

방조제 축조에 따른 지반의 변형에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Ground Deformation Caused by Sea-Dike Construction

김 성 필** · 장 병 옥* · 우 철 응**
Kim, Seung Pil · Chang, Pyoung Wuck · Woo, Chull Woong

Abstract

When a sea-dike is constructed on soft soils, it is much difficult to calculate ground deformation caused by forced displacements. In this study, a series of laboratory model tests have been performed to investigate the ground deformation under a constructed sea-dike on soft soils. Construction sequence of sea-dike embankment was assumed such as constructed by quarry first and followed by soils adjacent to quarry embankment.

As test data and displacement in subsoils have been analyzed, it seems that deformation is caused by general shear failure. The shape of ground deformation caused by forced displacements was well defined by parabola. Upon comparing profiles and depth of forced displacement from the model test to those based on stress-bearing capacity method commonly used, it has been found that deformation prediction using stress-bearing capacity method was not exact at the edge of loading

I. 서 론

우리 나라의 서남해안에서 주로 시행되는 간척 공사에서 방조제를 축조하는 경우에, 일반적으로 강제치환에 관한 설계는 지반의 초기유효응력과 사석제 등의 추가하중에 의해 지반 내에 추가로 발생하는 응력의 합이 지반의 극한지지력과 같아 지는 지점까지 치환되는 것으로 하여 추정하고 있다.²⁾³⁾ 그러나 강제치환에 대한 이론정립이 아직 이루어지지 않고 있을 뿐만 아니라 강제치환에 의한 지반의 변형은 탄성론적인 해법으로 그 추정이

불가능하며 또한 그 변형이 매우 크기 때문에 미소변형을 전제로 하는 유효요소해석도 불가능하다.⁵⁾

몇몇의 강제치환에 관한 연구 또한 지반의 변형형태에 대한 가정을 도입하여 최대치환심도를 추정하는 연구에 국한되어있다. 강제치환에 의한 변형의 형태와 치환심도에 대한 국내의 연구동향은 매우 미진한 형편이다. 방조제 축조시의 투입 물량을 산정하기 위해서는 최대치환심도 뿐만 아니라 강제치환에 의한 치환단면의 형태와 용기의 형태 등 단면의 형태에 대한 연구가 필요하다.¹⁾

*서울대학교 농업생명과학대학

**서울대학교 대학원

키워드 : 방조제, 사석제, 성토제, 강제치환심도

이 연구에서는 방조제 축조시 지반거동에 대한 모형시험을 실시하고 지반의 강도 및 재하조건에 따른 치환심도 및 치환단면의 변화를 고찰하였고, 또한 사석제를 축조하고 이후에 성토제를 축조하는 일반적인 방조제 축조방식을 따랐을 경우 지반의 변형형태에 대하여 고찰하였다. 그리고 현재 강제치환심도의 추정에 일반적으로 사용되고 있는 응력-지지력 이론에 의한 방법을 적용하여 모형시험에서의 재하단면에 대한 강제치환의 형태를 추정하고 시험결과와 비교하여 응력-지지력 이론에 의한 강제치환형태의 추정에 대한 적정성을 고찰하였다

II. 재료 및 시험방법

1. 재 료

시험에 사용할 시료는 강제치환에 의한 지반의 비배수거동을 표현할 수 있는 점토질 흙이어야 하므로 본 연구에서는 전라남도 장흥군 삼산간척지에서 채취한 교란시료를 재성형하여 사용하였다. 채취한 교란시료는 200번 체 통과율이 98% 이상으로 대부분이 점토 및 실트질로 구성되어 있으며, 물리적 특성은 다음의 Table 1과 같다.

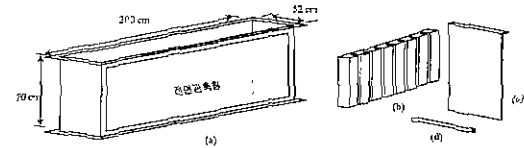
Table 1. Physical properties of soil used

Specific Gravity (G_s)	Natural water content (w_n %)	Liquid Limit (w_l %)	Plasticity Index (PI)	USCS
2.69	38.0	30.0	9.6	CL

2 시험방법

방조제 축조에 의한 지반의 변형형태를 평면 변형을 상태로 시험하기 위하여 모형토조를 제작하였으며, 그 개략도는 Fig. 1과 같다.

(a)는 전면에 특수강화아크릴을 이용하여 관측창을 붙인 모형토조이며, (b)는 토조상부에 설치하며, 5cm간격으로 홈을 파서 칸막이 (c)를 설치



(a) Soil tank (b) Guide block (c) Sector (d) Loading bar (Dia = 1cm, Len = 52cm)

Fig. 1. Schematic view of test device

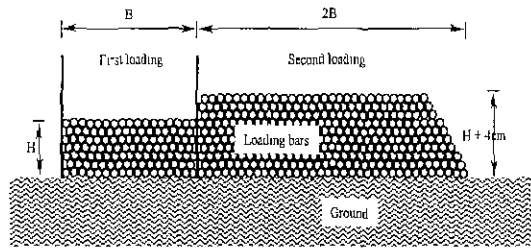


Fig. 2. Shape of loading and loading order

할 수 있도록 하였고, 칸막이 내부에 재하봉(d)를 이용하여 재하하였다.

지반의 강제치환에 영향을 미치는 변수는 크게 외부조건을 나타내는 변수와 지반조건을 나타내는 변수로 나눌 수 있을 것이다. 이 시험에서는 외부조건으로 제체의 재하조건과 지반조건으로 지반의 비배수강도를 선정하였고, 재하폭 10cm와 15cm에 대하여 각각 재고 5cm, 7.5cm, 10cm를 적용하고 비배수강도(Undrained shear strength, C_u)는 시험완료후 Vane test를 실시하여 측정된 결과 0.030kgf/cm^2 , 0.045kgf/cm^2 , 0.058kgf/cm^2 로 나타났다.

재하방법은 Fig. 2에서의 같은 형태와 규격으로 강봉을 이용하여 재하하여 자연적인 치환단면을 형성하도록 하였다.

모형시험은 Fig. 2의 좌측에 사석제 부분에 대한 재하시험이 완료된 후에 우측에 성토제 부분에 대한 재하시험을 사석제에 연결하여 실시하였다.

Ⅲ. 시험결과 및 고찰

1. 지반강도와 재하조건에 따른 지반의 변형

지반 강도 $C_u=0.030\text{kgf/cm}^2$, 0.045kgf/cm^2 , 0.058kgf/cm^2 에서의 제고와 제폭에 따른 최대치환심도의 변화를 나타내면 Fig. 3과 같다.

각 지반강도 조건에서 가장 큰 하중조건인 제고 10cm, 제폭 15cm에서 최대치환심도가 발생하였고 제고의 증가에 따라서 최대치환심도는 커지고 있다. 또한 제고의 증가에 따른 최대치환심도의 증가 경향과 용기량의 증가 경향이 비슷하게 발생하였으며 이는 체적변화가 없이 발생하는 지반의 비배수거동을 반영하고 있는 것으로 판단된다.

2. 사석제 축조에 따른 지반의 변형

2.1 강제치환의 형태

본 시험에서는 사석제 축조에 따른 강제치환의 형태를 정형화하기 위하여 포물선의 형태를 적용하였다.

시험결과에서 a 를 지반강도의 변화가 없는 x 좌표, 즉 치환심도와 용기량이 0인 지점으로 하고, b 를 최대치환심도의 y 좌표로 하면, 포물선의 식은 $y=(b/a^2)x^2-b$ 와 같이 나타낼 수 있다. $C_u=0.030\text{kgf/cm}^2$, 제폭 10cm에 대하여 포물선의 형태를 적용하여 보면 Fig. 4와 같다.

포물선의 형태를 시험결과와 비교한 결과 제체의 중앙부와 외측에서 모두 측정치와 거의 일치하

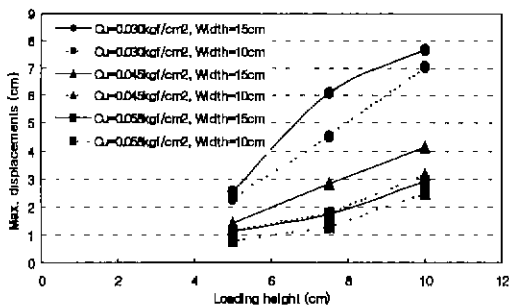


Fig. 3. Max. displacements vs. loading heights

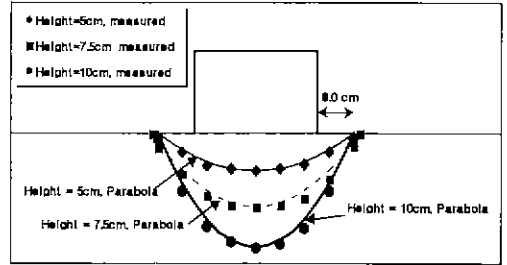


Fig. 4. The shape of forced displacements, Parabola ($C_u=0.030\text{ kgf/cm}^2$, width=10cm)

는 치환심도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 다른 조건의 시험에서도 동일한 결과가 나타났다. 또한 일반적인 가정과는 달리 제체의 양끝에서의 치환심도는 0이 아니며 재하조건에 따라서 약간의 차이는 있으나 제체의 외부에서 치환심도가 0인 지점이 나타났다.

2.2 지반내부의 변형

사석제의 축조에 의한 지반내부의 변형을 측정하기 위하여 관측창의 내부에 가로 10cm, 세로 5cm 간격의 격자에 맞추어 스티로폼을 삽입하고 각 위치에서의 변형을 측정하였다. Fig. 5, 6은 각각 $C_u=0.030\text{kgf/cm}^2$, 제폭 10cm, 제고 10cm인 경우와, $C_u=0.030\text{kgf/cm}^2$, 제폭 15cm, 제고 10cm인 경우에 있어서의 지반내부의 변위벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 지반의 용기는 지반내부의 변형에 의한 것임을 알 수 있다.

시험의 결과에서 나타난 지반내부의 변형은 기

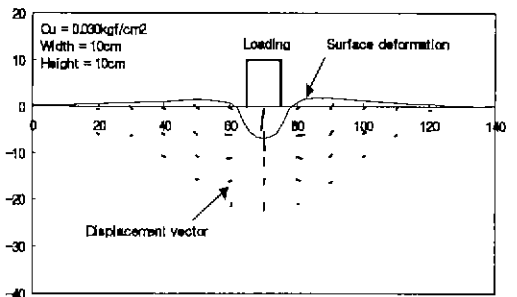


Fig. 5. Displacement vector in subsoils ($C_u=0.030\text{kgf/cm}^2$, width=10cm, height=10cm)

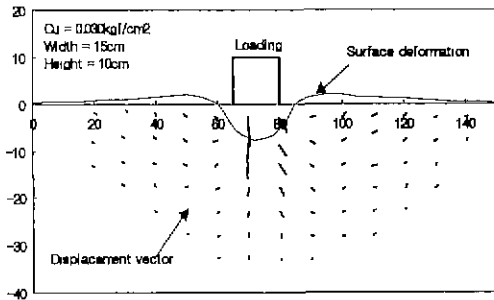


Fig. 6. Displacement vector in subsoils ($C_u=0.030\text{kgf/cm}^2$, width=15cm, height=10cm)

초의 전단전단파괴에 의한 변형과 같은 형태로 나타났다.

3. 사석제 축조 후 성토제 축조 시의 지반의 변형형태

사석제 축조 후에 성토제를 축조하는 일반적인 방조제 축조방식에 따른 지반의 변형을 고찰하기 위하여 사석제부분에 대한 재하시험이 완료된 후에 사석제부분에 연결하여 성토제부분에 대한 재하를 실시한 결과 강제치환의 형태는 Fig. 7과 같이 나타났다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 사석제부분 재하에 의해 형성된 치환단면이 성토제부분 재하에 의해서 침하하여 새로운 단면을 형성하였다. 이러한 성토제부분의 재하에 의한 사석제부분의 침하는 성토제에 인접한 부분에서 더 크게 나타났다. 또한 일

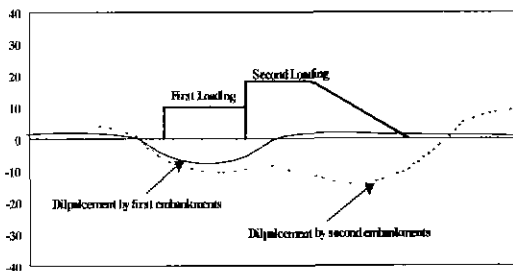


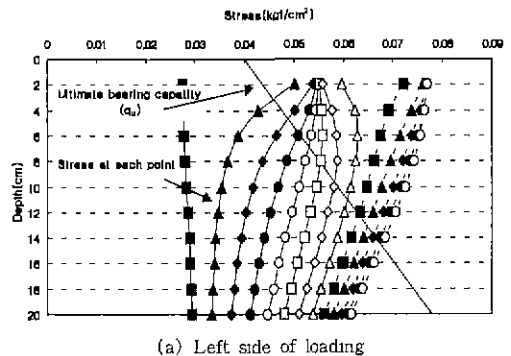
Fig. 7. Change of forced displacements profile caused by step loading

반적으로 가정하는 것과는 달리 사석제부분을 먼저 재하하고 성토제부분을 재하하는 경우의 치환단면은 사석제부분과 성토제부분의 경계부분에서 불연속적으로 움푹한 형태로 치환단면이 형성되었다.

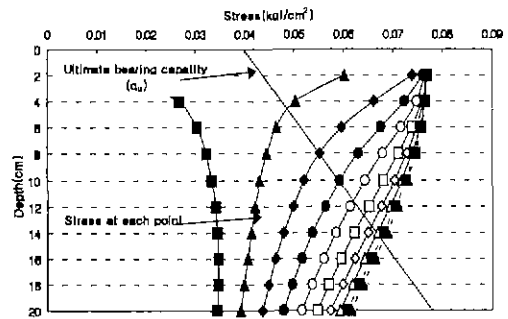
4. 응력-지지력 이론에 의한 강제치환형태의 추정

현재 강제치환심도의 추정에 일반적으로 사용되고 있는 응력-지지력 이론에 의한 방법을 적용하여 모형시험에서의 재하단면에 대한 강제치환의 형태를 추정하고 이를 시험의 결과와 비교하여 응력-지지력 이론에 의한 강제치환형태의 추정에 대한 적정성을 고찰하였다.

모형시험에서 방조제 단면 재하에 의해 지반 내에 발생하는 응력은 Boussinesq의 식을 이용하여 선하중에 의한 지반내의 응력을 증첩하여 구하였



(a) Left side of loading



(b) Right side of loading

Fig. 8. Stress-Ultimate bearing capacity at model tests

고, 지반의 극한지지력은 Terzaghi의 극한지지력 공식을 이용하였다.

모형시험에서 사석제부분의 재하폭이 15cm, 성토제부분의 재하폭이 30cm, 그리고 사석제부분의 제고가 10cm인 경우에 대하여 응력-지지력 이론에 의한 치환단면을 구하였다. 실제의 경우 사석제부분을 재하하고 성토제부분을 재하하였으나, 지반내의 응력은 사석제와 성토제부분이 동시에 재하되는 것으로 하여 구하였으며 순간적으로 재하되는 것으로 하였다.

Fig. 8은 위의 식을 이용하여 구한 모형시험에서의 지반의 극한지지력과 지중응력을 나타낸다. 재하단면 2cm간격에 대하여 지반내의 응력과 극한 지지력을 나타내었다. Fig. 8(a)는 재하단면 전체의 중앙을 기준으로 사석제 부분에 대한 그림이며 Fig. 8(b)는 성토제부분에 대한 그림이다. Fig. 8(a)는 좌측의 곡선이 재하단면 좌측의 지반응력이며 우측의 곡선이 재하단면 중앙부의 지반응력이다. Fig. 8(b)는 반대로 좌측의 곡선이 재하단면 우측의 지반응력이며 우측의 곡선이 재하단면 중앙부의 지반응력이다. 그림에서 극한지지력을 나타내는 직선과 만나는 지점까지 강제치환이 발생하게 된다.

각 지점에서의 치환심도를 나타내고 이를 시험의 결과와 비교하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 $C_u=0.030\text{kgf/cm}^2$, 사석제부분의 재하폭 15cm, 제고 10cm인 경우의 모형시험의 결과와 응력-지지력 이론에 의해 구한 치환단면을 나타낸다.

시험결과와는 달리 계산에 의한 치환단면은 사석제부분과 성토제부분의 연결부에서 불연속 부분이 명확하게 나타나지는 않았다. 또한 재하단면의 양 끝부분에서 시험결과에 비하여 상대적으로 작은 치환심도를 나타내고 있다. 사석제부분의 경우는 계산에 의한 값이 상대적으로 작게 나타났으며, 이는 실제의 재하방법에서의 차이에 의한 것으로 보인다. 즉, 실제 모형시험에서 사석제부분의 경우는 강제치환이 발생한 후에 성토제부분에 의해 보다 더 침하하기 때문으로 판단된다.

응력-지지력 이론에 의해 강제치환단면을 추정

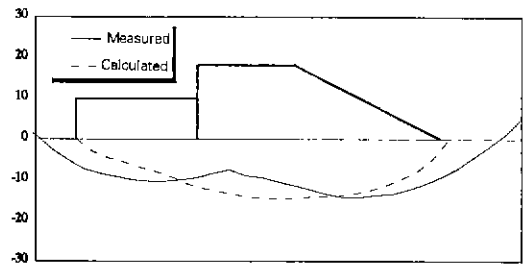


Fig. 9. Comparison between measured and calculated displacement ($C_u=0.030\text{kgf/cm}^2$, width=15cm, height=10cm)

한 결과, 전반적인 치환의 형태를 추정하는 것에 적절한 것으로 보이나 재하단면의 양 끝에서는 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 강제치환이 지반에 발생하는 연직응력 뿐만 아니라 수평응력의 증가 등에 의해 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 최대치환심도를 추정하기 위하여 현재 사용되고 있는 응력-지지력 이론에 의해서 강제치환단면을 추정하기 위해서는 이러한 부분에 대한 보정이 필요한 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 방조제 축조에 따른 지반의 변형에 관한 모형시험을 실시하였다. 모형시험을 통하여 지반의 강도 및 재하조건에 따른 강제치환심도의 변화를 고찰하였으며, 지반내부의 변형을 측정하여, 사석제 축조 후에 성토제를 축조하는 일반적인 방조제 시공방식에 의한 지반의 변형을 고찰한 모형시험의 결과는 다음과 같다

1. 사석제부분에 대한 재하시험결과 최대치환심도는 지반의 강도가 커짐에 따라서 작아지며, 재하하고와 재하폭이 커질수록 커졌으며 강도에 따른 치환심도의 변화경향과 용기량의 변화경향이 동일하게 나타났다.

2. 사석제부분에 대한 재하시험에 의한 강제치환의 형태를 정형화하기 위하여 포물선의 형태를 적용한 결과 강제치환의 형태에 적합한 것으로 나타났다 또한 모든 경우에 있어서 제체의 양끝에

서의 치환심도가 0이 아닌 것으로 나타났다.

3. 지반내부의 변위벡터에 의한 지반 내부의 변형에 의하면 강제치환에 의한 지반 내부의 변형은 기초의 전반전단파괴에 의한 변형형태와 같은 것으로 나타났다

4. 사석제부분 재하 후 성토제부분을 재하한 경우에 사석제부분에 의해 형성된 치환단면이 성토제부분 재하에 의해서 침하하여 새로운 치환단면을 형성하였으며, 사석제부분과 성토제부분의 연결부에서 불연속적으로 움푹한 형태로 치환단면이 형성되었다.

5. 현재 최대치환심도의 추정에 일반적으로 사용되고 있는 응력-지지력 이론에 의한 방법을 적용하여 모형시험에서의 재하단면에 대한 강제치환의 형태를 추정할 결과, 응력-지지력 이론에 의하여 강제치환단면을 추정하기 위해서는 재하단면의 끝부분에 대한 보정이 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김성필, 1999, 방조제 축조에 따른 지반의 변형 형태에 관한 실험연구, 서울대학교 석사학위논문.

2. 농어촌진흥공사, 1991, 방조제 시공시 침하 및 유실에 관한 연구(II).

3. 농어촌진흥공사, 1991, 토공구조물에 의한 연약 점토 지반의 변형해석에 관한 연구(II).

4. 농업진흥공사, 1984, 방조제 기술개발연구, 육군사관학교 화랑대연구소편.

5. 오재화, 이문수, 1998, 점성토지반에 축조한 제방의 변형추정, 한국농공학회지 Vol. 40, No. 4, pp. 94~102.

6. 이원택, 1985, 점토지반 매립시 치환깊이에 관한 실험연구, 서울대학교 석사학위논문.

7. Yamanouchi, Gotoh, 1979, A proposed practical formula of bearing capacity for earth-work method on soft clay ground using a resinous mesh, Technology Report of Tyushu University, Vol. 52, No. 3, pp. 201~207.

8. Yasuhara, Tsukamoto, 1982, A rapid banking method using the resinous mesh on a soft reclaimed land, 2nd International Conference on Geotextiles, pp. 635~640.