

준설매립지반의 세립토가 SCP공법의 치환율에 미치는 영향 Effect of Replacement Ratio of Sand Compaction Pile of Fine-Grained Soils With Reclaimed Land

김종국¹⁾, Jong-Kook Kim, 윤원섭²⁾, Won-Sub Yoon, 채영수³⁾, Young-Soo Chae, 최인걸⁴⁾, In-Gul Choi

- 1) 한국건설품질시험원 지반공학센터 팀장, Chief of Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis
- 2) 수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon
- 3) 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon
- 4) (주)유신코퍼레이션 인천사무소 전무이사, Director of Incheon Office, Yooshin Engineering Corporation

SYNOPSIS : The ground work with of the research is constructed by a SCP method to improve clay ground in the sedimentary layer and sand ground in the reclamation layer at the same time as a reclaimed soft ground by reclaiming deep depth. Improved fine-grained soils in the sand ground decrease the ground improvement effect and have an influence on replacement ratio of SCP method. Fine-Grained soils which advances in sand ground reduces a from improvement effect, Makes affect in replacement ratio of SCP method. In this study, consideration about replacement ratio of sand ground, Tried to observe affects in replacement ratio of fine-grained soils SCP method of dredging reclamation ground. The result, replacement ratio which follows in the Japan Geotechnical Society experience-chart(1988) recording where fine-grained soils content will increase feebly, was visible the aspect which increases progressively, replacement ratio in compliance with Gibbs and Holts(1973) methods according to fine-grained soils increase is visible the tendency which decreases gradually with the enemy. Specially, according to case fine-grained content of Mizuno(1987) methods increases, replacement ratio suddenly was showing the trend which rises from of 50% and according to fine-grained soils increase was overestimated.

Keywords : sand compaction pile, replacement ratio, fine-grained soils, fines content

1. 서론

최근 신공항 및 신항만을 비롯한 많은 산업단지 등의 해안 지역을 준설매립하여 부지를 조성하는 사례가 늘어나고 있는 실정이다. 준설매립지반의 증가로 점차 사질지반에 대한 다짐도 증진 및 액상화 저감효과 등의 지반 개량에 대한 관심이 대두되고 있다. 느슨한 사질토로 지반을 매립할 경우 작은 규모의 지진에 의해서도 액상화 현상이 발생하여 지반의 침하 및 구조물의 붕괴 등의 큰 지진피해가 발생할 수 있기 때문에 사질지반과 원지반 점성토의 침하대책을 동시에 만족하여야 한다. 따라서 인천 송도국제도시의 공유수면 매립구간의 지반개량은 퇴적층내의 연약지반을 개량하기 위하여 플라스틱 보드드레인(plastic board drain, PBD)공법과 프리로딩공법이 적용되었고, 준설매립지반의 액상화 대책공법으로는 유압햄머다짐, 동다짐공법이 적용되었으며, 원지반과 준설매립층을 동시에 개량하기 위하여 모래다짐말뚝((sand compaction pile, SCP)공법과 프리로딩공법 등이 적용되었다. 그 동안 국내의 SCP 설계는 주로 점토지반의 연약지반에서 이루어 왔고, 사질지반에 대한 설계 및 시공사례는 미미한 실적으로 준설매립지반에 적합한 새로운 SCP 설계법이 필요한 실정이다. 특히, 준설매립지반은 세립분이 발달된 실트 및 실트질 모래가 혼입된 사질지반의 특성을 보이고 있어 세립토가 SCP공법의 치

환율에 영향을 미치게 된다.

따라서, 본 연구에서는 준설매립지반을 대상으로 준설토의 재료 특성시험과 SCP공법의 개량 전·후의 표준관입시험을 실시하였으며, 준설매립지반에 함유된 세립토가 SCP공법의 치환율에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 사질지반 SCP의 치환율 산정방법

사질지반에서의 SCP공법은 지반의 입도특성과 유효 상재압에 따라 다르나 개념상으로는 N 치와 e 관계를 통해 지반의 지지력 및 유동화 현상을 규명하게 되며, 간극비 감소와 압입을 그리고 파일(pile)의 간격을 결정하는데 사용한다. 사질지반의 설계법으로는 Gibbs-Holtz(1973)방법, Mizuno(1987)방법 그리고 일본지반공학회의 경험도표(1988)를 이용하는 방법 등이 이용된다.

2.1 Gibbs-Holtz(1973)의 제안 방법

이 방법은 $N-D_r-e$ 와의 관계도표와 그림 1의 입경·입도 그리고 e_{max} 와 e_{min} 의 관계를 이용하는 방법으로 사질토의 입도시험 결과로부터 얻은 통과중량 백분율 60%, 입경 D_{60} 및 균등계수(C_U)를 매개로 하여 e_{max} 와 e_{min} 를 추정하고 이것으로 $e-D_r$ 관계를 추정하여 상재압의 구속조건을 고려하여 얻은 $N-D_r$ 의 관계를 사용하여 치환율(a_s)을 산정한다. 이 때 N 치에서 e 를 구할 때 유효 상재압을 가정할 필요가 있지만 실제 설계에서는 편의적으로 개량대상층 심도의 1/2 또는 1/3가량의 흙피복압을 유효 상재압으로 취하기도 한다.

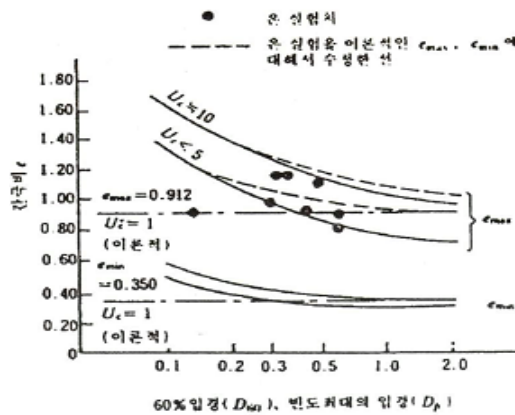


그림 1. 입경·입도 및 e_{max} 와 e_{min} 의 관계

그리고, 그림 2의 N 치-상재압-간극비 관계하에서 N_o , N_1 의 변화에 따른 Δe 를 구하여 치환율(a_s)로부터 말뚝 간격을 결정한다.

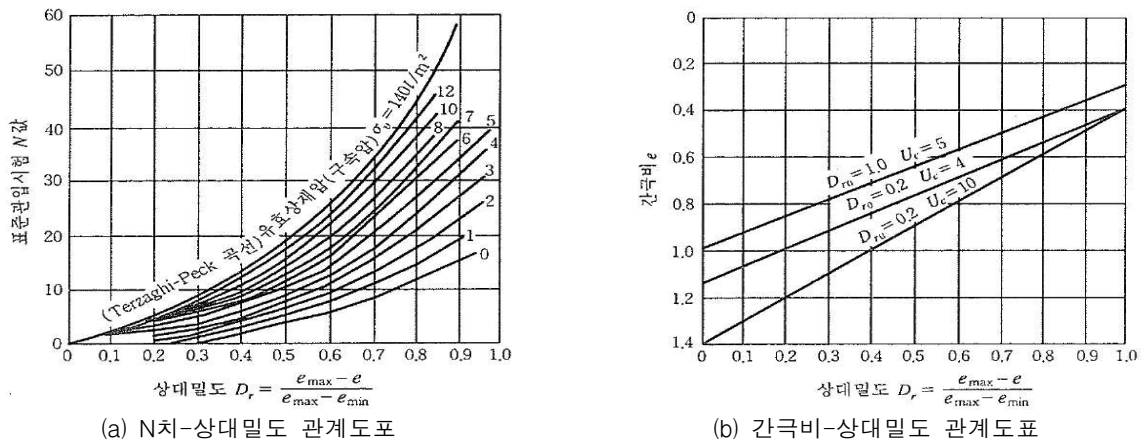


그림 2. 모래다짐말뚝에서의 $N-D_r-e$ 관계도표

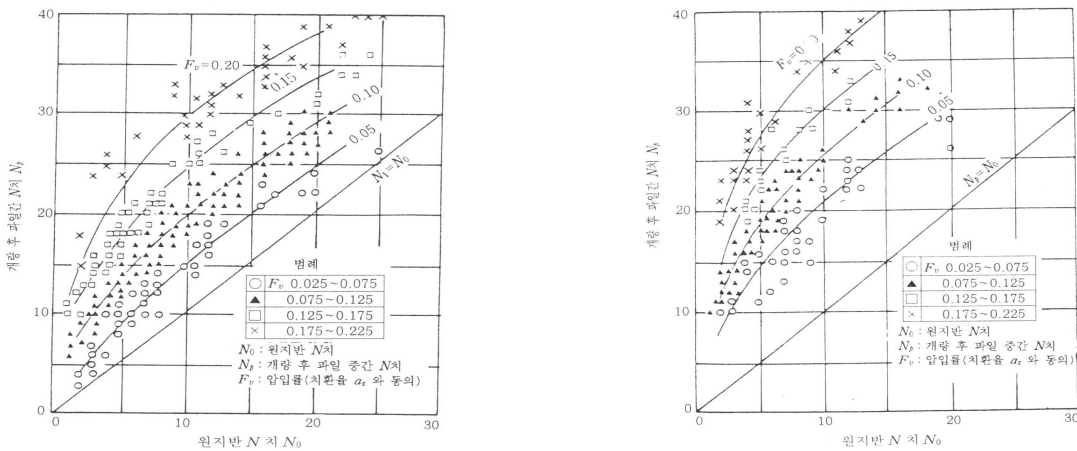
2.2 Mizuno(1987) 제안방법

이 방법은 근본적으로 Gibbs-Holts의 방법과 같지만 세립분으로 인한 개량효과의 저하를 고려하였다.

순서	추정값	산정방법
① 단계	e_{\max}, e_{\min}	$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0, e_{\min} = 0.008F_c + 0.6$ F_c : 세립분 함유량
② 단계	D_{ro}, e_o	$D_{ro} = 21 \sqrt{N_o / (0.7 + \sigma'_v)}, e_o = e_{\max} - \frac{D_{ro}}{100}(e_{\max} - e_{\min})$
③ 단계	감소계수(β)	$\beta = 1.05 - 0.5 \log F_c$
④ 단계	수정 N 치(N'_1)	$N'_1 = N_o + \frac{(N_1 - N_o)}{\beta}$
⑤ 단계	e_1	$e_1 = e_{\max} - \frac{D_{ro}}{100}(e_{\max} - e_{\min}), D'_{ro} = 21 \sqrt{N'_1 / (0.7 + \sigma'_v)}$
⑥ 단계	치환율(a_s)	$a_s = \frac{e_o - e_1}{1 + e_o}$

2.3 일본지반공학회(1988)의 경험도표 이용방법

일본지반공학회(1988)의 사질지반에 적용된 SCP공법 설계 시 원지반 N 치와 파일간 N 치와의 관계 및 원지반 N 치와 파일내 N 치와의 관계를 통해 치환율을 산정하여 SCP배치 간격을 결정하는 경험도표는 그림 3과 같다.



(a) 원지반 N' 와 파일간 N' 의 관계

(b) 원지반 N' 와 파일내 N' 의 관계

그림 3. 경험도표를 이용한 방법(일본지반공학회, 1988)

일본지반공학회(1988)의 경험도표는 N 치에 의해 원지반의 지지력 및 침하량 산정하여 개량여부를 결정하게 되며, 지지력 및 침하량 산정식은 식 (1)과 식 (2)와 같다. 소요 N 치를 산정(N_1)하여 원지반 N 치에서 N_o 와 N_1 으로 그림 3을 이용하여 치환율(a_s)을 산정하여 SCP 간격을 구한다.

$$q_{ult} = \beta \cdot B \cdot \gamma_1 \cdot N_v + \gamma_2 \cdot D_v \cdot N_q \quad (\text{Terzaghi}) \quad (1)$$

$$S = 0.04 \cdot \frac{P_0'}{N} \cdot H \cdot \log \frac{P_0' + \Delta P}{P_0'} \quad (2)$$

여기서, S_i 는 즉시 침하량(cm), N 은 사질토의 N 값, H 는 층두께(cm), P_0' 은 유효 상재하중(tf/m^2), ΔP 는 재하중에 의한 응력 증가분(tf/m^2)이다.

3. SCP의 개량효과 평가시험

본 연구에서는 원지반 및 준설매립토에 대하여 입도시험 등의 물리·역학시험을 실시하였고, 현장에서는 표준관입시험과 현장 계측기를 설치하여 대상지반의 SCP거동 특성을 평가하였으며, 주요 시험항목 및 시험횟수는 표 2와 같다.

표 2. 주요 시험항목 및 시험 수량

구분	시험항목		시험목적	시험횟수	비고
실내시험	함수비		기본 물리적 특성	257 회	개량 전
	비 중			257 회	
	액성한계			257 회	
	소성한계			257 회	
	입도시험		입도특성 평가	257회	개량 전
	강도시험		비배수전단강도특성 평가	18 회	개량 전·후
	압밀시험		압밀 침하 특성평가	18 회	개량 전·후
진동삼축시험		액상화 특성평가	93 회	개량 전	
현장시험	표준관입시험 (SPT)	원지반	액상화, 지반개량효과	18개소/179회	개량 전
		파일간*		18개소/179회	개량 후
		파일내**		18개소/179회	개량 후
	정적콘관입시험(CPT)		지반개량효과	18개소	개량 후

주1) * : 파일간 ; SCP와 SCP 사이, 주2) ** : 파일내 ; SCP의 중심

4. SCP의 치환율 산정결과 및 분석

4.1 SCP공법의 개량 전후의 SPT-N치 변화

본 연구에서는 준설매립층을 대상으로 SCP공법 적용에 따른 지반강도(다짐도)증가 여부를 통해 지반개량효과를 살펴보기 위하여 표준관입시험을 수행하였으며, SCP 개량 전 원지반과 SCP 개량 후의 파일간, 파일내의 N 값을 평가하였다. 준설매립지반의 SCP 개량 전·후의 원지반과 파일간, 파일내의 매립심도에 따른 N 치는 그림 4와 같다. 그림 4a)와 같이 N 치는 약 2/30~18/30의 범위에 있으나, 대체적으로 10이하의 느슨한 상태의 상대밀도를 보였다. 그림 4b)의 N 치는 SCP공법의 시공 후 프리로딩공법의 방치기간은 약 2개월~3개월 정도이고, 프리로딩공법의 성토를 제거하기 위하여 수행한 확인보링조사의 결과의 N 치는 약 3/30~28/30의 값을 보이며, 대체적으로 지표 상부 0~2m지층의 N 치는 10이상으로 나타난 반면에 매립심도가 깊어짐에 따라 N 치는 점차 감소하는 경향을 보인다. 특히, 준설매립층내 밴드형 실트층이나 밴드형 점토층이 혼재된 지층에서 낮은 N 치를 보이고, 하부로 갈수록 세립분 함유량이 증가하며, 심도에 따른 N 치도 작아졌다. 그림 4c)는 SCP공법의 개량 후의 파일내에서 실시한 N 치로 대략 5/30~36/30 범위로 전반적으로 10이상의 보통조밀 내지 조밀한 상태의 상대밀도를 보였다. 이처럼 준설매립지반은 SCP 적용으로 개량효과가 크게 증가하는 것으로 나타났으나, 개량전 매립모래층은 느슨한 상태의 포화된 사질토로 형성되어 있는 경우로 비배수 상태에서 급속한 반복하중이나 동적하중을 받게 되면 과잉간극수압이 발생하고 유효응력의 감소로 모래층의 강도를 잃은 액체상태로 유동화 가능성이 높은 것으로 나타났다. 이에 따라 SCP공법은 연약지반의 지반개량효과와 액상화 기준 안전율을 만족하는 관리방안이 필요하게 된다.

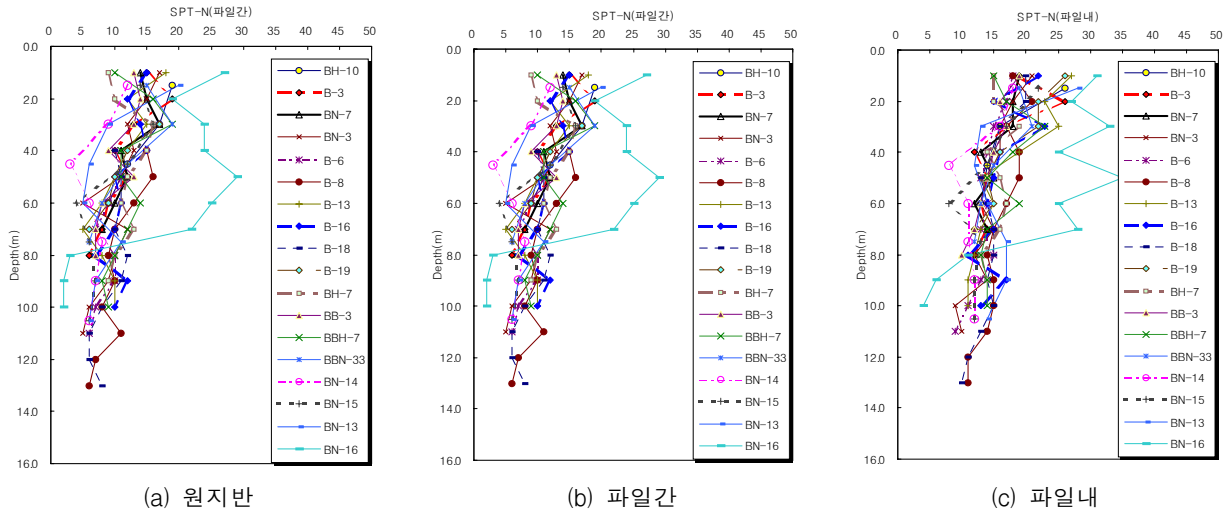


그림 4. 매립심도에 따른 SCP 개량 전·후의 SPT-N치 변화

4.2 준설패립지반의 SCP 치환율 산정결과 분석

4.2.1 매립심도에 따른 치환율 산정결과 비교

준설패립지반에서 SCP의 치환율은 상기의 각 제안방법을 토대로 매립심도에 따른 치환율을 산정하였으며, 그 결과를 그림 5와 같이 표현하였다. 그림 5a)의 Gibbs와 Holts(1973)의 방법에 따른 치환율은 약 0.01~0.18정도로 나타났으며, 매립심도가 깊어짐에 따라 치환율도 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 이때 원지반 N치는 약 2/30~18/30의 범위로 대체적으로 10이하의 느슨한 상태의 상대밀도를 보인다. 그림 5b)의 Mizuno 방법에 의하여 산정한 치환율은 0.02~0.27정도로 매립심도에 관계없이 치환율의 분포도가 넓고 그 범위도 크게 분산되었다. 그리고 그림 5c)는 원지반 N'치와 개량 후 파일간 N'치에 의하여 산정한 치환율로 그 결과는 약 0.01~0.18정도를 보이며, 그림 5d)는 원지반 N'치와 개량 후 파일내 N'치에 의해 산정한 치환율 결과로 약 0.02~0.20범위를 보이는 것으로 나타났다.

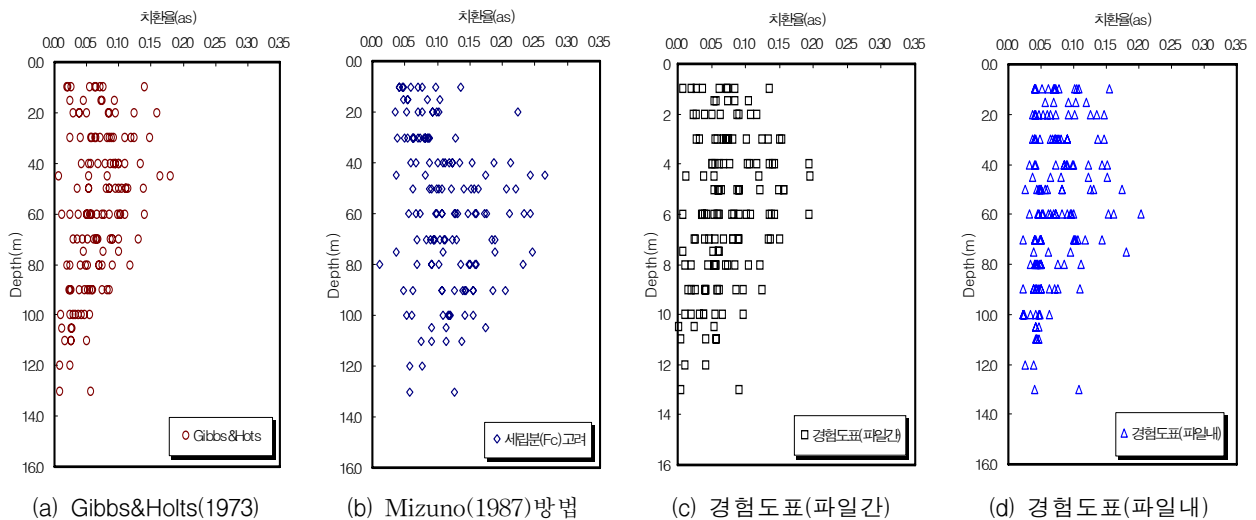


그림 5. 매립심도에 따른 SCP의 치환율 산정결과

4.2.2 각 제안방법에 따른 치환율 산정결과 비교

상기 그림 5에서와 같이 준설패립지반의 SCP 치환율은 각 제안방법에 따라 약간의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 각 제안방법의 특징을 보면, Gibbs와 Holts 방법은 사질토의 입도·입경 특성과 $N-Dr-e$ 관계에 따라 치환율에 영향을 미친다. Mizuno 방법은 Gibbs와 Holts에 의해 제안된 $N-Dr-e$ 관계를 근거로 하여 세립분 함유량을 고려한 경우로 세립분 함유량이 증가할수록 치환율도 증가하는 것으로 보고되고 있으며, 세립분 함유량 20% 미만에서는 다소 안전측의 결과를 보였다. 그리고 일본지반공학회의 경험도표를 이용하는 방법은 세립분 함유량 20% 기준으로 적정 치환율을 산정하도록 제안하고 있으며, 세립분 20% 이상에서는 개량효과가 급격히 저하되는 것으로 보고되었다.

이 들 각 제안방법에 따른 SCP의 치환율 산정결과를 서로 비교하여 그림 6과 같이 표현하였으며, 그림 6(a)는 경험도표와 Gibbs와 Holts 방법, 그림 6(b)는 경험도표와 Mizuno 방법과 비교한 결과이다. 그림 6(a)와 같이 치환율이 0.07이하의 낮은 범위에서는 Gibbs와 Holts 방법의 치환율이 경험도표의 치환율보다 약간 컸으며 치환율이 0.07 이상에서는 경험도표의 치환율이 Gibbs와 Holts 방법의 치환율보다 전반적으로 크게 나타났다. 그림 6(b)는 치환율이 0.13이하에서는 Mizuno 방법의 치환율이 경험도표의 치환율보다 상당히 크게 나타났으며, 치환율이 0.13 이상에서는 경험도표의 치환율이 Mizuno 방법의 치환율보다 다소 컸다.

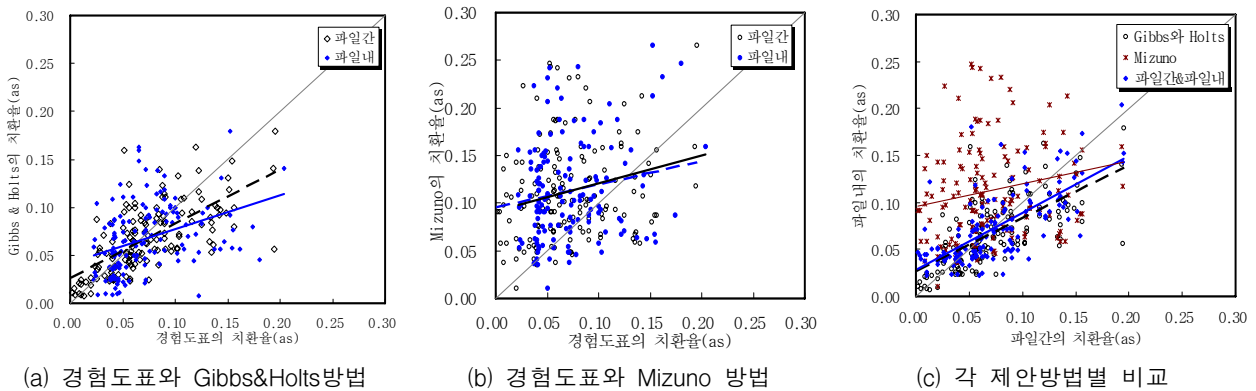


그림 6. 각 제안방법별 치환율 산정결과 비교

또한, 그림 6(c)의 각 제안방법별 치환율을 상호 비교한 결과로 경험도표에 의한 파일간 치환율과 파일내 치환율을 평균한 결과(평균 치환율)와 Gibbs와 Holts 방법의 치환율은 유사한 경향을 보이고 있으나, Mizuno 방법의 치환율은 0.13이하의 저 치환율 구간에서 상당히 크게 산정되는 것으로 보인다. 이는 Mizuno 방법으로 산정한 치환율은 세립토 함유량 증가에 따라 치환율도 크게 증가하기 때문으로 사료된다.

4.2.3 세립분 함유량과 N치 증가에 따른 치환율 변화

준설패립지반에 세립토가 발달되어 있는 경우 이를 감안하여 사례 및 각종 모형실험 등을 통하여 SCP공법의 설계가 이루어 져야 하지만, 설계단계에서 세립분 함유량이 치환율에 미치는 영향을 충분히 고려하지 못한다. 즉, 설계 시 충분한 시간 및 경제적인 설계가 이루어지지 못하고 경험적인 방법이나 시공사례를 통해 경험도표를 사용하고 있는 실정이다. 그림 7은 SCP의 개량 후의 목표 N치를 가정하여 N치 변화에 따른 각 제안방법별 치환율을 산정하였으며, 세립분 함유량과 치환율 관계를 도시하였다. 이 때 준설패립층의 세립토 함유량에 따른 증가 N치는 6, 9, 12, 15로 증가하여 치환율 결과를 비교하였다.

그림 7과 같이 세립분 함유량과 각 제안방법별 치환율 관계를 통해 개량 후 N치 증가에 따른 치환율은 상당히 크게 증가하는 것으로 나타났다. 즉, N치 증가에 따른 치환율은 개량 후 $N=6$ 일 때의 치환율을 기준으로 개량 후 $N=9$ 일 때는 약 3.5배, 개량 후 $N=12$ 일 때는 약 5.4배, 개량 후 $N=15$ 일 때는 약 6.4배로 증가한 것으로 나타났다. 그리고 세립분 함유량 증가에 따른 치환율을 보면, 일본지반공학회의 경험도표에 의한 경우 세립

토 함유량이 증가할수록 치환율은 점진적으로 증가한 반면, Gibbs와 Holts 방법에 의한 치환율은 세립토가 증가할수록 점차적으로 감소하는 것으로 보인다. 한편, Mizuno방법에 의한 치환율은 세립토 증가에 따라 치환율도 크게 증가하는 경향을 보이며, 세립분 함유량 50%를 전·후하여 치환율이 급격히 상승하여 세립분 함유량 50% 이상에서는 치환율이 상당히 크게 나타났다.

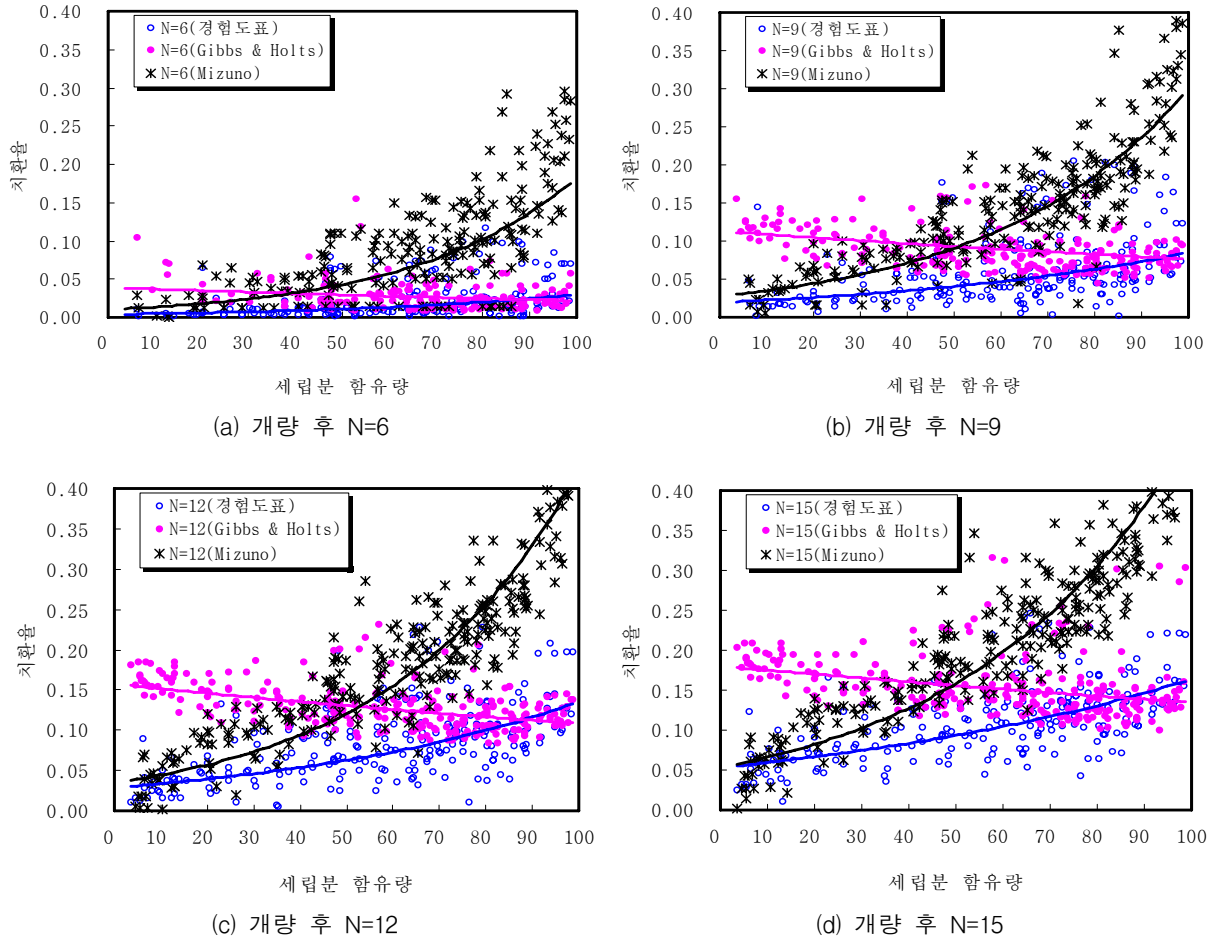


그림 7. 세립분 함유량과 N치 증가에 따른 치환율 변화 비교

4.2.4 세립분 함유량이 치환율에 미치는 영향

그림 8에서는 세립토 함유량을 $F_C=0\% \sim 20\%$, $F_C=20\% \sim 40\%$, $F_C=40\% \sim 60\%$, $F_C=60\% \sim 80\%$, $F_C=80\% \sim 100\%$, 즉 5단계로 나누어 준서매립지반의 세립토 함유량이 치환율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 파일간 치환율을 기준으로 각 제안방법에 따른 치환율을 도시하였다. 그림 8a)는 경험도표의 파일간 치환율과 파일내 치환율과의 관계로 각 세립토별의 치환율은 세립분 함유량 증가에 따라 세립토 $F_C=0\% \sim 20\%$ 범위보다 점차적으로 감소하는 것으로 보이며, 각 단계별 세립토 함유량에 따른 치환율 변화는 뚜렷한 경향성을 보이지 않고 있다. 또한, 그림 8b)는 파일간 치환율을 기준으로 Gibbs와 Holts 방법의 치환율과의 관계를 비교한 것으로, 각 단계별 세립토에 따른 치환율은 세립토 $F_C=0\% \sim 20\%$, $F_C=20\% \sim 40\%$, $F_C=40\% \sim 60\%$ 까지는 치환율이 증가하다가 $F_C=60\% \sim 80\%$, $F_C=80\% \sim 100\%$ 에서 다시 치환율이 감소하는 것으로 나타나, 이 방법은 세립토 함유량 범위에 따라 치환율에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 보인다. 그림 8c)에서는 파일간 치환율과 Mizuno방법의 치환율과의 관계에서

단계별 세립토 함유량에 따른 치환율은 $F_C=0\% \sim 20\%$ 에서 치환율이 낮은 값을 보이며, 세립분이 $F_C=20\% \sim 40\%$, $F_C=40\% \sim 60\%$, $F_C=60\% \sim 80\%$, $F_C=80\% \sim 100\%$ 범위로 세립토가 증가할수록 Mizuno방법의 치환율은 단계적으로 급격히 증가하는 경향을 보인다.

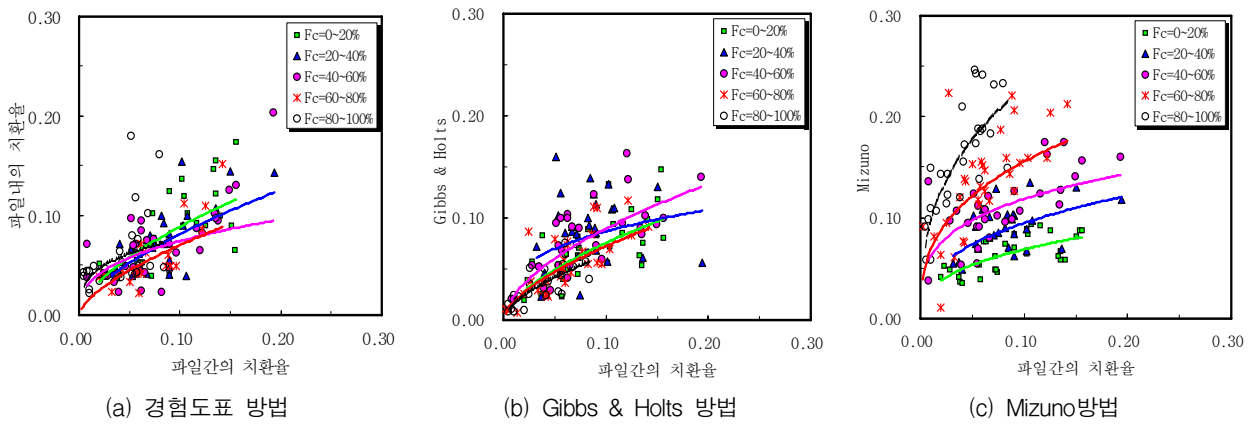


그림 8. 세립토 함유량이 치환율에 미치는 영향

이와 같이 준설패립지반의 세립토에 따른 SCP의 치환율은 각 제안방법에 따른 차이를 보이는 바와 같이, 경험도표의 치환율은 세립토 20%이상에서 점차적으로 약간씩 감소하는 경향은 있으나 미미한 변화를 보이고, Gibbs와 Holts 방법의 치환율은 세립토 $F_C=40\% \sim 60\%$ 까지 치환율이 증가하다가 세립토 60%이상에서는 다시 감소하여 세립분 함유량에 크게 영향을 받지 않고 일정한 영역에 수렴되는 성향을 보였다. Mizuno방법의 치환율은 세립분 함유량이 증가할수록 치환율은 급격히 증가하였으며, 치환율 약 1.3이상에서는 과대 평가되었다.

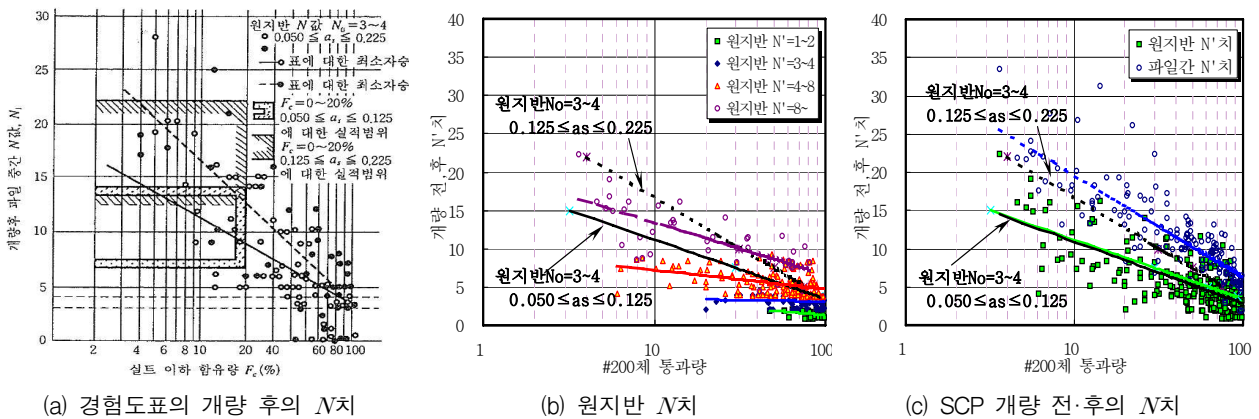


그림 9. 세립토 함유량과 원지반 N치와 개량 후 N치와의 상호관계 비교

한편, 일본지반공학회의 경험도표는 시공실적으로부터 목표 N치 결정 후 치환율을 결정하는 방법으로 세립분 함유량이 20%이상일 경우에는 개량효과 저하되어 적용시 현장시험시공이 필요한 것으로 보고되고 있다. 특히, 일본지반공학회의 경험도표는 치환율 범위를 $0.050 \leq a_s \leq 0.125$ 범위와 $0.125 \leq a_s \leq 0.225$ 범위로 나누어 세립분 함유량과 개량 후 원지반 N와 파일간, 파일내의 N치 관계를 통해 치환율을 구하는 방법을 제안하였다. 그러나, 이 경험도표는 세립분 함유량이 20%이상에서는 N치 3~4인 지반이 개량 후 교란 등의 영향으로 N치 0~10으로 분포가 넓게 분포하여 현장시험시공 등을 고려할 필요가 있다고 언급하고 있다.

이에 따라 그림 9에서는 SCP의 경험자료의 N치 3~4인 지반의 치환율과 동일한 조건으로 비교하기 위하여 준

설매립지반의 원지반 N 치를 N 치 1~2, N 치 3~4, N 치 4~8, N 치 8이상으로 4단계로 구분하여 경향성을 상호 비교하였다. 그림 9b)와 같이 경험자료의 N 치 3~4인 지반의 치환율 범위 $0.050 \leq a_s \leq 0.125$ 일 때의 추세선과 본 연구의 원지반 N 치 3~4에서의 200체 통과량과 N 치의 관계의 추세선과 비교했을 때 그림 9a)의 경험자료의 추세선보다 매우 낮은 상태를 보이고 있는 반면에 N 치 8이상에서의 200체 통과량과 N 치의 관계의 추세선이 높게 나타났다. 이때의 N 치는 SCP 개량 전의 원지반 N 치이다. 그림 9c)의 세립분 함유량과 개량 전·후의 N 치와의 관계와 같이 경험자료의 치환율 범위 $0.050 \leq a_s \leq 0.125$ 일 때의 추세선과 본 연구의 원지반 전체구간의 N 치와 비슷한 범위의 추세선을 보이고, 개량 후의 파일간 N' 치의 추세선은 경험자료의 치환율 범위 $0.125 \leq a_s \leq 0.225$ 일 때의 N 치 추세선보다 크게 나타난 것을 알 수 있다.

4.3 준설매립지반의 경험도표에 의한 치환율 산정결과

일본지반공학회의 경험도표에 의한 치환율은 $F_V=0.001 \sim 0.007$, $F_V=0.007 \sim 0.0125$, $F_V=0.0125 \sim 0.175$, $F_V=0.175 \sim 0.225$ 의 4단계로 나누어 SCP 개량 전·후의 N 치에 따른 치환율을 산정하는 방법으로서 그림 3의 도표를 이용하여 치환율결과를 그림 10과 같이 나타내었다. 그림 10a)는 원지반 N' 치와 파일간 N' 치와의 관계를 이용한 경우이며, 그림 10b)는 SCP 시공구간에서 수행한 원지반 N' 치와 파일내 N' 치와의 관계를 나타낸 경우이다.

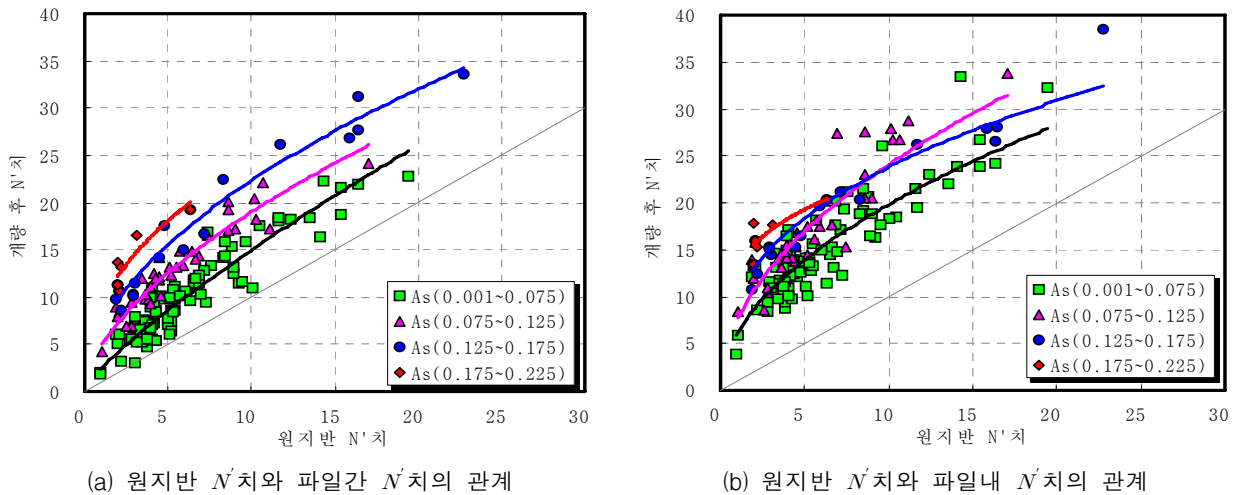


그림 10. 치환율 분포에 따른 SCP의 개량 전후의 N' 치 변화(SCP시공에 의한 실적도표)

그림 10a)에서 원지반 N' 치는 약 0~20정도이고 파일간 N' 치는 약 0~30정도의 범위에서 회귀분석에 의한 각 단계별 치환율 범위에 따른 선형관계는 일정하게 보이나, 치환율은 원지반 N' 치 10이하에서 치환율이 약 0.001~0.2정도의 비교적 낮은 값의 치환율 범위를 보이고 있다. 그림 10b)에서의 원지반 N' 치는 약 0~20정도일 때, 파일내 N' 치는 약 0~40정도의 범위에서 회귀분석에 의한 각 단계별 치환율 범위의 선형성을 볼 수가 없으며, 불규칙한 치환율 범위의 값을 보이고 있어 일본지반공학회의 경험도표의 목표 N' 치에 따른 치환율 산정결과와 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 즉 일본지반공학회의 경험도표는 세립분 함유량 영향과 N_o 치가 3~4인 범위에서 N 치 0~10인 경우로써, 본 연구의 원지반 N' 치는 약 0~20정도일 때, 파일내 N' 치는 약 0~40의 분포 범위에서의 치환율결과와의 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

따라서, 준설매립지반에 적용된 SCP 공법의 시공자료를 토대로 동 준설매립지반에 적합한 SCP의 치환율 산정법의 개발 등의 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 송도국제도시의 준설매립지반에 적용된 SCP의 치환율에 대한 고찰과, 준설매립지반의 세립토가 SCP공법의 치환율에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사질지반의 SCP 치환율 산정방법에 대한 고찰결과, 일본지반공학회의 경험도표(1988)에 따른 치환율은 세립토 함유량이 증가할수록 점차적으로 조금씩 증가하였으며, Gibbs와 Holts(1973) 방법에 의한 치환율은 세립토 증가에 따라 점차적으로 감소하였다. 특히, Mizuno(1987)방법의 경우 세립분 함유량 50%를 전후하여 치환율이 급격히 증가하여 세립토 증가에 따라 치환율 0.13이하의 구간에서 과대 평가되었다.
2. 준설매립지반의 세립분 함유량에 따른 치환율은 $F_C=0\% \sim 20\%$ 에서 치환율이 약간 낮은 값을 보이고, 세립분이 $F_C=20\% \sim 40\%$, $F_C=40\% \sim 60\%$, $F_C=60\% \sim 80\%$, $F_C=80\% \sim 100\%$ 등의 각 단계별로 증가할수록 Mizuno방법의 치환율은 단계적으로 증가하는 것으로 나타났다. 일본지반공학회 경험도표에서 세립토 20% 이상에서 치환율은 점차적으로 약간씩 감소하였으나 경미한 변화를 보이고 있고, Gibbs와 Holts 방법의 치환율은 세립토 $F_C=40\% \sim 60\%$ 까지 치환율이 증가하다가 세립토 60%이상에서는 다시 감소하였다.
3. 일본지반공학회의 경험도표는 시공실적으로부터 목표 N' 치에 따른 치환율을 결정하는 경우, 준설매립지반에 그대로 적용하기에는 세립분 함유량 영향과 N_o 치가 3~4인 범위에서 개량 N' 치 0~10인 경우로 다소 차이를 보이는 바와 같이 동 준설매립지반에 적용된 SCP 공법의 시공자료를 토대로 새로운 SCP의 치환율 산정법 개발 및 세립분 함유량 보정 등의 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김종국, 윤원섭, 박상준, 채영수, (2008), “준설매립지반의 세립토가 액상화 강도에 미치는 영향”, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.1717~1726.
2. 김종국, 손형호, 윤원섭, 채영수, 최인걸, (2008), “모래다짐말뚝(SCP)에 의한 매립지반의 액상화저감효과 평가” 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.1678~1688.
3. 이송, 김주현, 황규호, 양태선, (2003), “연약지반 설계와 시공”, 구미서관, pp.121~134.
4. 인천경제자유구역청, (2005), 송도 1공구 기반시설 기본 및 실시설계 보고서.
5. 인천경제자유구역청, (2006), 송도 3공구 기반시설 기본 및 실시설계 보고서.
6. 한국지반공학회, (2005), “준설매립” 지반공학시리즈 10, pp.482~488.
7. 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, 1, London, pp.35~39.
8. 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), Mar., pp.439~441.
9. The Japanese Geotechnical Society, (1988), “Remedial Measures Against Soil Liquefaction”, A. A. Balkema & Rotterdam & Brookfield, pp.172~178.
10. Keller Grumban GmbH, (1988), “Vibro Replacment to Prevent Earthquake Induced Liquefaction”, Proceedings of the Geotechnical Colloquium at Parmstadt, Germany, on Marth 19th, Technical paper 12-57E.
11. Mizuno. Y., Suematsu, N., Okuyama, K, (1987), “Design Method of Sand Compaction Pile for Sandy Soils Containing Fines”, Tsuchi to Kiso, Jour, of JSSMFE, 35(5): pp.21~26.(in Japanese).