

심층혼합처리공법으로 개량된 연약지반상의 사석제 설계기준

송영석* · 남정만** · 윤중만*** · 김태형****

*중앙대학교 기술과학연구소

**제주대학교 해양과학대학 해양토목공학과

***안산공과대학 토목과

****한국해양대학교 공과대학 토목환경시스템공학부

Design Criteria of Rubble Mounds on the Soft Grounds Improved by Deep Soil Mixing Method

YOUNG-SUK SONG*, JUNG-MAN NAM**, JUNG-MANN YUN*** AND TAE-HYUNG KIM****

*Institute of Technology and Science, Chung-Ang University, Seoul, Korea

**Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Cheju, Korea

***Department of Civil Engineering, Ansan College of Technology, Ansan, Korea

****Department of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Pusan, Korea

KEY WORDS: Deep Soil Mixing Method 심층혼합처리공법, Rubble Mound 사석제, Slope Stability Analysis 사면안정해석, Finite Element Method 유한요소해석, Soft Ground 연약지반

ABSTRACT: To establish the design criteria for construction of the rubble mound on improved ground, two kinds of analyses for the soil deformation behavior and the slope stability were performed on various cases for rubble mounds, soft grounds and back fills with application of the finite element method and the Bishop simplified method. The horizontal displacements and settlements at the crest of rubble mounds were analyzed as a function of the safety factor of embankments. The analyzed result shows that the soil movement increases considerably when the safety factor of rubble mounds is lower than 1.3.

1. 서 론

급속한 산업의 발달과 인구증가에 따라 국토개발이 더욱 필요하게 되었다. 특히 우리 나라와 같이 국토가 좁고 삼면이 바다에 인접한 조건에서는 해안을 개발 활용하여 공업단지, 주거시설, 운송시설(항만, 공항) 등을 건설함으로써 내륙에서의 부지확보 어려움을 해소하는 것이 불가피하다. 이러한 개발과정에서 해안을 따라 분포되어 있는 연약지반의 안정처리를 실시하는 비중이 점차 증대하고 있다.

이러한 국토개발의 과정에서 해안을 매립하여 항만접안시설 및 부대시설을 건설할 목적으로 해안연약지반의 심층부를 개량하는 심층혼합처리공법이 많이 활용되고 있다. 이 공법은 석회, 시멘트 등의 개량재를 연약지반 원위치에서 지중에 공급하여 강제적으로 원위치의 연약지반과 교반혼합하므로 연약지반을 견고하게 안정 처리하는 공법이다.

이와 같이 심층혼합처리공법에 의해 해안연약지반을 개량하고 개량 연약지반상에 사석호안을 축조한 후 내륙부 배면을 매립하면 심층혼합처리된 연약지반과 호안부에는 배면성토 및 횡방향 토압에 의해 침하와 수평변위가 발생하게 된다. 일반적으로 심층혼합

처리된 지반은 압축에 대해서는 큰 강도를 발휘하지만 휨과 인장에 대해서는 큰 강도를 기대할 수 없으므로 과도한 수평변형은 호안파괴의 주원인이 된다. 따라서 호안구조물을 축조할 경우 호안구조물과 기초지반에 파괴나 과도한 변형이 발생되지 않도록 설계하여야 할 것이다. 그러하기 위하여 사면과 지반의 안정성과 변형은 미리 해석검토하고 그 결과로 종합적인 안정판단을 할 수 있는 기준이 마련되어야 할 것이다. 현재 국내에서는 심층혼합처리공법을 이용한 해안연약지반상에 호안의 시공사례가 증가하고 있으나 이에 따른 판단기준이나 경험자료는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 심층혼합처리공법에 의해 개량된 연약지반과 상부 호안 사석제가 설치된 상황에 대한 유한요소해석과 사면안정해석을 수행하여 개량지반상 사석제의 거동과 안전성의 관계를 규명하여 보고자 한다. 즉, 유한요소해석 결과로부터 얻은 사석제의 수평변위와 침하를 사석제의 사면안전율과 연계하여 이들의 상관관계를 합리적으로 규명하므로써 심층혼합처리공법으로 개량된 연약지반상 사석제의 설계에 활용할 수 있는 자료를 마련하고자 한다.

2. 심층혼합처리공법

제1저자 송영석 연락처: 서울특별시 동작구 흑석동 221

02-824-0580 yssong@ms.cau.ac.kr

심층혼합처리공법(deep soil mixing method)은 석회, 시멘트 등의 개량재를 원위치에서 지중에 공급하여 강제적으로 연약지반과 혼합교반함으로써 원지반상에 견고한 안정처리지반을 형성하는 지반개량공법이다(Broms and Boman, 1977). 이렇게 형성된 개량체는 지중에 기둥형태로 존재하며, 이는 일정한 간격으로 시공되거나, 간격이 없이 서로 겹쳐져 벽체의 형태로 시공되기도 한다. 따라서, 시공이 완료된 상태를 위에서 본 평면도는 벌집모양의 형태를 갖게된다.

심층혼합처리공법은 주로 연약 충적토, 해성점토, 유기질토, 혹은 준설패립토 지반의 개량에 적용된다. 본 공법이 적용된 지반에서는 지반의 전단강도와 지지력이 증가하게 되며, 침하가 감소하게 된다(Terashi et al., 1979; 1980; Terashi and Tanaka, 1981).

지금까지 개발 사용된 심층혼합처리공법으로는 DCM(Deep Cement Mixing), SMW(Soil Mixing Wall), CMC(Cement Milk/Mortar Consolidation), DLM(Deep Lime Mixing)등이 있다(Toth, 1993).

심층혼합처리공법은 안정재의 종류, 안정재의 공급방법, 혼합방법 등에 따라 분류할 수 있으나, 일반적으로 처리방식에 따라 표층 혼합처리공법(Hong et al., 1996)을 발전시킨 기계적 혼합처리방식과 약액주입공법을 발전시킨 분사혼합처리방식으로 분류한다. 본 연구에서는 시멘트 밀크를 안정재로 사용하는 기계적 혼합처리방식에 의한 개량지반을 대상으로 하였다(Kawasaki et al., 1981; Kawasaki and Saitoh, 1984).

3. 현장사례 및 해석

3.1 현장개요

본 연구는 그림 1에 도시된 국내 한 컨테이너 터미널 건설시공현장을 대상으로 하였다. 컨테이너 터미널 부지인 A구간은 간척사업에 의해 마련되었으며, 이 위치의 연약지반을 개량하기 위하여 프리로딩공법을 적용하였다. A구간에서 프리로딩에 의한 압밀이 완료된 이후 프리로딩용으로 사용된 성토토사는 B구간의 사석호안 배면에 매립재로 다시 사용되었다. B구간에 배면매립을 실시하기 전에 먼저 937m의 사석호안을 축조하였으며, 호안공사가 완료된 이후 A구간의 성토재를 이곳에 옮겨 배면매립을 실시하였다.

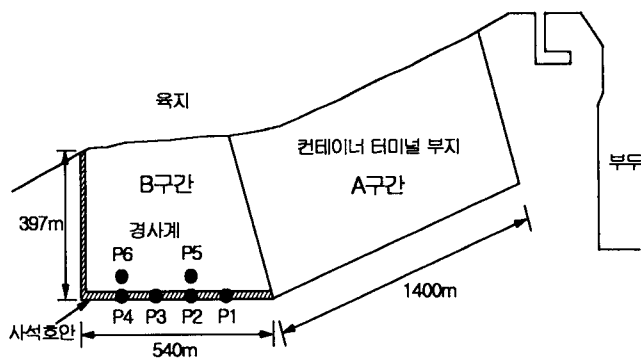


Fig. 1 A port construction project in Busan, Korea

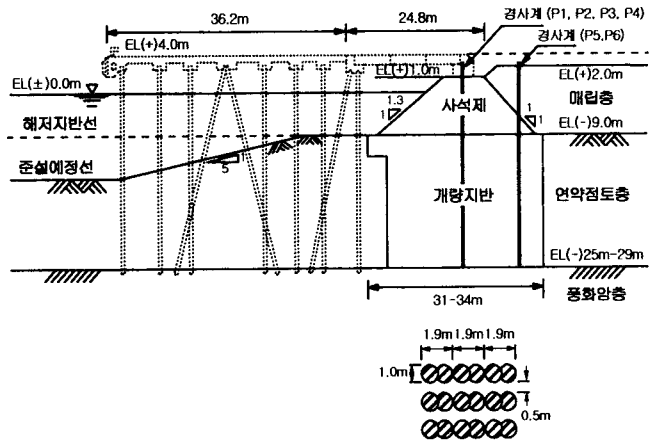


Fig. 2 Cross section of rubble mound on ground improved by the deep soil mixing method (Site B)

본 현장에 대한 호안시공단면은 그림 2에서와 같다. 먼저 해저부 연약점성토층을 심층혼합처리공법에 의하여 지반개량을 실시한 후 사석호안을 축조하였다. A구간에서 사용된 성토토사를 B구간 호안의 배면에 매립한 후 전면 횡간교부와 연결하는 것으로 하였다.

본 현장의 토질조건은 그림 2에서와 같이 수심 약 EL(-) 9.0m 이하에 퇴적층이 16~20m 정도의 깊이로 분포하고 있으며 상부 연약층(8~13m 두께로 분포)은 실트질점토로서 0.1~0.2kg/cm² 정도의 대단히 낮은 비배수전단강도를 나타내고 하부 연약층(7~12m 두께로 분포)은 점토 및 실트쉬인 모래로 구성되어 연약하거나, 느슨~중간정도의 상대밀도를 보인다. 퇴적층 아래는 풍화암 또는 연암이 지지층으로 존재하며 균열 및 절리가 발달한 양상을 보이고 있다. 한편, 개량지반속 기둥시공형식은 횡방향력이 큰 방파제와 같은 구조물에 가장 많이 쓰이는 벽체식 구조가 채택되었다. 사석체의 하부 지반반력을 지지할 수 있는 견고한 지반까지 지반개량률은 54%로 하였으며, 형상 및 재원은 그림 2에 나타내었다. 지반 개량후 확인보링을 실시한 결과 코아회수율(CR)은 60~90%, N치는 50이상으로 확인되었으며, 일축압축강도는 15kg/cm²이상으로 나타났다.

3.2 해석단면

사석체를 포함한 개량지반의 거동을 분석하기 위해 그림 2에 나타난 시공단면도를 단순화하여 그림 3과 같이 대표단면을 선정하였다. 사석체부, 개량지반부, 뒷채움성토부 등 각 부분의 토질조건은 지반조사결과를 토대로 표 1과 같이 결정하였다. 이를 기준으로 단면크기 및 형상, 개량체의 강도 등을 변화시켜 총 39개 단면에 대한 해석을 실시하였다.

CDM研究會編(1986)에 의하면 개량지반의 허용압축응력(σ_{cu})은 개량지반의 설계기준강도(q_{uck})와 같으며, 복합지반으로서의 응력분담효과를 고려하여 개량지반의 평균전단강도($\bar{\tau}$)는 식 (1)와 같이 구할 수 있다.

$$\bar{\tau} = a_p c_p = a_p (q_{uck} / 2) \quad (1)$$

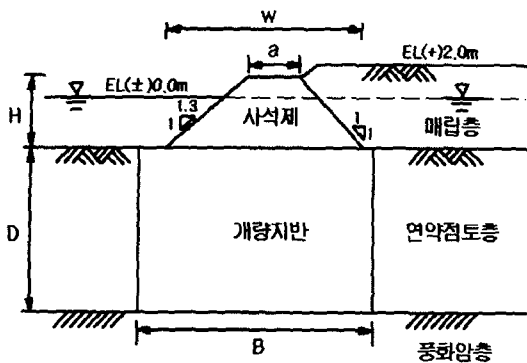


Fig. 3 Typical cross section applied on the analyses

여기서, a_p 는 개량률, c_p 는 개량지반의 전단강도이다.

본 현장의 개량지반에 대한 확인실험결과 일축압축강도는 15 kg/cm^2 이상이고, 상시 안전율 3을 적용하면 허용압축응력은 5 kg/cm^2 이 된다. 식 (1)에 허용압축응력과 현장시험에 의한 개량률 50%를 대입하면 $\bar{\tau} = (0.5)(2.5) = 1.25 \text{ kg/cm}^2$ 이 된다. 따라서, 허용압축응력과 개량률을 고려한 개량지반의 전단강도를 구할 수 있으며, 이상의 결과를 이용하여 개량지반의 비배수전단강도를 $\bar{\tau} = c_u = 2.5 \sim 15 \text{ t/m}^2$ 의 범위로 선정하였다.

3.3 해석방법

앞에서 설명한 바와 같이 개량지반상 사석제의 수평변위는 사석제의 사면안전을 고려되어 있다. 따라서, 개량지반상 사석제의 안정성에 대한 설계기준은 사석제의 수평변위와 사면안전을 고려하여 마련되어야 할 것이다. 그러나, 이러한 설계기준은 아직까지 마련되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 심층혼합처리 연약지반상 사석제에 대한 설계기준을 마련하기 위하여 개량지반의 규모 및 강도, 사석제의 높이, 그리고 상재하중을 고려한 유한요소해석과 사면안정해석을 동시에 실시하였다. 즉, 개량지반상 사석제의 변형거동을 조사하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 SIGMA/W를 이용하였으며, 개량지반상 사석제의 사면안전을 계산하기 위하여는 사면안정해석 프로그램인 SLOPE/W를 이용하였다.

Table 1 The geotechnical properties applied on the analyses

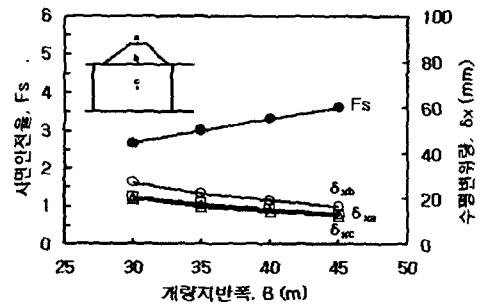
Soil	Unit	Rubble mound	Improved ground	Backfill	Soft clay	Bedrock
Saturated unit weight	t/m^3	2	1.75	1.9	1.6	-
Wet unit weight	t/m^3	1.8	1.65	1.8	1.5	-
undrained shear strength	t/m^2	0	2.5-15	1	1.0	-
internal friction angle	$^\circ$	40	0	28	0	-
Elastic modulus	t/m^2	10,000	1-5	3000	200	100,000
Poisson's ratio	-	0.35	0.3	0.3	0.4	0.25

SIGMA/W는 비선형 유한요소해석 프로그램으로서 연약지반의 배수 및 비배수상태의 응력-변형률 문제를 간편하게 정의할 수 있는 입력방식을 적용하고 있다. 본 해석에서 적용된 지반모델은 비선형 탄소성모델이며, 배수조건은 비배수상태인 전응력 조건이다. 한편, SLOPE/W는 한계평형해석을 이용한 여러 가지 사면안정해석법의 적용이 가능하나 본 해석에서는 Bishop의 간편법이 적용되었다.

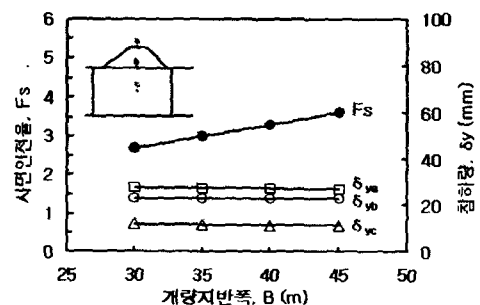
4. 개량지반상 사석제의 변형거동에 대한 영향요소

4.1 개량지반 폭

개량지반 폭을 30m에서 45m까지 증가시키면서 사면안정해석과 유한요소해석을 모두 실시하였다. 그림 4는 개량지반 폭(B)의 변화에 따른 사면안전율과 사석제 및 개량지반의 수평변위량 및 침하량을 각각 나타낸 것이다. 개량지반상 사석제의 수평변위량 및 침하량은 사석제 상단의 a점, 사석제 하단과 개량지반의 상단접촉면의 b점, 그리고 개량지반의 중심 c점에서의 값을 각각 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 개량지반상 사석제의 사면안전율은 개량지반 폭이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 반면에, 수평변위량은 개량지반 폭이 증가할수록 완만하게 감소하는 경향을 보이며, 침하량은 개량지반 폭의 증가와 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났다. 즉, 개량지반폭의 증감에 의해 사면안전율은 선형적으로 변화하지만 사석제 및 개량지반의 변형은 약간씩 감소하고 있음을 알 수 있다.

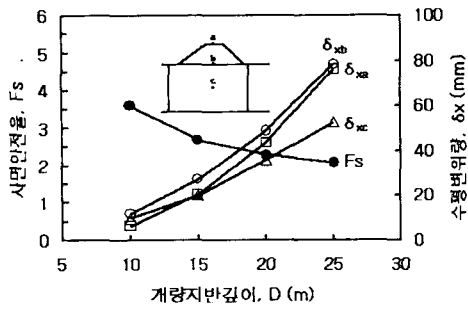


(a) Horizontal displacement

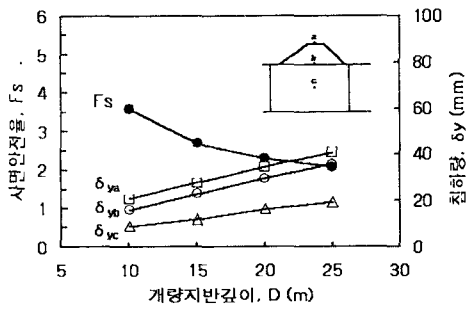


(b) Settlement

Fig. 4 Relationship between safety factor of slope and deformation of rubble mound according to the width of improved ground

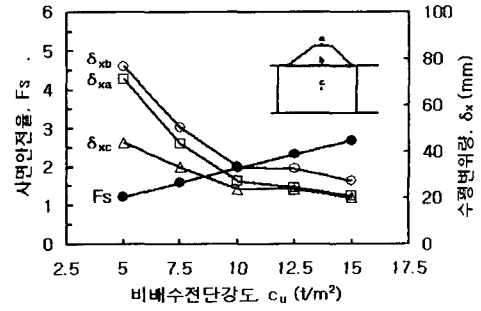


(a) Horizontal displacement

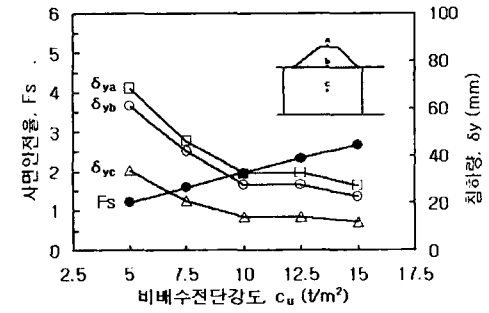


(b) Settlement

Fig. 5 Relationship between safety factor of slope and deformation of rubble mound according to the depth of improved ground



(a) Horizontal displacement



(b) Settlement

Fig. 6 Relationship between safety factor of slope and deformation of rubble mound according to the strength of improved ground

4.2 개량지반 깊이

그림 5는 개량지반 깊이(D)의 증가에 따른 사면안전율과 수평변위량 및 침하량의 변화양상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 개량지반의 깊이가 증가함에 따라 개량지반상 사석제의 사면안전율은 감소하며, 수평변위량 및 침하량은 증가하는 것으로 나타났다. 특히 수평변위량은 개량깊이가 증가함에 따라 급격히 증가하고 있다. 그리고, 개량지반보다 사석제의 수평변위 증가율이 더 크며, 사석제 하단의 수평변위량이 사석제 상단보다 크게 나타났다. 이것은 수평변위가 사석제 하단과 개량지반 상단에서의 접촉면에서 최대수평변위가 발생되기 때문이다. 한편 침하량은 사석제 및 개량지반의 모든 위치에서 일정하게 증가하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 개량지반상 사석제의 수평변위량은 침하량보다 개량깊이에 따라 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4.3 개량지반 강도

개량지반의 강도증가에 따른 개량지반상 사석제의 사면안전율과 수평변위량과 침하량을 그림 6에 나타내었다. 여기서, 강도증가에 따른 영향을 조사하기 위해 개량지반의 비배수전단강도를 5~15t/m²으로 증가시키면서 해석을 실시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 사면안전율은 개량지반의 강도증가에 따라 거의 비례적으로 증가됨을 알 수 있다. 그러나, 사석제와 개량지반의 수평변위량 및 침하량은 개량지반의 강도가 10t/m²이상으로 증가하게 되면 두 변위의 감소가 매우 뚜렷하게 둔화되는 것을 알 수 있다.

5. 개량지반상 사석제의 안정성 평가

개량지반상 사석제의 안정성 평가를 위해서 개량지반상 사석제의 수평변위량과 침하량을 사면안전율과 연계시킨 관계를 검토하고자 한다. 이러한 검토를 통하여 개량지반상 사석제의 안정성 평가기준을 마련할 수 있을 것이다.

그림 7과 그림 8은 각각 사석제의 수평변위량 및 침하량과 사면안전율의 관계를 도시한 것으로 종축에는 사석제의 수평변위량과 침하량을 대수눈금으로 나타내었으며, 횡축은 사면안전율을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 사석제의 사면안전율이 감소함에 따라 수평변위량 및 침하량은 점차적으로 증가되는 경향을 보인다. 특히 사면안전율이 1.3이하가 되면 수평변위량 및 침하량의 증가는 급격히 커지는 것으로 나타났다. 또한, 사면안전율이 1.3이상에서 수평변위량과 침하량은 완만하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 사면의 안정성이 떨어지면 지반의 변형이 증가되는 것을 의미하므로 지반의 변형과 사면안정성은 분리 취급할 수 없다.

그림 7은 사석제 상부에서의 수평변위와 사면안전율의 관계를 나타낸 것으로 사면안전율 1.3에서의 수평변위량은 사석제 상단에서 100mm정도를 보이고 있다. 따라서 사면안전율과 수평변위량의 관계로부터 급격한 변형을 일으키지 않는 사면안전율인 1.3을 개량지반상 사석제의 안정성 평가시 기준사면안전율로 볼 수 있을 것이다. 따라서, 사석제 상단의 수평변위량이 100mm를 초과하게 되면 사면안전율은 1.3보다 작아지게 되고, 수평변위는 더욱 급증하여 사석제가 불안정한 상태로 될 것임을 의미한다.

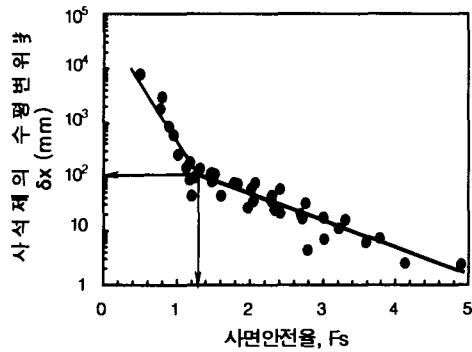


Fig. 7 Relationship between safety factor of slope and horizontal displacement of rubble mound

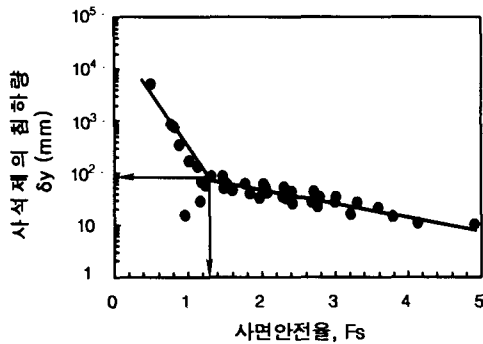


Fig. 8 Relationship between safety factor of slope and settlement of rubble mound

한편, 그림 8은 사석제 상부에서의 침하량과 사면안전율의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 침하량도 사석제 상부의 수평변위량과 마찬가지로 사면안전율 1.3을 개량지반상 사석제의 안정성을 평가하는 기준으로 고려할 수 있을 것이다. 즉, 사석제 상단의 침하량이 70mm를 초과하게 되면 사면안전율은 1.3이하가 되고 침하량이 더욱 급증하므로 사석제는 불안정 상태로 될 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 개량지반상 사석제의 안정성을 평가할 수 있는 기준을 마련하기 위하여 여러 경우에 대한 유한요소해석 및 사면 안정해석을 실시하였다. 이들 해석을 실시하기 위하여 시공사례를 통한 대표단면을 설정하고, 개량지반 폭, 개량지반 깊이, 사석제 높이 그리고, 개량지반의 강도를 변화시킨 총 39개 단면을 선정하였다. 이러한 해석결과를 분석, 고찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개량지반상 사석제의 수평변위는 사석제의 사면안전율과 관련되어 있으므로 개량지반상 사석제의 안정성에 대한 설계기준은 사석제의 수평변위와 사면안전율로 마련될 수 있다.

(2) 개량지반상 사석제의 변형거동 및 사면안전율에 영향을 크게 미치는 요소들로는 개량지반 폭, 개량지반 깊이, 개량지반 강도 등이 있으며, 이 가운데 영향을 크게 미치는 요소로는 개량지반 강도 및 개량지반 깊이를 들 수 있다.

(3) 개량지반상 사석제의 사면안전율이 1.3이하가 되면 지반의 수평변위량 및 침하량은 모두 급격히 증가된다. 이러한 사면안정성의 한계상태에서 사석제 상단부의 한계수평변위량과 한계침하량은 각각 100mm, 70mm정도가 발생됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- CDM研究會編(1986). CDM工法と施工マニュアル, CDM研究會.
- Broms, B. B. and Boman, P. (1977). "Lime columns-A new type of vertical drains", Proc. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1, pp 427~432.
- Hong, W. P., Yun, J. M. and Kim, D. Y.(1996). "Soil improvement of surface layer in dredge and reclaimed soft ground", Proc. 3rd International Symposium on Environmental Geotechnology, Vol 1, pp 343~352.
- Kawasaki, T. and Saitoh, S. (1984). "Deep mixing method using cement slurry as hardening agent", Seminar on soil improvement and construction techniques in soft ground, pp 17~38.
- Kawasaki, T., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Honjyo, Y. (1981). "Deep mixing method using cement hardening agent", Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 3, pp 721~724.
- Terashi, M and Tanaka, H. (1981). "Ground improved by deep mixing method", Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 3, pp 777~780.
- Terashi, M. et al. (1980). Fundamental properties of lime and cement treated soils (2nd report), Report of the Port & Harbour Res. Inst., Vol 19, No 1, pp 33~62.
- Terashi, M., Tanaka, H. and Okumura, T. (1979). "Engineering properties of lime-treated marine soils and DM method", Proc. 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1, pp 191~194.
- Toth, P. S.(1993). "In situ soil mixing", Ground Improvement, edited by Moseley, M. P. Blackie, Academic & Professional, pp 193~204.