

## 방조제 시공을 위한 강제치환심도의 추정

### Estimation of Replacement Depth for the Sea-dike Construction

장 병 옥\* · 우 철 웅\*\* · 김 성 필\*\*

Chang, Pyoung Wuck · Woo, Chull Woong · Kim, Seong Pil

#### Abstract

The research has been done to obtain an empirical equation for the depth of replacement by the analysis of data collected from 8 sea-dike construction sites of south coast of Korean peninsula. The correlation analysis results show that the depth of replacement was mainly dependent upon the height of embankment and the undrained shear strength of soft soil. The suggested regression equation was quite well predicted the depth of replacement and recommended to use under certain restrictions where the embankment height was less than 10m and under  $0.2 \text{ kgf/cm}^2$  of the undrained shear strength of soil.

*Keywords : sea-dike, depth of replacement, undrained shear strength, regression analysis*

#### I. 서 론

연약지반 위에 방조제나 호안을 축조할 때 지반 개량을 위해서 치환공법이 널리 사용되고 있다. 이 중에서 강제치환공법은 경제성과 시공성이 뛰어나 널리 적용되고 있다. 이 공법은 성토재료의 하중으로 인해 원지반이 비배수 변형 또는 지지력 부족에 의한 파괴가 발생하면서 지반이 양질의 성토재료로 치환되어 지반을 개량시키게 된다. 이 때 발생하는 강제치환 깊이를 산정하는 방법은 지지력 방법

(Yasuhara and Tsukamoto, 1982) 및 경험적 방법(Fellenius, 1964; Lee, 1993)으로 대별해 볼 수 있다.

지지력 방법은 기본적으로 탄성적 방법에 기초한 지중응력의 산정과 깊이에 따른 기초의 근입깊이와 비배수 전단강도의 증가에서 기인하는 지지력의 증가가 균형을 이루는 깊이까지를 치환심도로 간주하는 방법이다. 이 방법은 탄성 영역에서의 지중응력 증가와 지반의 소성거동 사이의 불일치, 극한지지력의 불확실성 등에 여러 불확실한 점에 의해서 조건에 따라 해를 도출할 수 없거나 부적절한 결과를 주는 경우가 있어 합리적인 설계에 어려움이 있다. 경험적 방법으로는 성토고의 함수로 제안한 Benjamin and Cornell(1970), 접촉응력에 대한 이양희(1982) 등이 있다. 이들 경험식은 본질적으로 지반의 특성

\* 서울대학교 지역시스템공학과  
\*\* 서울대학교 대학원  
\* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4585  
Fax: +82-2-873-2087  
E-mail address: pwchang@snu.ac.kr

에 따라 각기 다른 매개변수를 사용하며 단순한 선형방정식의 형태를 가지고 있다. 이들 경험식은 지반의 특성 즉, 지형조건, 지반강도, 성토고 등과 같은 물리적 조건뿐만 아니라 시공법 및 시공속도 등의 영향을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 이들 경험식은 설계 단계에서의 예측에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 지금까지 방조제 축조에 따른 지반변형은 남해안의 많은 방조제에서 나타났으며 이에 다양한 조건에서의 사례도 축적되어 있다. 이에 본 연구에서는 우리나라의 남해안의 연약지반상에 축조된 방조제 변형 사례를 이용하여 방조제의 치환심도를 추정할 수 있는 경험식을 도출하고자 하였다.

## II. 자료의 특성 및 분석방법

### 1. 자료 개요

우리나라의 연약지반은 주로 서남해안에 분포하고 있으며 서해안의 연약지반은 주로 실트질로 구성되어 있으며 남해안은 점토질로 구성되어 있다고 알려져 있다. 실트질 지반은 지반의 강도가 비교적 높아 변형이 크기 않은 경우가 많다. 변형이 작은 경우에는 많은 부분이 탄성 침하에 의해서 설명될 수 있어 치환이라기 보다는 탄성변형으로 설명하는 것이 합리적이다. 또한, 치환에 의해 연약지반이 모두 치환된 경우에는 연약지반의 층후가 지반의 변형 가능성보다 작은 경우로서 불안전 치환으로 볼 수 있다. 또한, 잔류한 연약층의 층후가 두텁고 제방 축조 후 많은 시간이 경과하는 경우에는 지반의 압밀침하에 의한 영향을 배제할 수 없다. 이에 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 다음과 같은 조건을 설정하고 이러한 조건에 적합한 자료를 수집하였다.

- 치환심도가 2 m 이상
- 잔류 연약층이 1 m 이상
- 단순 제형인 단면

- 압밀침하량이 50 cm 이하
- 제방의 단면이 공기의 단절없이 연속적으로 시공된 경우

방조제 축조에 따른 치환심도의 분석을 위해 만덕지구 외 5개 지구의 방조제 축조시공자료 및 광양컨테이너 부두공사 외 2건의 부두공사시의 강제치환 사례 등 8개 지구에서 총 73건을 수집하여 이를 Table 1에 요약하였으며 지역적인 분포를 Fig. 1에 도시하였다.

Table 1 Collected data

Name	Location	Remark
Mandeok	Gangjin, Jeonnam	
Gogeu	Wando, Jeonnam	
Sannae	Haenam, Jeonnam Gangjin, Jeonnam	
Goheung	Goheung, Jeonnam	
Gunnae	Jindo, Jeonnam	
Wando	Wando, Jeonnam	
Gwangyang	Gwangyang, Jeonnam	Dock
Busan	Sinseondae, Busan	Dock



Fig. 1 Location of collected data

## 2. 자료 특성

치환심도에 영향을 미치는 변수는 지반조건을 나타내는 변수와 외부조건을 나타내는 변수가 있으며 외부조건을 나타내는 변수로는 성토고, 사면경사, 성토재 단위중량 등과 같은 성토체의 물리적 특성과 시공법, 시공속도 등과 같은 시공변수가 있다. 본 연구에서는 자료의 수집에 있어서 사석에 의한 강제치환공법을 대상으로 하였으나 투하 사석의 크기 및 단위중량 등은 조사할 수 없었다. 이러한 인자는 어느 정도는 치환심도에 영향을 미칠 것으로 예상되나 그 영향은 크지 않을 것으로 판단하였다. 또한 사면경사는 사석제 시공시에는 사석의 안식각으로 유지하고 추후 방파석으로 설계사면을 완성하는 공법을 적용하므로 조사된 자료의 사면경사의 변화는 크지 않은 것으로 판단되어 외부 변수로는 성토고를 선정하였다. 지반조건 변수로는 지반조건을 나타내는 변수로는 함수비, 비중, 단위중량, 액성한계, 소성지수, 압축지수, 압밀계수, 지반의 강도 그리고 지반의 지형적 조건을 나타내는 연약지반의 심도를 조사하였다.

데이터의 특성은 그 분석결과의 신뢰성에 큰 영향을 미치며 분석결과의 활용범위를 결정한다. 분석에 사용된 자료의 특성치를 Table 2에 정리하였다. 자료의 평균을 중심으로 한 대칭성의 지표인 왜도(skewness)는 성토고 및 비배수 강도에서 0.5 이상의 값으로서 양의 값 즉, 평균보다 큰 값 쪽으

로 두터운 분포하며 이 외에는 대부분 균등한 정도의 분포를 보이고 있다. 분포의 뾰족한 정도를 나타내는 첨도(Kurtosis)를 살펴보면 모두 3이하로서 완첨한 특성을 보였다. Fig. 2는 액성한계, 비배수 전단강도, 성토고의 분포이며 Fig. 3은 비배수 전단강도 및 성토고에 따른 치환심도의 분포를 나타낸다. 이러한 결과는 자료가 전체적으로는 큰 왜곡없이 잘 분포되어있는 것으로 볼 수 있으나 비배수 강도 및 성토고는 다소 큰 자료가 포함되어 있다고 할 수 있다. 분석대상이 되는 연약지반은 지반 특성은 함수비 63.9%, 비배수 전단강도 0.128 kgf/cm<sup>2</sup>, 액성한계 55%, 성토고 7.26 m 정도가 평균이며 비교적 고소성의 지반이며, 성토고는 10 m 이하가 대부분이라는 점이 특징이다.

## III. 분석 결과 및 고찰

### 1. 자료 분석

치환심도에 영향을 미치는 인자를 도출하기 위해서 먼저 변수들을 상관분석(Correlation analysis) 하였다. 상관분석결과는 액성한계, 소성한계, 압축지수와 강도는 매우 밀접한 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다. 이러한 상관성은 세립토의 연경도와 흙의 특성에 대한 일반적인 거동과도 일치하고 있다. 따라서, 이들 변수는 동일한 특성을 반영하는 것으로 보았으며 지반의 지지력과 관계가

Table 2 Statistical characteristics of the physical properties of the data

Properties	Wate content (%)	Liquid Limit (%)	Undrained shear strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Embankment height (m)	Depth of replacement (m)
Minimum	21.4	21.4	0.056	4.00	9.70
Maximum	98.8	79.8	0.290	14.5	20.69
Average	63.9	55.0	0.128	7.26	11.70
standard deviation	17.7	12.4	0.060	1.9	3.83
Skewness	0.45	-0.32	1.17	1.29	0.21
Kurtosis	-0.87	0.112	0.56	2.39	-0.396

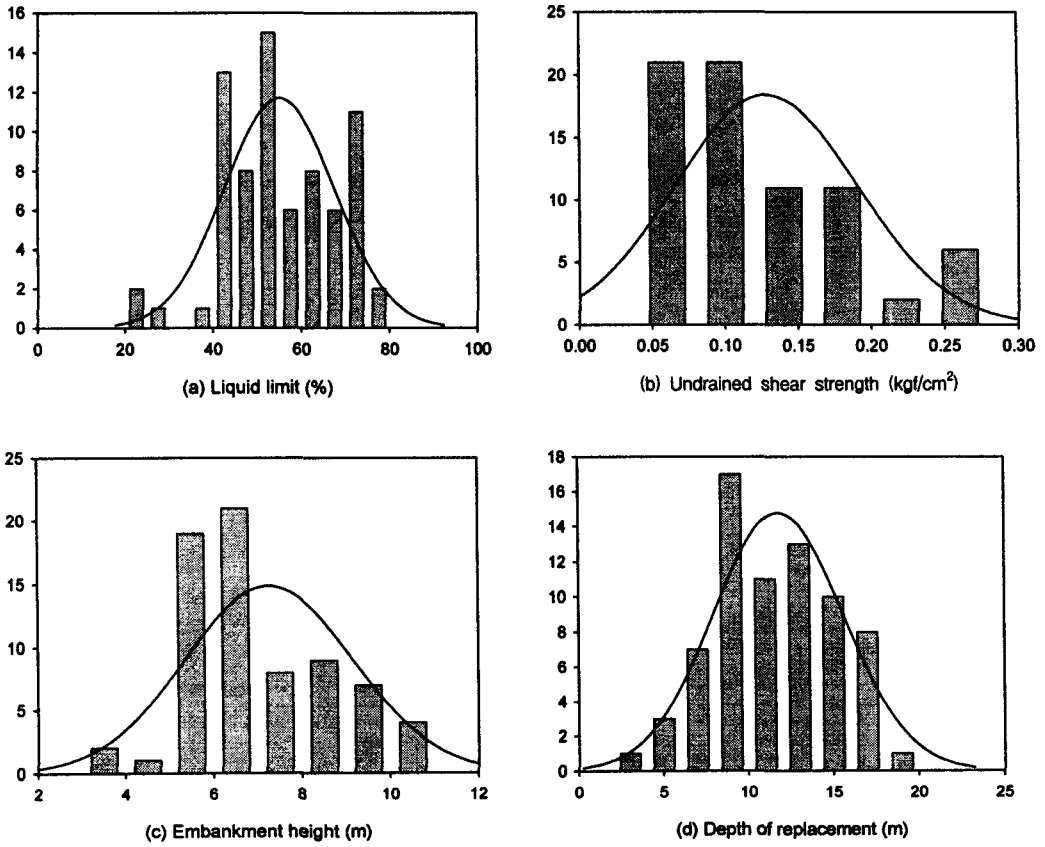


Fig. 2 Histograms of the data

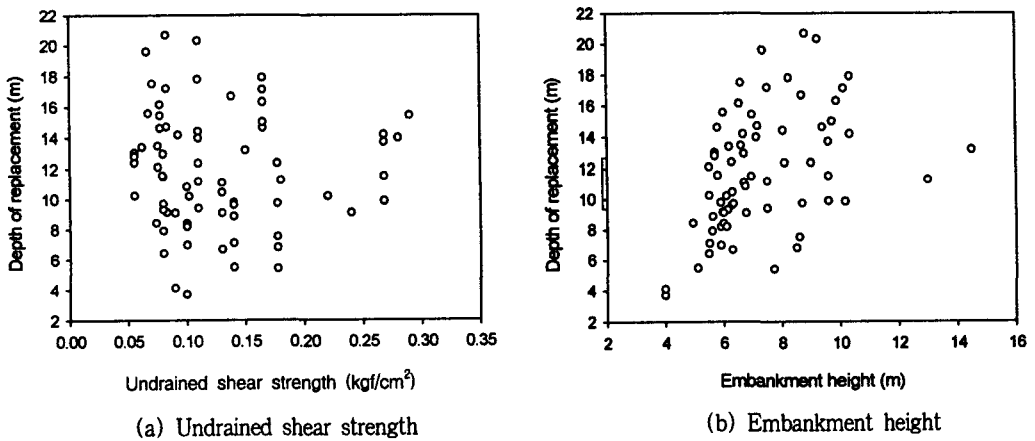


Fig. 3 Depth of replacement

있는 변수인 비배수 전단강도를 대표변수로 선정하였다. 이들 변수와 기타 지반정수들에 대한 상관분석결과 선정된 두 변수가 강제치환심도와 상관정도가 높은 것으로 나타났으며, 두 변수와 강제치환심도에 대한 다중회귀분석을 실시하였다.

치환심도와 비배수강도와 성토고간의 관계를 선형으로 한 다중회귀모형, 다항회귀모형 그리고 로그 항을 포함한 모형을 선택하여 각 모형에 대하여 회귀분석을 수행하였고 각각의 모형에 대하여 R-square 값을 구하고 F-검정을 실시하였다. 회귀분석에 사용된 모형과 회귀분석의 결과치 및 각 모형의 R-square값은 Table 3과 같다. 식 중의 Y 는 치환 심도, X는 성토고, Z는 비배수 전단 강도이다. 모형 중에서 지수함수를 포함하는 모형은 회귀분석에서 사용한 변수간의 관계특성상 적합하지 않은 것으로 판단하여 제외하였다.

회귀분석 결과 선형회귀모형을 제외한 모든 모형에서 R<sup>2</sup> 값에서 비슷한 결과를 얻었으며 F-검정 결과도 매우 유의한 것으로 나타났다. Lee(1993)는 치환심도에 대해 다음과 같은 경험식을 제안한 바 있다.

$$D_z = \frac{\gamma_c h - 5.14 c_u}{\frac{7}{6} \gamma_c + \gamma_{sub}} \dots \dots \dots (1)$$

이 식은 기본적으로 치환심도와 각 변수간의 비례 관계를 반영하고는 있으나 Table 3에서와 같이 이

러한 선형 관계식의 R<sup>2</sup>는 0.283로서 유의성이 없었다. 이는 연약지반의 치환심도와 성토고 및 비배수 전단강도와의 관계가 비선형적이라는 것을 의미한다. Table 3은 성토고에 따른 비선형성을 고려한 모형이 비배수 강도의 경우보다 더 좋은 R<sup>2</sup>를 보였으나 두 차이는 유의성이 없었다. 따라서 본 연구에서는 이들 모형 중에서 가장 R-square 값이 높은 이차다항회귀모형을 치환심도 모형으로 선택하였다. 이 모형의 회귀계수의 특성은 Table 4와 같다.

$$D_z = -5.469 + 6.122 h - 0.270 h^2 - 137.448 c_u + 326.407 c_u^2 \dots (2)$$

여기서, D<sub>z</sub>=치환심도(m), h = 성토고(m), c<sub>u</sub> = 비배수 전단강도(kgf/cm<sup>2</sup>)이다.

Table 4 Population of the regression coefficient

Parameter	Estimated values	Asymptotic Std. Error	Asymptotic 95% Confidence Interval	
			Lower	Upper
A	-5.469	4.082	-14.614	1.675
B	6.122	0.950	4.227	8.017
C	-0.270	0.054	-0.378	-0.162
D	-137.448	26.875	-191.075	-83.820
E	326.407	77.737	171.286	481.528

Table 3 Accuracy of multiple regression analysis with variable models

Model	SSR	SSE	MSR	MSE	R <sup>2</sup>
Y = A+BX*+CZ**	299.368	757.435	149.684	10.821	0.283
Y = A+BX+CZ+DZ <sup>2</sup>	10525.457	627.541	2631.364	9.065	0.944
Y = A+BX+CX <sup>2</sup> +DZ	10574.737	578.261	2643.684	8.381	0.948
Y = A+BX+CX <sup>2</sup> +DZ+EZ <sup>2</sup>	10693.796	459.202	2138.759	6.753	0.959
Y = A+BlnX+ClnZ	10541.879	611.119	3513.960	8.730	0.945

\* X means the embankment height  
 \*\* Z means the undrained strength

Table 5 Variance table for the selected model

Variations	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	$F_0$	$F(0.01)$
Regression	10693.796	5	2138.759	317.569	3.34
Residual	459.202	68	6.753		
Total	11152.998	73			

선택된 모형의  $F$ -검정을 위한 분산분석표는 Table 5에 제시하였으며 이를 살펴보면  $F_0 > F(0.01)$ 로 매우 유의한 결과임을 알 수 있다.

2. 모형의 적용성 검토

Fig. 6은 이 모형을 3차원 상의 평면으로 나타낸 것이다. 이 그림의 일정 영역에서는 비배수 전단강도가 증가함에 따라 치환심도가 감소하고, 성토고가 높아짐에 따라 치환심도가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향은 치환심도는 성토고와 정(+), 지반의 강도와 부(-)의 상관관계를 가질 것이라는 기대와 일치하는 것이며, 모형은 일정 범위에서 이를 반영하고 있다. 그 영역을 보면 비배수 전단강도의 경우 0.2 kgf/cm<sup>2</sup>까지며 성토고의 경우는 11 m까지이다.

Fig. 4의 결과는 회귀분석에 사용된 자료의 특성

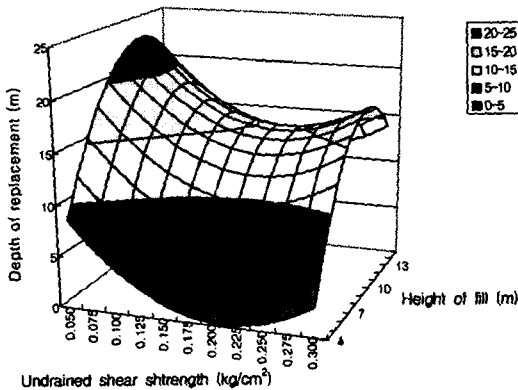


Fig. 4 Regression model for replacement

에서 볼 수 있듯이 11 m 이상의 성토에 대한 자료와 비배수강도가 0.2 kgf/cm<sup>2</sup> 이상인 자료가 빈약한 것에서 기인한 것으로 판단된다. 통상 비배수 전단강도가 큰 지반에서는 치환심도가 크지 않으므로 모형의 비배수 전단강도의 범위는 적절한 것으로 판단된다. 모형을 적용할 수 있는 성토고의 한계를 11 m, 비배수강도를 0.2 kgf/cm<sup>2</sup> 이하라고 하고 표현하면 Fig. 5과 같다. 개발된 회귀모형과 회귀분석에 사용된 설명변수를 이용하여 치환심도를 구해본 결과와 실제의 치환심도를 비교하였다. 그 결과 최대 5.71 m의 차이를 보이는 곳이 있었고 평균적으로 약 2.3 m 정도의 오차를 보이고 표준편차는 1.678 m 이다. 따라서, 개발된 모형은 약 2 m 정도의 오차한계를 가지고 있는 것으로 판단된다. 이와 같은 오차는 본 연구에서 사용된 자료의 치환심도 평균인 11.7 m의 약 20% 가량으로서 적지 않았다. 이러한 오차는 모형의 한계는 물론이거니와 사용된 지반 강도정수의 불확실성, 자료의 한계 등에서 기인한다. 따라서, 본 모형은 개략적인 치환심도의 예측에 유용하지만 이를 적용할 때에는 이러한 오차를 감안하여야 할 것으로 생각된다.

농림수산부의 간척자원 조사 결과에 의하면 수심 10 m 정도인 천해 간척자원은 전체 간척자원의 약 10% 정도이며 현재까지 진행된 대부분의 간척사

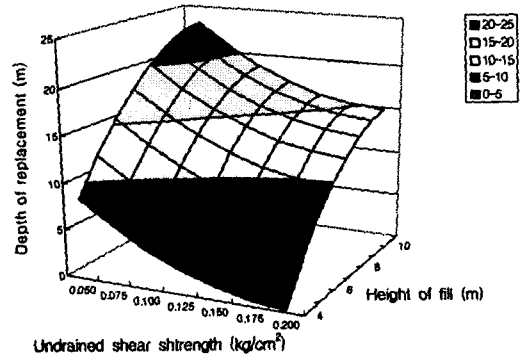


Fig. 5 Regression model for replacement (allowable range)

업이 여기에 속한다. 따라서, 향후의 대단위 간척사업 및 심해 간척에 연구결과를 적용하기 위해서는 심해 간척에 대한 자료가 보완되어야 할 것으로 판단되며 이후에 보다 많은 자료가 추가된다면 보다 넓은 범위에 대하여 적용성이 있는 모형을 구할 수 있을 것이다.

#### IV. 요약 및 결론

우리 나라 남해안의 8개 지구의 치환심도 자료를 수집하여 연약지반 사석제 시공자료를 검토하고 이를 지반조건 즉, 연약지반 심도, 비배수 전단강도 등의 물리적 특성과의 상관관계를 분석하여 지반조건에 따른 경험적 치환심도 추정식을 도출하였다.

1. 치환심도의 추정을 위해 잔류연약층이 존재하며 단순 제형인 제방의 치환사례를 수집하였다. 수집된 사례는 지반특성은 함수비 60%, 비배수 전단강도  $0.12 \text{ kgf/cm}^2$ , 액성한계 50% 정도, 성토고는 7 m 정도가 평균적인 분포이다.

2. 매개변수를 선정하기 위하여 상관분석을 실시하였으며 그 결과 여러 지반정수는 상당한 상관관계를 보였으며 이를 고려하여 지반조건에 대한 대표 변수로 점착력을 외부변수로는 성토고를 선정하였다.

3. 회귀모형을 검토한 결과, 선형 모형은 적용성이 없으며 치환심도와 성토고 및 비배수 점착력은 비선형적 관계를 보인다는 것을 알 수 있었다.

4. 본 연구에서는 다음과 같은 치환심도에 따른 경험식으로 2차 중회귀모형이 가장 적합한 것으로 나타났다.

$$D_z = -5.469 + 6.122 h - 0.270 h^2 \\ - 137.448 c_u + 326.407 c_u^2$$

이 회귀모형은 점착력  $0.2 \text{ kgf/cm}^2$  이하, 성토고 10 m 이하에서 적용할 수 있다. 모형의 적용에 있어서는 지반정수의 불확실성, 모형의 한계 등에서 기인하는 오차를 고려하여야 할 것이다.

#### References

1. Benjamin, J. R. and C. A. Cornell. 1970. *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*. McGraw-Hill.
2. Chen, W. F. 1994. *Constitutive equations for engineering materials; Plasticity and modeling*. Elsevier.
3. Chung, H. S., S. H. Lee and Y. C. Hwang. 1993. A Study on deformation of soft clay foundation by embankment construction. *J. of the KGS*. KGS. 9(2)55~62.
4. Desai, C.S. and H. J. Siriwardane. 1984. *Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geologic materials*. Prentice-Hall.
5. Indraratna, B., A. S. Balasubramaniam and S. Balachandran. 1992. Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay. *J. of Geotechnical Engineering*. ASCE. 118(1):12-33.
6. Lee, S. H. 1993. *A study on deformation of soft clay foundation by soil structure*. Ph. D. Dissertation. Hanyang University. (In Korean)
7. Lee, S. H. and Y. J. Lee. 2000. A study on the numerical model for predicting depth of replacement and consolidation by embankment on weak soil. *J. of Ocean Engineering and Technology*. The Korean Committee for Ocean Resources and Engineering. 14(3): 61-65.
8. Mesri, G. M., Choi Y. K. 1985. Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays, *J. of Geotechnical Engineering*. ASCE. 111(4) 444-465.
9. Mitchell, J. K. and W. S. Gardner. 1971. Analysis of Load-Bearing Fills over Soft Subsoils. *J. of the Soil Mechanics and Foundations Div*. ASCE. 97(11)1549-1571.
10. Oh, J. H. and M. S. Lee. 1998. A deformation prediction of the embankment on the soft clayey foundation. *J. of the KSAE*.

- KSAE. 40(4):94-102.
11. Stamatopoulous A. C. and P. C. Kotzias. 1972. Embankment construction on yielding sea bottom. *J. of the Soil Mechanics and Foundation Div. ASCE.* 98(7)727-747.
  12. Tavenas, F. and S. Leroueil. 1980. The behavior of embankments on clay foundations, *Can. Geotech. J.* 17(2)236~260.
  13. Weber Jr. E. G. 1952. Construction of a fill by a mud displacement method. *Highway research proceeding.* 41:591-610.
  14. Yasuhara, K. and Y. Tsukamoto. 1982. A rapid banking method using the resinous mesh on a soft reclaimed land. *Proc. 2nd IGS Conf. Las Vegas.* 3:635-640.