

세립분 함유량에 따른 준설토의 침강 및 자중압밀특성

The Characteristics of Sedimentation and Self-Weight Consolidation for Dredged Soil Depending on Fines Content

이 범 준¹ Lee, Bum-Jun

이 무 철² Lee, Moo-Cheol

이 송³ Lee, Song

Abstract

In order to analyze the effect of fines content on sedimentation and self-weight consolidation characteristics of dredged soil, a series of self-weight consolidation tests with different fines content were conducted. From the experimental test results on dredged soils, it was found that the coefficient of sedimentation and consolidation is correlated with water content. And it is related to fines content as well. So, in this study, correlation between fines content and the coefficient of sedimentation and consolidation has been proposed. And it is expected that the coefficient of sedimentation and consolidation can be estimated by the percentage of fines content.

요 지

준설토의 침강 및 자중압밀 특성에 대한 세립분 함유량의 영향에 대해 분석하기 위하여 세립분 함유량을 각각 달리한 실내 자중압밀 시험을 수행하였다. 준설토에 대한 실내시험 결과에서 실내자중압밀 시험으로부터 얻어진 침강압밀계수(Cs)는 함수비와 관계가 있다는 것을 알게 되었다. 또한 침강압밀계수가 세립분 함유량에 의존적이라는 사실 역시 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는, 수행한 실내 자중압밀 시험결과를 바탕으로 세립분 함유량과 침강압밀계수와의 관계를 제안 하였으며 이를 이용하여 차후에 세립분 함유량을 이용하여 침강압밀계수를 추정할 수 있을 것으로 기대한다.

Keywords : Coefficient of sedimentation and consolidation, Fines content, Sedimentation, Self-weight consolidation

1. 서 론

산업의 발달 및 인구의 증가와 함께 한정된 국토의 효율적인 활용과 부족한 용지의 확충을 위한 해안 준설·매립이 활발히 진행되고 있다. 또한 국내 지역적 특성상, 화물의 중간 집하지로서의 이점을 활용하고자 항만건설 사업이 활발하게 진행되어 이에 따른 준설 및 매립공사가 많이 이루어지고 있다.

이러한 매립에 가장 이상적인 재료는 투수성이 좋고 압축성이 작은 쇄석이나 산토, 해성모래 등이 되겠으나 재료의 구입이 점점 더 어려워지고 그 가격 또한 상승하고 있으며, 최근에는 자연경관 훼손, 생태계 파괴 등의 환경적인 문제가 대두됨에 따라 물량확보가 용이한 준설점토가 매립재로 주로 사용되고 있다.

준설토를 이용한 매립에 있어서 가장 중요한 것은 준설토의 침강 및 압밀 특성을 파악하는 것이다. 압밀이

1 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (Member, PhD Candidate, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul)

2 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (Member, PhD Candidate, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul)

3 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul, scugeo@uos.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

얼마나 빨리 종료되는가를 나타내는 침강압밀계수를 실내자중압밀 시험을 통해 산정하여 실제 준설패립시 자중압밀의 종료시점을 추정할 수 있는 것이다. 침강압밀계수는 시간경과에 따른 계면고의 변화를 통하여 준설패립지반의 침하량과 체적비를 예측할 수 있는 전체 투기 해석방법을 통하여 산정할 수 있다(Yano, 1985).

이러한 준설토의 특성을 파악하기 위해서는 각 준설토에 대한 실내시험이 선행되어야 하나 각 시료에 대해 매번 시험을 실시하는 것은 시간과 비용의 측면에서 비합리적인 이유가 된다.

따라서 본 연구에서는 토출구로부터 거리별 입도분포를 고려하기 위하여 준설토의 세립분 혼합비율을 각각 달리하여 실내 침강 및 자중압밀시험을 실시하였고 압밀 종료 후 준설토적도의 퇴적특성과 그 변화양상을 관찰하였다. 시험결과로부터 세립분 함유량과 침강압밀계수와 의 관계를 유추해 보았으며, 이를 이용하여 차후의 다른 준설패립 현장에 대한 실내 침강 및 자중압밀시험시 원지반의 세립분 함유량만을 측정하여 준설토의 침강압밀 계수 예측을 가능하게 하는데 연구의 목적이 있다.

2. 시험방법 및 시험시료

2.1 시료 특성

시험시료는 통일분류법상 CL 계열의 준설퇴토와 SP

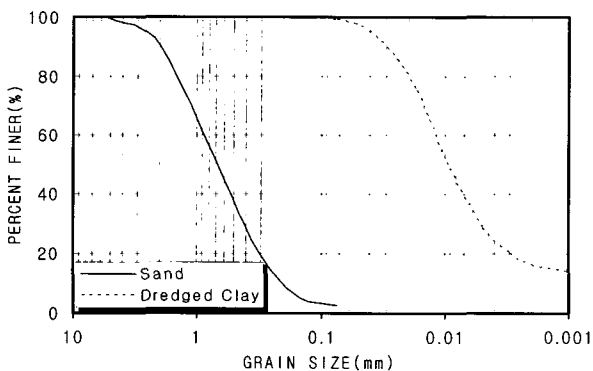


그림 1. 시험에 이용된 준설퇴토와 모래의 입도분포

표 1. 시료의 물성치

구분	Gs	LL / PI	Cu / Cc	D ₅₀	#200체 통과율	USCS
준설퇴토	2.72	39.5 / 16.8	- / -	-	99.2%	CL
모래	2.65	-	4.19 / 0.95	0.67mm	2.7%	SP

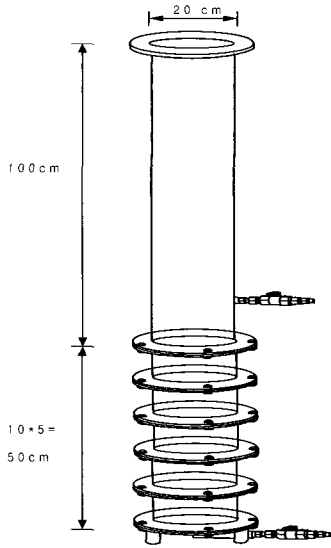
계열의 사질토를 혼합하여 함수비 600%, 1000%에 맞는 시료를 염분을 고려하여 제조하였다. 모래와 실트를 포함한 점토의 구분을 AASHTO와 통일분류법에서 규정한 0.074mm로 구분 했으며, 시험에 사용된 모래는 #200체를 이용하여 잔류한 시료만을 이용하였다. 염분비는 0.020~0.030의 범위를 갖는 서해안 지역의 일반적인 염분비의 평균치인 0.025로 고려하였으며, 시험함수비는 600%와 1000%로 하여 실시하였다. 시험시료에 대한 물성시험결과와 입도분포를 각각 표 1과 그림 1에 나타내었다. 이 두 가지 시료를 원하는 세립분 함유량으로 맞추기 위해 중량배합을 실시하여 시험시료를 만들었다.

2.2 시험 기구 및 방법

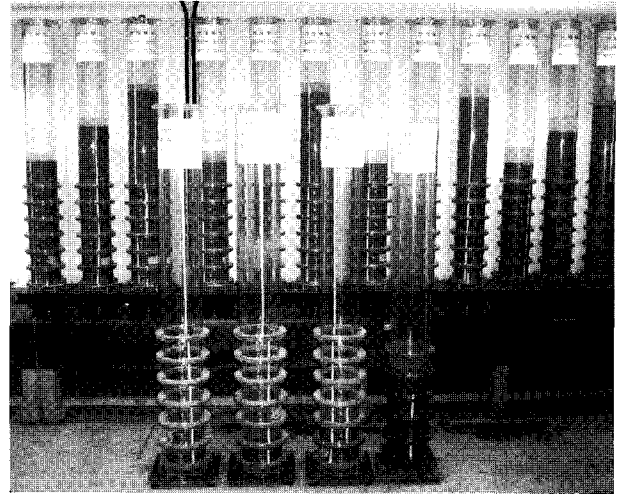
준설토의 침강 및 자중압밀 특성을 파악하기 위하여 그림 2와 같은 투명한 아크릴로 이루어진 직경 20cm, 높이 150cm로 10cm 단위로 분리가 가능한 Column을 제작하였다. 하부에서는 시료를 시험 직전에 교반할 수 있도록 압축펌프를 연결할 수 있도록 제작하였다. 시험은 Yano가 제안한 전체투기에 의한 자중압밀시험법을 이용하였으며 절차는 다음과 같다.

준설토를 균질하게 교반 후 건조시켜 함수비를 측정한다. 측정된 함수비는 해수를 이용하였기 때문에 염분비를 고려하여 함수비 보정을 실시한 후 시험함수비로 시료를 제조하였다. 시험함수비로 조정된 후, 투기시료의 균질성을 확보하기 위하여 교반을 실시하고 제조된 시험 함수비의 신뢰성 및 초기 간극비를 판단하기 위하여 제조된 시료의 함수비를 다시 한번 측정한다.

시험시료 제작이 완료되면 제작된 시료를 각 전체 투기 높이별로 투기한 후 시험을 실시하기 전에 초기 간극비가 전체높이에 대해 일정하도록 Column 하부의 밸브와 압축펌프를 연결하여 압축공기를 주입해 시료 교반을 실시한다. 충분한 교반을 실시한 후 압축공기의 주입을 멈추고 동시에 침강 및 자중압밀시험을 실시한다. 투기된 시료의 침강 및 자중압밀 특성을 관찰하기 위하여 초기 2일 동안은 계면고를 세밀하게 측정하고 그 이후로는 1일 주기로



(a) Schematic



(b) Photograph

그림 2. 시험장치

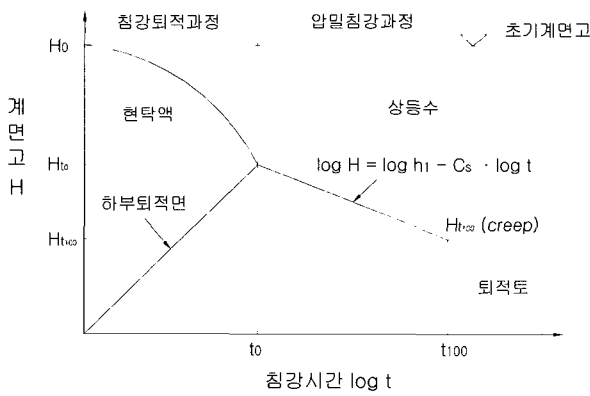


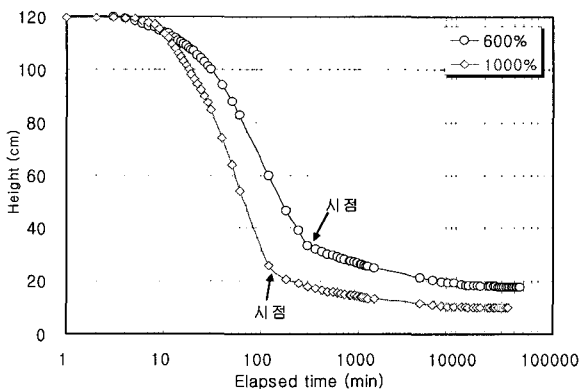
그림 3. 침강자중압밀 곡선

계면고를 측정한다. 그림 3에서처럼 계면고가 시간축에 평행하게 Creep 거동을 하는 것을 확인한 후 시험을 종료하여 각 층별 함수비 및 단위중량을 측정한다.

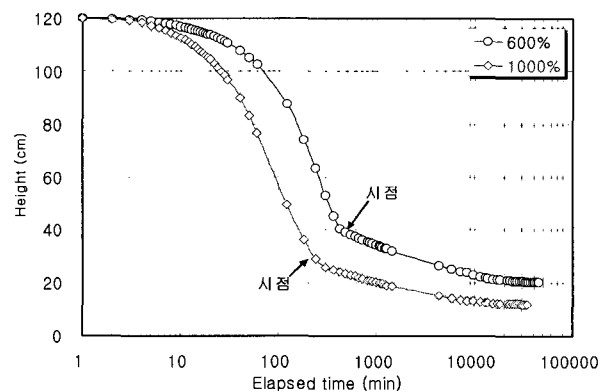
3. 시험 결과

3.1 함수비에 따른 침강압밀곡선

세립분 함유량과 함수비를 달리하여 제조된 총 40가지의 준설토를 전체투기 방법으로 투기한 후 침강자중압밀 곡선을 도시하였다. 유효응력의 존재 유무가 자중압밀의 시·종점을 구분하는 가장 정확한 방법이기기는 하지만 실제로 이것을 측정하기는 매우 어렵기 때문에 침강곡선에서 속도의 변화를 보고 간접적으로 구하게 된다. 곡선에서 침강이 종료되어 자중압밀이 시작되고 끝나는 두개의 변곡점을 각각 자중압밀 시점과 종점으로 구분하고, 선형적으로 계면고가 감소되는 자중압밀부분의 기울기인 침강압밀계수(C_s)를 산정하였다³⁾(Yano).



(a) 세립분 함유량 20%



(b) 세립분 함유량 30%

그림 4. 침강자중압밀 곡선

그림 4는 대표적으로 세립분 함유량 20%와 30% 일 때의 실험함수비에 따른 침강 및 자중압밀곡선을 나타낸 것이다.

시험결과로부터 Yano의 방법에 의해 자중압밀 시·중점을 추정한 결과, 기존의 연구결과들과 동일하게 동일한 초기 높이에서 함수비가 높을수록 자중압밀의 시·중점이 빨리 나타나는 경향을 보여주었다. 이는 시험한 모든 case에서 동일하게 나타났으며 함수비가 높을수록 자중압밀은 더 빨리 진행됨을 의미한다.

3.2 세립분 함유량에 따른 침강압밀계수

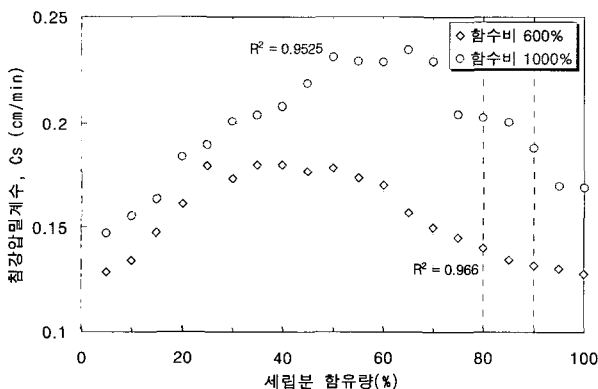
시험함수비 600%와 1000%에 대해 산정한 침강압밀계수를 세립분 함유량에 따라 비교해본 결과, 세립분 함유량과 침강압밀계수의 관계를 음(-)의 기울기의 3차 곡선식으로 유도할 수 있었다. 세립분 함유량 50%~60%에서 최대 침강압밀계수가 산정되었으며, 이는 세립분 함유량이 5% 내지는 10% 정도밖에 포함되어 있지 않은 경우에는 준설토 대부분이 조립분이기 때문에 상대적으로 무거운 조립분은 투기 초기에 침강이 종료되고 그 후에 적은양의 세립분만이 천천히 압밀진행되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 세립분이 워낙 적기 때문에 세립분 자체자중의 영향도 작아 압밀침강이 더딘 것으로 추정된다. 즉, 세립분 함유량이 5% 정도로 아주 낮은 경우는 준설토의 거동 자체가 조립토의 거동으로 봐도 무관하며, 자중압밀에 의한 침하량 자체가 워낙 작아 높은 세립분을 포함한 준설토의 자중압밀 후의 Creep 침하량 정도로 해석해도 무관할 것으로 판단된다.

시험값을 이용하여 그림 5의 (b)와 같은 회귀곡선을 그렸으며, 세립분 함유량과 침강압밀계수와의 관계를

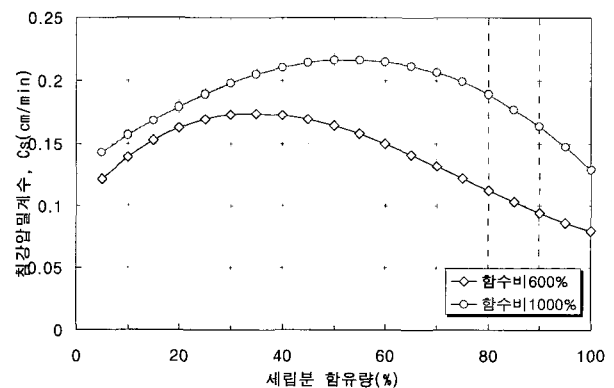
다음과 같은 상관식으로 유도할 수 있었다. 함수비 600%에서는 $y = 4E-07x^3 - 9E-05x^2 + 0.0048x + 0.0996$, 함수비 1000%에서는 $y = -1E-07x^3 - 2E-05x^2 + 0.003x + 0.1285$ 로 유도되었으며, 상관식에서 y와 x는 각각 침강압밀계수와 세립분 함유량을 나타낸다. 분산정도를 나타내는 결정계수 R^2 이 함수비 600%일 때 0.9525, 1000%일 때 0.966 값을 나타내어 본 상관식이 유용함을 알 수 있다.

3.3 세립분 함유량에 따른 침강속도

실제 준설매립시 투기된 준설토의 침강속도가 수위의 증가속도보다 커야만 준설 슬러리가 침강되지 못한 상태에서 여수토로 월류되지 않고 침강이 발생할 수 있다. 침강속도는 침강압밀곡선에서 투기시점부터 침강종료시점까지의 시간에 따른 계면고 변화를 통해 산정할 수 있다. 즉, 침강압밀 곡선의 침강부분 기울기가 바로 침강속도가 된다. 시험을 통하여 세립분 함유량의 증가에 따라 침강속도가 감소됨을 알 수 있었다. 세립분 함유량 5%~40%에서는 세립분 함유량의 증가에 따라 침강속도가 확연하게 감소됨을 보였으나 세립분 함유량 40%이상에서는 세립분 함유량 증가에 따른 침강속도의 감소폭이 크지는 않았다. 다음 그림 6은 침강압밀 곡선의 침강부분의 기울기를 나타낸 것이고, 이 기울기가 침강속도를 의미한다. 동일한 세립분 함유량에 대하여 함수비에 따른 침강속도를 나타낸 것으로서, 그림에서 보면 600%에서의 침강속도 0.1421cm/min 보다 1000%에서의 침강속도 0.2158cm/min가 더 빠름을 알 수 있다. 즉, 고 함수비일수록 침강속도가 빠른 것이다. 또한, 그림 7은 세립분 함유량에 따른 침강속도의 변화를 나타



(a) 시험값(Test data)



(b) 회귀곡선(Regression curve)

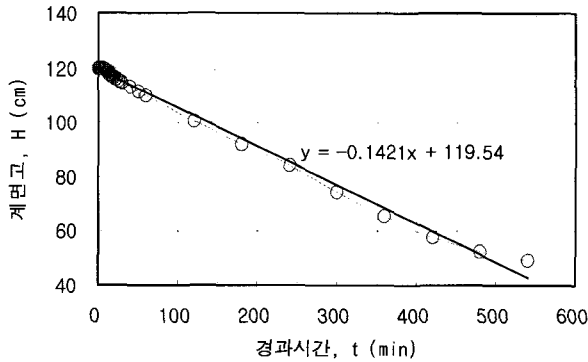
그림 5. 세립분 함유량에 따른 침강압밀계수

낸 것이다. 세립분 함유량이 적을수록, 고함수비일수록 침강속도가 빠름을 알 수 있다.

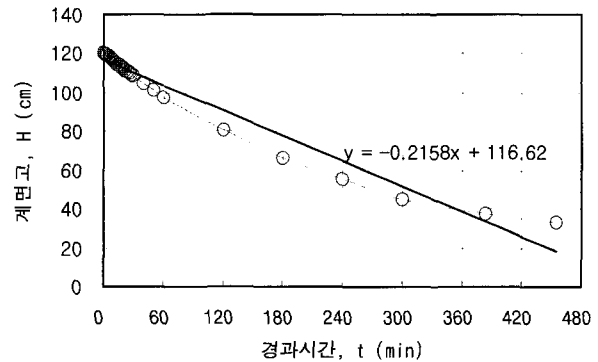
시험 결과값을 상관식으로 표현한 결과, 분산정도를 나타내는 결정계수 R^2 이 함수비 600%인 경우 0.9675, 1000%인 경우는 0.9253의 높은 신뢰도를 지니고 있는 것으로 나타났다.

3.4 세립분 함유량에 따른 자중압밀특성

침강 및 자중압밀 시험의 결과를 토대로 산정된 자중 압밀시·종점 시의 계면고와 자중압밀 완료 이후 계면고가 Creep 거동을 시작하여 일정하게 유지될 때의 높이를 비교하였다.

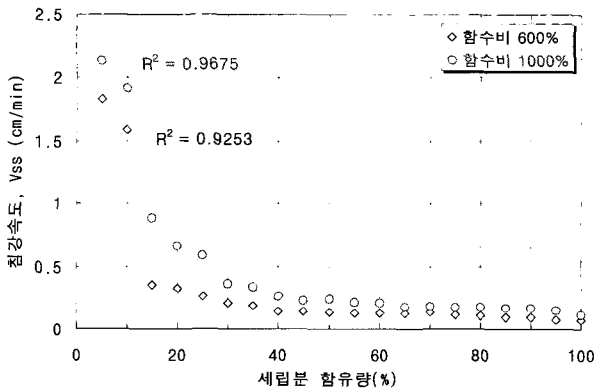


(a) 세립분 함유량 40%, 초기함수비 600%

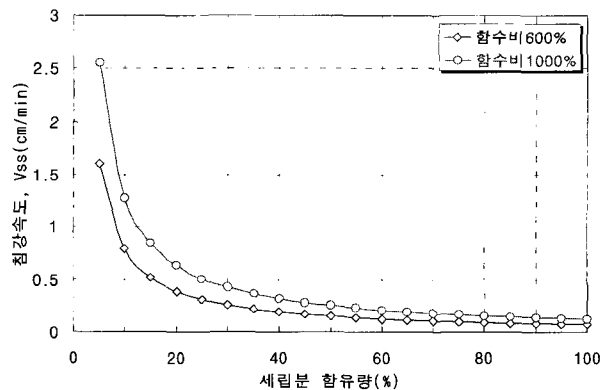


(b) 세립분 함유량 40%, 초기함수비 1000%

그림 6. 함수비에 따른 침강속도의 산정

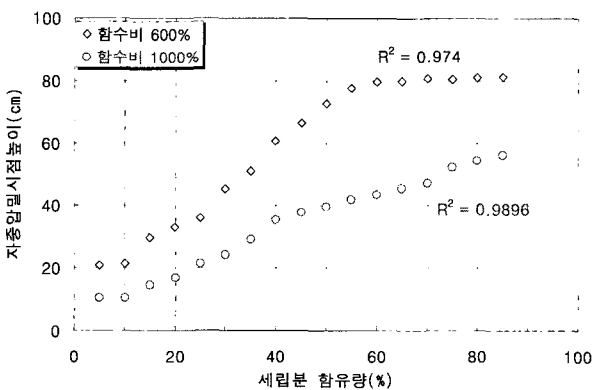


(a) 시험값(Test data)

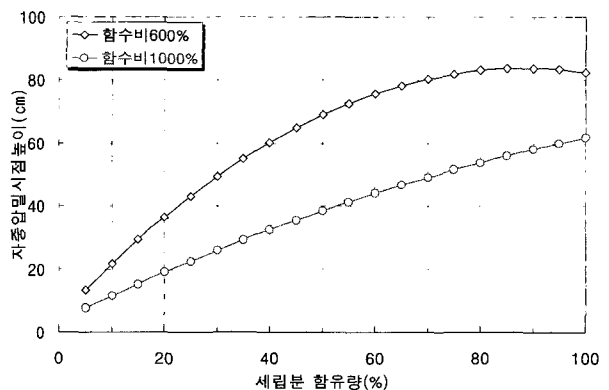


(b) 회귀곡선(Regression curve)

그림 7. 세립분 함유량에 따른 침강속도

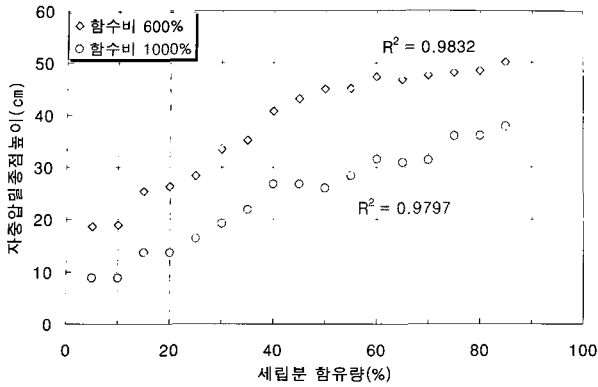


(a) 시험값(Test data)

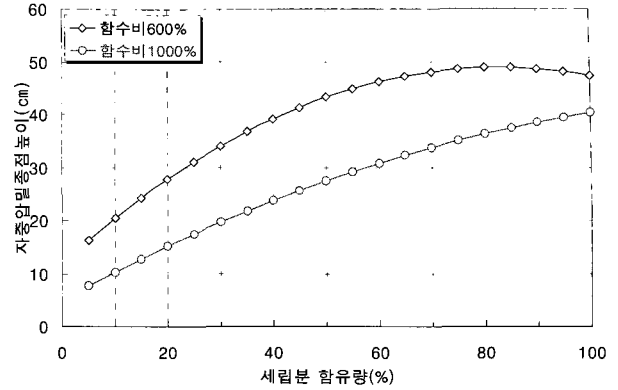


(b) 회귀곡선(Regression curve)

그림 8. 세립분 함유량에 따른 자중압밀시점의 계면고

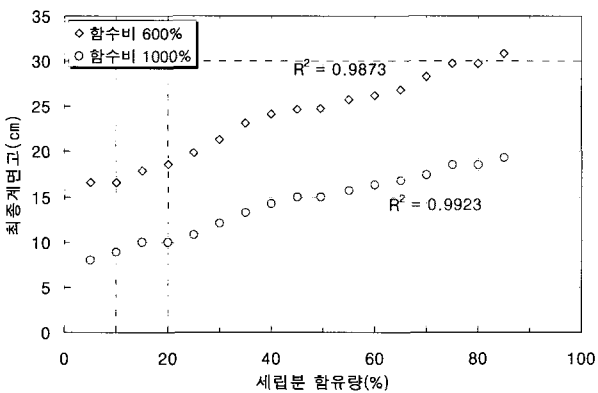


(a) 시험값(Test data)

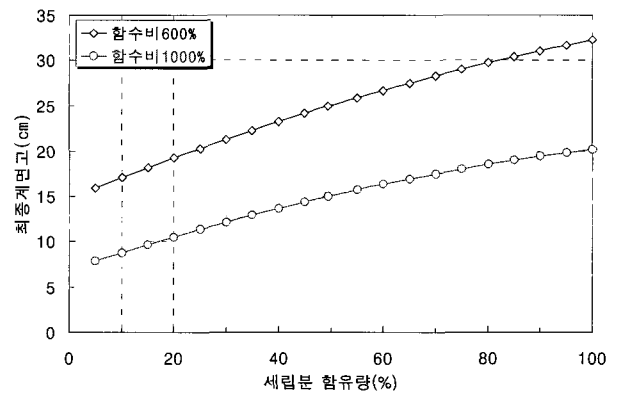


(b) 회귀곡선(Regression curve)

그림 9. 세립분 함유량에 따른 자중압밀종점의 계면고



(a) 시험값(Test data)



(b) 회귀곡선(Regression curve)

그림 10. 세립분 함유량에 따른 최종계면고

세 가지 경우 모두, 그 거동은 유사한 형태로서 세립분 함유량에 따라 비선형적인 관계를 갖는 것으로 판단되었다.

함수비에 따른 계측 시점의 계면고를 비교하면 기존의 연구 결과와 마찬가지로 실질토량이 더욱 많은 저함수비인 경우가 고함수비인 경우에 비해 그 계면고가 높은 것으로 나타났다. 세립분 함유량에 따른 계면고의 비교 결과, 더 높은 계면고를 나타냈다. 이는 세립분 함유량이 적은 경우는 세립분이 비소성 준설토의 거동을 지배하는 요소가 아니나, 세립분이 많이 함유되어 있는 경우는 준설토의 거동을 지배하는 인자는 세립분으로서 세립분의 함유량에 따라 발생하는 자중압밀과 자중압밀 이후의 Creep 거동에 따른 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 준설토의 퇴적 및 자중압밀특성을 파악하기 위하여 준설토의 전체건조시료 중 세립분 혼합

비율을 각각 5%에서 100%까지 5% 단위로 달리 제조하여 전체투기방법으로 침강 및 자중압밀 시험을 실시하였다. 함수비에 따른 침강압밀계수와 세립분 함유량에 따른 침강압밀계수를 예측, 비교 하였으며, 세립분에 따른 침강속도 및 자중압밀 시·종점의 계면고와 Creep 거동 시의 계면고 양상을 비교하여 상관식으로 표현하였다. 시험결과에 대한 각 조건의 결론을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 동일 세립분 함유량을 갖는 준설토의 자중압밀시험 결과, 함수비가 높을수록 침강압밀계수가 크게 나타났다. 이것은 같은 입도분포를 갖는 준설토의 경우에서도 함수비가 높을수록 침강자중압밀이 더 빨리 진행된다는 것을 의미한다.
- (2) 동일 함수비를 갖는 준설토의 자중압밀시험 해본 결과, 세립분 함유량 50%~60%에서 최대 침강압밀계수가 산정되었으며, 음(-)의 기울기를 갖는 3차 곡선식으로 세립분 함유량과 침강압밀계수와의 관계

를 유도할 수 있었다.

- (3) 세립분 함유량의 증가에 따라 침강속도가 감소됨을 알 수 있었다. 세립분 함유량 5%~40%에서는 세립분 함유량의 증가에 따라 침강속도가 확연하게 감소됨을 보였으나 세립분 함유량 40%이상에서는 세립분 함유량 증가에 따른 침강속도의 감소폭이 크지는 않았다. 이는 세립토에 비해 상대적으로 무거운 조립토는 투기직후 바로 침강되지만 나머지 세립토는 응집에 의해 천천히 침강되기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) 산정된 자중압밀 시·중점 시의 계면고와 자중압밀 완료 이후 계면고가 Creep 거동을 시작하여 일정하게 유지될 때의 높이를 비교한 결과, 세 가지 경우 모두에서 저함수비인 경우가 고함수비인 경우에 비해 계면고가 높게 나타났으며, 세립분 함유량이 증가함에 따라 계면고가 높게 나타났다.

향후 본 논문을 바탕으로 좀 더 다양한 투기높이와 염분비에 대해서 다양한 실내시험을 실시하여 그에 따

른 강도 특성 및 자중압밀 특성을 평가하여 상관도를 표현한다면 앞으로의 준설 매립 공사의 시간적, 경제적 절약에 큰 도움이 되리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김자겸, 이종섭 (1992), 실트질 점토의 침강특성에 관한 연구, *대 한토목학회 논문집*, 제11권 3호, pp.85-93.
2. 김형주, 오근엽 (1999), 연약한 준설매립 점성토지반의 자중압밀 과정에 관한 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제15권 제2호, pp.129-138.
3. 天野弘一郎 (1985), 浚渫粘土による軟弱地盤の性状とその豫測, *土木學會 論文集*, 第 364 號, pp.1-14.
4. Been, K. and Silts, G. C. (1981), "Self-weight consolidation of soft soils : An experiment and theoretical study", *Geotechnique*, 31, pp.519-535.
5. Lin, T.W. and Lohnes, R.A. (1981), "Sedimentation and self-weight consolidation of dredged soils", conference proceeding, *ASCE*, pp.464-480.
6. Silts (2000), "The Behavior of Dredged Clays", 초연약 준설매립지반의 특성 및 지반개량기술, *특별세미나 논문집*, 현대건설(주), pp.295-328.
7. Yamaguchi, H., Imai, G., Watanabe, K. and Ogata, K. (1991), "Sedimentation-consolidation analysis of pump-dredged cohesive soils", *Geo-coast '91*, pp.129-134.

(접수일자 2007. 2. 8, 심사완료일 2007. 8. 7)