

영종도 지반공학 야외시험장에서의 사질토지반 개량효과 평가

Evaluation of Ground Improvement on Sands at Yongjong Island Geotechnical Experimental Site

김동수¹⁾, Dong-Soo Kim, 박형춘²⁾, Hyung-Choon Park, 김영웅³⁾, Young-Ung Kim, 김수일⁴⁾, Soo-Il Kim

- 1) 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, KAIST
- 2) 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, KAIST
- 3) 인천국제공항공사 건설시험소장, General Manager, Res & Analysis Dept. of Incheon International Airport Co.
- 4) 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ

개요(SYNOPSIS) : In situ experimental studies were performed at Yongjong Island Geotechnical Experimental Site to evaluate the ground densification on sand deposits. Standard penetration test, cone penetration test, and SASW test were performed and soil profiles and quality of ground improvements were evaluated. The feasibility of applying SASW method were verified by comparing test results. The evaluation technique of in-situ density using SASW and resonant column tests was proposed, and the reliability of proposed method was verified by performing case studies

주요어(Key words) : SASW test, Resonant Column test, CPT, SPT, Density evaluation, Geotechnical experimental site

1. 서론

최근 선진국에서는 국립야외시험장(National Experimental Site)을 설치하여 각종지반조사, 현장계측 및 실험시험을 수행하여 자료를 집대성하고 이들을 바탕으로 새로운 현장시험기법, 설계 및 시공방법들의 적용성을 검증하는 등 지반공학분야의 실증 연구를 수행하고 있다. 국내에서도 신공항 관리공단의 협조를 얻어 영종도 지반공학 야외시험장을 선정하고, 사질토지반 개량효과 평가, 지진시 지반의 증폭현상 및 액상화 포텐셜 평가등 실증연구를 수행하고 있다. 본 시험부지는 여객터미널 인근 가식장 예정지에 40m×120m 규모로 조성되었으며, 공단으로부터 다양한 현장지원과 일정기간 동안 시험목적에 위해 원상태 유지가 가능하도록 하였다. 본 논문에서는 여러 연구내용중 사질토 지반 개량효과 평가와 관련된 내용을 소개하고자 한다.

본 연구의 목적은 준설매립으로 조성된 지반을 유압햄머다짐으로 개량한 후 표면파 시험을 비롯한 다양한 시험기법을 사용하여 개량 효과를 평가하는데 있다. 기존의 개량효과 평가시험인 SPT, CPT시험을 개량 전·후에 실시하였다. SPT의 경우 시험결과의 표준화를 위하여 에너지비 측정을 병행하였다. 3개의 시험축선에 대하여 표면파(SASW)시험을 수행하여 개량전·후의 전단파속도 주상도를 획득하고, 교란시료를 채취하여 밀도의 변화를 주며 공진주/비틀전단시험을 수행하여 전단파속도-밀도-구속압의

상관관계를 구하였다. 표면과 시험결과를 검증하기 위하여 동일위치에서 다운홀 시험을 수행하였으며, 현장밀도 측정을 위하여 몰드법에 의한 현장밀도시험을 병행하였다. 이들 시험결과를 종합 분석하여 개량 전·후의 깊이별 전단파속도, SPT의 N값, CPT시험의 q_c 값, 밀도등을 구하여 기존기법과 새로운기법의 결과를 비교·검증하였으며, 이를 통하여 표면파기법을 이용한 사질토지반 개량효과 평가기법을 개선·정립하였다.

2. 시험부지

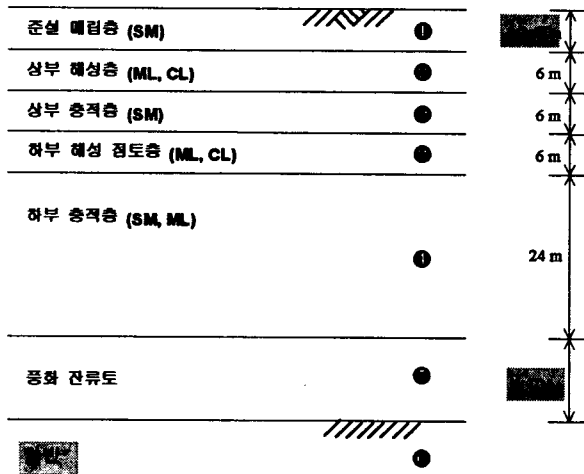


그림 1. 영종도 현장 지층 단면도

시험장 부지는 그림 1에서 보는 바와 같이 암반위에 약 50m 두께의 원지반이 분포하며, 그 위에 약 7.5m 두께의 준설패립층이 분포한다. 원지반은 풍화잔류토와 하부충적층이 대부분을 차지하며, 그 위에 하부해성점토층, 상부충적층, 상부해성층이 분포한다. 준설패립토층은 실트성분을 함유한 세립 모래(SM)로 구성되어 있으며, 지하수위는 깊이 4~5m에 위치하고 있다. 현재, 지반개량을 위하여 5m가량의 Preloading을 가하였으며 시험은 2.5m가량의 Preloading이 제거된 후 수행되었다.

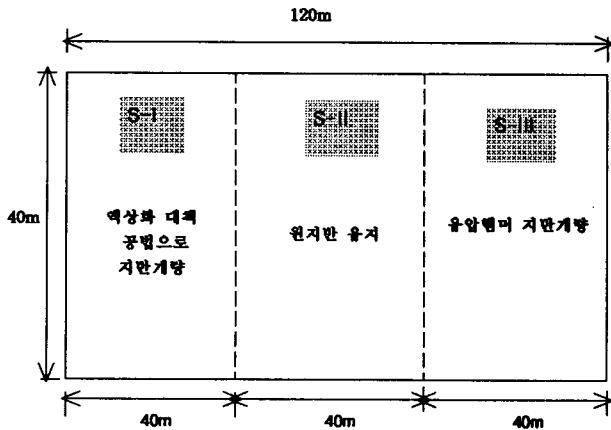


그림 2. 영종도 현장 시험부지의 계획 평면도

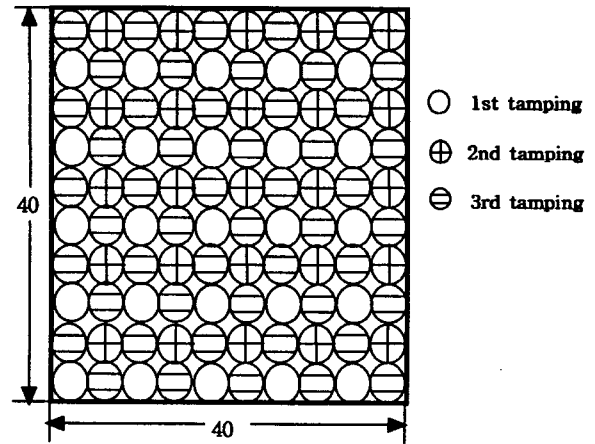


그림 3. 유압식 햄머 다짐 패턴도

이 지역에 지반공학야외시험장을 40m×120m 규모로 조성하였으며, 시험장을 3등분하여 원지반 유지 지역(S-II), 유압햄머 지반개량 지역(S-III), 액상화 대책 공법 시공 지역(S-I)으로 나누어 관리하고 있다(그림 2). 본 연구를 위하여는 S-III지역을 사용하였다. S-III에서는 낙하고 1.2m, 무게 10ton의 유압식 다짐햄머를 사용하여 다짐에 의한 지반개량을 수행하였다. 다짐패턴도는 그림 3과 같다.

3. 시험계획

본 현장의 시험목적은 준설패립으로 조성된 지반에서 유압햄머다짐으로 인한 지반개량 전·후에 표

면파시험을 비롯한 다양한 시험기법을 사용하여 개량 효과를 평가하는데 있다. 기존의 평가시험인 SPT와 CPT시험은 일점 시험으로, 시험위치 사이 지반의 물성평가에는 어려움이 있으며 또한 지반 관입이 필요한 단점을 갖고 있다. 반면 표면파시험은 지역의 평균적인 물성을 획득하고, 비관입시험이므로 경비와 시간을 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 사질토 지반 개량효과 평가를 위하여 기존의 평가방법과 본 연구에서 제안한 평가방법을 사용하여 각 기법의 결과를 비교 분석하였다. 또한 표면파시험의 신뢰성을 검증하기 위하여 다운홀시험을 수행하여 측정된 전단파속도 주상도를 비교하였다. 현장의 교란시료를 이용하여 공진주/비틀림전단시험을 수행하여 전단파속도 (V_s)-밀도(γ_d)-구속압(σ_m)이 상관관계를 얻어 표면파 시험결과와 결합하여 현장밀도 결정에 적용하였다. 제안된 방법에 의한 개량 전·후의 밀도 평가의 신뢰도를 검증하기 위하여 현장에서 몰드법에 의한 깊이별 밀도측정을 수행하여 측정된 밀도를 비교하였다. 시험 항목중 CPT시험과 몰드법 밀도측정은 현장사정에 의하여 개량 전에만 수행되었다(그림 4, 표 1).

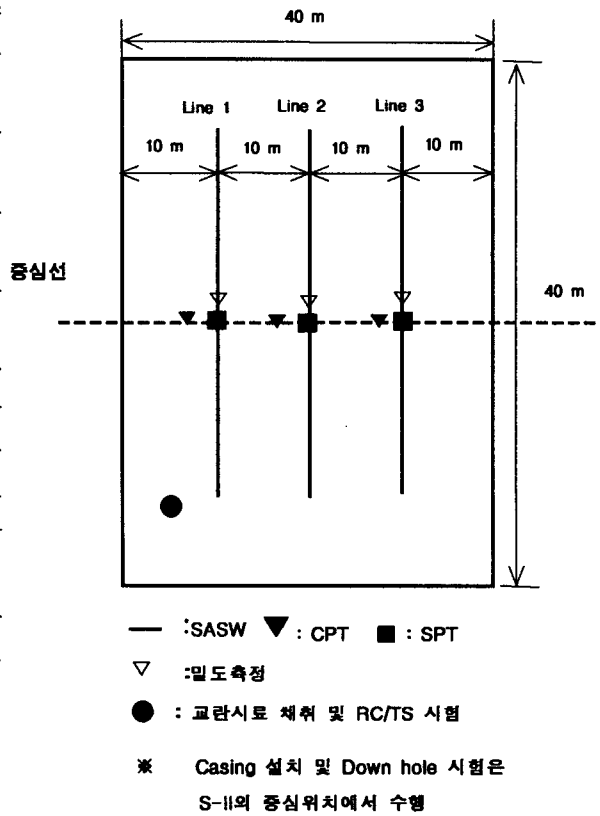


그림 4. 영종도 시험부지에서의 시험계획(S-III)

표 1. 사질토 지반 개량효과 평가를 위한 시험 항목

| 시험명 | 도출계수 | 시험목적 | 비고 |
|----------|------------|---------------------------------------|---------------------------|
| SASW | 전단파속도 | 개량효과 평가 | 개량 전·후 |
| RC/TS | 전단파속도 | V_s - γ_d - σ_m 관계 결정 | 교란 시료 필요 |
| CPT | q_c, f_s | 개량효과 평가 | 개량 전·후 (현장사정으로 개량전만수행) |
| SPT | N치 | 개량효과 평가 | 에너지 보정 필요 개량 전·후 수행 |
| 몰드법 밀도시험 | 건조밀도 | 개량효과 평가 | 개량전만 수행 |
| 다운홀 시험 | 전단파속도 | SASW시험의 검증 | 시추공 필요 |

4. 시험결과

4.1 표준관입시험(SPT)

도우넛 햄머형 표준관입시험기를 이용하여 지반개량 전·후에 시험을 수행하였다. 이때 에너지비를 측정된 결과 40%전후의 에너지비를 얻을 수 있었으며, 장비의 에너지비를 40%로 설정하여 결과해석시 에너지비 60%로 보정하여 사용하였다. 시험위치는 각 시험축선의 중심에 위치한다.

그림 5는 시험부지의 개량전 SPT실험 결과를 나타낸다. 3개의 축점에서 값의 차이는 있으나 깊이에 따른 N치의 변화경향이 유사함을 볼 수 있다. 깊이 약 2m 까지는 3개의 축선 모두에서 N치가 2~3정도로 매우 느슨한 상태를 보이며, 이는 preloading 설치 및 제거시 지반이 느슨하게 형성됨을 알 수 있다.

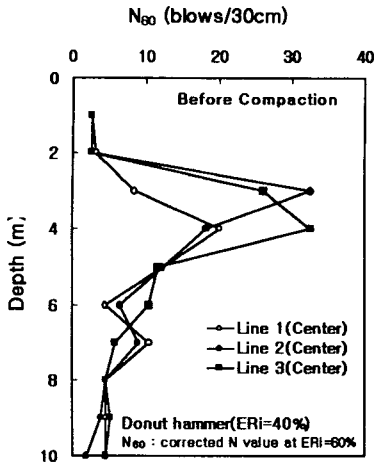


그림 5. 개량 전 깊이별 N치

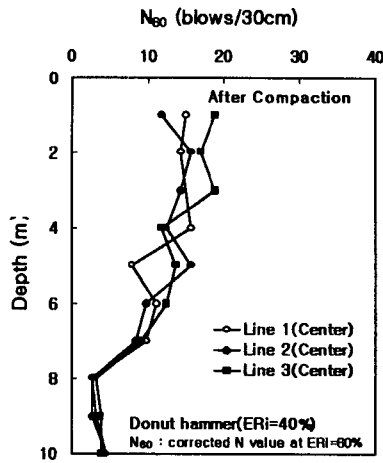


그림 6. 개량 후 깊이별 N치

유압햄머다짐으로 인하여 지반의 강성이 모든 지역에서 고르게 개량되었음을 알 수 있다. 흥미로운 현상은 모든 축선의 심도 3m~4m에서 N치가 다짐 후에 다짐 전보다 감소된 점이다. 이는 다짐 전 겔보기 suction효과에 의하여 상당한 강도를 지닌 국부적인 층상구조가 다짐에 의해 교란된 결과로 생각된다. 다짐 후 시간의 증가에 따라 복원될 것으로 판단된다. 심도 5m~7m 사이에서는 다짐 후 N치가 다짐 전 N치보다 증가한다. 다짐 후 심도에 따른 N치 증가량을 살펴보면 심도 2m이하에서의 N치 증가량이 심도 5m~7m 사이에서의 N치 증가량에 비해 그 크기가 크다. 이는 준설매립토 하부의 원지반이 연약한 점토질 실트지반으로 충격에너지에 대한 충분한 반력을 제공하지 못하고 동다짐시 지반개량을 유발하는 압축파가 발생하여 전달되거나 준설매립토와 원지반의 경계면에서 인장파로 바뀌어 반사되기 때문으로 판단된다.

4.2 콘관입시험(CPT)

유압햄머다짐에 의한 지반개량 전, 시험축선 1, 2, 3의 중심에서 콘관입시험을 수행하였다. 그림 7은 세 축선에서 측정된 q_c 값이다. 수행깊이는 준설매립지반을 중심으로 10m로 국한하였다. 세 축점의 결과에 의하면 사질토지반은 심도 0.2m~3m에서는 약 2.5MPa 내외의 낮은 저항력을 보이며 느슨한 상태로 있다. 지하수위 주변인 심도 3m~5m에서는 지반의 겔보기 suction현상으로 q_c 값이 급격히 증가하여 축점 1에서는 15MPa, 축점 2, 3에서는 20MPa이상의 값을 가진다. 심도 5m~8m에서는 3축점 모두 8MPa 내외의 값을 가지며, 또한 원지반은 대체적으로 2MPa 내외로 나타나 준설매립토와 원지반의 경계를 분명하게 나타내고 있다. 콘관입저항치(q_c)의 깊이별 분포와 SPT N치의 깊이별 분포는 거의 유사한 결과를 보임으로 상호결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 현장의 여건상 다짐 후 콘관입시험은 수행이 되지 못하였다.

3m~4m에서 지하수위 위에 모세관 현상에 의한 겔보기 suction효과에 의하여 3개의 시험축선에서 모두 최대값을 가진다. 시험축선 1에 비하여 시험축선 2, 3에서의 N치가 크게 나타나며, 동일부지에서도 지반의 강성분포가 변화함을 알 수 있다. 심도 5m~7m에서는 세 축선에서 모두 N치가 10 내외에 분포되어있으며, 심도 8m 이상의 원지반에서는 N치값이 5 내외의 값을 나타내어 준설매립토와 원지반의 경계부위를 명확히 알 수 있다.

그림 6은 시험부지의 개량후 SPT실험 결과이다. 개량후 준설매립토층 전체에 걸쳐 N치가 15~20 내외에 깊이에 따라 일정하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 따라서,

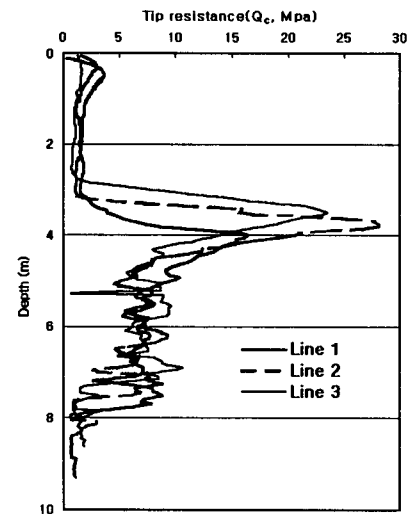


그림 7. 시험축선 1, 2, 3의 개량전 깊이별 q_c 값

4.3 표면파시험(SASW)을 이용한 개량효과 평가

4.3.1 표면파기법의 신뢰성 검토

표면파기법의 신뢰성 검토를 위하여 다운홀시험결과와 비교하였다. 다운홀시험을 수행하기 위한 시추공은 시험부지 S-II의 중앙에 위치하며, 깊이 30m까지 1m간격으로 3방향 속도 감지기를 위치시켜가며 시험을 수행하였다. 다운홀시험과 표면파시험을 수행하여 얻은 전단파속도 주상도를 그림 8에 나타내었다. 심도 0~15m사이에서는 두 방법에서 얻어진 전단파속도 주상도가 거의 일치하나, 깊이가 더 깊어지면 차이를 보인다. 이로부터 본 연구에서 적용된 10m이내의 준설토 지반에서 표면파기법을 사용하여 얻은 각 시험축선의 전단파 속도 주상도의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

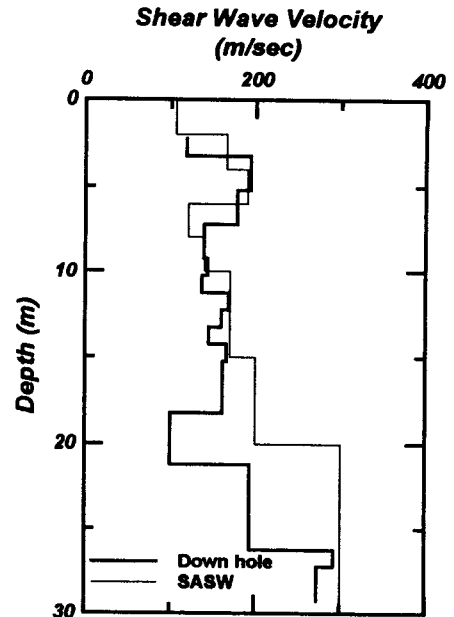


그림 8. 표면파시험과 다운홀시험 결과의 비교

4.3.2 표면파기법을 이용한 사질토 지반 밀도추정 기법

본 논문에서는 현장에서 표면파 시험결과와 실내에서의 공진주시험결과를 효과적으로 결합하여 사질토 지반의 지반개량정수(밀도)변화를 평가하기 위하여 다음과 같은 방법을 제안하였다.

- 1) 현장에서 개량 전 표면파시험을 수행하여, 개량 전 깊이별 전단파속도 분포를 획득한다.
- 2) 현장에서 채취한 교란시료로 다양한 밀도의 재성형시료를 만들어 여러 구속압에서 공진주시험을 수행하여 현장시료의 전단파속도-밀도-구속압의 관계를 정립한다.
- 3) 전단계에서 구한 전단파속도-밀도-구속압의 관계를 구속압의 영향없이 비교하기 위하여, 구속압에 대하여 정규화된 전단파속도(v_{s1})를 결정한다.
- 4) 1)단계에서 표면파 시험을 통하여 얻은 개량 전 대상지반의 깊이별 전단파속도 분포로부터 현장구속압으로 정규화된 깊이별 전단파속도 분포를 계산한다.
- 5) 3)단계에서 얻은 정규화 전단파속도-밀도 관계와 4)단계에서 얻은 대상지반의 깊이별 정규화 전단파속도를 결합하여, 대상지반의 개량 전 깊이별 밀도변화를 구한다.

4.3.3 표면파시험 결과

(1) 분산곡선

그림 9, 10은 축선 1, 2, 3에서 개량 전·후의 분산곡선을 나타낸다. 그림 9와 10을 비교하여 보면, 전체 파장길이(깊이)에 걸쳐 개량 전에 비하여 개량 후의 표면파속도는 평균 30m/sec정도의 증가를 보이고, 이로부터 준설토층 전체 깊이에 걸쳐 유압햄머다짐에 의한 개량효과가 있었음을 확인할 수 있었다.

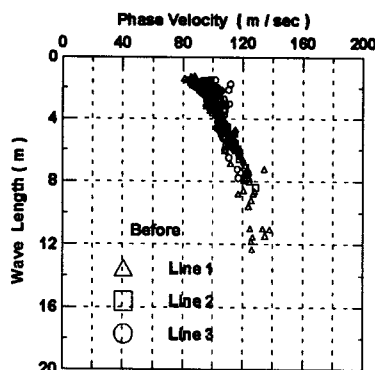


그림 9. 개량전 실험분산곡선

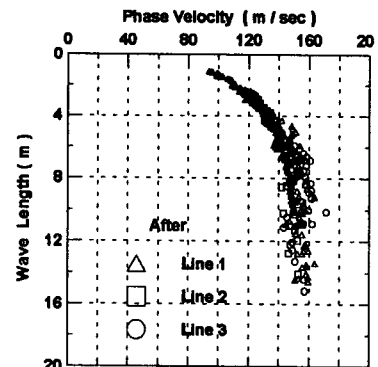
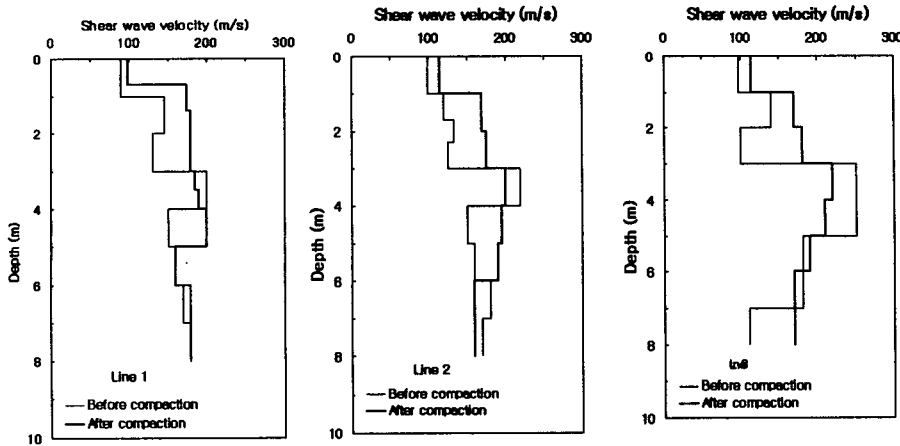


그림 10. 개량후 실험분산곡선

(2) 전단파속도 주상도의 결정

각 시험측선에서 다짐 전·후의 깊이에 따른 전단파속도의 변화양상을 그림 11에 나타내었다. 앞절에서 기술된 SPT, CPT결과와 비교하여 보면, 세 측선 모두 전체 깊이에 걸쳐 다짐 전·후의 깊이에 따른



(a) 시험측선 1

(b) 시험측선 2

(c) 시험측선 3

그림 11. 개량 전·후의 전단파속도 비교

전단파속도, N_{60} , q_c 값의 변화양상이 거의 유사하다. 이러한 결과로부터 SASW, SPT, CPT시험결과의 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

개량 전·후 심도별 전단파속도를 비교하여 보면, 개량전 느슨한 상태를 보이는 심도 3m이하에서는 시험측선 1에서 20~50m/sec, 시험측선 2에서 50m/sec, 시험측선 3에서 20~60m/sec 정도의 전단파속도 증가를 보인다. 다짐 전 이미 겉보기 suction에 의해 이미 상당한 정도의 전단파속도를 갖고

있는 심도 3~4m 사이에서는 세 측선 모두 크기에 차이는 있으나 전단파속도가 감소하고 있다. 이는 SPT시험결과와도 일치한다. 심도가 깊어짐에 따라 다짐에 의한 전단파속도 증가가 다시 나타난다. 시험측선 1에서는 심도 4~5m사이에서 다짐 후, 다짐 전에 비하여 50m/sec 정도, 시험측선 2에서는 심도 4m~6m 사이에서 40m/sec 정도의 전단파속도 증가를 보인다. 시험측선 3에서는 심도 5m~6m사이에서 다짐전 전단파속도가 이미 증가되어 있어 시험측선 1, 2에 비해 작은 7m/sec 정도의 전단파속도 증가를 나타내었다.

(3) 현장의 건조단위 중량 추정

대상현장의 준설매립층에서 교란시료를 채취하여 시료의 밀도와 구속압을 변화시키며 공진주시험을 실시하여 전단파속도-밀도-구속압의 관계를 그림 12와 같이 획득하였다. 전단파속도에 미치는 구속압의 영향을 최소화하기 위하여 대기압(1 kg/cm^2)을 기준으로 전단파속도를 정규화하였으며 그 결과는 그림 13과 같다. 정규화된 전단파속도와 건조단위중량사이의 관계를 선형회귀분석을 통하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

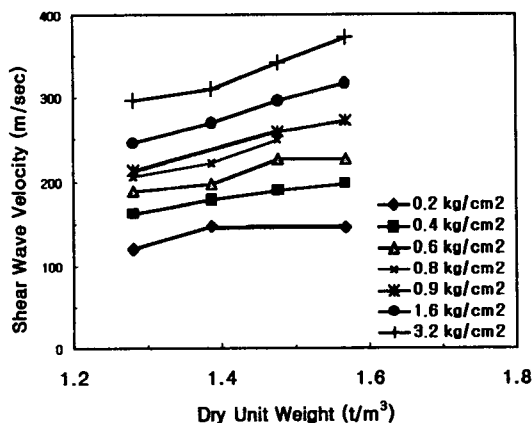


그림 12. 전단파속도-건조단위중량-구속압 관계

를 그림 15와 같이 추정하였다. 시험부지는 지표면에서 약 7.5m정도까지 준설매립층이고 그 이하는 해성점토층이다. 해성점토 구간은 동다짐에 의한 개량대상 구역이 아니므로 7.5m이하의 지반은 지반개량

$$v_{s1} = 184.0 \times v_d - 22.5 \quad (1)$$

이 때 v_{s1} 은 정규화된 전단파속도로 단위는 m/s이며 v_d 는 건조단위중량으로 단위는 t/m^3 이다. 개량 전·후에 SASW시험에서 얻은 깊이별 전단파 속도 분포(그림 11)로부터 현장구속압으로 정규화된 전단파속도의 분포를 그림 13에 나타내었다.

실내시험에서 결정한 정규화된 전단파속도-건조단위중량 관계와 그림 14에 나타난 깊이별 정규화전단파속도 관계로부터 개량 전·후의 현장건조 단위중량의 변화를

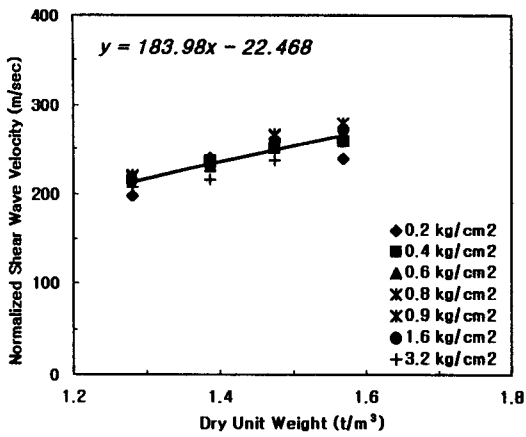


그림 13. 정규화된 전단파속도-건조단위중량사이의 관계

평가에서 큰 의미가 없다.

시험측선 1, 2, 3에서 지반개량전 몰드법에 의한 밀도 시험을 수행하였다. 시험측선 1, 2에서는 깊이 1m에서 수행하였으며, 시험측선 3에서는 깊이 1.5, 1.8, 2.4, 2.9, 3.8m에서 밀도 시험을 수행하였다. 밀도시험을 통해 얻은 건조단위중량과 본 연구에서 결정된 건조단위중량을 그림 15에 같이 비교하였다. 몰드법에 의한 밀도시험과 본 연구에서 제안된 방법에 의한 건조단위중량은 거의 유사한 값을 보임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 제안된 방법이 개량 전·후의 건조단위중량 측정에서 타당한 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

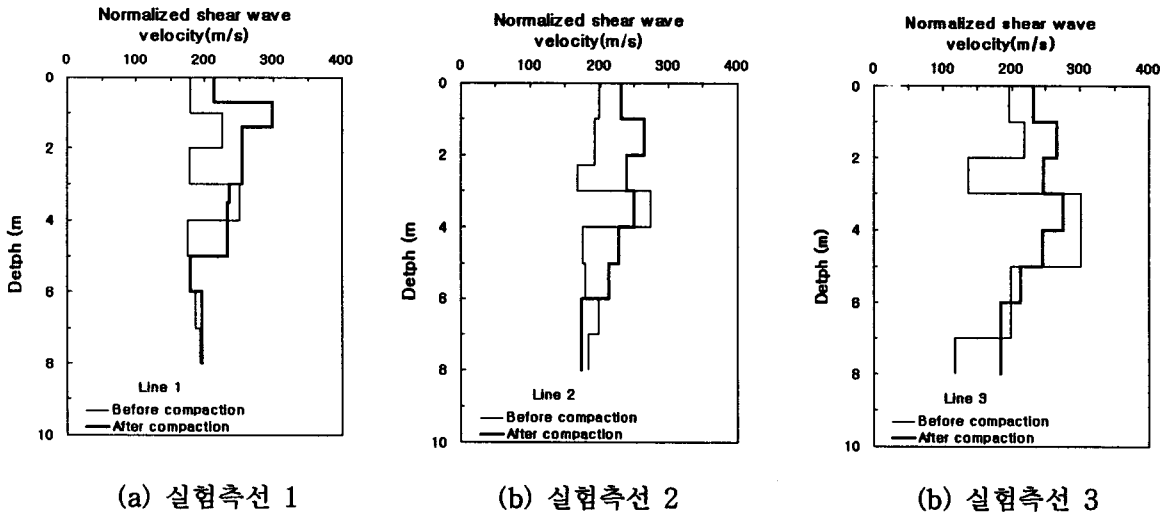


그림 14. 개량 전·후의 구속압에 대하여 정규화된 깊이별 전단파속도

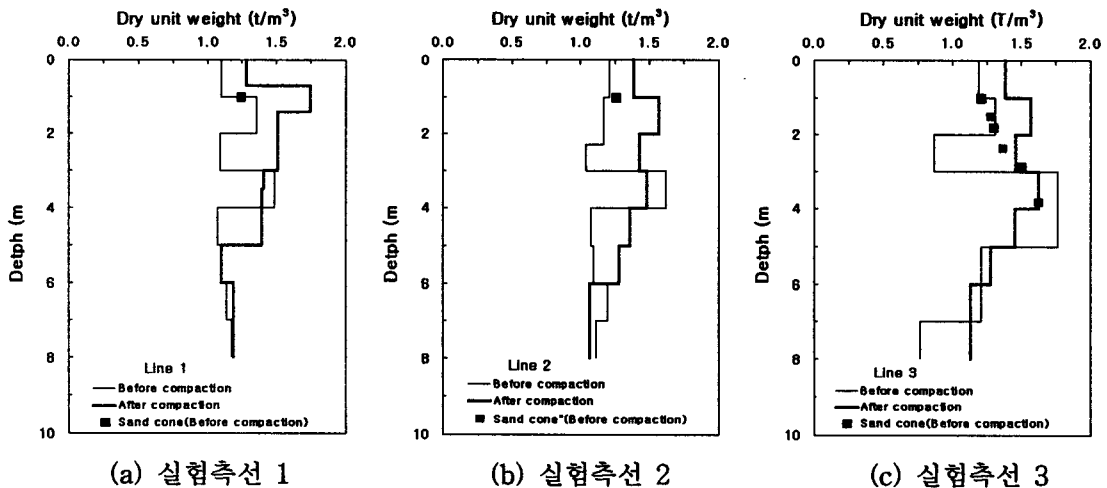


그림 15. 개량 전·후의 깊이별 현장 건조단위중량

5. 결론

본 연구에서는 영종도 지반공학 야외시험장에서 수행된 사질토지반 개량효과 평가시험결과를 정리하였다. 기존의 개량효과 평가시험인 표준관입시험, 콘관입시험등을 수행하였고, 관입시험을 통하여 얻은 지층구조와 개량 전·후의 개량효과 및 개량심도를 표면파시험 결과와 비교하여 지반의 층상구조 및 개량심도 평가에 있어서 표면파시험 결과의 타당성을 확인하였다. 또한 표면파시험결과와 공진주시험결과를 효과적으로 결합하여 사질토지반의 밀도를 평가하는 방법을 제안하고, 영종도 현장에 적용하여 신뢰성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 프로젝트(RND-96-0007)와 STEPI(ED-01-04)과제의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 시험부지 제공과 여러 시험 편의를 제공하여 주신 인천국제공항공사 건설시험소의 소장님의 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김동수(1995), "공진주/비틀전단(RC/TS)시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성", 한국지반공학회지, 제11권, 제1호, pp101-112.
2. 김동수, 박형춘, 김성인, "표면파시험과 공진주시험을 이용한 사질토지반 개량평가 시스템의 개발", 한국지반공학회지(1999년 2월 게재예정)
3. 건설교통부(1997), "표면파기법을 이용한 사질토지반 개량효과 평가기법 개발"
4. Joh, S. H.(1992), "User's guide to WinSASW, a program for data reduction and analysis of SASW measurements." The University of Texas at Austin.
5. Joh, S. H.(1996), "Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.