

모형시험에 의한 준설점토지반의 표층안정기법 연구

A Study on the Shallow Improvement Method for Dredged Clay Fills by the Model Tests

김석열¹⁾, Seog-Yeol Kim, 노종구²⁾, Jong-Koo Ro, 이영철³⁾, Young-Chul Lee, 권수영⁴⁾, Soo-Young Kwon, 김승욱⁵⁾, Seung-Wook Kim

¹⁾농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원, Chief Researcher, Rural Research Institute, KARICO

²⁾농업기반공사 구조지반연구실 실장, Director, Rural Research Institute, KARICO

³⁾대림산업(주) 토목사업본부 차장, Deputy Manager, Daelim Industrial Co., LTD. Civil Projects Dept.

⁴⁾대림산업(주) 토목사업본부 대리, Deputy Section Chief, Daelim Industrial Co., LTD. Civil Projects Dept.

⁵⁾농업기반공사 농어촌연구원, Researcher, Rural Research Institute, KARICO

Synopsis : Recently, the hydraulic fill method is commonly used in many reclamation projects due to lack of fill materials. The method of hydraulic fill in reclamation is executed by transporting the mixture of water-soil particles into a reclaimed land through dredging pipes, then the dredged soil particles settle down in the water or flow over an out flow weir with the water. In the present study, to compare the soil and sand-mat mixed method with sand-air jet method for shallow improvement of hydraulic fills at southern seashore, the model tests were performed. Through the model test results, the behavior of surface as disturbance of desiccation crust is analyzed.

Key words : hydraulic fills, shallow improvement, model test

1. 서론

해저의 원지반을 준설하여 조성되는 매립지반의 경우, 흙의 물리적 성질과 역학적 성질의 변화가 복잡하며, 고함수비의 슬러리상태로 배송관을 통해 이송되기 때문에 특히 해저의 원지반 흙이 점토인 경우에는 매립지반 상부에 계획된 후속공정에 따른 장비투입이 불가능하므로, 소요지지력을 확보할 수 있는 시점까지 장기간의 방치기간이 필요하게 된다.

시간의 경과에 따라 미소하게 증가하는 준설매립지반의 지지력은 주로 표층부의 전단강도에 의해 지배되며, 준설토 표층의 건조수축현상으로 인해 생성되는 건조수축층(desiccation crust)은 상부에 시공장비가 투입될 수 있는 정도의 지지력이 확보되기에는 두께가 미소하고 예민비가 크기 때문에 소요 장비가 반복주행해야 하는 경우에는 지반교란의 영향을 크게 받으며, 더욱이 하부지반이 불투수층으로써 일면배수인 경우에는 건조수축층의 투수계수가 작기 때문에 오히려 하부에서 지반상부로 유출되는 물이 원활하게 공급되지 못하는 불투수층의 역할을 하게 되어, 준설매립지반은 지표의 불투수층과 하부 불투수층 사이에 슬러리상태로 계속 존재하는 형태가 될 수 있다.

이러한 문제점으로 인하여 대심도 준설매립지반 상부에 산업단지 등을 조성하고자 하는 경우에는 준설매립지반 전체심도의 개량에 앞서서 시공장비의 투입이 가능한 정도의 지지력을 확보하기 위한 표층처리공법이 우선적으로 적용되어야 하며, 표층개량에 의한 지지력 확보후 심층처리공법이 이행된다.

본 연구에서는 국내 남해안에 위치한 ○○지구 준설매립지반의 표층처리를 위해 적용가능할 것으로

예상되는 토사 및 샌드매트 혼용공법(Case 1)과 이에 대한 대안으로써의 모래분사공법(Case 2) 등을 비교, 검토하기 위한 노력의 일환으로 폭, 길이 및 높이가 각각 2.4m인 모형토조 2조를 제작한 후 모형시험을 수행하였으며, 본 과업에서 수행된 모형시험을 통해 공법별로 표층지반의 교란에 따른 내부지반의 거동을 파악하였다.

2. 유한차분해석에 의한 모형토조 및 장비자원 결정

모형토조시험을 위한 토조제작에 앞서 선결되어야 하는 점은 외부하중에 의해 지중에 발생하는 응력과 지표면 부근에서 발생하는 소성영역의 크기 및 변위 등이 토조의 측벽에 영향을 받지 않도록 해야 하는 점을 들 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 조건들을 수치해석적인 기법에 의해 검토한 후 모형토조의 크기와 재현장비 등을 제작하기 위해 유한차분해석 상용프로그램인 *Flac^{2D}*를 사용한 해석을 수행하였다.

기하학적인 현장의 상황을 모형토조에서 재현하는 과정에서 우선적으로 고려되어야 할 사항은 습지도저와 PBD타설장비로 인한 지반의 거동문제이며, 특히 접지압과 접지면적 등을 고려하여 보았을 때, 습지도저의 총중량(6ton)이 PBD 타설장비의 총중량(80ton)에 비하여 매우 작기 때문에 본 연구에서는 PBD장비에 의해 발생하는 지반거동을 파악하였다. 본 해석에 적용된 PBD타설장비의 한변의 길이는 2.55m, 접지압은 12.29t/m²의 조건하에 해석이 수행되었다.

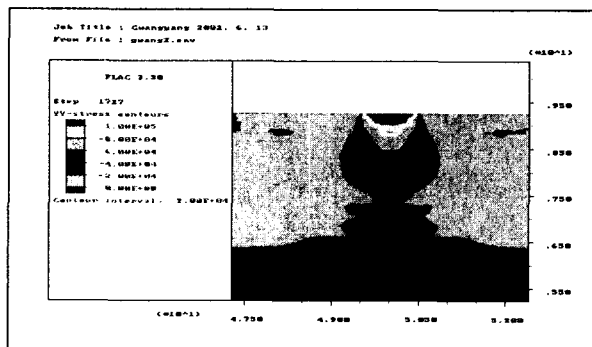


그림 1. 지중응력분포도(현장조건)

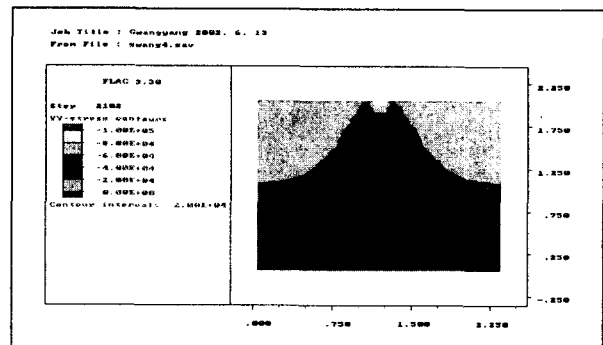


그림 2. 지중응력분포(축소모형)

그림 1은 실제 현장조건에서 수행된 유한차분해석결과로부터 얻은 지중응력분포를 확대하여 도시하였으며, 이를 살펴보면 소성영역의 깊이와 폭이 2m 안팎으로 나타나는 것을 알 수 있다. 현장조건을 대상으로 수행한 유한차분해석으로부터 얻은 지반 내부 변위양상과 소성영역 등의 예측을 토대로 하여 모형토조의 폭과 넓이를 각각 2.4m로 결정하였으며, 이 경우 PBD장비의 접지면적을 결정하기 위한 유한차분해석이 수행되었다. 본 해석으로부터 장비의 접지면적은 그림 2에 도시한 바와 같이 20×20cm의 면적으로 결정하였으며, 본 연구에서의 모형시험에서는 길이방향과 폭방향은 무한한 것으로 간주하고 연직방향만을 축소하는 형태로써 시험을 수행하게 되었다.

3. 실내모형시험

3.1 모형지반의 특성

실내모형시험에 사용한 준설토는 ○○지구 준설매립지반의 현장시료로써 준설투기된 이후 약 40개월에 걸쳐 자중압밀과 건조수축에 의한 침하가 진행된 상태이다. 모형토조에 투기한 시료는 지표면으로부터 심도 0.3~2.0m에서 채취하였으며, 시료의 평균함수비는 약 90%로서 통일분류법상 고소성의 점토

(CH)에 해당된다. 모형토조시험시 복토재로서 쓰인 토사는 실트질 모래로 토조가 위치한 인근의 야산에서 채취하였으며, 드레인의 배수층으로 쓰인 모래는 입도가 균등한 모래를 사용하였다. 본 연구의 모형지반 조성을 위해 토조에 투기한 준설토, 산토 및 샌드매트 등의 물리적특성은 표 1에 명기하였다.

표 1. 모형지반조성을 위한 흙시료의 물리적 특성

흙시료	Grain size distribution(%)				ω_n (%)	LL (%)	PI (%)	G_s	USCS
	Gravel	Sand	Silt	Clay					
준설토	0.0	15.8	51.4	32.8	89.0	54.9	27.9	2.623	CH
복토재	0.2	58.8	30.2	10.8	14.5	N.P		2.716	SM
샌드매트	0.0	90.6	6.8	2.6	4.6	N.P		2.643	SM

3.2 모형토조제원 및 시험방법

본 연구에서는 현장상태를 재현한 후 표층처리공법의 적용에 따른 지반의 내부거동특성을 규명하기 위하여 모형지반을 조성하였으며, 현장에서 시료를 채취하여 현장과 유사한 상태로 토조에서 현장의 상태를 재현함과 동시에 현장 시공진행과정을 재현함으로써 각 시공 단계 및 향후 지반의 거동특성을 분석하고자 하였다.

본 연구에서의 모형토조시험은 ○○지구의 매립지에 투기되어 침강이 완료된 이후 자중압밀과 건조수축이 계속적으로 진행되고 있는 상태의 준설토를 운반한 후 모형토조에 재투기하였으며, 모형지반 조성시 전반적으로 균질한 상태가 될 수 있도록 현장에서 시료채취시 넓은 범위에 걸쳐 시료를 채취하고 덤프트럭을 이용한 운반시에 균질하게 혼합이 될 수 있도록 유도하였다. 모형토조는 폭과 넓이가 각각 2.44m, 높이가 2.65m이며, 내측은 폭과 넓이가 각각 2.4m, 높이가 2.4m의 크기로 전체가 5mm 강판으로 3개 측벽을 이루고 한개 면에서는 투명아크릴 판을 이용하여 토조내부 현상을 육안으로 관찰할 수 있도록 제작된 2개의 토조를 사용하여 비교시험을 실시하였다(그림 3 참조). 한 개의 토조에서는 표층처리방법을 산토 및 샌드매트의 복토과정 이후에 연직배수재를 타설하는 시공과정을 재현(Case 1)하였으며, 나머지 한 개의 토조에서는 샌드매트 부설시 습지도저가 표면정리와 균등한 모래부설을 위해 표층에 투입될 때 준설토매립지반 표층에서 부풀어 오르는 현상(heaving)을 방지하고자 모래를 분사하는 공법을 적용한 샌드매트의 부설과정 이후 연직배수재를 타설하는 과정을 재현(Case 2)하였다.

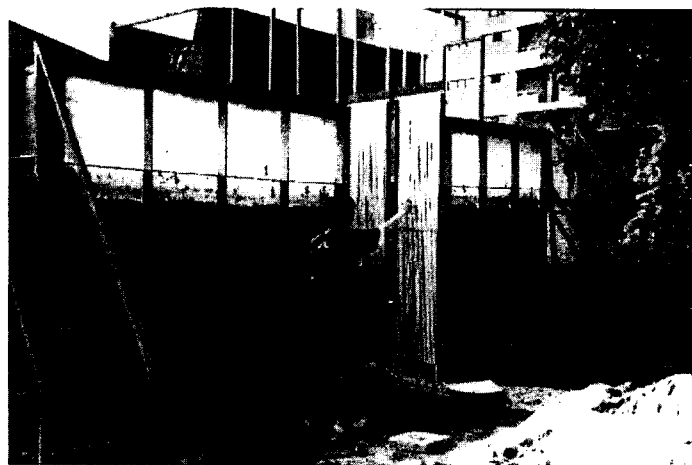


그림 3. 모형토조 개요도

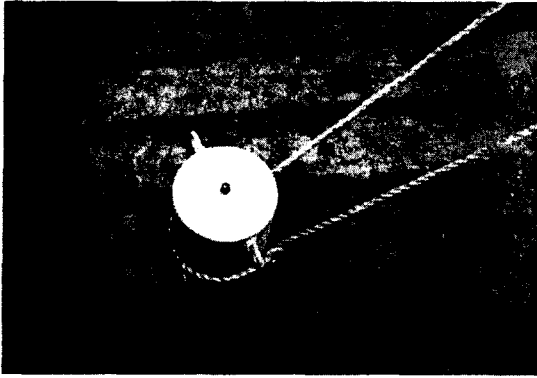


그림 4. 복토과정의 재현(Case 1)



그림 5. 모래분사 재현(Case 2)

3.3 측정항목

본 연구의 모형토조시험에서는 모형토조에 흙시료를 투기하는 과정에서 소요 계측장치들을 설치하였으며, 설치된 각종 장비들은 정의 간극수압과 부의 간극수압 측정이 가능한 전기식 간극수압계 2조와 토조 측벽 20개소에 설치한 마노미터, 그리고 침하량을 측정하기 위한 층별침하계 4조 등이다. 모든 계측은 오전과 오후로 나누어 1일 2회 계측하여 수행하였다.

모형지반에 설치된 층별침하계 설치위치는 그림 4에 도시한 바와 같이 측벽과의 마찰영향을 배제하기 위하여 측벽으로부터 30cm 떨어진 지점에 설치하였으며, 표층으로부터 연직깊이 35cm 간격으로 20, 55, 90, 125cm의 깊이에 각각 설치하였다. 한편, 토조 측벽에는 바닥면부터 10cm 깊이의 간격으로 각각의 심도가 10cm 지점에서부터 200cm의 높이까지 액주계(manometer)를 설치하여 각 지점에 작용하는 간극수압을 측정하였다.

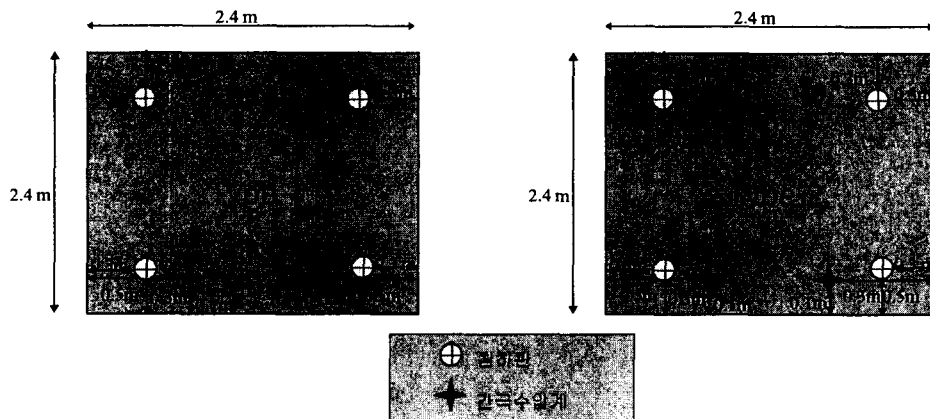


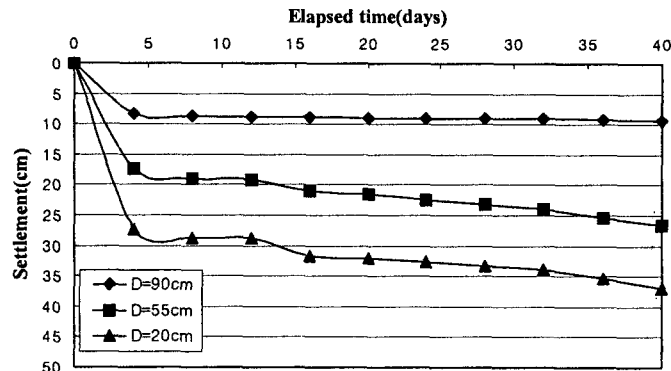
그림 4. 계측장치의 설치 평면도

4. 모형시험결과의 비교

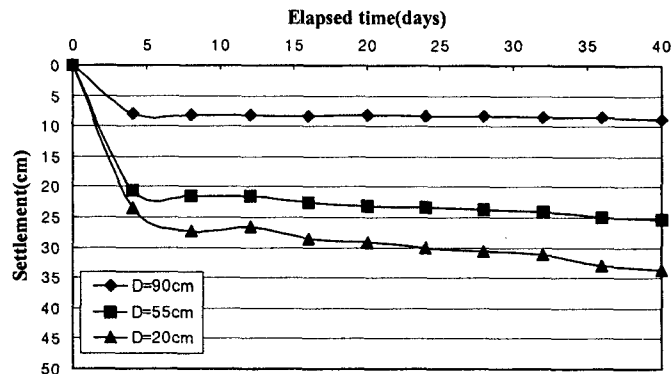
4.1 침하량 비교

모형지반 조성후부터 표층처리 이전단계까지 시간의 경과에 따라 심도별로 측정된 침하량을 도시하면 그림 5 (a), (b)에 나타난 바와 같다. Case 1 토조의 침하량과 Case 2 토조의 침하량이 거의 유사한 범위에 걸쳐 나타나고 있으며, 이러한 침하량 결과와 이후 언급하게 될 베인시험 결과 등을 토대로 하여 표층처리에 앞선 두 개 토조의 상태가 거의 동일한 조건에 있는 것으로 간주할 수 있었다. 한편, 침

하량의 계측시점은 표층처리 이전 단계까지만 측정하였으며, 표층처리 이후 단계에서의 지반 내부거동 파악은 피조미터를 이용하여 측정된 결과를 토대로 하였다.



(a) Case 1 침하량 측정결과



(b) Case 2 침하량 측정결과

그림 5. 층별침하계 침하량 측정결과비교

4.2 간극수압비교

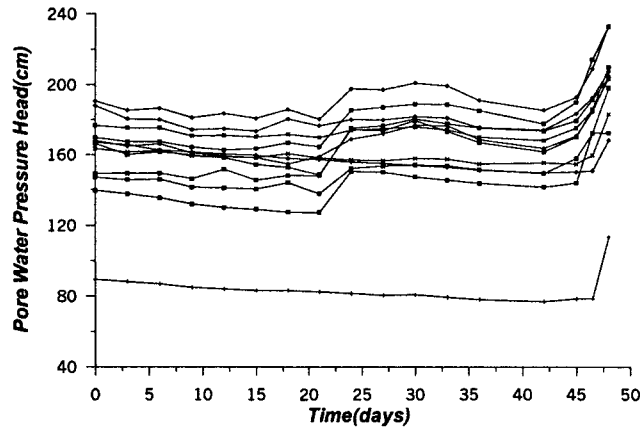
그림 6 (a), (b)에는 본 연구의 모형시험에서 토조의 측벽에 설치한 피조미터의 측정치를 시간경과에 따라 도시하였다. 그림 6 (a), (b)의 결과를 살펴보면 단기간 내에 관측을 실시하였기 때문에 Case 1과 Case 2 각각의 처리공법 적용방식에 따라 정량적인 비교는 불가능하지만 전반적인 경향의 비교 정도는 가능할 것으로 판단되며, 최초 측정일로부터 48일이 경과한 시점(6월 11일)에서 Case 1과 Case 2 모두 전반적으로 수두가 상승하는 경향을 보이고 있으며, 이는 6월 10일에서 11일 양일에 걸쳐 2개소 토조 모두에서 표층처리와 PBD 타설을 실시하였기 때문에 나타나는 것으로 판단할 수 있었다.

앞서 언급한 표층처리 방식에 따라 표층처리 2개소 토조 모두 샌드매트를 부설하였으며 Case 1의 경우 약 30cm의 재하성토를 선시공하였고, 샌드매트 포설시 습지도저를 재현한 추를 옮기면서 모래를 포설하였고 PBD 타설시엔 PBD 타설장비를 재현한 추를 옮기면서 작업을 진행하였다. Case 2의 경우 모래분사공법을 재현하기 위해 2HP의 에어컴프레서를 이용하여 모래를 공중분사하는 방식으로 포설하여 지반의 교란을 방지하였다.

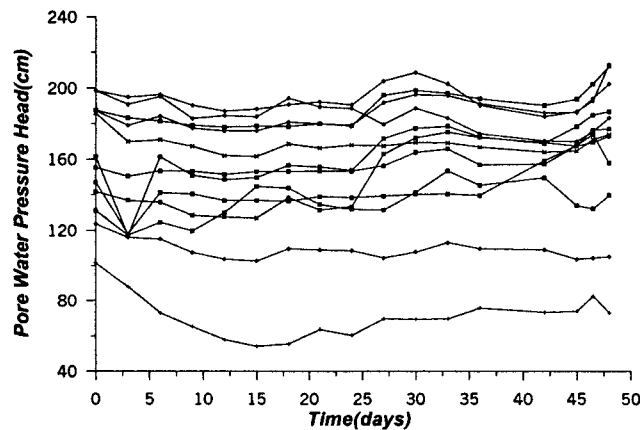
일련의 작업과 동시에 측정한 간극수압결과를 볼 때 두 토조에서 간극수압의 전체적인 경향은 유사하게 나타나고 있으나 47일에서 48일의 데이터를 비교해 보면 Case 1의 경우 Case 2에 비해 직선의 기울기가 매우 급하며 기존 측정간의 값과는 달리 47~48일에서 간극수압값이 크게 증가했음을 알 수 있으며, 표층으로부터 상부 30cm의 계측값이 유사한 기울기로 증가되는 것을 알 수 있다. 반면 Case 2 토

조의 경우 Case 1과 마찬가지로 47~48일에서 간극수압값이 급작스럽게 증가하는 것을 알 수 있으나 상부 20cm만이 급한 기울기로 상승하는 경향을 보이고 있다.

이는 Crust층을 포함한 표층의 일부가 표층처리작업과정과 PBD 타설장비에 의해 영향을 받았기 때문인 것으로 추정할 수 있으며 그 영향을 받는 범위에 있어서 Case 2에 비해 Case 1이 더 민감하다는 것을 반영한다.



(a) Case 1 수두측정결과



(b) Case 2 수두측정결과

그림 6. 피조미터에 의한 수두 측정결과비교

4.3 원위치시험 결과

4.3.1 배인전단강도의 변화

그림 7 (a), (b)에서 배인시험기를 이용하여 측정한 전단강도가 Case 1과 Case 2측 토조에서 서로 차이를 나타내고 있는 주된 요인은 표층처리와 PBD 타설시 상부 Crust층이 일부 교란되었기 때문이며, Case 1의 경우 표층처리 전에 비해 표층처리 후와 PBD타설 후 각각 전단강도가 약 19%와 49% 정도 감소하였다는 것을 알 수 있다. 반면 Case 2의 경우 모래분사공법을 재현하여 실시한 표층처리후의 전단강도는 표층처리전과 유사한 경향을 보이고 있고 PBD타설 후의 전단강도 감소율은 약 26%를 보이고 있어 Case 1의 49%에 비해 표층의 교란 정도가 상당히 경미하다는 것을 알 수 있다.

이러한 Case 1 토조에서 표층의 전단강도 감소는 표층처리시 재현한 습지도저의 하중과 성토재와 모래의 자중, 그리고 PBD 타설장비의 재현에 의한 것임을 알 수 있으며 이때 표층의 교란 정도는 배인 시험의 결과로 미루어 볼 때 지표면으로부터 약 30cm 하부까지 파괴가 나타나지만, 표층에 모래를 분사하는 경우 약 20cm 정도의 표층파괴가 발생하는 것을 알 수 있다.

5. 요약 및 제언

본 연구에서는 국내 남해안에 위치한 준설패립현장을 대상으로 한 표층처리공법을 재현하기 위한 모형시험을 수행하였으며, 이후 본 모형지반을 대상으로 한 심층처리공법에 대한 비교검토가 이루어질 예정이다. 표층처리 과정까지 분석된 결과를 살펴보면, 모형지반 내부에서 측정된 간극수압 측정결과로부터 모래분사가 균등하게 현장에서 재현될 수 있다면 건조수축층의 교란을 최소화 할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한, 원위치시험 결과로부터 표층처리과정과 이후 연직배수재를 타설하는 일련의 과정을 거친 후에도 표층부에서의 전단강도 감소율은 모래분사공법의 경우가 토사와 샌드매트를 혼용하는 경우에 비해 더 작게 나타나는 결과를 보였다.

참고문헌

1. 김석열, 김승욱, 김홍택, 강인규(2000), “준설패립토의 건조수축에 따른 강도증가 예측과 장비투입시기 결정에 관한 연구”, 한국지반공학회 2000년 봄 학술발표회 논문집, pp.591~598.
2. 김석열, 노종구, 이영철, 권수영, 김승욱(2002), “준설패립지반의 표층처리방안 검토를 위한 모형시험”, 한국지반환경공학회 2002 학술발표회 논문집, pp.75~80.
3. 김홍택, 김석열, 강인규, 김승욱(2001), “준설패립지반의 전단강도 예측 및 장비투입시기 결정에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 논문집, 제2권, 제3호, pp.47~56.
4. 홍병만, 김상규, 김석열, 김승욱, 김홍택, 강인규(1999), “준설패립지반의 건조수축특성에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 제15권, 제6호, pp.219~238.