

液状化対策における仮設構造物の有効利用とその効果

阪神高速道路公団 浜田信彦¹

阪神高速道路公団 尾関良純²

京都大学国際融合創造センター 大津宏康³

By Nobuhiko HAMADA, Yoshizumi OZEKI and Hiroyasu OHTSU

論文主旨

阪神高速道路淀川左岸線大開工区は、開削トンネル（箱型断面）からU型擁壁へ移行する地下構造形式である。特にU型擁壁底面は液状化の可能性のある砂質系地盤に位置しており、この地盤が地震時に液状化した場合、函体の浮き上がりが懸念されるため、その対策について検討を行った。対策効果、工費等比較検討の結果、対策工法として遮蔽壁により側方の液状化地盤が函体下方へ回り込むのを防止する「遮蔽壁を用いた液状化対策工法」を採用することとした。遮蔽壁としては施工時の仮設土留め鋼矢板を残置し有効利用することとした。本論文は、対策工法の比較検討および「遮蔽壁を用いた液状化対策工法」の概要、効果、設計手法、建設マネジメント面からの課題を報告するものである。

【キーワード】液状化対策、仮設構造物、遮蔽壁、コスト縮減

1. はじめに

地震により地盤が液状化すると、地中に埋設された比較的軽量の構造物に浮き上がり変位が生じることは広く知られており、釧路沖地震や兵庫県南部地震でのマンホールの浮き上がり被害が報告されている。さらに大規模な構造物についても、新潟地震において病院の地下室の浮き上がりが生じ、十勝沖地震では製紙工場の中和槽の浮き上がりが生じたと報告されている。

阪神高速道路淀川左岸線の大開工区は、トンネル区間からU型擁壁を経て高架区間に移行する区間である。当該区間の代表的な断面図を図-1に、縦断面図を図-2に示す。

本体構造物は、液状化対象層に位置しており、盛土層(Bk)及び砂質土層(As)が地震時に液状化することが F_L 値（液状化に対する抵抗率）による判定によって確認されている。液状化時には、過剰間隙水圧の発生に伴う浮き上がり、液状化終息後の沈下等が考えられるため、これらの現象を抑制し、液状化時に生じる構造物への損傷を極力低減させることを目的として対策工の検討を行った。

本稿は、まず液状化時の構造物の浮き上がり対策工法の比較検討を述べ、現場にて採用することとなった「遮蔽壁を用いた液状化対策工法」（以下、「遮蔽壁工法」という）について、工法原理、効果、設計手法、建設マネジメント面からの課題を報告するものである。

¹ 大阪建設局建設企画部設計課課長 TEL06-6615-7460

² 大阪建設局建設企画部設計課 TEL06-6615-7467

³ 融合部門教授 TEL075-753-5680

断面 A

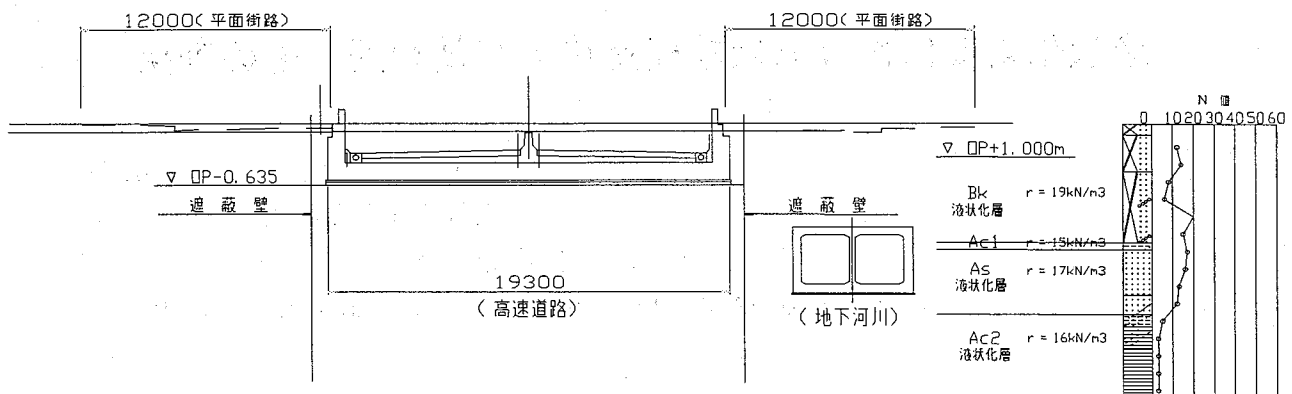


図-1 断面図 (U7ブロック)

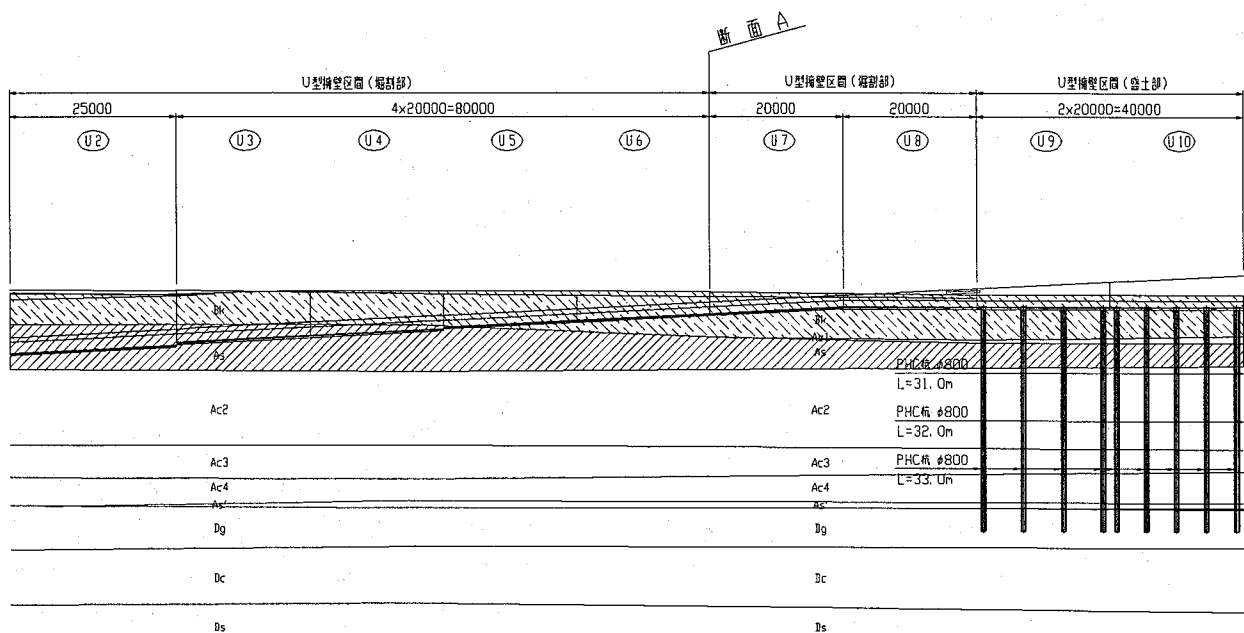


図-2 縦断面図

2. 液状化による浮き上がり対策工法の検討

(1) 浮き上がりの照査

大開工区の地層は、地表から深さ10m程度までにN値10程度の沖積砂質土層が分布するとともに地下水位が高く、地震時に構造物に影響を与える液状化の生じる可能性があることが F_L 判定の結果わかっている。次に示す「道路土工擁壁工指針(平成11年3月)」¹⁾の照査式に準じ、当該区間(U3～U8)の地震時の浮き上がりの照査を行った。

$$F_s = \frac{W_s + W_b + Q_s}{U_s + U_d}$$

F_s : 浮き上がりに対する安全率

W_s : 上載土の重量

W_b : U型擁壁の重量

Q_s : 上載土のせん断抵抗と擁壁側面の摩擦抵抗

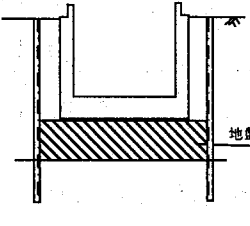
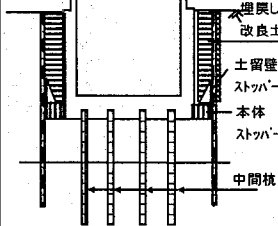
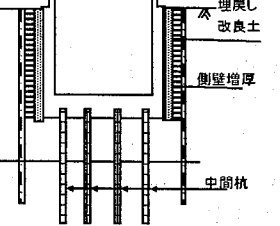
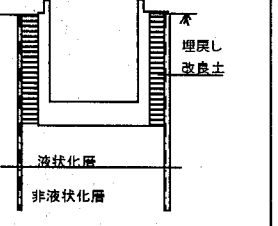
U_s : 擁壁底面に作用する静水圧による揚圧力

U_d : 擁壁底面に作用する過剰間隙水圧による揚圧力

液状化時点の照査であるため、 Q_s の影響を無視した。照査結果から F_s は0.42～0.96と安全率(1.0)を満足できなかったため、浮き上がりに対する対策が必要であることが確認された。

(2) 浮き上がり対策工法の検討

表-1 液状化に伴う浮き上がり対策工法の比較

	底面地盤改良案	土留壁スッパ-及び中間杭利用案	本体増厚+中間杭利用案	遮蔽壁工法案
工法概要	底版下面の液状化層を地盤改良し、地盤の液状化の発生そのものを防ぐ方法。	底版下面に作用する揚圧力に対して、スッパ-のせん断抵抗と擁壁側面の摩擦、仮設材（中間杭）の周辺摩擦力によって浮き上がり力に抵抗させる。	底版下面に作用する揚圧力に対して、本体側壁部を増厚し、本体重量を増加させる。かつ中間杭の周辺摩擦力によって浮き上がり力に抵抗させる。	構造物周辺に配置した鋼矢板を非液状化層に根入れすることによって、底版下面への液状化層の回り込みを防止する。
断面図				
評価	底面地盤を平面的にしかもAs層全体を改良する必要があるため、かなり割高で工期が長くなる。地盤改良工法の選定や施工管理において、排土など環境面の配慮が必要となる。	中間杭が本体に固定されているため、引抜力に対して仮設構造物（中間杭）の摩擦力を有効に利用できる。スッパ-の設置が別途必要になる場合がある。	中間杭が本体に固定されているため、引抜力に対して仮設構造物（中間杭）の摩擦力を有効に利用できる。側壁の増厚による重量バランスを図るため、支持に対する照査が必要になる。	仮設時に必要とされる土留壁を兼用することでコストダウンをはかれる。遮蔽壁による地下水流動への影響や遮蔽壁の腐食等、耐久性に対する考慮が必要となる。
費用比較	14	1.6	1.7	1.0
判定	×	△	△	◎

浮き上がり対策工法は従来、液状化層が道路構造物下部に存在する場合、対象層を地盤改良する工法や杭やアンカーなどの浮き上がり反力部材の設置などが行われてきた。一方、これらとは別に、「地中構造物の浮き上がり現象が、地震時に液状化した地盤が構造物下方に回り込んでくることにより生じる」に着目し、構造物を遮蔽壁で囲むことにより構造物下の液状化層を閉鎖空間化するという概念に基づく「遮蔽壁工法」のような対策工法²⁾がある。

ここでは、大開工区において「遮蔽壁工法」を採用するに先立ち、いくつかの液状化対策工法の比較検討を行った。比較結果を表-1に示す。その結果、施工時に使用する土留め壁（仮設構造物）を流用することで、経済性、施工性にすぐれる「遮蔽壁工法」を採用することとした。

3. 遮蔽壁工法の考え方

「遮蔽壁工法」は、見かけの密度（自重を容積で除したもの）が地盤より小さい構造物、つまり液状化時に浮き上がりの危険性の考えられる構造物を対象とした対策工法である。

「遮蔽壁工法」は地盤の液状化そのものを防止す

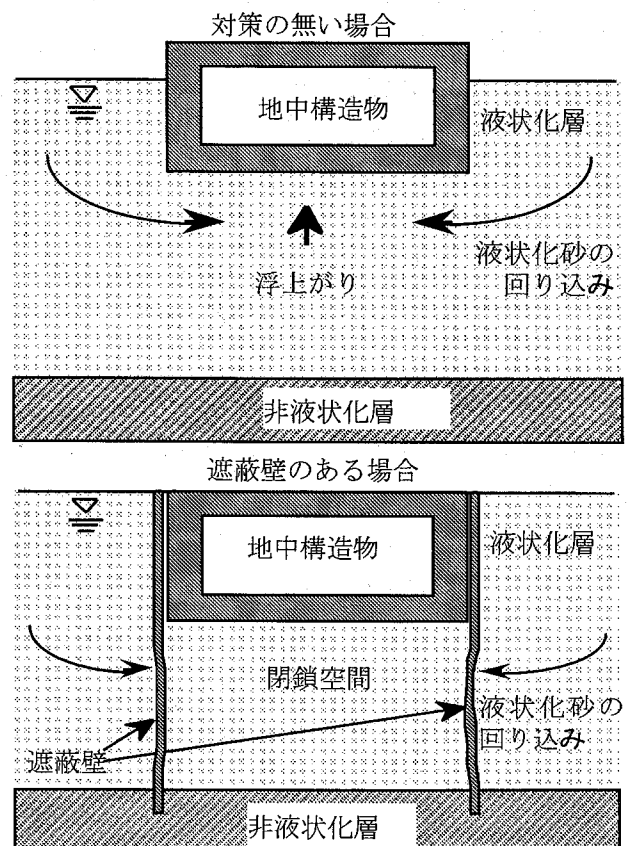


図-3 「遮蔽壁工法」の基本的概念

るものではなく、図-3に示すように、液状化に伴う構造物の大きな浮き上がりの変位は構造物下部に液

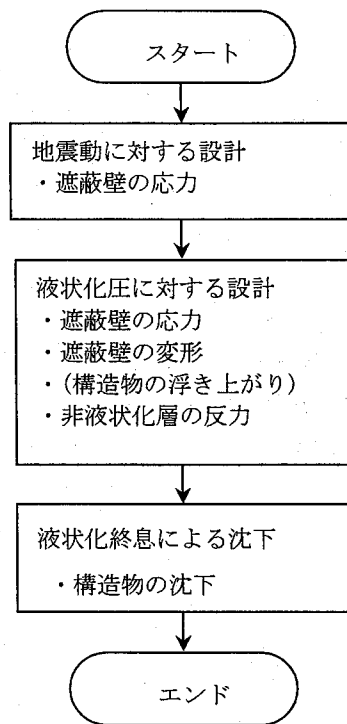


図-4 「遮蔽壁工法」の設計フロー

状化した地盤が回り込むことによって生じることとしてとらえ、遮蔽壁により地盤の回り込みを抑制できれば、液状化による浮き上がり変位も大幅に減少できる。これが本工法の基本的な考え方である。つまり、構造物下の液状化層を「非液状化層まで根入れされた遮蔽壁」と「上部構造物底面」及び「下部の非液状化層上面」で囲まれた閉鎖空間とし、液状化時にも当該閉鎖空間の容積変化を抑制することにより、対象構造物の上下方向の変位を防止することができる。

したがって、遮蔽壁の非液状化層への根入れや構造物と遮蔽壁との取り合いは重要な項目であり、構造物と遮蔽壁の取り合いについては構造物と壁を剛結せず、相対的な変位を許す設計を行う。つまり、液状化圧による壁の変形を構造物の浮き上がり変位に転化することであり、壁の剛性や根入れ長などによりその量は抑制することができる。また、遮蔽壁の根入れも液状化した時点で壁を支持している非液状化層が破壊されないように根入れを決める。

4. 遮蔽壁工法の設計手法

図-4に「遮蔽壁工法」の設計手順フローを示す。

「遮蔽壁工法」の設計においては「非液状化層ま

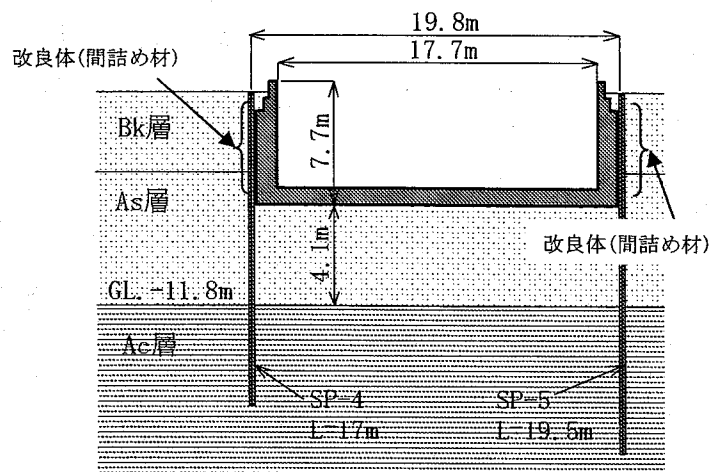


図-5 照査断面図 (U3ブロック)

で根入れされた遮蔽壁」、「上部の構造物」及び「下部の非液状化層」の構成要素が、液状化時に閉鎖空間を保持することが主要な工法原理となっている。したがって、対象地盤は液状化したものとして取り扱い、以下の項目について検討を行うものとする。

- ・ 液状化時の側圧に対する遮蔽壁の健全性の検討
- ・ 同状態における遮蔽壁の変形量の検討
- ・ 非液状化層の遮蔽壁支持能力の検討
- ・ 構造物と遮蔽壁との間の遮蔽性の検討

また、液状化発生までに遮蔽壁が損傷されることを防ぐために、地震主要動時における遮蔽壁の耐震性の確認も必要となる。さらに使用性能を考慮し地震直後の供用を要求されることもあるため、液状化終息後の沈下量も検討項目になる。

(1) 地震時遮蔽壁の応力

遮蔽壁の耐震性検討については2次元FEM解析による有効応力解析手法³⁾を用いた。この目的は、液状化に至るまでの地震主要動時に遮蔽壁が安全であるかどうかを照査することである。手法は、有効応力法に基づいた非線形地盤～構造物系の解析コードで、粒状体に特有のダイレタンシー現象と飽和地盤における過剰間隙水圧、水圧上昇に伴う地盤剛性の低下などの地盤の非線形性を扱えるのが特徴である。照査は構造物深度の最も深いU3ブロックを例に行った。断面図を図-5に示す。また、地盤条件と解析モデルを図-6に示す。図-7に示す解析用入力地震動により、Bk層とAs層で過剰間隙水圧が100%に達し液状化に至った。図-8(1)、(2)は、地震動作用中の遮蔽

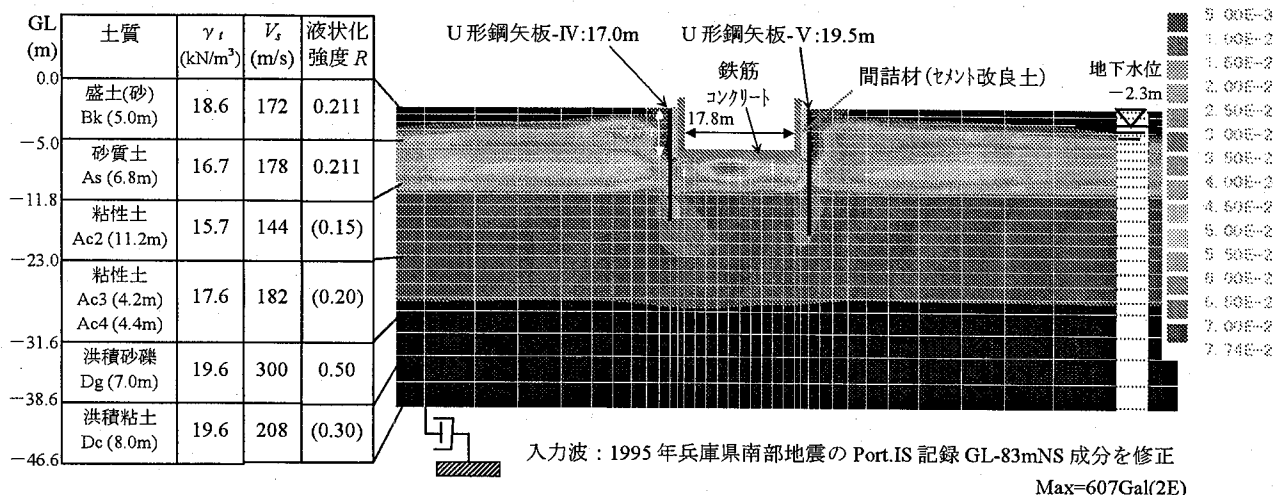


図-6 解析条件と最大せん断ひずみ分布

壁の最大応力の深度分布であるが、地震動による遮蔽壁の応力は通常の許容応力度程度であった。矢板の断面力と応力の最大値分布を示す。ここでは比較のため、改良体(遮水壁と構造物側壁間の間詰め材)の剛性(変形係数 E_{50})が硬い場合($E_{50}=490000\text{kN/m}^2$)と柔らかい場合($E_{50}=49000\text{kN/m}^2$)の2ケースを想定した。直応力 σ としては、値が最も大きくなる縁応力 σ_b を示してある。 σ_b は、 $Z (=l/y)$ を断面係数とすれば、 $\sigma_b = M_{\max}/Z$ で表される。

せん断応力 τ は許容応力度 τ_a に対して十分に余裕がある。曲げモーメントは、改良体下端(GL-7.7m)と液状化層(As)・非液状化層(Ac2)の境界付近で大きな値を示している。これに基づく直応力に着目すると、FSP-IVの場合、GL-7.7mの部分で縁応力 σ_b が許容応力度を若干超えている($\sigma_b=284200\text{kN/m}^2$)。この深度は改良体下端(床版底面)の位置である。改良体の剛性が柔らかい場合には、許容応力度以内に収まっている($\sigma_b=235200\text{kN/m}^2$)。(鋼矢板の許容引張応力 σ_a とせん断応力 τ_a は、 $\sigma_a=284200\text{kN/m}^2$ 、 $\tau_a=117600\text{kN/m}^2$ である。) よって、改良体が柔らかい場合には矢板は健全であるが、改良体が硬い場合には、改良体下端部で若干塑性化する可能性がある。よって、少なくとも改良体の下端部分は柔らかくし、剛性が急変するような施工は避けた方が良く考えられる。

(2) 液状化時遮蔽壁の応力

図-9に液状化時の圧力分布概念図を示すが、地盤

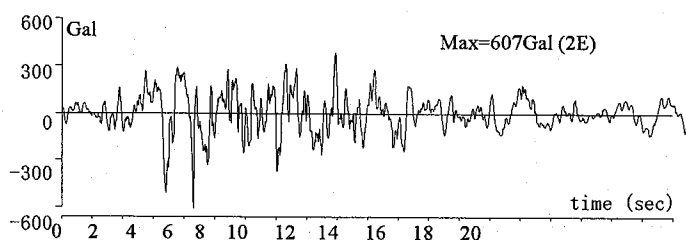


図-7 解析に用いた入力加速度 (Port.1S 波を修正)

が液状化した時点での遮蔽壁へ作用する圧力は地盤の深さで明確に定まる。通常の場合は壁内外の液状化圧の深度方向の増分は同一であるから、遮蔽壁はその差分である等分布荷重をうけることになり、この状態での遮蔽壁の応力度の照査を梁の理論式により断面力を算定し行う。その際の遮蔽壁端部の支持条件は、構造物下端では固定支持(L1レベル)もしくは単純支持(L2レベル)、非液状化層根入れ部では遮蔽壁先端から3分割点での剛体回転支持とする。

①遮蔽壁断面力(液状化圧作用時: 固定支持)

$$M_{\max} = \frac{(q_1 - q_2)L^2}{8} \quad Q_{\max} = \frac{5(q_1 - q_2)L}{8}$$

②遮蔽壁断面力(液状化圧作用時: ヒンジ支持)

$$M_{\max} = \frac{(q_1 - q_2)L^2}{8} \quad Q_{\max} = \frac{(q_1 - q_2)L}{2}$$

L: 支間長

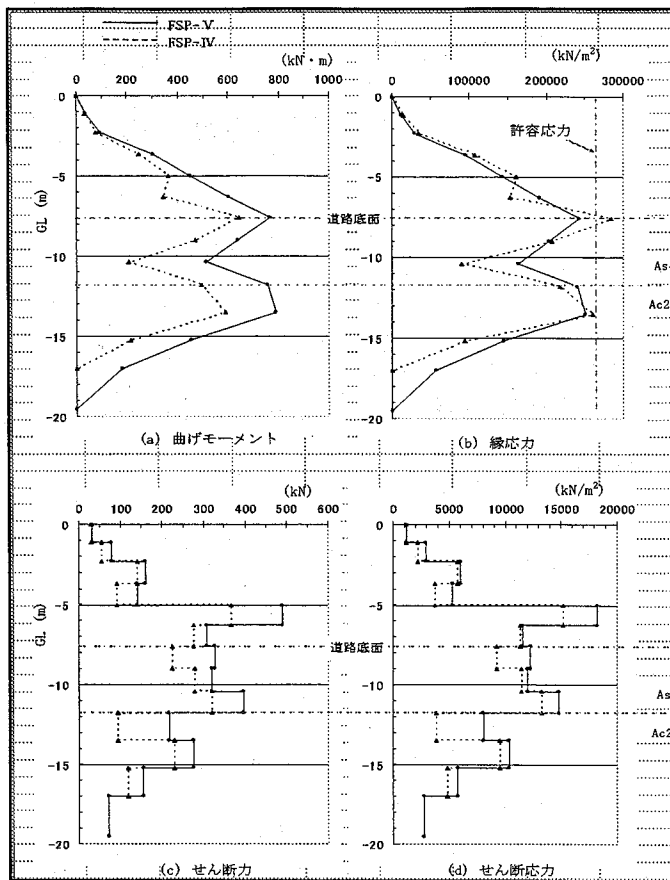


図-8(1) 矢板の断面力と応力 (奥行き 1m 当たり)
($E50=500q_u = 490000 \text{ kN/m}^2$)

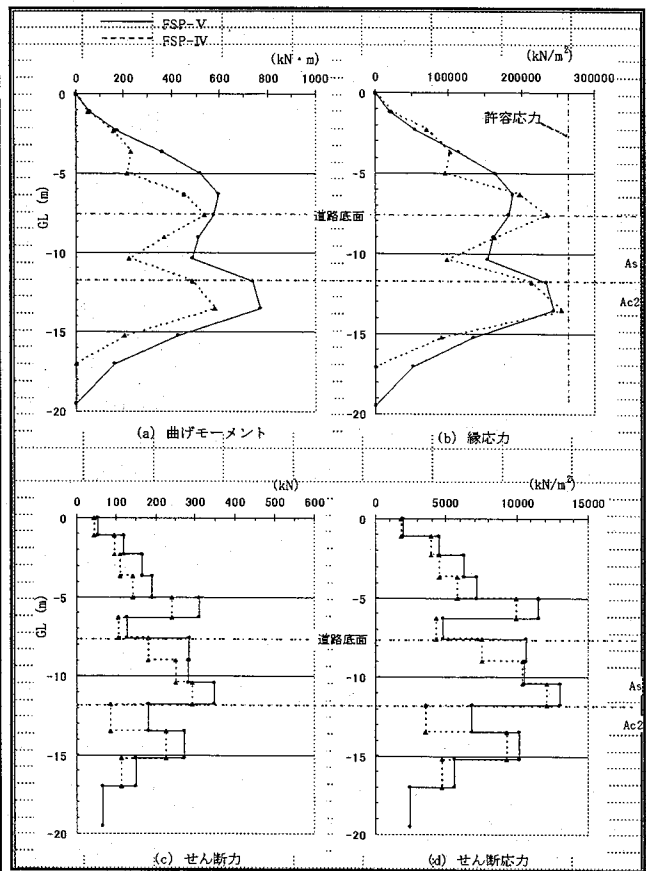


図-8(2) 矢板の断面力と応力 (奥行き 1m 当たり)
($E50=50q_u = 49000 \text{ kN/m}^2$)

(3) 液状化時における遮蔽壁の変形量及び構造物の浮き上がり量の照査

液状化時の側圧による遮蔽壁の変形量を梁の理論式より算出する。構造物下部の液状化地盤が閉鎖空間として閉じ込められているので、遮蔽壁の変形量が構造物の浮き上がり量に転嫁されると考える。この際、構造物の過度の浮き上がりが生じていないか確認する。遮蔽壁の支持条件は(2)と同様とする。

遮蔽壁の変形量は壁のたわみ a_1 と非液状化層根入れ部分の回転による変形量 a_2 の和として算出する。

③ 壁体のたわみによる減少面積

$$a_1 = \frac{(q_1 - q_2)L^5}{320EI} : \text{上端固定時 (L1レベル)}$$

$$a_1 = \frac{(q_1 - q_2)L^5}{120EI} : \text{上端ヒンジ時 (L2レベル)}$$

④ 非液状化層根入れ部の剛体回転による減少面積

$$a_2 = \frac{3(q_1 - q_2)L^2}{4f \cdot Kh} \quad Kh : \text{地盤反力係数}$$

⑤ 浮き上がり量

$$\delta = \frac{2(a_1 + a_2)}{B}$$

(4) 液状化時の非液状化層根入れ部の地盤反力

支持地盤が破壊されると、遮蔽壁の変形量が大きくなるばかりではなく、閉鎖空間が成立しなくなり、液状化地盤が内側に流入する可能性もあるため、健

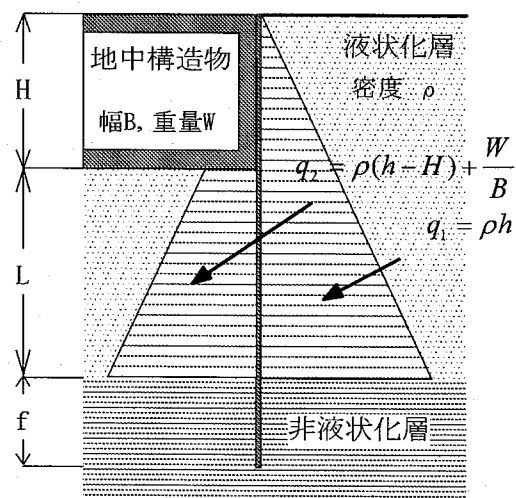


図-9 液状化時作用圧の概念図

全性を照査する。

上記（２）のとおりに非液化化層根入れ部では壁下端から３分割点で剛体回転支持であると仮定して、非液化化層上端での地盤反力を求め、根入れ部分の地盤破壊に対する安全性を確認する。

⑥非液化化層の地盤反力

$$\gamma = \frac{3(q_1 - q_2)L}{2f}$$

（５）液化化時の照査結果

下記条件のもとでのU3～U6ブロックの安定性照査結果を表-2に示す。

・土質条件

単位体積重量 Bk層：19 kN/m³

As層：17 kN/m³

非液化化層 Ac2層

一軸圧縮強度 $q_u = 12 \text{ tf/m}^2$

地盤ばね係数

$K_h = 4890 \text{ kN/m}^2$ (L1レベル時)

$K_h = 2920 \text{ kN/m}^2$ (L2レベル時)

(地盤ばね係数は、ひずみ依存性考慮の重複反射地盤応答解析における有効ひずみ時のばね係数とした)

・遮蔽壁：鋼矢板（SKY295）

継手効率（土工指針による）：変形算定時45%、応力算定時60%（矢板応力度は上端固定にて調査している。）

・奥行き1mあたりで算定している。

結果は、仮設（土留工）での設計（表中の現計画）を本検討によって、断面剛性の増加あるいは根入れ長を長くすることにより、液化化の遮蔽壁の安定性を確保した。なお、これらの矢板の変更は非液化化層の地盤の安定性で主に決定されている。

（６）有効応力解析手法による照査結果及び液化化終息後の沈下について

上記の（２）～（５）は液化化圧作用時の遮蔽壁の応力と変形状態に関するものであり、静的問題として捉えることができる。梁の理論式を拡張した2次元非線形骨組解析の適用が可能であり、地盤の弾塑性を考慮した梁バネモデルを用いて解析を行った。

液化化終息後の沈下については液化化現象を反映できるものを用いることが必要であり、今回の検討では液化化時に経験したせん断ひずみに着目した沈下量の算定をおこなった。

表-2 遮蔽壁の安定性と擁壁の浮き上がり量

			単位	U3始点側		U4始点側		U5始点側		U6始点側		備考
				現計画	変更計画	現計画	変更計画	現計画	変更計画	現計画	変更計画	
諸元	左側	矢板断面		Ⅳ型	—	Ⅳ型	Ⅳ型	Ⅲ型	Ⅳ型	Ⅲ型	Ⅳ型	
		矢板長	m	17.0	—	14.5	16.5	13.5	16.5	10.5	16.5	
	右側	矢板断面		V型	—	V型	—	V型	—	V型	—	
		矢板長	m	19.5	—	19.5	—	19.5	—	19.5	—	
断面照査	左側	曲げ σ1	kN/m2	99700	—	129000	129000	<u>299300</u>	176700	∞	193100	σ a=270000kN/m2
		せん断 τ1	kN/m2	12100	—	12400	12400	17000	13400	∞	12300	τ a=120000kN/m2
	右側	曲げ σ2	kN/m2	71900	—	93000	—	127300	—	∞	139200	σ a=270000kN/m2
		せん断 τ2	kN/m2	10900	—	11200	—	12200	—	∞	11100	τ a=120000kN/m2
浮上量	L1レベル δ1	cm	0.329	—	0.824	0.516	2.081	0.851	∞	1.196		
	L2レベル δ2	cm	0.590	—	1.480	0.965	3.990	1.704	∞	2.534		
遮蔽壁の支持力 r			kN/m2	81.1	—	<u>160.5</u>	92.2	<u>275.5</u>	99.7	∞	95.2	ra=100kN/m2

注：下線付きは許容値を超したものである。

：L2レベルの浮上量については、矢板が降伏すると仮定

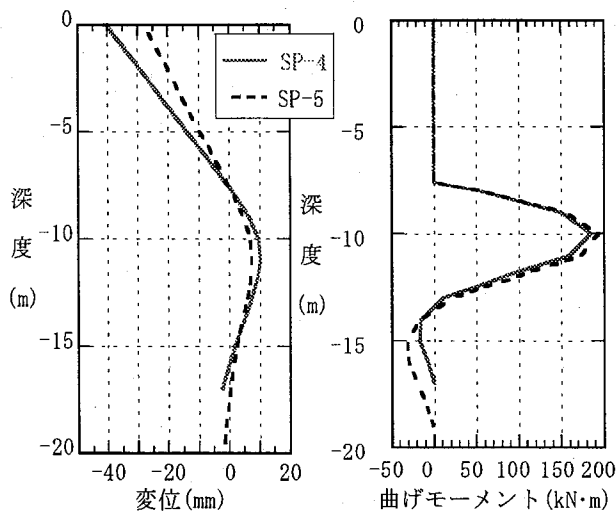


図-10 遮蔽壁の変位と曲げモーメントの分布

梁バネモデルの解析は、(1)地震時の遮蔽壁の応力照査にて行った有効応力解析と同時に行った。遮蔽壁の最大変位は道路底板で22.3cm、矢板頂部で28.3cm、解析底面で8.6cmであった。

液状化圧に対する検討結果から、非液状化層に塑性領域はほとんど生じなかった。液状化差圧による壁の変位と曲げモーメントの分布を図-10に示すが、壁の変形から算出される構造物の浮き上がり変位量は4mm程度と極めて小さかった。

また、液状化終息後の沈下については周辺地盤と同程度の値が生じることが明らかになった。

以上のことから、当該区間に遮蔽壁を用いた浮き上がり対策工法を適用することが可能と判断した。

5. おわりに

遮蔽壁を用いて構造物下の液状化地盤を閉鎖空間化するという発想に基づく「遮蔽壁工法」の設計手法を中心に述べた。本工法は残置土留め壁がある場合に経済的に有利になる工法であり、構造物下の地盤に固結工法等の地盤改良を必要としないことから、環境にも優しい工法といえる。なお、本工法は構造物直下を処理しないことから、既設構造物の液状化対策（耐震補強）にも展開できる可能性がある。

今後は、遮蔽壁として鋼矢板を用いる場合の腐食等耐久性の問題、地下水流動阻害が問題となる箇所での影響検討について、LCC面からのアプローチを含めた検討が必要と考えている。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会(1999):道路土工擁壁工指針(平成11年3月)
- 2) Yoshimi, Y.(1998):Simplified design of structures buried in liquefiable soil, Soils and Foundations, Vol.38, No.1, pp.235-240.
- 3) 福武毅芳(1997):土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究,名古屋工業大学博士論文

Effective Utilization and Cost Reduction of Temporary Cutoff Walls as Preventive Measures against Liquefaction

By Nobuhiko HAMADA, Yoshizumi OZEKI and Hiroyasu OHTSU

In this paper, we discussed the effectiveness and cost reduction of using temporary cutoff walls as preventive measures against liquefaction. The U-type retaining walls studied here are based on the liquefiable soil strata. We carried out a comparative study for the effectiveness and cost of some preventive measures against liquefaction. We concluded that making use of cutoff walls is most effective in terms of preventive effect and cost reduction. Effective stress analyses revealed that the stresses of cutoff walls were almost within the allowable stresses under seismic loading. We found that the rigidity between cutoff walls and underground structure plays an important role for the safety of cutoff walls. A quantitative estimation method was verified to be valid for the principle of this countermeasure that "The liquefiable soil just below the underground structure is made as a closed space". As the result, it is concluded that the practical design method of cutoff walls against liquefaction is shown here based upon the results calculated by a beam-spring model taking the decrease in rigidity of non-liquefiable layer, liquefied soil-water pressure acting against the wall, and so on, into consideration.