。
- 地盤条件（地盤 N 値）の影響は大きく、 N 値が大きいほど杭式パネル擁壁の支持能力は格段に高くなり、上載補強土壁の最大壁高も大きくすることが可能である。ただし、 N 値が小さい場合でも、杭の断面を大き

くとることによって、この状況にある程度改善することが可能であることを、確かめている。すなわち、杭断面を杭の断面を N 値に関わらず等しく設定すると、 N 値が小さい場合には必要杭長が長くなるが、同程度の上載補強土擁壁の高さを確保することが可能である。したがって、補強土擁壁の施工実績としては壁高が 20m を超えているが、複合的な擁壁とすることにより実績をカバーできることが分かった。

6. おわりに

本研究では、土工量と建設コスト削減、施工期間削減に貢献できる、切削式杭基礎パネル擁壁の施工法とその設計方向について説明した。このような杭基礎パネル擁壁を単独で用いる場合と補強土擁壁を上載する複合形式の擁壁の場合について、条件を設定して試算を実施した。

単独の場合については壁高や支柱間隔の条件に加えて、地盤条件を考慮することによる、支柱と杭の断面選択および適用範囲を示すことができた。複合形式の場合については、杭式パネル擁壁が支持できる上載補強土擁壁の限界高さを明らかにすることができ、補強土擁壁の施工実績を十分にカバーできることを示した。

今後は試験施工および載荷試験により、設計法、施工法の検証を進める予定である。

参考文献

- 右城猛：新・擁壁の設計法と計算法，理工図書，1998.
- 日本道路協会：道路土工 一盛土工指針，2010.
- 第4版多数アンカー式補強土壁工法設計・施工マニュアル，2014.
- 高木翔太，三浦均也，栗田和博，松田達也：地盤反力の非線形性を考慮した横荷重を受ける杭のたわみ解析，地盤工学会中部支部，地盤工学シンポジウム，2015.
- 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.
- 三浦均也，松田達也，澤木達也，穴井啓太，渡辺強，栗田和博：自立式鋼矢板土留め壁の線形応答関数法によるたわみ解析と設計，地盤工学会中部支部，地盤工学シンポジウム，2016.
- 高木翔太，澤木達也，三浦均也，松田達也，栗田和博，鈴木祥哲：看板・標識のための杭基礎の載荷試験と非線形応答関数解析，土木学会中部支部研究発表会，2017.
- 例えば，JFE スチール：鋼構造設計便覧，<http://www.jfe-steel.co.jp/products/building/binran/>