

## 모래다짐말뚝(SCP)에 의한 매립지반의 액상화저감효과 평가 Evaluation of Liquefaction Remediation of Reclaimed Land by Sand Compaction Pile

김종국<sup>1)</sup>, Jong-Kook Kim, 손형호<sup>2)</sup>, Hyung-ho Son, 윤원섭<sup>3)</sup>, Won-Sub Yoon, 채영수<sup>4)</sup>, Young-Soo Chae  
최인걸<sup>5)</sup>, In-Gul Choi

<sup>1)</sup> 한국건설품질시험원 지반공학센터 팀장, Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.

<sup>2)</sup> 한국건설품질시험원 지반공학센터 상무, Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.

<sup>3)</sup> 수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

<sup>4)</sup> 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

<sup>5)</sup> 유신코퍼레이션 지반공학부 전무, Dept. of Geotechnical Engineering, Division of Yooshin Corporation.

**SYNOPSIS :** In this study, dredging reclamation ground were performed to evaluate the ground improvement and liquefaction reduction effect with the result that standard penetration test(SPT) and piezo penetration test(CPT) before and after of improvement. Especially, the estimate center of the pile and factor of liquefaction safety to the position of ground around with the pile presented improvement of compaction for improved compaction of dredging reclamation ground.

**Key words :** Liquefaction Remediation, Reclaimed Land, Sand Compaction Pile, replacement ratio

### 1. 서 론

최근에 발생한 중국의 쓰촨성 지진(2008년)은 인도판과 유라시아판의 충돌 시 판의 경계에서 발생한 리히터 규모 7.8의 대규모 지진으로 두 판의 충돌 시 인도판이 맞닿아 있는 유라시아판 아래로 파고들면서 밀어올리는 과정에서 에너지가 분출돼 강진이 발생하였다. 그리고 한반도 주변에서의 지진으로 인한 피해규모가 점차 커지고 있고 일본, 중국 등과 지형적으로 인접해 있어 한반도가 지진에 대한 안전지대가 아니라는 사실을 일깨워 주고 있다. 이와 더불어 진앙지에서 멀리 떨어진 지역에도 지진피해가 발생함으로써 지진의 영향이 매우 넓게 분포함을 보여주고 있다. 최근 들어 국내에서도 신공항, 신항만 그리고 방조제 등의 대규모 시설은 해안의 연약지반위에 성토 또는 매립하여 부지를 조성하는 사례가 증가하고 있다. 이러한 연안의 매립지반은 느슨한 상태의 새로운 지반을 형성하게 되며, 이러한 지반 위에 구조물을 축조하는 경우 크지 않은 규모의 지진에도 액상화가 발생할 가능성이 높다. 이처럼 서남해안의 대규모 시설을 건설하고 있는 우리에게 지진대비의 필요성을 확인시켜 주고 있다.

액상화 방지공법으로는 모래다짐말뚝(sand compaction pile, SCP)이 가장 많이 적용되고 있는 공법이고 또한 쇄석다짐말뚝공법도 이용이 늘고 있는 실정이다. SCP공법은 연약지반에 진동을 이용하여 모래를 압입함으로써 모래기둥을 조성하는 공법으로 입도개량, 밀도증대 및 유효응력의 증대와 간극수압의 소산 및 차단 등의 원리를 이용하여 지진 시 액상화 현상을 저감시키기 위한 연약지반 보강에 효율적이고 비교적 경제적 공법으로 알려져 있다. 동북아의 세계화, 국제화를 지향하여 대규모 공사가 진행되고 있는 인천 송도국제도시의 매립부지는 상부 준설매립층과 그 하부에 원지반 퇴적층으로 연약지반이 존재하였다. 이에 준설매립층의 액상화 방지 및 다짐도

증진과 하부 원지반의 압밀축진의 일환으로 SCP공법이 적용되었다.

본 연구에서는 인천 송도지역의 매립부지에 적용된 SCP공법의 개량 전·후에 수행한 품질시험을 통해 연약지반의 지반개량 및 액상화저감효과를 평가하였으며 그 결과를 토대로 보다 준설패립지반의 다짐도 개선방안을 제시하였다.

## 2. 지반특성

본 연구 대상지역은 그림 1과 같이 원지반의 점성토 상부위에 준설토를 매립하여 조성한 부지로 준설패립층은 자갈 섞인 실트질 모래 내지 모래질 실트, 실트 등으로 약 3.5m~12m정도의 두께로 구성되었으며, 원지반은 실트질 점토 및 점성질 실트, 실트질 모래, 점토질 모래 등이 혼재되어 나타났다. 준설패립층은 대부분 갈색~황갈색, 담회색~암회색의 실트질 모래 내지 자갈섞인 전석층 또는 모래섞인 실트로 구성되었고, 그림 2에서 처럼 입도가 불량하고 느슨한 상태로 일괄 매립된 되어서 다짐관리가 곤란하며, N값 10이하의 느슨한 층이 분포하여 장래의 노체 및 노상층으로 이용 시 액상화 방지 및 다짐도 증진이 필요하였다.

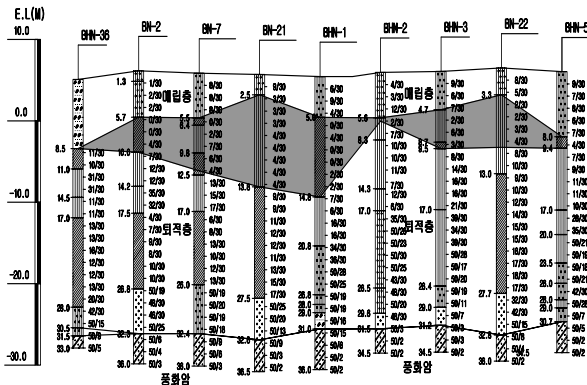


그림 1. 대표적인 지층 분포 현황도(NSIC지역)

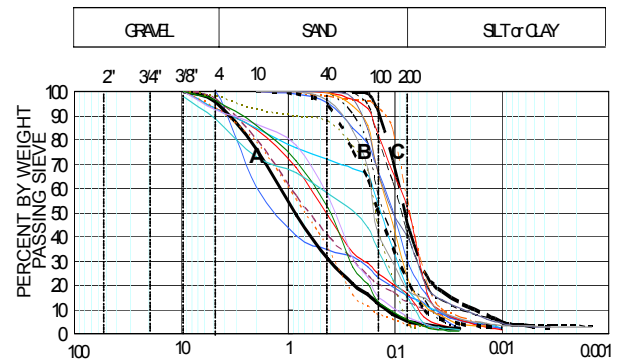


그림 2. 매립층의 입도분포 곡선 (김종국 등, 2006)

## 3. SCP공법의 설계 및 시공

SCP공법은 1950년대에 일본에서 개발되어 드레인공법과 같이 많은 현장에서 적용되고 있다. SCP공법으로 연약지반에 모래를 압입, 시공하여 큰 직경의 다져진 모래말뚝을 조성하는 공법으로 사질지반과 점성토지반에 모두 적용되는 장점이 있다. SCP공법에 의해 치환된 부분은 지진하중 작용 시 지반내부에 발생하는 큰 전단응력을 소산시키는 역할을 함으로써 보강지반은 동일한 진동하중에 대해 더 큰 저항력을 발휘한다. 이처럼 지반면적에 대한 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의는 치환율( $a_s$ ) 개념에 따라 성토 등 상부구조물이 비교적 경량인 경우에는 치환율이 20%~40%정도인 “저치환율 SCP공법”이 많이 사용되며, 항만공사 등 모래말뚝 자체로 지지력, 전단강도 증가효과 등을 발휘해야 하는 경우에는 치환율이 70%정도인 “고치환율 SCP공법”이 사용된다. 최근에는 고치환율 SCP공법은 모래의 공급부족현상으로 인하여 “저치환율 SCP공법”으로 바뀌는 추세이다. 본 연구의 대상 매립부지는 그림 3과 같이 상부 준설패립층과 하부 원지반 점성토층으로 이루어져 있어 사질지반과 점토지반을 동시에 지반개량을 수행하는 목적으로 SCP공법과 프리로딩(pre-loading, P/L)공법이 병행되어 압밀침하량 검토를 통해 잔류침하량이 허용치(10cm)에 만족하도록 하였다.

또한 SCP공법 적용구간은 응력집중효과를 고려하여 침하량을 산정하였다. 즉, SCP가 타설된 연약지반은 복합지반으로 구성재료의 강성이 서로 다르므로 상대적으로 강성이 큰 SCP 상부에 더 큰 응력이 작용하는 응력집중 현상이 발생하며 이에 적절한 응력분담비를 설계하여 침하량을 산정하였다.

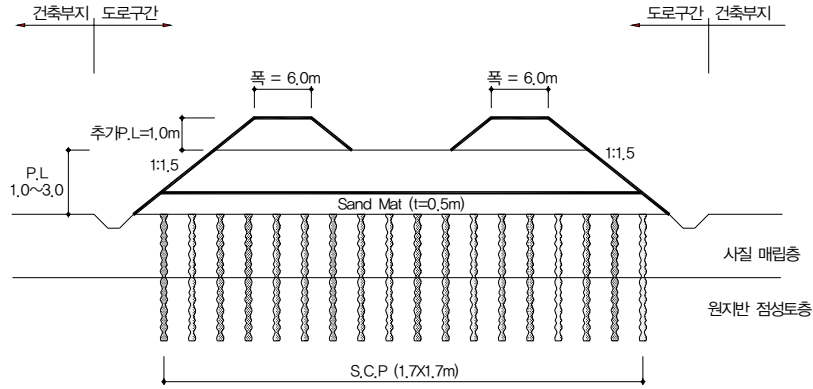


그림 3. 모래다짐말뚝(SCP)공법의 설계 단면도

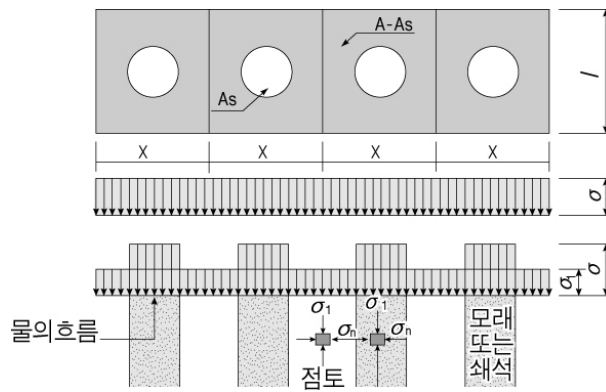


그림 4. 복합지반의 응력집중효과 모식도

SCP공법은 복합지반에 의한 개량원리로 그림 4와 같이 복합지반위에 평균응력  $\sigma$ 가 재하되어 지반반력으로 말뚝에  $\sigma_s$ , 점성토에  $\sigma_c$ 의 응력이 발생하고, 각각의 면적  $A_s$ ,  $A_c$ 의 범위내에서 응력이 일정하다고 하면 식 (1)과 식 (2)가 얻어진다.

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (1)$$

$$\sigma A = n \sigma_c A_s + n \sigma_c A_c = \sigma_c (n A_s + A_c) \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_s$ 는 모래다짐말뚝 응력,  $\sigma_c$ 는 점성토 응력,  $a_s$ 는 치환율( $A_s/A$ ),  $n$ 는 응력분담비( $\sigma_s/\sigma_c$ )이고,  $A$ 는 분담 면적,  $A_s$ 는 모래다짐말뚝면적,  $A_c$ 는 점성토 면적,  $\sigma$ 는 상재하중이다.

이것으로 다음 식 (3), 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\mu_s(\text{말뚝}) = \frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{n \cdot A}{n \cdot A_s + A_c} = \frac{n}{1 + (n-1) \cdot a_s} \quad (3)$$

$$\mu_s(\text{점토}) = \frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{n \cdot A}{n \cdot A_s + A_c} = \frac{1}{1 + (n-1) \cdot a_s} \quad (4)$$

여기서,  $\mu_c$ 와  $\mu_s$ 는 상재하중에 의해 각각 점토층과 모래 말뚝에 발생하는 응력비이다. 따라서 응력비는 식 (5)와 같다.

$$\mu_s \cdot a_s + \mu_c(1 - a_s) = 1 \quad (5)$$

식 (3), 식 (4), 그리고 식 (5)는 복합지반에 대한 기본적인 식이 된다.

SCP공법의 복합지반의 거동해석은 모래말뚝이 분담하는 등가유효원주(unit cell)를 대상으로 등가원주의 직경은 정삼각형 배치와 정사각형 배치로 이루어진다. 치환율( $a_s$ )은 원지반을 1.0로 하여 SCP 체적비로 개량정도를 나타내는 정수로서 일반적으로 사질토나 육상점성토의 개량에는 0.3이하, 해상에서는 0.3~0.8이 적용된다. 본 연구의 대상지반의 SCP공법은 정사각형 배치로 간격은 1.7m×1.7m를 적용하였고 개량기간은 그림 5와 같이 개량심도별로 압밀도에 따른 지반개량시간을 검토하여 90%압밀을 만족하는 기간은 최대 2개월 정도인 것으로 설계되었다. 이때의 SCP공법의 치환율( $a_s$ )은 그림 6과 같이  $A_s = 0.13$ 으로 설계되었다.

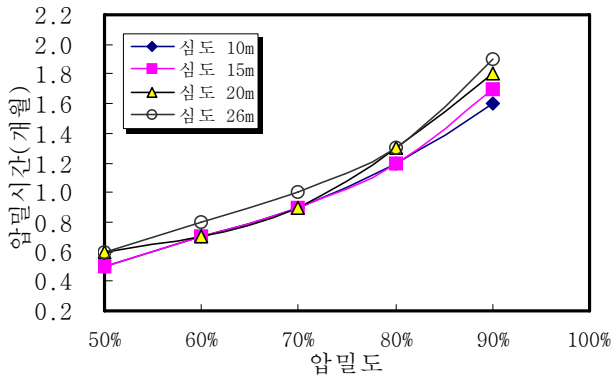


그림 5. SCP의 개량심도별 압밀도와 개량시간

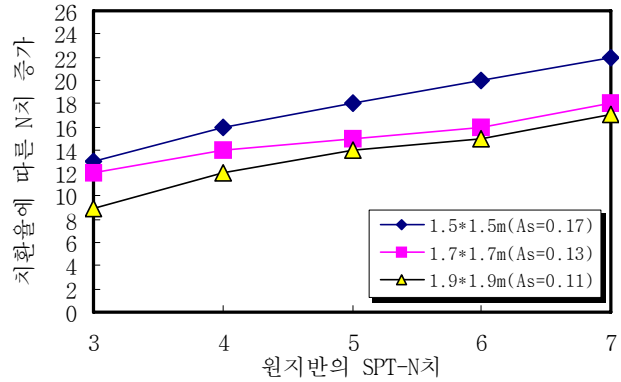


그림 6. 치환율에 따른 N치 증가

SCP공법 타설 후 및 프리로딩에 의한 연약지반 개량완료 후 대상 개량층에 대하여 확인보링과 표준관입시험(SPT) 등을 실시하여 설계 시 개량목표를 확인하였다. 이때의 확인보링의 위치는 말뚝중심 및 말뚝과 말뚝사이에서 각각 1회 수행한다. 상부 연약사질토층은 N치가 4~10정도로 SCP의 간격은 1.7m×1.7m로 적용 시 증가된 N치가 14이상으로 액상화 및 지지력 문제는 없었다.

#### 4. 액상화 평가방법

SCP공법으로 지반을 개량할 경우 액상화 평가는 식(6)과 같이 지진에 의한 전단응력비(cyclic stress ratio, CSR)와 지반의 액상화 저항응력비(cyclic resistance ratio, CRR)와의 비교를 통해 안전율  $F_s$ 를 산정하여 액상화를 평가한다.

$$F_s = \frac{CRR(\tau_1 / \sigma'_v)}{CSR(\tau_d / \sigma'_v)} > 1.5 \quad (6)$$

액상화에 대한 안전율은 지진에 의해 발생하는 전단응력비(CSR)는 대상지반의 진동전단응력( $\tau_d$ )와 액상화에 저항할 수 있는 지반의 전단응력( $\tau_1$ )의 비로 정의된다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{\alpha_{max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (7)$$

여기서,  $\tau_d$ : 진동전단응력,  $g$ : 중력 가속도

$\sigma_v$ : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 상재압

$\sigma'_v$ : 액상화를 평가하고자 하는 깊이에서의 유효상재압

$\alpha_{max}$ : 액상화 평가지층의 최대지반가속도

지진 시 발생하는 전단저항비(CSR)는 대상지반의 지진응답해석으로 산정한 최대가속도를 사용하여 산정할 수 있고, 지반의 액상화 저항능력비(CRR)는 현장에서 얻어진 표준관입저항치(N치)를 이용방법, 콘관입시험치( $q_c$ )를 이용한 간편법, 전단파속도( $V_s$ )를 이용한 간편법 등으로 산정된다.

본 연구에서는 국내 여건을 고려하여 지진 규모(M) 6.5에서의 지진응답해석과 지진기록을 토대로 최대 지반가속도를 이용하여 송도신도시 매립부지에 대해 전단응력비를 산정하였다. 그리고 수정 Seed and Idriss(1985)의 간편법에 기초한 표준관입시험(SPT)의 N치를 이용하여 액상화 안전율 산정하였다. 지진응답해석은 일반적으로 쓰이는 상용 프로그램인 SHAKE91을 이용하였으며 해석에 사용된 지진파는 단주기 성분이 우세한 Ofunato향의 지진기록과 장주기 성분이 우세한 Hachinohe향의 실지진 기록을 이용하고 표준설계 응답스펙트럼 기준을 만족하는 인공지진파를 이용하였다.

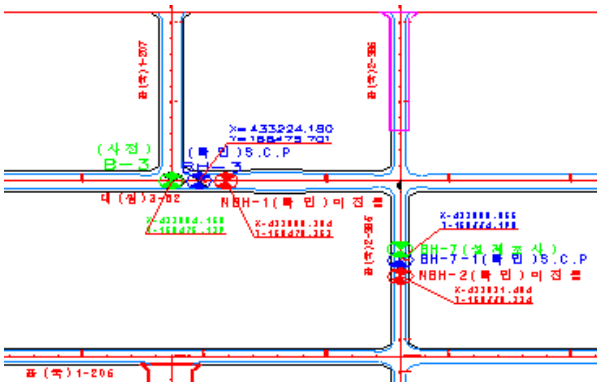


그림 7. SCP공법의 개량효과 평가 위치도 (NISC-Zone 6)

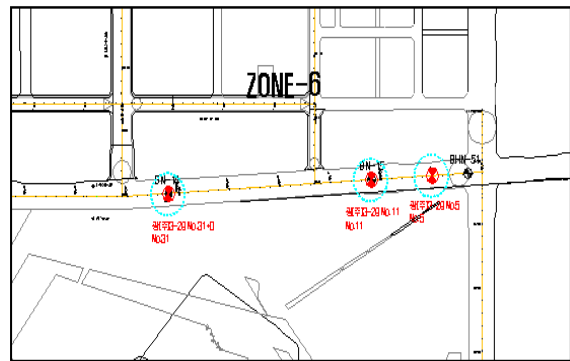


그림 8. SCP공법의 개량효과 평가 위치도 (NISC-Zone 2)

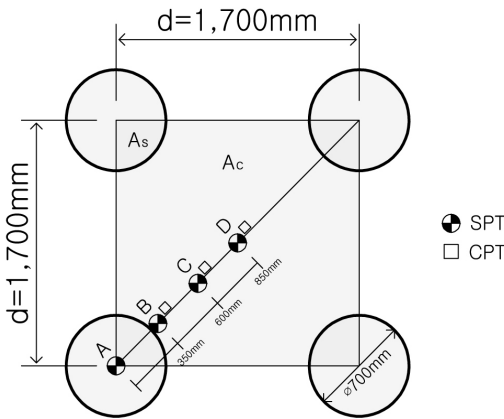


그림 9. SCP공법의 개량효과 평가 계획

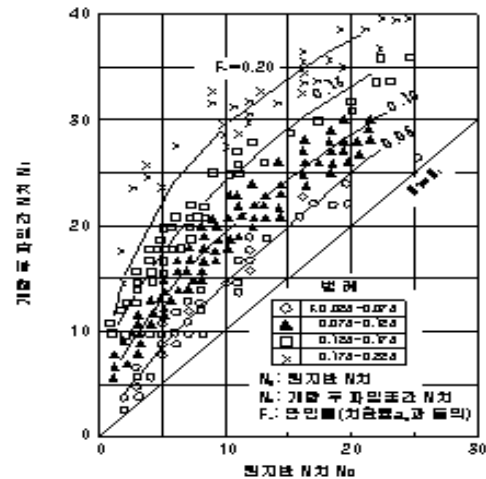


그림 10. 원지반 N치와 파일간 N치와의 관계

특히, 송도 NSIC지역의 zone 6구역에서 그림 7의 2개소와 zone 2구역의 3개소(그림 8)에 대해 그림 9와 같이 SCP보강에 의한 복합지반의 개량체 중심과 말뚝과 주변지반의 경계 그리고 말뚝사이의 주변지반의 위치를 350mm, 600mm, 850mm로 달리하여 수행한 SPT-N값을 이용하여 액상화 안전율을 산정하고 지반개량효과와 액상화 저항감효과를 평가하였다. 이는 SCP공법으로 지반을 개량할 경우 전단저항비(CRR)를 증가시키는 방법으로 설계하기 위하여 기준 안전율을 확보하기 위한 전단저항비(CRR)를 결정하고 이에 해당하는 목표 N값을 결정, 다짐 말뚝의 치환율을 결정한다. 그러나 그림 10과 같이 현장에서 시공된 모래다짐말뚝에 세립분 함유량을 20% 기준으로

적정 치환율을 산정하도록 제안하고 있으며 세립분 함유량 20% 이상인 경우 개량효과가 급격히 저하되는 양상을 보인바와 같이 준설패립층에 세립토가 많이 발달경우에 있어 지반개량 및 액상화 저감효과를 고려한 다짐도 관리기준이 필요한 실정이다.

## 5. 시험결과 및 분석

### 5.1 SCP 지반의 지반개량효과

본 연구부지의 SCP공법이 적용된 지반의 개량효과를 평가하고 액상화 저감효과를 확인하기 위하여 SCP공법 개량 전·후에 수행한 현장시험결과를 그림 11~15와 같이 도시하였다. 특히, 그림 10, 11에서는 SCP공법의 지반개량효과를 효율적으로 평가하기 위하여 그림 9와 같이 모래말뚝 중심(A)와 말뚝과 말뚝사이의 원지반에 350mm, 600mm, 850mm간격으로 수행한 그림 11(a)표준관입시험결과 및 그림 11(b)피에조콘관입시험(CPT)결과를 비교하였다.

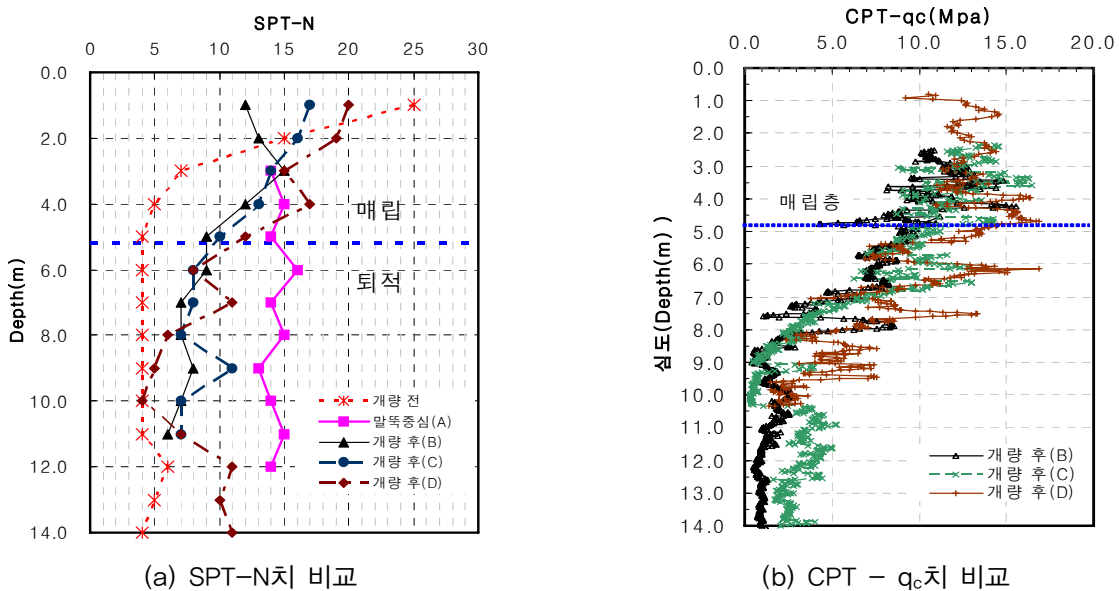
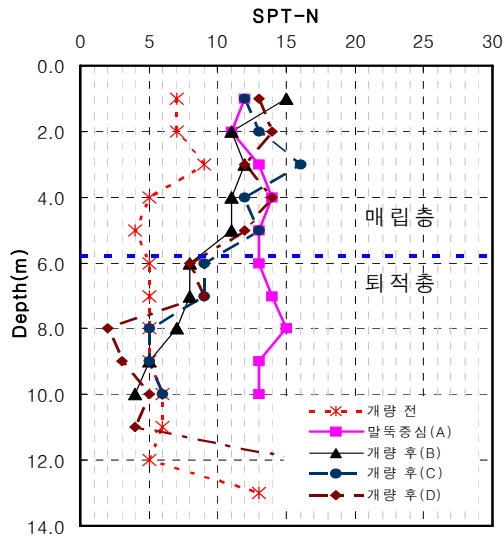


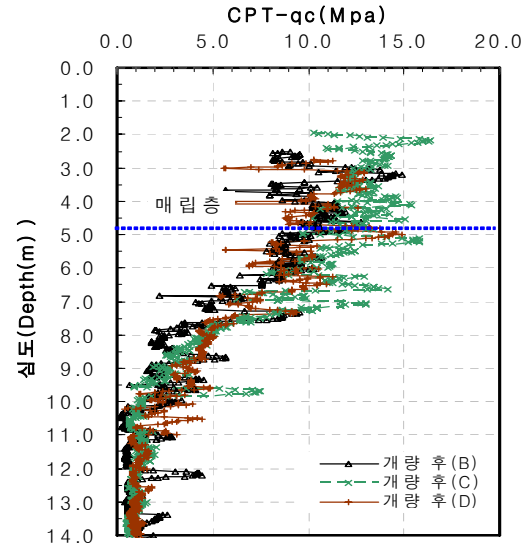
그림 11. SCP공법의 지반 개량 전·후의 SPT-"N" 비교 (zone 2-NBH-1)

그림과 같이 SCP개량 전의 SPT-N치보다 SCP 개량후의 SPT-N치가 크게 증가되었으나, 전반적으로 그림 6의 증가 N치 관리기준인 14에 다소 미달되었다. 이는 준설패립층내에 실트 및 배밴드형 점토층이 존재하는 경우 등의 세립토의 영향으로 SPT-N치가 다소 낮게 나타났다. 그리고 말뚝(SCP개량체) 중심 및 말뚝과 말뚝 사이에서 수행한 SPT-N와 CPT- $q_c$ 값을 보면, SCP개량 후의 개량정도는 말뚝중심에서의 SPT-N치는 11~16정도로 비교적 균일한 값을 보이는 반면, 말뚝에 근접한 B(350mm)지점의 보다 C(600mm)지점과 D(850mm)지점의 N치와  $q_c$ 값이 다소 크게 증가하였다. 이는 말뚝타설 시의 주변 지반에 교란으로 간극수압이 압밀하중으로 작용하여 스미어 영향과 배수저항에 의해 압밀지연 현상이 발생하기 때문으로 말뚝 주변지반의 압밀특성에 미치는 영향으로 사료된다. 이와 같이 말뚝 주변의 교란영향과 준설패립층내의 잔존하는 세립토의 영향을 고려하여 SCP공법의 개량목표를 확보하지 못할 경우 현장 여건을 감안하면 준설패립층의 다짐도 개선방안이 필요하였다.





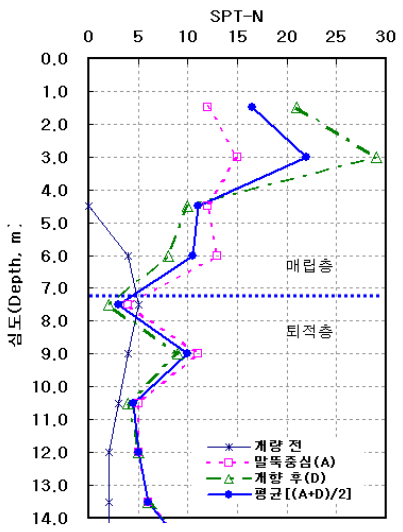
a) SPT-N치 비교



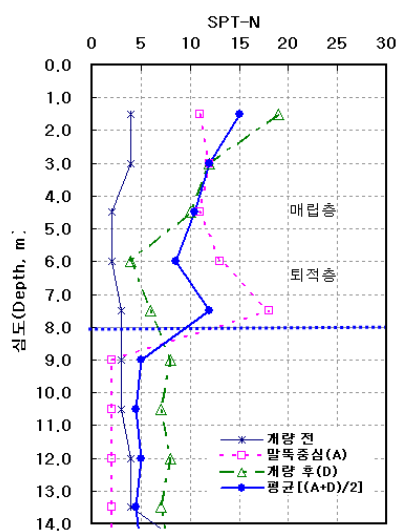
b) CPT - qc치 비교

그림 12. SCP공법의 지반 개량 전·후의 SPT-"N" 비교 (zone 2-NBH-2)

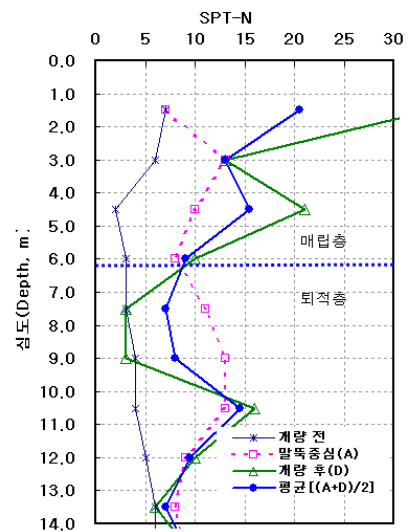
그림 13은 zone -6구역에서 말뚝 중심과 말뚝과 말뚝사이(개량 후 D)에서 수행한 SCP공법의 개량 전·후의 SPT-N치를 비교한 결과이고 그림 13은 같은 구역에서 말뚝과 말뚝사이에서 수행한 SCP공법의 개량 후의 CPT-qc값을 비교한 결과이다.



a) No.5



b) No.11



c) N,o31

그림 13. SCP개량체 및 개량 전·후의 SPT-"N" 비교(Zone 6)

그림 13과 같이 준설패립층에서 개량전의 SPT-N치 2~7보다 SCP 개량후(D)의 SPT-N치가 4~29로 크게 증가하였으며 말뚝중심에서의 SPT-N치는 7~18정도였다. 이처럼 SCP공법의 복합지반의 개량원리를 고려하여 말뚝 중심과 말뚝과 말뚝사이(개량 후 D)에서 수행한 SPT-N치의 평균한 값(굵은 선)을 보면 매립층에서 개량 후 N치는 평균 12이상을 보인다. 또 준설패립층의 콘관입저항치( $q_c$ )는 그림 14와 같이 밴드형 점토층을 제외하면 전반적으로 약 7MPa이상을 보였다.

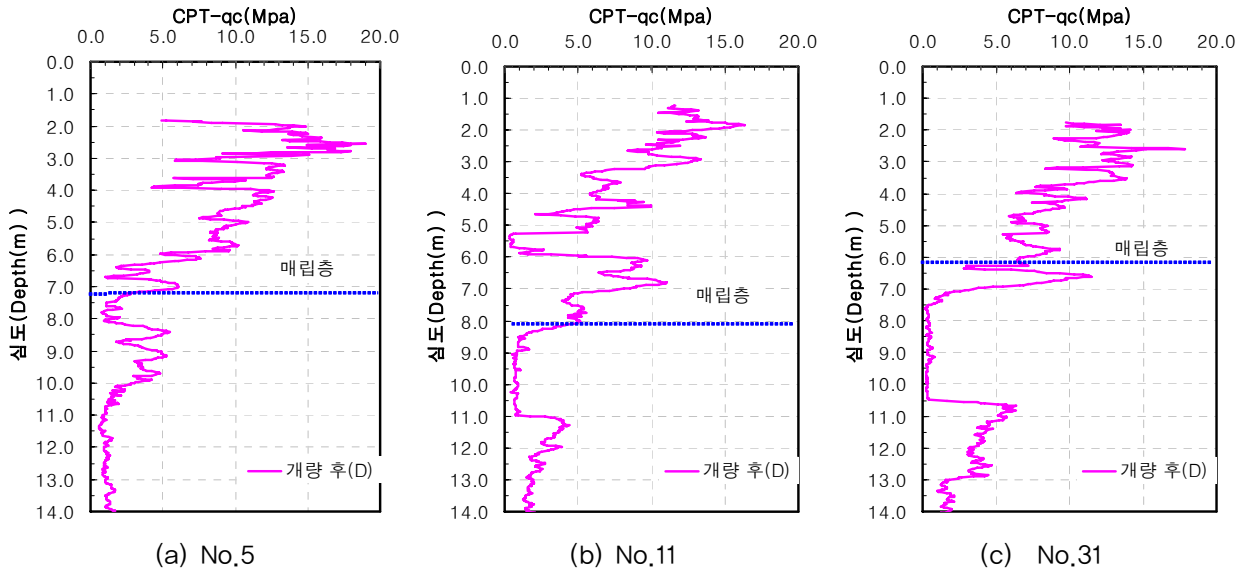


그림 14. SCP개량체 및 개량 전·후의 CPT- $q_c$  비교 (zone 6)

## 5.2 SCP 지반의 액상화 저감효과

SCP공법으로 개량된 복합지반의 말뚝 중심에서부터 말뚝과 말뚝사이에 수행한 SPT-N치를 이용하여 액상화 저감효과를 평가하였다. SCP말뚝 중심과 말뚝사이의 주변지반의 거리에 따라 350mm, 600mm, 850mm로 달리하여 수행한 SPT-N값을 이용하여 액상화 안전율을 산정하였다. 그림 15, 그림 16은 각각 (a)단주기 지진파, (b)장주기 지진파, (c)인공지진파를 이용하여 액상화 안전율 산정하였다.

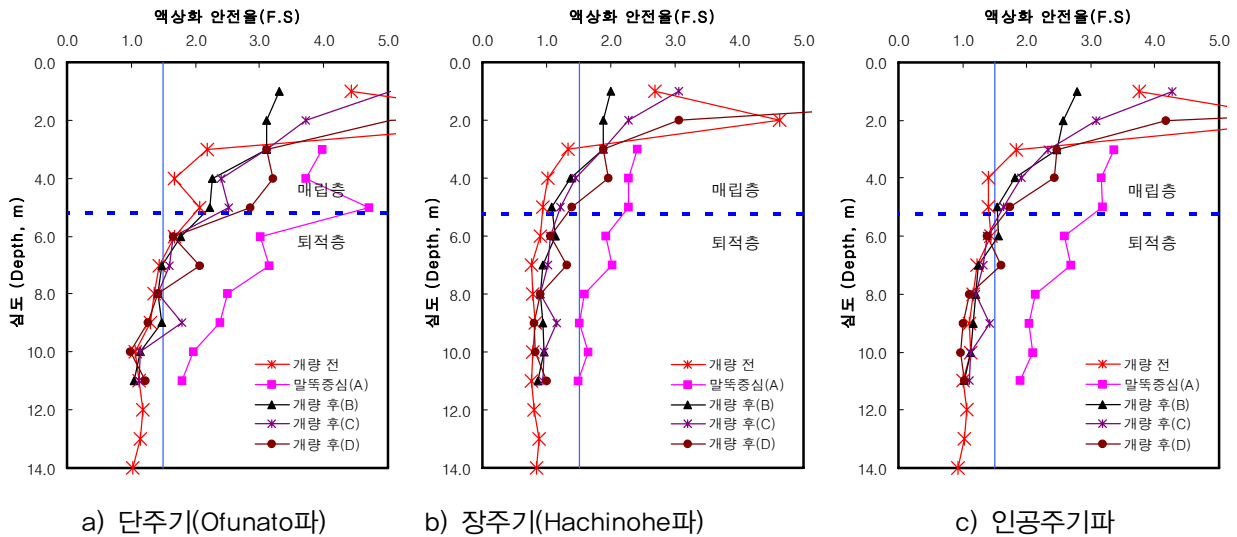


그림 15. SCP공법 개량 전·후의 액상화 안전율 비교(Zone ; NBH-1)

그림 15, 그림 16에서 보면 준설매립층에 대한 액상화는 단주기의 Ofunato 지진파, 인공지진파보다는 장주기의 Hachinohe 지진파에 의한 증폭현상이 더 크게 나타나 안전율이 크게 산정되었다. 그리고 SCP공법 개량 전의 액상화 안전율보다 SCP공법 개량 후의 안전율은 크게 증가하였으며, 말뚝의 중심거리에 따른 액상화 안전율은 말뚝과 지반의 경계부인 개량 후 B지점에서 안전율이 가장 작았으며, 말뚝 중심에서 거리가 먼 곳 개량 후 C지점, D지점에서 더 큰 안전율을 보인다. 이는 말뚝 주변의 교란영향과 준설매립층내의 세립토의 영향이 다짐정도에 미치기 때문으로 사료됨에 따라 말뚝 중심과 말뚝과 말뚝사이의 원지반에 대해 각각 SPT-N치를 측정하고 이를



평균하여 관리하는 것이 필요하다.

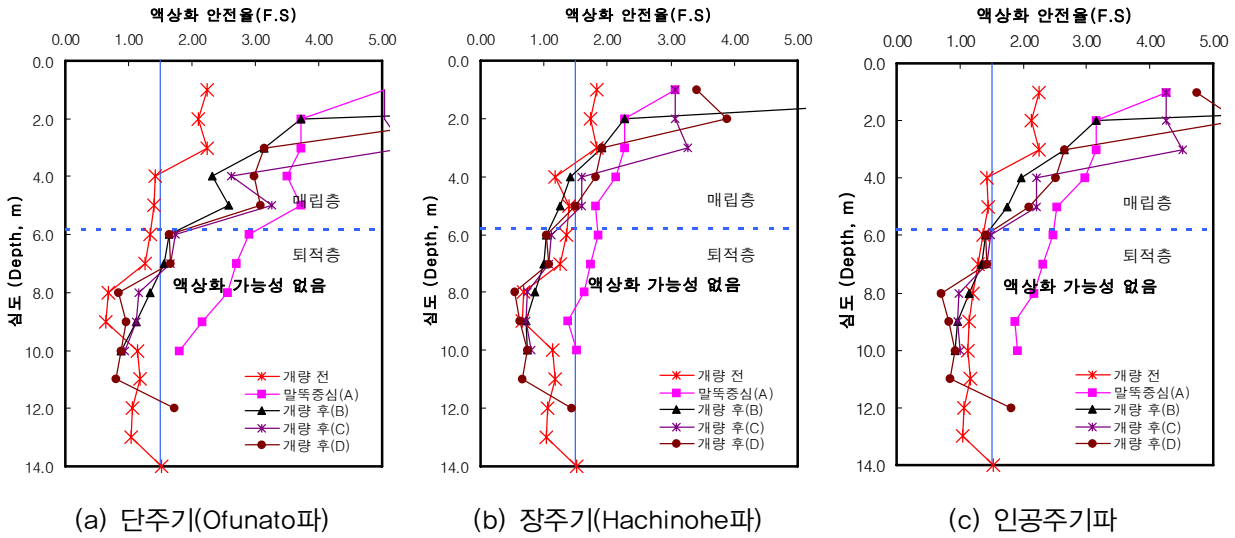


그림 16. SCP공법 개량 전·후의 액상화 안전율 비교(zone 2 ; NBH-2)

그림 17은 인공지진파를 이용하여 간편법에 의하여 액상화 예측결과로 준설매립층의 SCP개량 전의 액상화 안전율은 (a)의 0.84~1.07, (b)의 0.78~1.51, (c)의 0.95~2.21로 분석되어 기준안전율(FS =1.5) 이하의 낮은 안전율을 보였으며 SCP 개량 후 안전율이 1.5이상으로 나타나 SCP공법으로 인한 액상화저감효과는 크게 나타났다.

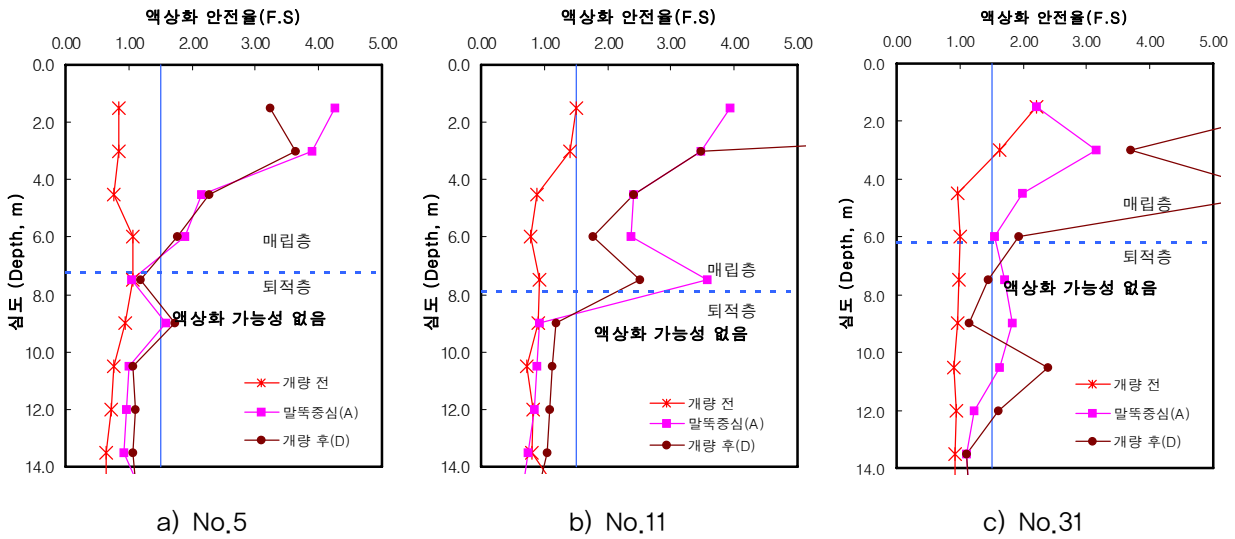


그림 17. SCP공법 개량 전·후의 액상화 안전율 비교(zone 6)

### 5.3 SCP 지반의 다짐도 개선방안

SCP공법의 개량효과에 대해서 많은 문헌이 있으나 대표적인 결과로서 개량 전·후의 SPT-N의 상관관계는 그림 10에 언급한 바와 같이 개량지반이 세립분 함유량이 많은 경우 표준관입시험결과가 초기 목표이하가 되는 경우가 발생하며 세립분 함유량에 따른 보정 및 상세평가 등에 의하여 액상화 기준안전율에 만족하도록 이에 대응할 필요가 있다. 본 연구 대상부지는 SCP공법 및 프리로딩에 의한 연약지반개량이 완료된 상태에서 대상 개량층에 대한 확인보링, 시험을 수행한 경우로 설계 시 개량목표를 현장 지반 특성을 고려하여 보완할 수 있었

다. SCP공법의 지반개량 후 지반 지지력과 액상화 방지를 고려하여 복합지반의 N값은 평균 12이상으로 관리하고, 2개소의 조사결과가 기준치를 모두 만족하면 해당 시공구역의 말뚝은 모두 합격으로 간주하나 2개소의 조사결과 중 1개소라도 기준치를 만족하지 못하면 이 지역을 재시공 또는 보강시공하였다. 또한 확인보링은 SPT-N치를 기본으로 하나 이와 동등한 다른 시험 방법(CPT 또는 dynamic cone test 등)을 사용하여 품질시험을 강화하였다.

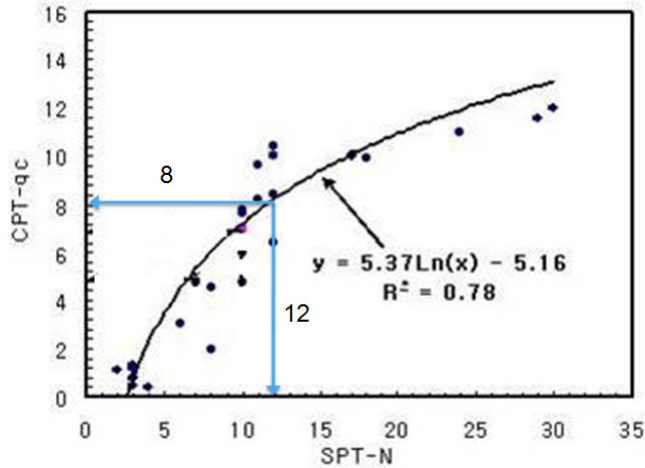


그림 18. SCP의 지반개량 후의 SPT-N와 CPT-qc와의 관계

그림 18은 상기 구역에서 수행한 시험결과를 토대로 SPT-N치와 CPT-qc관계를 분석하여 각각의 SPT 값에 상응하는 CPT-qc값을 산정하였다. 그림과 같이 SPT-N치에 해당하는 CPT-qc다짐관리 기준으로 N치 12이상일 때 CPT-qc는 8MPa이상으로 설정되었다. 이때의 개량심도 이내에서 원지반이 나타날 때는 개량 심도를 매립층의 깊이까지로 제한하며 복합지반의 원리를 고려하여 말뚝중심에 1회, 말뚝과 말뚝사이에 1회를 수행하여 평균값을 적용하였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 송도국제도시의 준설패립지반에 적용된 SCP공법의 개량 전·후에 수행한 품질시험을 통해 연약지반의 지반개량 및 액상화저감효과를 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구의 대상부지는 SCP공법 및 프리로딩에 의한 연약지반개량이 완료된 상태로 SCP공법의 개량효과는 준설패립층의 실트 및 밴드형 점토층 등의 세립토의 영향으로 개량목표 N치보다 부분적으로 개형효과가 저하됨에 따라 개량목표 수정이 필요하다.
2. SCP공법의 복합지반의 말뚝중심과 말뚝중심의 거리에 따른 지반개량 액상화 저감효과는 전반적으로 말뚝과 지반의 경계부가 지반개량정도와 액상화 안전율이 가장 작았으며, 말뚝 중심에서 거리가 먼 곳에서 더 큰 개량효과와 액상화에 안전하였다.
3. SCP공법의 지반개량 후 지반 지지력과 액상화 방지를 고려할 때 복합지반의 N값은 평균 12이상으로 관리하고, CPT-qc는 8MPa이상으로 관리하는 것이 고품질 확보에 보다 합리적으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 인천경제자유구역청, (2005), “송도 1공구 기반시설 기본 및 실시설계보고서”.
2. 김종국, 채영수, (2006), “동다짐공법이 적용된 준설패립지반의 개량효과평가에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집

문집, 22(5), pp.13~26.

3. 해양수산부, (1999), “항만 및 어항시설의 내진설계표준서”, 한국해양연구소.
4. Douglas, D. J., (1983), "The Standard Penetration Test", Proceedings of an Extension Course on Insitu Testing for Geotechnical Investigations, Sydney, May-June, pp.21~31.
5. Gibbs, H. J., Holtz, W. G., (1957), "Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing", Proceedings of 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, London, pp.35~39.
6. Holtz, W. G., Gibbs, H. J., (1979), "Discussion of SPT and Relative Density in Coarse Sand", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105(GT3), March, pp.439~441.
7. Port and Harbour Research Institute Editor, "Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land"
8. Robertson, P. K., Campanella, R. G., Wightman, A., (1983) "SPT-CPT Correlations", Journal of the Geotechnical Division, ASCE, 109(11), pp.1449~1459.
9. Seed, H. B., Idriss, I. M., Arango, I., (1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 109(3), pp.458~482.