

# 심층몰탈파일로 조성된 항만구조물 기초의 안정성 검토

천병식\* · 여유현\*\* · 김경민\* · 양진석\* · 김도식\*

\* 한양대학교 토목공학과, \*\* 한국해양대학교 토목공학과

## Stability Analysis of Marine Structure Foundation Constructed by Deep Mortar Piles

BYUNG-SIK CHUN, YOO-HYEON YEOH, KYUNG-MIN KIM, JIN-SUK YANG, DO-SIK KIM  
Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**KEY WORDS:** Foundation reinforcement, Deep Mortar Pile, Marine structure, Slope sliding, Lateral flow

**ABSTRACT:** In this case study, under consideration of field situations, such as increase of water level, height increment of the marine structure, dredging and backfill, the stability analysis of sliding and lateral flow of the marine structure in ○○○harbor was carried out, and foundation reinforcement methods was presented. Based on the results of site investigation, the stability analysis of slope sliding and lateral flow was performed as following. In section BH-1, 2, the analysis was performed in two cases that the marine structure was heightened and filled, and not heightened and filled. In section BH-3, 4, heightened and filled. The analysis results showed that the stabilities of slope sliding and lateral flow in section BH-1, 2, 3, 4 were unstable. After additional reinforcements with Deep Mortar Pile, the stabilities in section BH-1, 2, 3, 4 were evaluated as efficiently large.

### 1. 서 론

본 연구는 수위상승, 호안구조물의 증고 및 배면 준설투기 등 외적조건에 따른 현 시공중인 ○○지역 북항 호안구조물의 사면활동 및 측방유동에 대한 안정성 검토를 실시하고 기초보강 방안을 제시하였다. 호안구조물 기초보강방안으로써 심층몰탈파일이 추가적으로 시공될 경우에 대한 사면안정해석(SLOPE/W)과 측방유동에 대한 안정해석을 수행하였다. 사면안정 검토를 위해 호안구조물을 I, II구역으로 구분하여 2개 지점씩 지반조사 및 관련지반조사를 실시하였다. 심층몰탈파일에 의한 발생한 복합지반효과와 호안 배면의 준설토 투기에 따른 하부지반의 강도증가율 개념을 적용하여 수년간에 걸친 단계별 매립에 따른 하부지반의 물성치 변화를 산출하였다. 사면안정해석을 위한 수치해석과 측방유동에 대한 안정해석시 입력물성치에 반영함으로써 현장상황에 근접한 안정성 검토를 하고자 하였다.

### 2. 현장 개요

#### 2.1 공사개요

현재 시공 중인 ○○지역 호안구조물은 DMP나 CGS등의 심층몰탈파일에 의하여 보강 파일에 의하여 보강되어 있는데, I 구역, II 구역으로 나뉘며 I구역은 DMP(Deep Mixing Pile)공법에 의하여 3~4공으로 타설 되어있고, II 구역은 CGS(Compaction

Grouting System)공법으로서 6~7공으로 되어 있다. 2002년 후반기부터 시작하여 5~6년동안 준설, 매립할 계획으로 되어 있다. 해면수위상승에 따른 대책으로서 호안구조물을 0.5m, 배면 지역도 1.0m 증고 계획이며 이에따른 추가적인 지반보강이 필요한 상황이다.

#### 2.2 지층상태

본 현장의 지층은 매립층, 실트층, 실트질점토층, 모래자갈층, 풍화암층, 연암층 등으로 구분이 되며 표준관입시험시 채취된 교란시료 및 시추조사시 채취된 불교란시료에 대한 기본물성시험 및 실내역학시험 결과는 Table 1, 2와 같이 나타났다.

Table 1 Laboratory physical test results

Division		Natural water content (%)	Specific gravity	Atterburg Limits			US CS
Bore-hole No.	Depth			Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plasticity index	
BH 2	6.0-6.8m	64.67	2.724	37.90	24.94	12.96	ML
BH 2	15.0-15.8m	61.18	2.706	40.90	24.99	15.91	CL
BH 2	20.0-20.8m	62.27	2.701	40.60	25.01	15.59	CL
BH 3	7.5-8.3m	65.90	2.695	37.40	25.14	12.26	ML
BH 3	15.0-15.8m	67.60	2.671	39.30	24.97	14.33	CL
BH 3	20.0-20.8	57.25	2.712	41.50	25.35	16.15	CL
BH 4	6.0-6.8m	55.97	2.610	39.30	24.45	13.85	ML
BH 4	10.0-10.8m	56.78	2.630	39.50	24.19	15.31	CL
BH 4	15.0-15.8m	65.88	2.743	42.10	25.52	16.58	CL

Table 2 Laboratory mechanical test results

Division		Unconfined compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> ) (Disturbed)	Triaxial compression test (UU test)		Triaxial compression test (CU Test)		Consolidation test		
Borehole No.	Depth		Cohesion c (kg/cm <sup>2</sup> )	Internal friction φ (°)	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Internal friction φ (°)	Compression index C <sub>c</sub>	Total unit weight γ <sub>t</sub> (t/m <sup>3</sup> )	Pre-consolidation stress P <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
BH 2	6.0-6.8m	-	0.08	1.6	-	-	0.418	1.63	0.26
BH 2	15.0-15.8m	-	-	-	0.07	13	0.357	1.72	0.22
BH 2	20.0-20.8m	0.165 (0.11)	0.12	2.5	-	-	0.434	1.69	0.29
BH 3	7.5-8.3m	0.16 (0.11)	0.12	3.4	-	-	0.414	1.65	0.27
BH 3	15.0-15.8m	0.16 (0.11)	0.07	1.5	0.11	9.7	0.434	1.66	0.32
BH 3	20.0-20.8	0.11 (0.076)	0.13	2.8	-	-	0.480	1.67	0.26
BH 4	6.0-6.8m	0.09 (0.057)	0.12	2.5	-	-	0.367	1.75	0.28
BH 4	10.0-10.8m	0.14 (0.092)	0.14	2.5	-	-	0.427	1.67	0.24
BH 4	15.0-15.8m	-	-	-	0.08	7.4	0.469	1.67	0.26

### 3. 복합지반효과에 의한 지반개량의 원리

지반내에 강도증진이나 기타목적으로 개량체가 주입된 경우 개량된 지반의 전단강도는 원지반의 전단강도보다 증가한 값을 가지게 된다. 이러한 강도의 증가를 개량율과 평균전단강도의 개념을 이용하여 다음 식(1)과 같이 산출할 수 있다.<sup>1), 2), 3)</sup>

$$\bar{c} = a_p \cdot c_p + (1 - a_p) \cdot c_0 \quad (1)$$

여기서  $\bar{c}$  : 평균전단강도

$a_p$ : 개량율(개량체의 면적/원지반의 면적)

$c_p$ : 개량기둥의 전단강도

$c_0$ : 원지반의 전단강도

I, II구간의 보강방안은 Fig. 1, 2와 같이 DMP구간에 대해서는 CJM 2열보강, CGS구간에 대해서는 CGS 2열보강으로 가정 하였으며 각각의 단면에 대하여 개량율을 계산하여 평균전단강도  $\bar{c}$ 를 구하여 보면 Table 3와 같다.

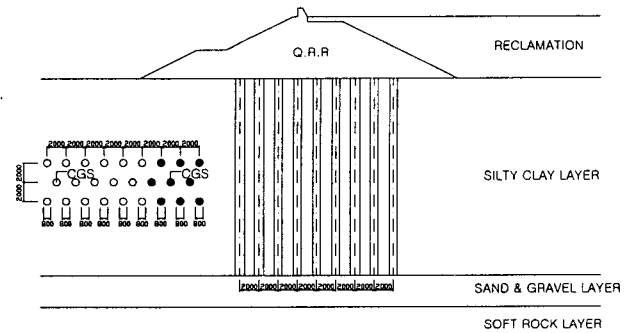


Fig. 2 Plan and section of reinforcement of II area

Table 3 Variance of C before and after reinforcement (Unit :kg/cm<sup>2</sup>)

	Before reinforcement	After reinforcement
BH-1	0.73	0.77
BH-2	0.73	0.77
BH-3	0.78	0.93
BH-4	0.76	0.91

### 4. 단계별 매립에 의한 지반강도의 변화

#### 4.1 단계별 매립토의 물성치 산출

각각의 단계별로 매립된 매립토의 지반강도 정수의 산출결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Strength parameters of fills by steps

Fill step	water content(%)	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	φ (°)
4th step fill	700	1.120	0.000	0.000
3rd step fill	250	1.260	0.030	0.000
2nd step fill	150	1.380	0.050	0.000
1st step fill	125	1.430	0.150	0.000

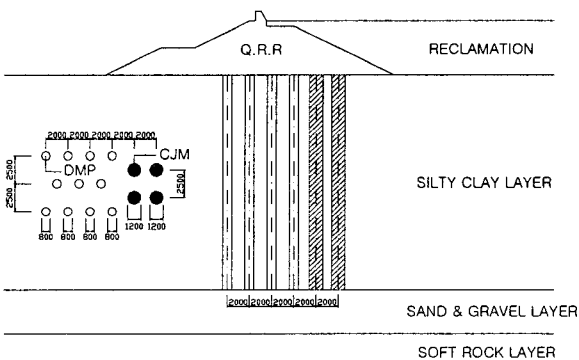


Fig. 1 Plan and section of reinforcement of I area

본 구조물의 배면 준설토의 투기는 5~6년에 걸친 단계시공으로 보았으며 총 5단계로 분류하여 단계별로 약 1년의 기간이 소요된다고 가정하였다. 1단계~4단계는 고풍수비(약 700%)의 준설토를 투기하는 과정이며 5단계는 단위중량 1.8t/m<sup>3</sup>의 산토를 성토하는 것으로 보았다. 단계별 함수비의 산정은 기존의 시공사례를 통하여<sup>4), 5), 6)</sup> 함수비 변화를 예측하였으며 그 결과는 Table 4에 나타난 바와 같다.

단위중량의 산출시 흙입자의 비중은 2.7을 적용시켜 주었으며<sup>7)</sup> 간극비의 추정은  $e=0.027w$ 을 적용하였고<sup>8)</sup>, 함수비는 100%, 해수의 간위중량은 1.03 t/m<sup>3</sup> 적용하여 주었다.

각 단계별 점착력의 산정은 함수비의 변화에 따른 전단강도의 변화율로 추정하였는데 함수비가 700%, 250%, 150%, 125%로 변화함에 따라 점착력은 0.00t/m<sup>2</sup>, 0.03t/m<sup>2</sup>, 0.05t/m<sup>2</sup>, 0.15t/m<sup>2</sup>로 증가한다고 가정하였으며 내부마찰각의 산정은 일반적인 고풍수비 흙의 토질특성을 고려하여 0°로 가정하였다.<sup>9)</sup>

#### 4.2 단계별 매립에 따른 하부 점토층의 강도 증가

단계별 매립에 의한 상재하중 증가로 인해 호안 배면의 점토층은 강도 증가의 양상을 보이는데 강도증가율을 이용하여 산출하여 보면 다음 식(2)와 같다.<sup>10)</sup>

$$c_u = c_0 + \left( \frac{S_u}{P} \right) \cdot \Delta P' \quad (2)$$

여기서,  $S_u$  = 비배수 전단강도 (t/m<sup>2</sup>)

$P$  = 유효응력 (t/m<sup>2</sup>)

$\Delta P$  = 유효응력 증가분

여기서, 압밀이 진행중이므로 평균압밀도 (U)를 고려하면,

$$c_u = c_0 + \left( \frac{S_u}{P} \right) \cdot \Delta P \cdot U \quad (3)$$

$$\frac{S_u}{P} = 0.11 + 0.0037PI \quad (\text{Skempton}) \quad (4)$$

여기서, PI는 소성지수

평균압밀도의 계산은 양면배수로 가정한다.

$$T = \frac{C_v t}{H^2} \quad (5)$$

여기서,  $C_v$  : 압밀계수(cm<sup>2</sup>/s)

$t$  : 실시시간(각 단계별 평균개랑기간을 2년으로 함)

$H$  : 배수거리(cm)(양면배수인 경우 H/2)

평균압밀도 U(%)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(\%) = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \times T \quad (6)$$

식(2) ~ 식(6)을 이용하여 호안 배면 준설 매립지반 하부의 점토지반의 전단강도를 계산하면 Table 5와 같다.

Table 5 The cohesion increment of clay layer beneath fill

Bore-hole No.	Fill height by steps (m)	PI	Coeff. of consolidation $c_v(10^4 \text{ cm}^2/\text{s})$	Cohesion $c_0(\text{t/m}^2)$	$U_{\text{ave}}(\%)$	Increased cohesion $c_u(\text{t/m}^2)$
BH-1,2	0.75	14.82	6.70	0.8	18.8	0.92
	1.0				18.2	0.96
BH-3	1.125	14.25	9.06	0.8	20.8	0.99
	1.375				19.5	1.03
BH-4	1.125	15.25	11.68	0.8	23.7	1.03
	1.375				22.8	1.07

## 5. 사면활동에 대한 안정검토

### 5.1 프로그램 해석결과

본 연구에서 사면활동에 대한 검토는 지반조사결과에 따라 BH-1, BH-2 단면의 경우 기시공된 상태로 증고하지 않고 매립하였을 경우와 기시공된 상태로 증고하여 매립하였을 경우의 2종류로 분류하여 실시하였으며 BH-3, BH-4 단면의 경우 기시공된 상태로 증고하여 매립하였을 경우에 대하여 실시하였고, 그 결과는 Fig. 3 ~ Fig. 8과 같다.

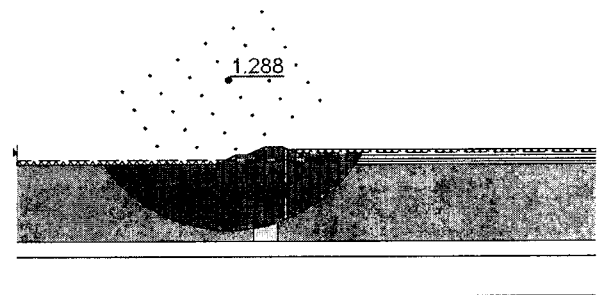


Fig. 3 The result of stability analysis(existing section of BH-1)

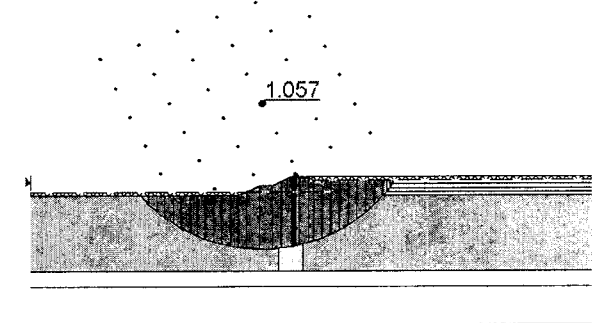


Fig. 4 The result of stability analysis(height increasing section of BH-1)

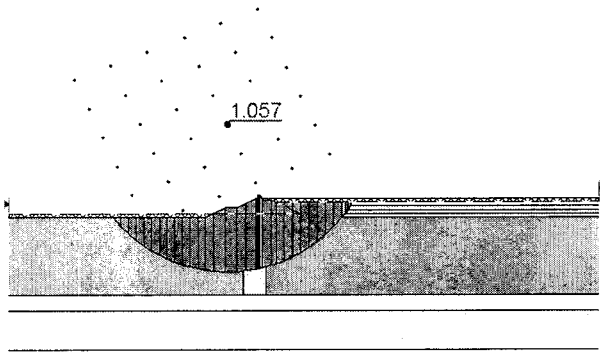


Fig. 5 The result of stability analysis(existing section of BH-2)

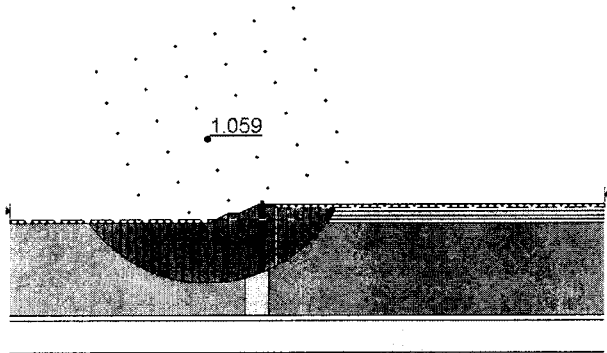


Fig. 6 The result of stability analysis(height increasing section of BH-2)

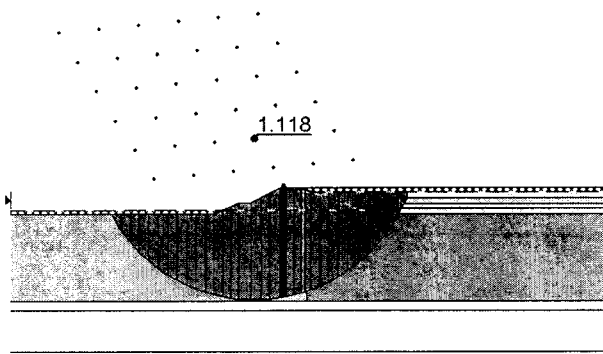


Fig. 7 The result of stability analysis(present section of BH-3)

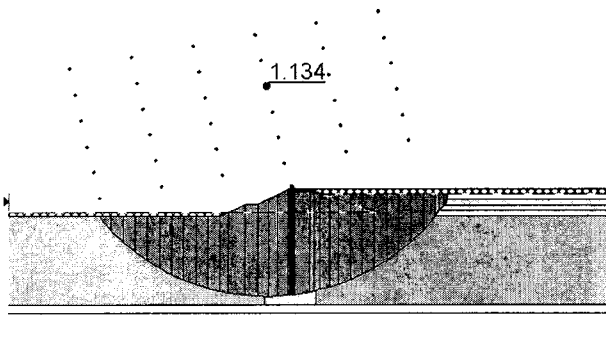


Fig. 8 The result of stability analysis(present section of BH-4)

Table 6 Safty factors of non-reinforced sections

		Division	F.S.
I area	BH-1	Existing section	1.288
		Height increasing section	1.057
	BH-2	Existing section	1.296
		Height increasing section	1.059
II area	BH-3	Present section	1.118
	BH-4	Present section	1.134

사면안정 해석결과를 살펴보면 Table 6과 같이 현상태 그대로 보강을 하지 않고 증고 한다면 DMP공법으로 3~4열로 보강된 I구역의 경우는 F.S.=1.057~1.059의 안전율을 보였으며 CGS 6~7열로 보강된 II구역의 경우는 F.S.=1.118~1.134의 안전율을 보여 두 구간 모두 기준치인 1.3에 미달되는 것으로써 증고전에 추가적인 보강이 필요하다고 판단되었다.

## 6. 기초보강단면에 대한 호안사면 안정검토 및 측방유동 판정

### 6.1 기초보강단면에 대한 사면안정 해석 결과

I구역에는 CJM공법으로 2열을 보강하고, II구역에는 CGS공법으로 2열을 보강하는 것으로 하여 사면안정을 검토한 결과는 Fig. 9 ~ Fig. 12와 같다.<sup>11)</sup>

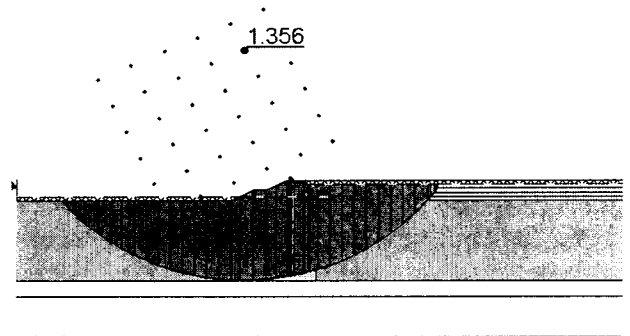


Fig. 9 The result of stability analysis(reinforced section of BH-1)

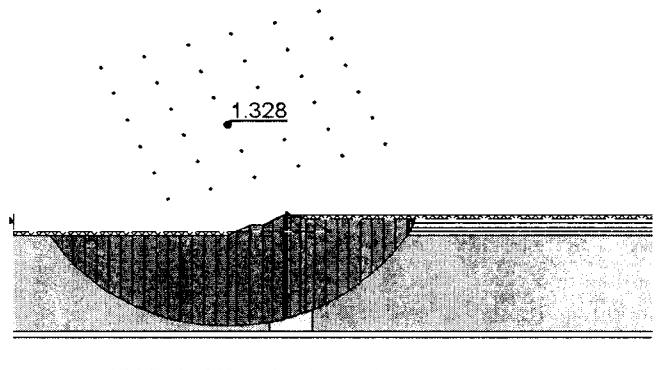


Fig. 10 The result of stability analysis(reinforced section of BH-2)

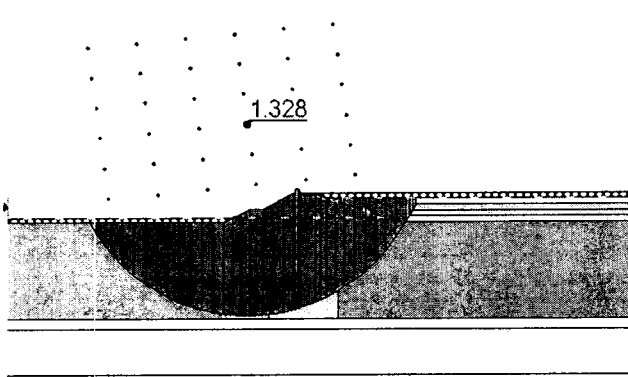


Fig. 11 The result of stability analysis(reinforced section of BH-3)

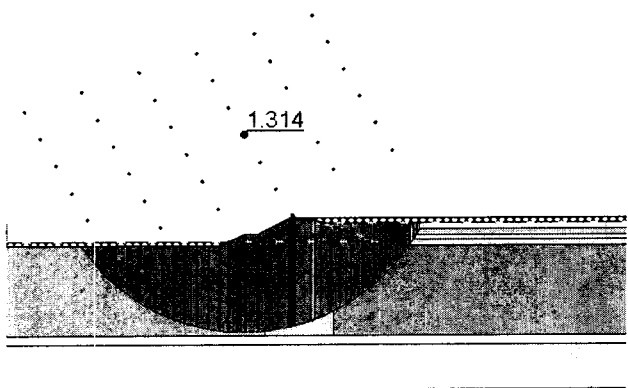


Fig. 12 The result of stability analysis(reinforced section of BH-4)

기초보강 단면에 대한 사면안정을 검토한 결과 Table 7과 같이 I구역의 경우 F.S.=1.328~1.356, II구역의 경우 F.S.=1.314~1.328의 값을 보여 복합지반 효과에 의하여 사면의 안정성이 확보됨을 확인할 수 있었다.

Table 7 Safty factors of reinforced sections

		Division	F.S.
I area	BH-1	Reinforced & Height increasing section	1.356
	BH-2	Reinforced & Height increasing section	1.328
II area	BH-3	Reinforced section	1.328
	BH-4	Reinforced section	1.314

## 6.2 측방유동에 대한 검토

본 연구에서는 I, II구간에 대해 각각 원지반(무보강) 설계 단면과 보강단면에 대한 측방유동 가능성을 연약지반의 측방 유동지수, F를 이용하여 판정하였다. 측방유동지수, F는 다음의 식(7)로 계산할 수 있으며,<sup>12)13)</sup> 일반적으로  $F \geq 4 \times 10^{-2} m^{-1}$ 을 만족하면 구조물은 측방이동에 대하여 안정한 것으로 볼 수 있다.

$$F = \frac{c}{\gamma \cdot h} \cdot \frac{1}{H} \quad (7)$$

여기서, F : 측방향 이동지수( $\times 10^{-2} m^{-1}$ ) (4기준)

F  $\geq$  4 : 측방향 이동이 예상되지 않을 때

F  $\leq$  4 : 측방향 이동이 예상될 때

c : 연약층의 평균점착력(t/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  : 성토재료의 단위체적중량(t/m<sup>3</sup>)

h : 성토고(m)

H : 연약층의 두께(m)

본 연구에서는 연구대상부지의 기초지반의 평균점착력은 원지반에서는 해성점토층의 평균점착력을 그대로 사용하였고, 보강후 증고단면에 대해서는 개량지반의 증가점착력을 이용하였다. 또한 제체 배면 준설토의 단위체적중량은 배면의 준설토 투기를 5~6년간에 걸친 단계시공으로 보아 각 단계별 매립층의 단위체적중량을 평균하여 계산하였다. 원지반(무보강 단면)과 지반보강 후 증고단면에 대한 측방유동지수 계산결과는 Table 8과 같다.

Table 8 Lateral flow indexes of reinforced sections

		Division	Lateral flow index F ( $\times 10^{-2} m^{-1}$ )
I area	BH-1	Non-reinforced section	0.586
		Reinforced section	5.64
	BH-2	Non-reinforced section	0.502
		Reinforced section	4.825
II area	BH-3	Non-reinforced section	0.415
		Reinforced section	4.822
	BH-4	Non-reinforced section	0.419
		Reinforced section	4.763

측방유동지수에 의한 판정 결과 원지반(무보강단면)에 대해서는 F = 0.415~0.586 ( $\times 10^{-2} m^{-1}$ )로 4 이하로 나타나 측방유동에 대해 불안정한 것으로 판단되었으며, 보강단면에 대해서는 F = 4.763~5.64 ( $\times 10^{-2} m^{-1}$ )로 4 이상으로 나타나 측방유동이 발생하지 않을 것으로 예상되었다.

## 7. 분석 및 고찰

사면안정 해석결과를 살펴보면 현상태 그대로 보강을 하지 않고 증고 한다면 DMP공법으로 3~4열로 보강된 I구역의 경우는 F.S.=1.057~1.059의 안전율을 보였으며 CGS 6~7열로 보강된 II구역의 경우는 F.S.=1.118~1.134의 안전율을 보여 두 구간 모두 기준치인 1.3에 미달되는 것으로서 증고전에 추가적인 보강이 필요하다고 판단되었다. 따라서, I구역에는 CJM공법으로 2열을 보강하고, II구역에는 CGS공법으로 2열을 보강하는 것으로 하여 사면안정을 검토한 결과 I구역의 경우 F.S.=1.328~1.356, II구역의 경우 F.S.=1.314~1.328의 값을 보여 보강 후

복합지반 효과에 의해 사면의 안정성이 확보됨을 확인할 수 있었다.

측방유동지수에 의한 판정 결과 원지반(무보강단면)에 대해서는  $F = 0.415 \sim 0.586 (\times 10^2 m^1)$ 로 4 이하로 나타나 측방유동에 대해 불안정한 것으로 판단되었으며, 보강단면에 대해서는  $F = 4.763 \sim 5.64 (\times 10^2 m^1)$ 로 4 이상으로 나타나 측방유동이 발생하지 않을 것으로 예상되었다.

## 8. 결론

본 연구는 ○○지역 북향 호안구조물의 수위상승 및 준설·매립에 따른 활동 및 측방유동에 대한 안정검토를 행하여 그에 대한 기초지반 보강대책을 제시한 것으로서 연구결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 구조물은 I구역은 4~10년 전 DMP공법으로, II구역은 1~3년 전 CGS공법으로 기초지반개량되었는 바, 장기간에 걸친 압밀이 진행되었다고 보아 현 시점에서의 개량된 토성치를 구하기 위하여 새로이 지반조사 및 관련 토질역학실험을 시행하였다.
- (2) 본 구조물 하부의 두께 약 20m 전후의 초연약층(Silty Clay)에 적용된 주상개량체에 대해 지반개량개념으로 보아 관련 물성치를 산정하였다. 한편, 본 구조물 배면의 준설투기 투기는 5~6년간에 걸친 단계시공으로 보았고 준설투기 직후를 최악 조건으로 보아 물성치를 적용하였다.
- (3) 복합지반효과를 고려한 호안 사면안정 해석결과, I구역의 경우 증고시  $F.S.=1.057 \sim 1.059$ , II구역의 경우 현단면  $F.S.=1.118 \sim 1.134$ 로 나타나 기준치 1.3에 미달되는 바 추가보강이 필요한 것으로 판단되었다.
- (4) 기존에 적용한 것과 동일한 공법(DMP 및 CGS)으로 2열을 추가 보강시 I구역의 경우  $F.S.=1.328 \sim 1.356$ , II구역의 경우  $F.S.=1.314 \sim 1.328$ 로서 안전한 것으로 나타났다.
- (5) 측방유동에 대한 안정검토 결과 무보강 원지반에서는 I, II구역 모두 불안정하나 기초보강 지반의 경우는 I, II구역 모두 안전한 것으로 판정되었다.
- (6) 호안구조물 증고시의 대책(추가 2열보강)은 가급적 기존에 적용한 것과 동일 또는 유사 공법을 적용하여 균질한 지반개량이 되도록 하며 더욱 기존 열과 열 사이에 설치하는 것이 측방유동억제 측면에서 보다 유리할 것으로 판단된다.
- (7) 준설투기시 호안구조물에 Over Flow 되지 않도록 반드시 여유고를 두어야 하고, 준설매립토 표면수의 제거가 용이하도록 배사관의 토출구를 호안 상부가 아닌 준설토 투기장내 중앙부에 설치하여 표면에 자연구배가 형성될 수 있도록 한다.

## 참 고 문 헌

- (1) (주)한국항만엔지니어링(1989. 10), “목포북향 호안 실시설계용역”, 목포지방해운항만청, pp.3~133
- (2) (주)서영기술단(1999.4), “목포북향 물양장(2단계)축조 및 기타공사 실시설계보고서(추가)”, 목포지방해양수산청, pp.3~61
- (3) 土質工學會(1998), “軟弱地盤對策工法”, pp.165~166
- (4) 현대건설연구소(1995), “울촌공단 준설성토지반 쾌속처리공법 연구”, 95-GEO-S02/100, pp.119~137
- (5) 지성현 외 3인(1996), “울촌지역 준설매립토의 침강·압밀 특성에 관한 연구”, 한국지반공학회, '96 가을학술발표회, pp.227~284
- (6) 지성현 외 3인(1997), “울촌지역 준설매립토의 침강·압밀 특성에 관한 연구(II)”, 한국지반공학회, '97 가을학술발표회, pp.111~116
- (7) 송만순(1988.9), “우리나라 해성점토의 제토질계수의 상관관계에 관한 연구”, 한국항만협회지, 제 12권, 제 3호, pp.56~71
- (8) 송만순(1988.12), “우리나라 해성점토의 제토질계수의 상관관계에 관한 연구”, 한국항만협회지, 제 12권, 제 4호, pp.69
- (9) 한국지반공학회(1999), “준설매립과 환경매립”, 지반공학시리즈10, 구미서관, pp.296~297
- (10) 부산지방국토관리청(1995.12), “국도7호선 유강의팔교 4차선 이설공사 토질조사보고서”, pp.181~238
- (11) 천병식 외 (1996.6), “영종도 신공항 고속도로 연육교 1공구 논골교 교대 측방유동 대책공 연구보고서”, 대학교 부설 산업과학연구소, pp.12~131
- (12) 홍성영(1995), “지반의 측방유동” 건설도서, pp.13~156
- (13) 홍원표(1998), “연약지반상 교대의 측방이동과 그 대책공법”, 대한토목학회 기술강좌 Vol.3, No.1 pp.1202~1203