

斜め控え支持杭式矢板岸壁について

1. 背景

港湾構造物の主要な施設である岸壁には重力式岸壁、矢板式岸壁、栈橋がある。このうち矢板式岸壁は、前面の鋼矢板壁と背面の控え杭（主に鋼管杭）をタイ材で結合するもので、重力式岸壁のように壁体の重量を重くすることなく岸壁を構築するもので、主に軟弱地盤に適した工法である。控え杭の形式としては、控え直杭式と、控え組杭式がある。控え組杭式は構造が複雑であり工費も控え直杭式と比較すると高いことから、採用例は少ない。

控え工の地震荷重への抵抗メカニズムとして、控え直杭式は地盤反力と杭の曲げ剛性で抵抗する。ただし、巨大地震作用時には控え杭前面の地盤は軟弱化するため、地盤反力は地震前より大幅に低下する。さらに、設計計算上は、控え杭は十分に強固な工学的基盤に根入れされる必要がないため、巨大地震作用時には軟弱化した地盤のみに支えられることになり、控え杭自体が海側へ変形してしまい、十分な耐震性を発揮できない。一方、控え組杭は、基本的に杭の軸力（杭の延長方向に伝達される力）で地震荷重に抵抗するため、巨大地震作用時に地盤が軟弱化することの影響は小さい。矢板式岸壁は背面土圧の影響により必ず海側へ変位が生じるので、変位により押し込まれる側を押し込み杭、引き抜かれる側を引き抜き杭と呼んでいる（図1）。控え組杭式矢板岸壁の特徴として、次のものが挙げられる。

①矢板壁と控え杭頭部の距離は比較的短く設定される。矢板壁背後の主働崩壊面の背後に控え杭を設置することで、控え工には地盤変位の影響がなく、かつ工費を節減できる。

②押し込み杭は、引き抜き杭と比較して同じ長さか、または短く設定され、工学的基盤まで根入れされない。これは杭に作用する軸力に対して杭先端の地盤支持力と杭周面の摩擦力で抵抗すればよいためである。引き抜き杭は先端支持力を見込めないので、周面摩擦力を大きくするために杭長が長くなるが、工学的基盤まで根入れされることはほとんどない。

以上はあくまでも慣習的な設計法の想定する耐震機構に基づくものであり、実際の耐震性評価という観点からは問題が多い。現行設計法で設計された岸壁が十分な耐震性を確保できていなかった例としては、2011年東北地方太平洋沖地震で、控え組杭式の仙台塩釜港の高砂2号岸壁（-14m）がはらみだしなどの被災を受け、基幹輸送が長期間にわたり途絶えるという支障が生じた例を挙げることができる^{1),2)}。

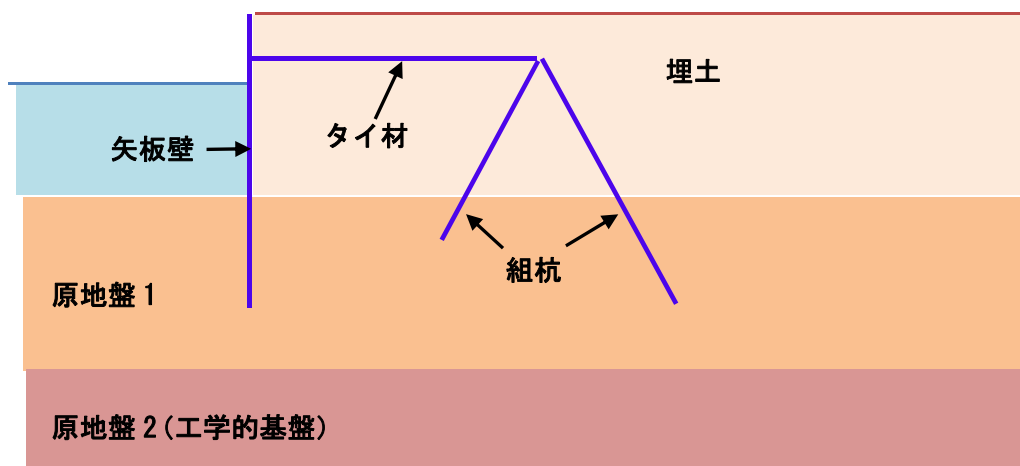


図1 控え組杭式矢板岸壁の標準的な断面

控え組杭式矢板岸壁の現行設計法の問題点で、設計コード作成者や設計実務者が認識していないポイントは以下の通りである。控え工に関する問題点に限定して記述する。

①工学的基盤以浅の地盤は巨大地震動作用時には剛性が大きく低下する。このため、押し込み杭の先端支持力と周面摩擦力は設計で想定している値より大幅に低下する。先端支持力については、杭が仮に工学的基盤に根入れされていれば、巨大地震時にも剛性低下の度合いは低く、杭に作用する軸力を地盤が支持することが可能である。

②控え工の位置は、矢板壁背後の主働崩壊面を避ければよいので、控え直杭と比較すると、矢板壁に近い位置に設置される。しかしながら、岸壁は水平成層地盤上に構築されないため、地震前の状態でもせん断応力が地盤に発生しており、その値は矢板壁に近いほど大きい。このため、地震時の地盤変形量も矢板壁に近い位置ほど大きい。控え杭は、タイ材張力を受けるとともに、地盤の変形の影響も受ける。よって、控え工を矢板壁に近い場所に設置することは耐震性能的に不利である可能性がある。

このほかの点として、控え工を組杭式にすることで、上述の通り、控え直杭式岸壁と比較すると工費が大きく増加する。

2. 提案する構造

提案する構造は、以上述べた現行設計法により設計される構造の問題点を解決するもので、図2に標準的な断面を示す。特徴は以下のとおりである。

①組杭とせず、押し込み杭のみとする。さらに、押し込み杭を工学的基盤に根入れする。引き抜き杭を伴う場合は、たとえそれが工学的基盤に根入れされていたとしても、期待できるのは工学的基盤における引き抜き抵抗のみであり、工費の増加に見合った耐震性能向上は見込めない。押し込み杭については、工学的基盤に根入れされれば、巨大地震作用時にも上述のように大きな支持力が期待できる。工学的基盤以浅の地盤は巨大地震作用時には剛性が大きく低下するため水平地盤反力はほとんど期待できないが、重量は変化するものではない。よって、斜め控え杭の上部に存在する地盤の重量が、タイ材張力などで杭に大きな曲げ変形が生じることを抑制する効果がある。

②控え杭設置位置を矢板壁から十分に離れた位置にすることによって、地震時の地盤変形の影響を受けにくくする。最適な設置位置は設計条件によって異なるが、控え直杭を設置する場合の位置程度とすることもできる。ただし、矢板～控え距離が長いほど岸壁の変形量抑制の観点からは効果が高い。

このほか、控え杭は通常、一定の間隔で離散的に設置されるが、条件により耐震性能が不足すると考えられる場合は、連続壁としてもよい。

③控え直杭の場合は、曲げ剛性でタイ材張力に抵抗するが、地盤の剛性の変化点（土層の境界）では地震時に地盤変位が大きく変化するため、控え杭に大きな曲げモーメントが発生してしまう。これは特に地盤の剛性が複雑に変化する互層条件で顕著であり、耐震性の大きな低下につながる。さらに、地震時に液状化が発生すると、杭を支える地盤反力がゼロとなるため、控え直杭の耐震性能は極端に低下する。そのような場合は地盤改良を行う必要があるが、地盤改良は施工費用の大幅な増加につながる。

本形式では、地下深い土層の境界では杭に作用する力は軸力が支配的であり、直杭のような大きな曲げモーメントは発生しない。本形式では杭上部において大きな曲げモーメント

が発生する傾向にあるが、杭の上部の剛性を高くすることで経済的に許容される範囲で比較的容易に要求される耐震性を達成することができる。さらに、大きな水平地盤反力を期待する形式ではないため、巨大地震作用時に液状化が発生したとしても耐震性能の低下は少ない。このため、条件にもよるが液状化対策は最小限でよく、工費の大幅な増加は生じないことから他形式と比較して有利である。

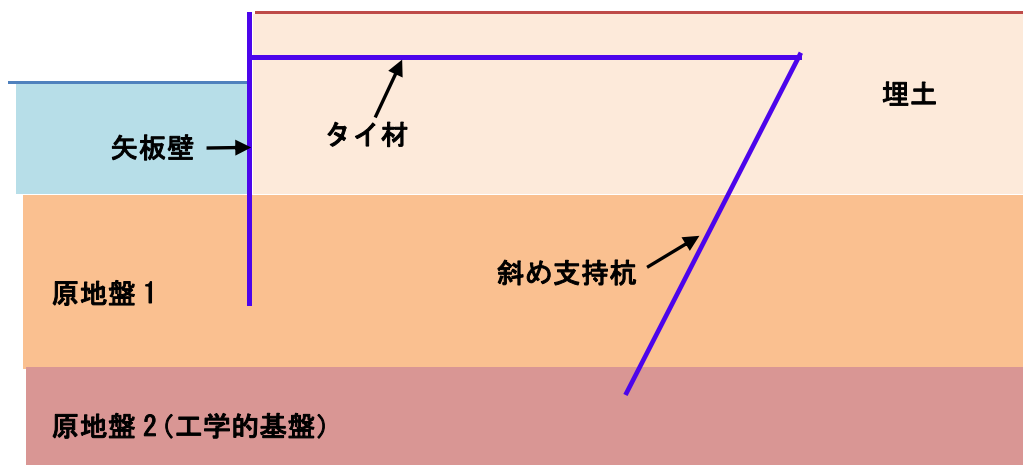


図2 斜め支持控え杭式矢板岸壁の標準的な断面

3. 耐震性能の評価

提案する構造（以下、本形式と表記）と通常の控え直杭式矢板岸壁（以下、直杭式と表記）の耐震性能を解析で比較した。大水深岸壁への適用性を検証する観点から、水深-14mの条件とした。解析は2次元有限要素解析で行い、巨大地震作用時の地盤の非線形性を考慮している。解析コードはFLIP³⁾であり、港湾構造物の巨大地震作用時の地震応答の評価において標準的に用いられているものである。図3に本形式の断面図、図4に岸壁周辺の有限要素メッシュ図、図5に比較対象とする直杭式の断面図を示す。ここでは、本形式の杭の傾斜角は30°である。入力地震動は周期1秒の正弦波とした。この周期は岸壁の変形に大きな影響を持つもの⁴⁾として設定した。最大加速度は3m/s²および4m/s²とした。最大加速度の値に対応して岸壁の変形量が変化するため、耐震性確保の観点から矢板壁および控え杭の諸元は最大加速度の値に応じて変化させている。表1に地盤条件、表2に構造諸元を示す。控え杭の長さやタイ材長さ以外は本形式と直杭式で同じ条件としている。直杭式の控え杭長さやタイ材長さは標準的と考えられる値を設定している。本形式においては、控え杭は工学的基盤に2m根入れするものとしている。タイ材長さについては、矢板壁と控え杭の干渉を考慮して設定している。地震応答解析前の自重解析は築堤段階を模擬した3段階解析とした。構造部材と地盤との境界条件は、矢板壁と地盤間はジョイント要素、控え直杭と地盤間は杭-地盤相互作用ばね要素、斜め支持杭と地盤間は軸方向はジョイント要素、軸直角方向は杭-地盤相互作用ばね要素とした。タイ材は質量を有さない非線形ばね要素（初期ばね剛性13778kN/m）とし、地盤とは非接触である。以上の設定は解析コードFLIPで標準的な設定方法である。

なお、上述のように直杭式の場合は、巨大地震動作用時に表層地盤で液状化が発生すると耐震性能の極端な低下を招くが、本形式は地盤の水平反力を期待しないため、特に表層地盤で液状化が発生したとしても大きな耐震性の低下にはつながらない。ただしこの例では、仮に液状化が発生しない条件においても提案する形式が有利であることを示すために、液状化は発生しない条件として解析を行っている。

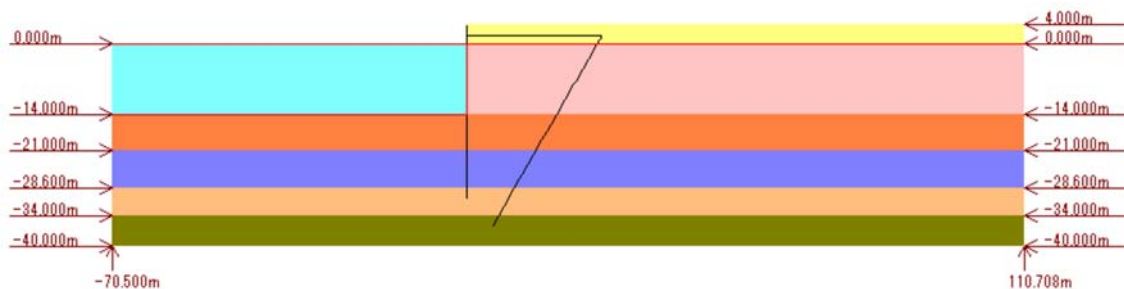


図3 本形式の断面図（矢板下端-30.5m、控え杭下端-36.0m、タイ材長さ 26.7m）

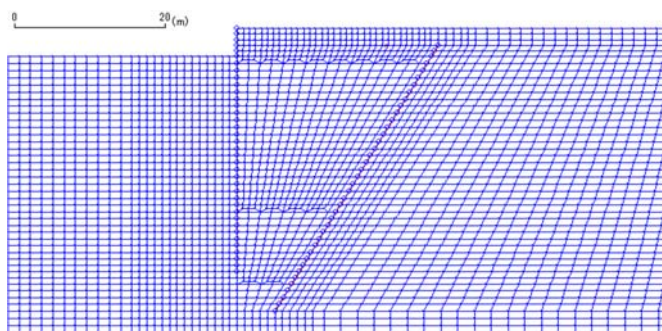


図4 本形式の岸壁周辺の有限要素メッシュ図

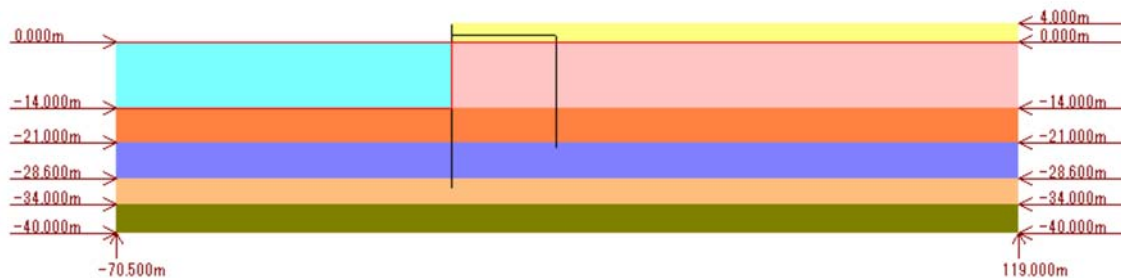


図5 直杭式の断面図（矢板下端-30.5m、控え杭下端-22.0m、タイ材長さ 22m）

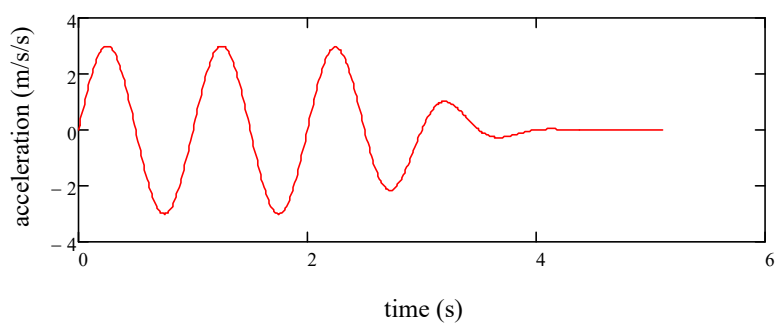


図6 入力地震動（加速度最大値 3m/s^2 ）

表 1 地盤パラメータ

地盤種別	標高(m)	ρ (t/m ³)	σ_{ma}' (kPa)	Gma (kPa)	ϕ (deg)
埋土 (地下水位上)	+4.0 ~ 0	1.83	98	45900	38.6
埋土 (地下水位下)	0 ~ -14.0	2.04	98	45900	38.6
原地盤 1	-14.0 ~ -21.0	2.04	98	29380	37.9
原地盤 2	-21.0 ~ -28.6	2.04	98	45900	38.6
原地盤 3	-28.6 ~ -34.0	2.04	98	98740	40.5
工学的基盤	-34.0 ~ -40.0	2.04	98	183600	43.7

注： ρ ：湿潤密度， σ_{ma}' ：基準有効拘束圧，Gma：基準せん断剛性， ϕ ：せん断抵抗角

表 2 構造諸元（本形式と直杭式で共通）

部材	断面積(m ²)	曲げ剛性 (kNm ²)	全塑性モー メント(kNm)	圧縮側降 伏軸力(kN)	引張側降 伏軸力(kN)
矢板壁 (3m/s ²)	0.04964	1731231	5506	14645	15636
矢板壁 (4m/s ²)	0.07371	4010100	10357	22057	23218
控え杭 (3m/s ²)	0.04446	2415287	6219	13254	14003
控え杭 (4m/s ²)	0.07370	4009389	9903	22053	23213

注：何れも数値は単位奥行きあたりの値，密度は 7.85 (t/m³)，せん断剛性は 76900000(kPa)

本形式について，加速度最大値 3m/s² の場合の矢板天端の水平変形時刻歴を図 7 に，矢板及び控え杭に発生する最大曲げモーメントの深度分布を図 8 および図 9 に示す．直杭式について，矢板天端の水平変形時刻歴を図 10 に，矢板及び控え杭に発生する最大曲げモーメントの深度分布を図 11 および図 12 に示す．残留水平変形量は本形式では 64cm，直杭式では 96cm であり，本形式の残留水平変形量は直杭式の値の 67% であり，大きな違いがある．矢板壁の最大曲げモーメントや控え杭の最大曲げモーメントは本形式と直杭式で同程度である．図中の M0 が最大曲げモーメント，Mp が全塑性モーメントであり，曲げモーメントが全塑性モーメントに達することは設計上許容されない．

加速度最大値 4m/s² の場合について，本形式の矢板天端の水平変形時刻歴を図 13 に，矢板及び控え杭に発生する最大曲げモーメントの深度分布を図 14 および図 15 に示す．直杭式について，矢板天端の水平変形時刻歴を図 16 に，矢板及び控え杭に発生する最大曲げモーメントの深度分布を図 17 および図 18 に示す．残留水平変形量は本形式では 87cm，直杭式では 135cm であり，本形式の残留水平変形量は直杭式の値の 64% であり，大きな違いがある．矢板壁の最大曲げモーメントは本形式と直杭式で同程度である．控え杭の最大曲げモーメントは本形式の方が直杭式よりも大きい，最大値は全塑性モーメント以下であり，設計上許容される範囲にとどまっている．

以上より，本形式は直杭式と比較すると，同程度の構造健全性の条件で，地震時の残留水平変形量を大幅に低減することが可能な形式であるといえる．岸壁の耐震性能は構造健全性と変形量によって判断されるため，本形式は有利であることが示された．加速度最大値 3m/s² の場合で，この他の条件について検討した残留変形量を以下の表にまとめた．

タイ材長	26.7m	22m	26m	22m	22m
杭傾斜角	30°	30°	20°	20°	0° (直杭)
残留変形量	0.64m	0.68m	0.73m	0.83m	0.96m

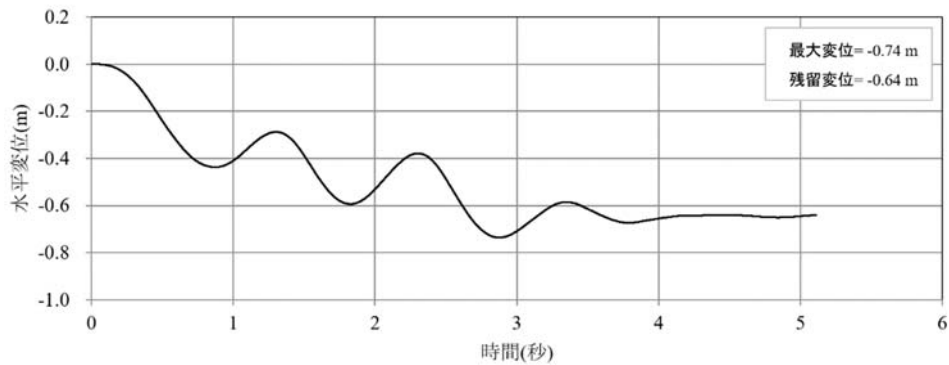


図7 天端水平変位時刻歴（本形式）

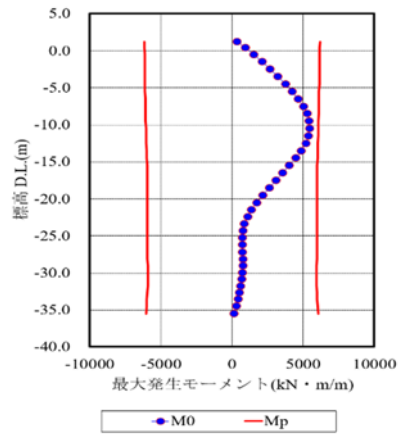
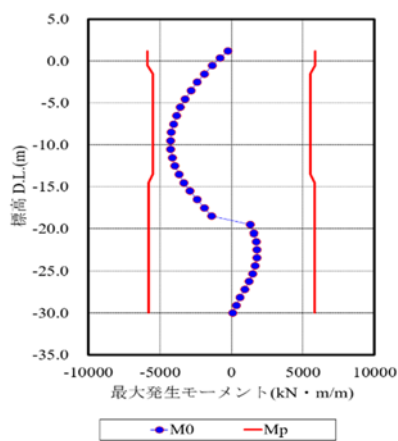


図8 矢板壁最大曲げモーメント(本形式) 図9 控え杭最大曲げモーメント(本形式)

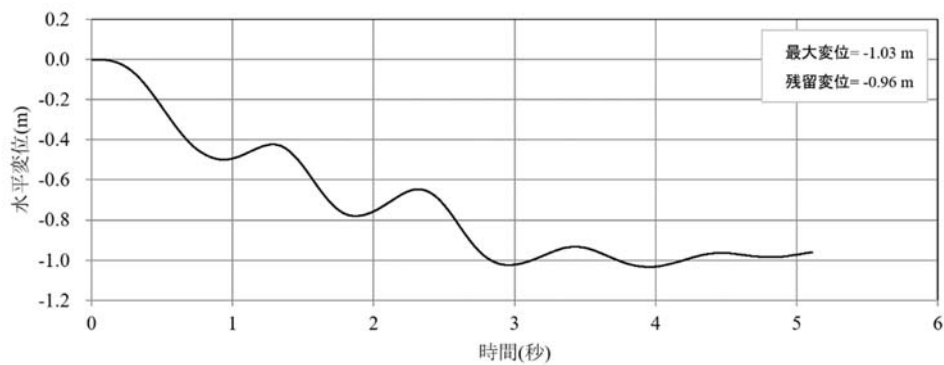


図10 天端水平変位時刻歴（直杭式）

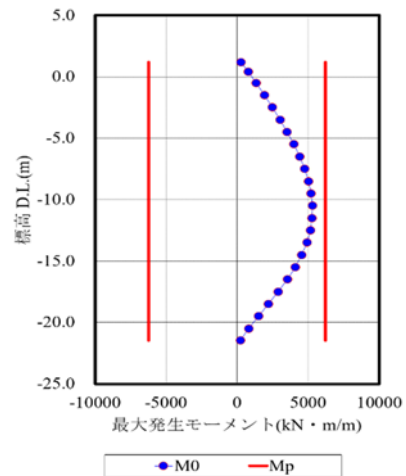
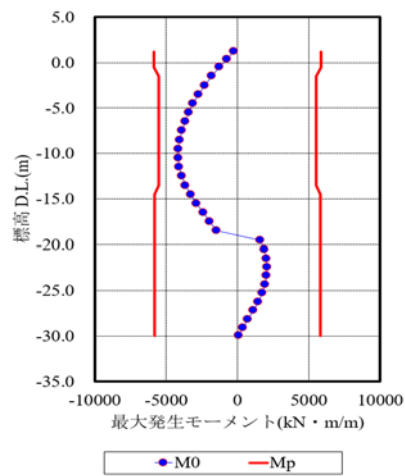


図 11 矢板壁最大曲げモーメント(直杭式) 図 12 控え杭最大曲げモーメント(直杭式)

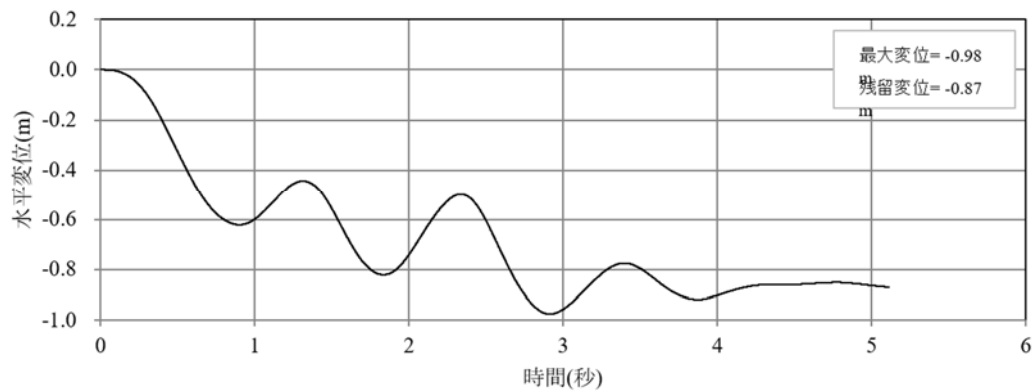


図 13 天端水平変位時刻歴 (本形式)

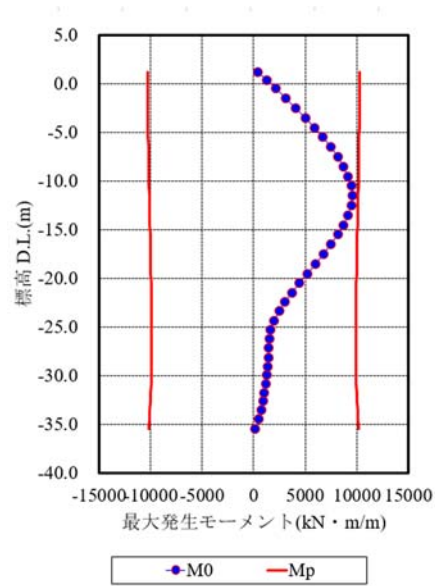
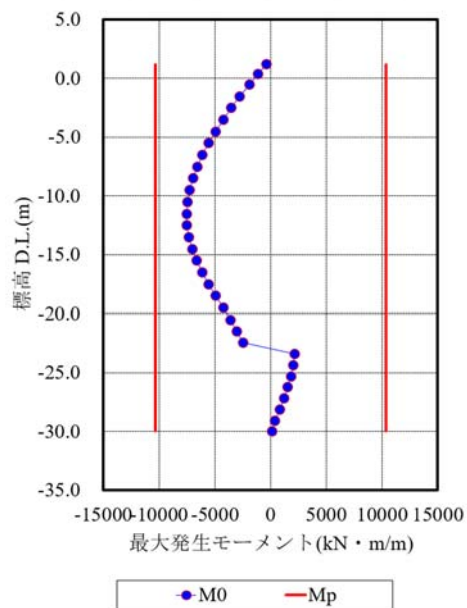


図 14 矢板壁最大曲げモーメント(本形式) 図 15 控え杭最大曲げモーメント(本形式)

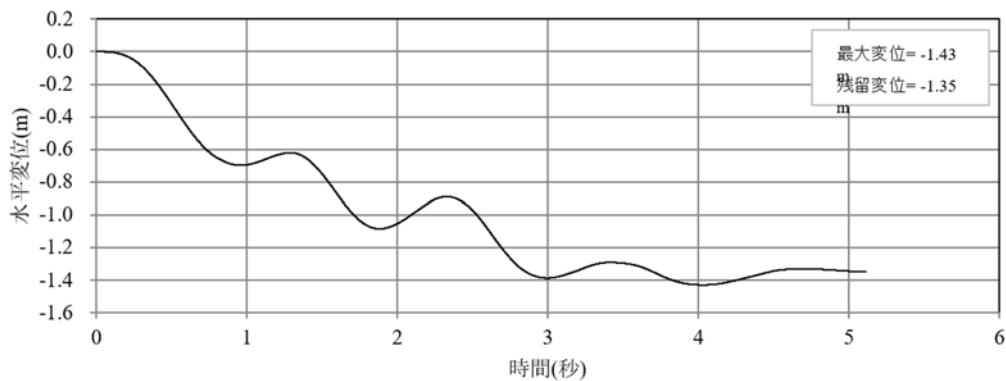


図 16 天端水平変位時刻歴（直杭式）

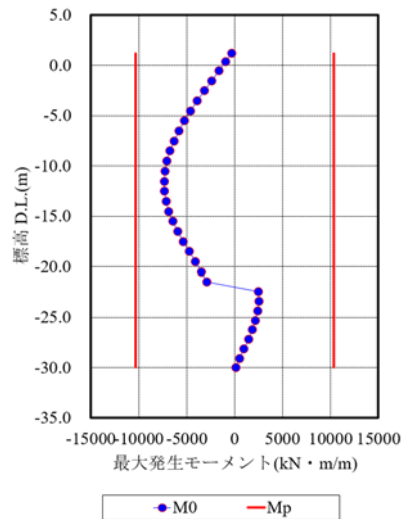


図 17 矢板壁最大曲げモーメント(直杭式)

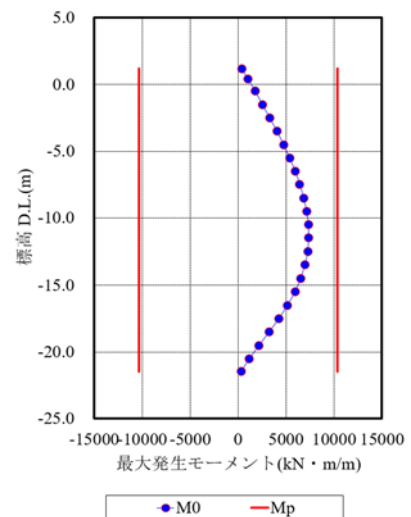


図 18 控え杭最大曲げモーメント(直杭式)

ここに示した以外の様々な条件についても検討しており、**本形式はどの条件でも従来の矢板式岸壁より耐震性の面で有利であることを確認しています。** 詳細は順次発表していく予定ですが、**本形式に興味を持たれた方には個別に詳細な新情報を提供しますので、ぜひ連絡先あてにコンタクトください。** なお本形式は、特許査定済です。

参考文献

- 1) http://www.jaspp.com/shiryou/tomorrow/pdf/fut_no81.pdf
- 2) https://www.umeshunkyo.or.jp/ronbun/MarineVoice_281a.pdf
- 3) Iai S, Matsunaga Y, Kameoka T. Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility. Soils and Foundations 1992; 32-2: 1-15.
- 4) 長尾毅, 岩田直樹: 重力式及び矢板式岸壁のレベル 1 地震動に対する耐震性能照査用震度の設定方法, 構造工学論文集 Vol.53A, pp.339-350, 2007