

준설매립토의 다짐 평가방법에 관한 고찰

An assessment on the Compaction Evaluation Method for Hydraulic Fill

김 영 응*1, 김 용 철*2, 김 종 국*3

1. 서론

인천국제공항 건설부지는 영종도, 용유도 및 삼목도 일대의 간석지에 준설매립하여 조성되었으며, 준설매립층의 두께가 3~6m로 비교적 깊은 심도이며 입도분포가 비교적 균등하여 다짐이 용이치 않는 점을 고려해 현장시험시공을 실시한 결과 유압식 햅머 다짐공법이 최적공법으로 선정되었다.(신공항건설공단, 1996) 이 공법이 적용되는 활주로, 유도로 및 계류장지역의 노체, 노상의 부지는 항공기 하중이상 견딜 수 있도록 개량효과를 최대화해야할 뿐 아니라 깊은 심도에서의 다짐효과를 적절히 평가하는 방법이 요구되었다. 또한 본 현장은 두꺼운 층으로 조성된 지반으로서 지하수위의 영향으로 굴착이 곤란하여 층다짐으로는 다짐공사를 실시하기가 어려운 실정에 있다. 일반적으로 국내의 다짐공사에서는 현장 밀도에 의한 다짐도 측정방법으로 평가하는 경우가 많으나, 외국공항의 다짐공사에서는 상대밀도를 이용하여 다짐관리를 실시하는 사례도 있어 준설매립지반의 다짐측정방법에 이를 활용하고자 한다.

본 연구는 공사현장 부지내 5개지역을 대상으로 현장밀도 및 상대밀도에 의한 다짐도와 표준관입시험, 동적 및 정적콘관입 시험에 의한 지반강도를 각

각 측정하여, 인천국제공항과 같이 깊은 심도에서의 다짐도를 효과적으로 측정할 수 있는 방법을 선정하고자 실시하였다.

아울러 상대다짐도에 의한 방법과 지반강도에 의한 평가방법과의 상관관계를 기존의 연구와 비교하여 준설 매립지반의 소요 다짐기준의 설정과 다짐 관리방안의 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 시험개요

2.1 실내시험

준설매립지역에서 채취된 시료를 대상으로 입도분석은 KS F 2302, 실내다짐은 KS F 2312 및 투수

표 1. 다짐현장 지반강도 측정

구분	측정 방법	측정 항목	비고
표준관입시험 (SPT)	KS F 2318	N치	Blows/30cm관입
동적콘관입시험 (DCPT)	KS F 2318 ^{*1}	N _d 치	콘:뿔드 끝에 원추형콘, 햅머: 63.5kg, 낙하고: 75cm
피조콘관입시험 (CPTu)	ASTM D 3441	선단지지력(qc), 간극수압(u), 마찰저항력(fs)	선단지지력(qc)만 이용 관입능력: 10~20ton

*1: 동적콘관입시험방법에 대해 표준화된 규정이 없어 KS F 2318과 유사한 측정방법을 적용하였음.

*1 정회원, 신공항건설공단 공항건설기술연구실 소장
*2 정회원, 신공항건설공단 공항건설기술연구실 대리
*3 정회원, (주) 유신코퍼레이션 (공단 공항건설기술연구실) 대리

■ 기술기사 ■

계수는 KS F 2322의 방법중 준설토의 투수성을 고려하여 변수위투수시험으로 각각 측정하였다.

2.2 현장시험

활주로지역내 다짐이 완료된 5개소에 대하여 0.5m 간격으로 2.5m 심도까지 굴착하고서 현장밀도 및 상대밀도에 의한 다짐도를 측정하였으며, 다음 표 1의 3가지 방법으로 각 층에 해당하는 지반강도를 각각 측정하였다. 이때 현장밀도는 KS F 2311(Sand cone에 의한 현장밀도), 상대밀도는 KS F 2345의 방법으로 측정하였다.

3. 시험결과

3.1 준설패립도 실내시험 결과

준설패립도에 대한 입도시험 결과를 종합해 보면, 그림 1과 같이 #200체 통과량이 6~18%의 분포로 조립분의 함유량이 높으며, 모래성분 함유량이 87% 이상으로 대부분의 상,하부층이 모래로 구성되어 있는 것을 알 수 있다.

또한 준설패립도의 다짐시험 결과, 수정다짐도 95%를 갖는 최적함수비(OMC)의 범위는 13~18%, 매립 후 자연상태의 수정다짐도는 약 85%수준으로 나타났으며, 투수계수는 $(3\sim 20)\times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 로 나타났다.

또한, 다짐시험시공보고서(신공항건설공단, 1996)

에 의하면 유압식 햄머 공법을 적용한 현장 다짐시험 결과, 그림 2와 같이 시험시공구간에서의 다짐 전, 후의 심도별 현장밀도의 변화는 다짐후의 밀도가 현저히 증가 됨을 알 수 있다.

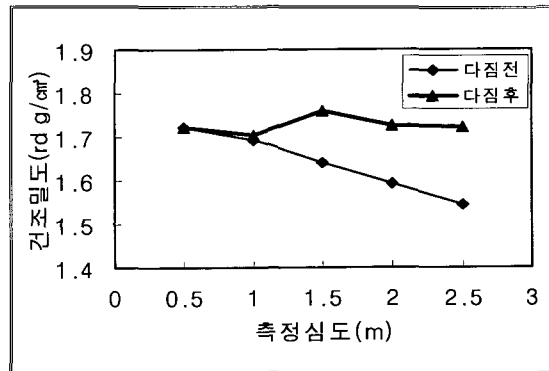


그림 2. 현장밀도의 다짐 전, 후의 변화

3.2 상대다짐도 및 지반강도 측정결과

활주로의 경우는 노상지반은 2m의 두께로, 노체지반은 평균 3m의 두께로 두꺼운 지반층을 형성하고 있어 다짐공법에 대한 다짐효율을 적절히 평가할 수 있는 방법을 알아보기 위하여 표 2와 같이 종래의 현장밀도시험을 포함한, 상대밀도에 의한 다짐도와 지반강도의 평가로 표준관입저항치(N), 동적관입저항치(Nd) 및 피에조콘에 의한 콘관입저항치(qc) 등을 각각 측정하였다.

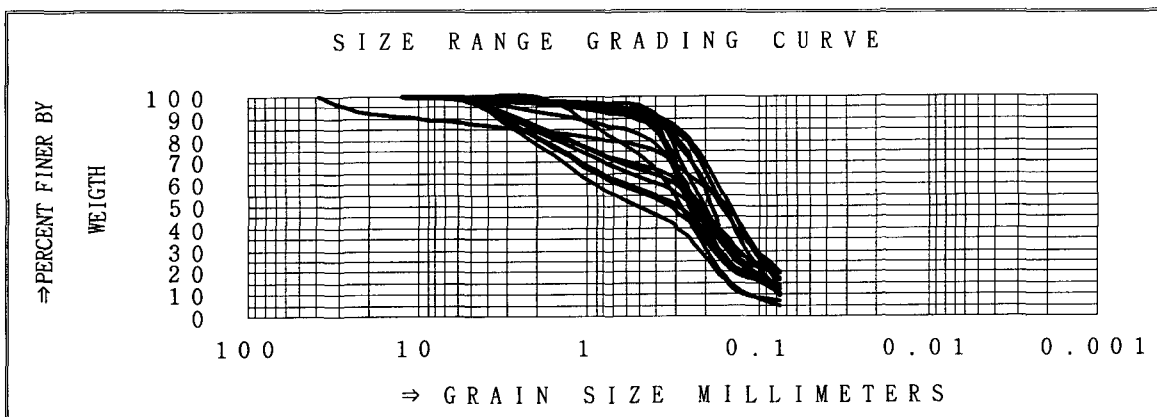


그림 1. 준설패립도의 입도분포곡선

준설패립토의 다짐 평가방법에 관한 고찰

표 2. 현장시험결과 정리

Location	Depth	Field Density (g/cm ³)	Relative compaction		σ_v' (kg/m ²)	CPTu (qc Mpa)	SPT (N)	DCPT (Nd)
			Compaction Degree(%)	Dr(%)				
A-1area BH-1	0.5	1.801	97.9	88.3	0.89	16.5	42	46
	1.0	1.761	95.7	78.3	1.74	21.1	50	111
	1.5	1.741	94.6	73.2	2.58	20.4	60	153
	2.0	1.766	96.0	79.6	3.51	26.2	97	107
	2.5	1.755	95.4	76.8	4.34	20.7	44	75
A-1area BH-2	0.5	1.775	96.5	81.9	0.86	25.2	41	46
	1.0	1.764	95.9	79.1	1.73	26.3	47	57
	1.5	1.758	95.5	77.6	2.62	22.3	58	59
	2.0	1.732	94.1	70.8	3.44	19.4	67	74
	2.5	1.660	90.2	50.9	4.14	9.6	45	72
A-2area Y-1	0.5	1.647	93.0	70.5	0.75	18.5	24	9
	1.0	1.692	95.6	81.2	1.66	21.1	48	67
	1.5	1.717	97.0	86.8	2.56	25.49	61	83
	2.0	1.708	96.5	84.8	3.40	23.84	53	77
	2.5	1.722	97.3	88.0	4.30	27.3	64	100
A-2area Y-2	0.5	1.632	93.9	66.9	0.82	9.4	29	9.5
	1.0	1.660	95.5	73.7	1.65	24.3	43	63.5
	1.5	1.670	96.1	76.0	2.49	23.4	38	44
	2.0	1.722	99.1	98.7	3.53	32.67	40	53
	2.5	1.688	97.2	80.3	4.21	29.3	53	75
A-2area Y-3	0.5	1.667	95.5	75.3	0.81	20.3	49	8
	1.0	1.651	94.6	71.5	1.62	14.3	44	48
	1.5	1.699	97.4	82.8	2.51	31.87	64	70
	2.0	1.703	97.6	83.7	3.38	31.68	37	78
	2.5	1.719	98.5	87.3	4.27	32.2	55	96
Remarks	* Relative density in Lab.: $\gamma_{d \max}(t/m^3) = 1.85 \sim 1.778$, $\gamma_{d \min}(t/m^3) = 1.5 \sim 1.4$ * Compaction test in Lab.: $\gamma_{d \max}(t/m^3) 1.75 \sim 1.84$							

이때 표 2의 상대밀도에 의한 다짐도는 KS F 2345에 제시된 계산 식을 이용하여 구했으며 식은 다음과 같다.

$$Dr = \frac{\rho_{dmax}(\rho_d - \rho_{dmin})}{\rho_d(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})} \times 100, \text{ 또는}$$

$$Dr = \frac{\gamma_{dmax}(\gamma_d - \gamma_{dmin})}{\gamma_d(\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin})} \quad (1)$$

또한, 측정결과를 이용하여 상대밀도에 의한 다짐도와 종래 현장밀도에 의한 다짐도와의 상호관계를 비교하였으며, 이 결과를 토대로 지반강도에 의한 선행 연구결과와 비교하여 준설패립층의 다짐도를 지반강도로 평가할 수 있는 방안에 대해서도 고찰하였다.

기술기사

4. 시험결과에 대한 고찰

4.1 다짐도 측정방법에 대한 고찰

준설매립 지반의 다짐도 평가시험 결과들을 토대로 가장 신뢰성 있는 상관관계를 알아보고자 먼저 현장밀도에 의한 다짐도와 지반강도값과의 회귀분석을 실시하여 표 3에 결과를 나타내었다.

이 때 회귀분석은 선형회귀, 이차원 회귀분석 및 Harris모델 분석 등의 방법을 이용하여 그 중 신뢰성이 가장 양호한 상태에 있는 상관도를 그림 3에 나타내었다. 회귀분석 결과, 표준관입시험과 동적콘 관입시험은 여러 회귀모델에서의 결정계수(r^2)가

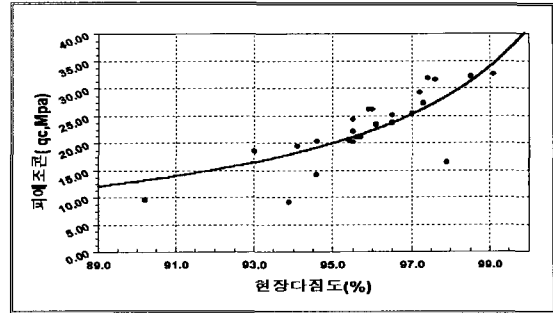


그림 3. 현장다짐도화 qc와의 상관도(Harris모델)

(0.03~0.17)로 신뢰성이 낮은 것으로 나타났으나, 피에조콘 관입시험의 경우 선형회귀 분석이나 이차

표 3. 회귀분석에 의한 현장다짐도와 현장시험결과 비교

현장시험	회귀 분석	관계식	결정계수(r^2)
표준관입시험	선형회귀분석	$Y=2.02X - 139.1$	0.06
	2차원 회귀분석	$Y=-0.378X^2 + 73.1X - 3482.7$	0.07
	Harris Model회귀분석	$Y = \frac{1}{4.77 - 0.56X^{0.065}}$	0.16
동적콘관입시험	선형회귀분석	$Y=2.97X - 217.0$	0.09
	2차원 회귀분석	$Y=-0.13X^2 - 21.9X + 961.7$	0.03
	Harris Model회귀분석	$Y = \frac{1}{-0.11 + 1.3X - 0.51}$	0.17
피에조콘관입시험	선형회귀분석	$Y=2.73X - 238.9$	0.65
	2차원 회귀분석	$Y=-0.08X^2 - 12.6X - 493.4$	0.65
	Harris Model회귀분석	$Y = \frac{1}{10.8 - 8.72X^{0.046}}$	0.78

표 4. 현장 시험결과와의 상관관계 비교 (Harris 모델)

상관계수	현장밀도에 의한 다짐도	상대밀도에 의한 다짐도	현장 다짐지반강도 측정		
			"N"	"Nd"	"qc"
현장밀도에 의한 다짐도		0.95	0.16	0.17	0.78
상대밀도에 의한 다짐도	0.95		0.17	0.15	0.71
현장 다짐지반강도	"N"	0.16	0.17	0.49	0.28
	"Nd"	0.17	0.15	0.49	0.31
측정	"qc"	0.78	0.71	0.28	0.31

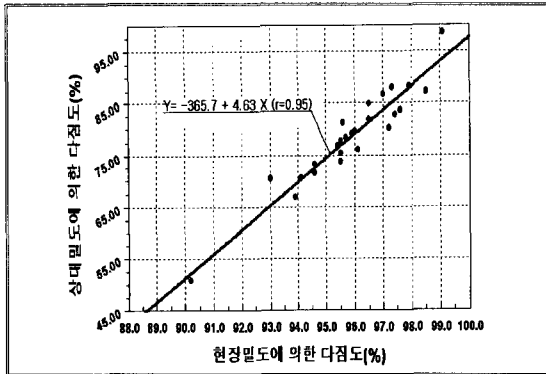


그림 4. 현장다짐도와 상대밀도에 의한 다짐도 비교 그림

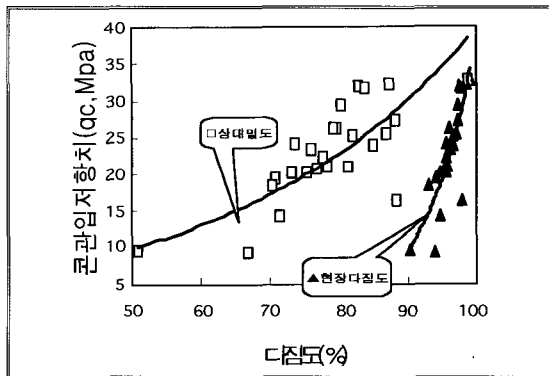


그림 5. 현장다짐도와 상대밀도에 의한 다짐도와 지반강도와의 관계

원 회귀분석 및 Harris모델에 의한 관계식에서도 결정계수(r^2)가 0.65, 0.65, 0.78로 나타났으며, 이들 분석 중에서도 Harris 모델을 이용한 방법이 가장 적절한 것으로 나타났다. 이 방법에 의한 관계식을 적용하면 현장다짐도 90~95%범위에 대응하는 콘관입저항치(q_c)는 대략 14~20Mpa로 나타났다. 한편, 표 4는 국내에서 널리 사용하는 현장밀도에 의한 다짐도 평가방법과 상대밀도에 의한 다짐

도 및 그림 4, 5는 각종 다짐강도간의 상관관계를 나타낸 것으로서, 외국공항의 경우 상대밀도에 의한 다짐도와 지반강도와의 관계로부터 다짐기준을 설정하는 사례가 많아 금번 측정결과와 비교, 고찰함으로써 신뢰성있는 다짐기준을 제시하고자 하였다.

그림 4의 결과로부터 현장밀도 및 상대밀도에 의한 다짐도간에 상관관계가 높게 나타나, 현장밀도에 의한 다짐도방법이 기존의 상대밀도에 의한 다짐도와 지반강도간의 상관관계와 유사한 경향을 나타낼 것으로 예측된다. 그러나, 다짐도와 콘관입저항치(q_c)와의 관계를 나타낸 그림 5의 결과를 보면 상대밀도의 경우와 달리 현장밀도에 의한 다짐도가 좁은 측정범위내에서 지반강도의 변화가 크게 나타나 현장다짐도의 정밀도가 저하할 경우, 다짐지역의 다짐정도를 예측하는데에는 신뢰성을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

4.2 (q_c)에 의한 상대밀도에 대한 고찰

4.2.1 $\sigma_{vo} - q_c - D_r$ 와의 관계의 비교

압축성을 지닌 정규압밀된 모래에서 콘관입저항력(q_c)이나 연직유효응력(σ_v')과 상대밀도(D_r)와의 관계를 추정하는 선행연구의 제안을 표 5와 같이 나타냈으며, 상대밀도에 의한 다짐도와 콘관입저항치(q_c)와의 실험결과를 선행의 연구결과와 비교하여 다짐도 평가가 적절한지를 알아보았다.

표 5. q_c 와 D_r 와의 기존연구결과

구분	토질정수	적용 사질토	추정 및 산정방법	제안자
모래지반	$\sigma_v', q_c, \sim D_r$	압축성을고려한 석영질 모래(Ticino Sand)	$D_r(\%) = -98 + 66 \log_{10} \left(\frac{q_c}{(\sigma_v')^{0.5}} \right)$	Robertson과 Campanella(1983)
	$\sigma_v', q_c, \sim D_r$	Ticino, Ottawa, Edgar, Hokksund Hilton mines의 모래	$D_r(\%) = 68 \left[\log \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma_v'}} \right) \right] - 1$	Jamiolkowski (1986)
	$\sigma_v', q_c, \sim D_r$	정규화 시킨 사질토 지반	$D_r^2 = \frac{C_q \cdot (q_c/Pa)}{305 \cdot C_A \cdot Q_c \cdot Q_{OCR}}$ 여기서, Q_c : 압축지수 ($0.91 < Q_c < 1.09$) Q_{OCR} : 과압밀지수($OCR^{0.19}$)	Jamiolkowski (1988)
	$\sigma_v', q_c, \sim D_r$	정규화 시킨 사질토 지반	$D_r(\%) = 51.14 \left[\log \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma_v'}} \right) - 0.35 \right]$	Skempton(1986)

기술기사

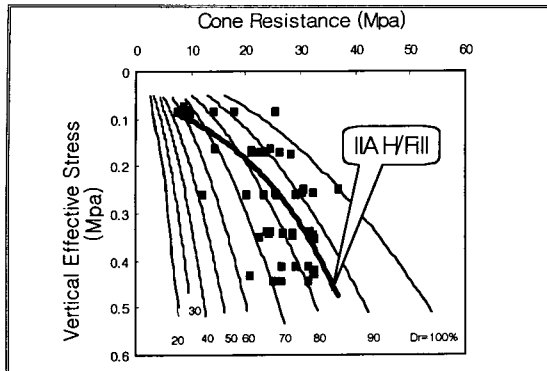


그림 6. 준설패립토와 Ticino Sand 와의 σ_v' , q_c , D_r 와의 비교

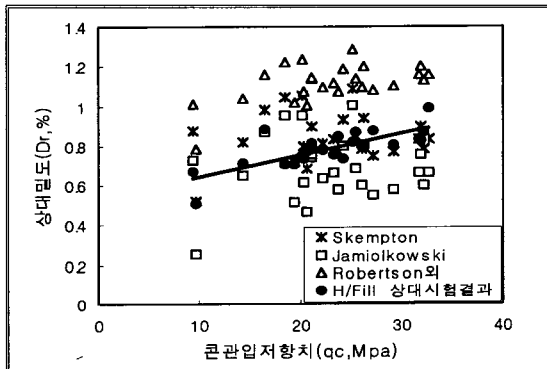


그림 7. 선행연구와 준설패립토의 q_c - D_r 와의 비교

그림 6은 Baldi et al.,(1986)이 제안한 Ticino Sand에 대한 σ_v' , q_c , D_r 의 상관도를 나타낸 결과와 본 실험결과를 비교하였다. 또한, 표5의 제안식을 이용한 결과와 본 실험결과를 비교하여 그림 7과 같이 나타내었다.

그림 6은 본 실험결과에서는 유효응력 0.2 이상은 어느정도 일치하고 이보다 작은 부분은 일치하지 않은 결과를 보여 주고 있다.

그림 7은 선행연구에 의한 제안식을 적용했을 때, Jamiolkowski(1986)이 제안식에 의한 경우보다 Skempton의 제안식에 의해 구한 상대밀도와 현장에서 얻은 상대밀도의 경향이 유사하게 나타났으며, 이러한 자료를 검토한 결과 다짐도 평가방법으로 콘관입저항치(q_c)를 기준으로 하는 것이 타당할 것으

로 판단된다.

4.2.2 N - D_r - q_c 와의 관계 비교

준설패립토에서 피에조콘 관입시험결과를 토대로한 상대밀도와의 관계를 살펴보기 위해 Meyerhof의 N치-상대밀도-정적콘지지력과 제안치를 나타낸 표 6의 결과와 본 실험결과를 비교하여 그림 8에 나타내었다.

표 6. Meyerhof 에 의한 N - D_r - q_c 의 관계

모래의 상태	상대밀도 (D_r)	N치	정적콘지지력 (Mpa)
매우느슨	0.2	<4	<2
느슨	0.2~0.4	4~10	2~4
보통	0.4~0.6	10~30	4~12
조밀	0.6~0.8	30~50	12~20
매우조밀	>0.8	>50	>20

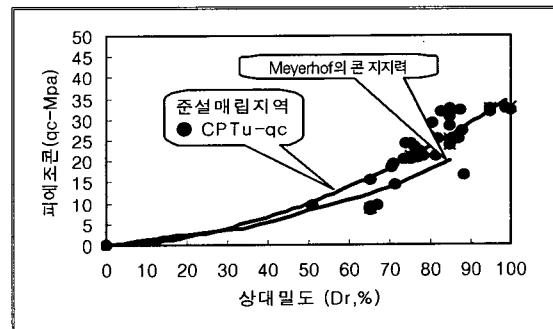


그림 8. D_r - q_c 와 결과의 비교

그림 8의 콘관입저항치(q_c)는 Meyerhof의 제안치와 유사한 경향을 보이고 있으며, 현장다짐도 90~95%범위에 해당하는 상대밀도를 Meyerhof의 상대밀도 분류와 비교한 결과, 조밀한 상태인 0.55~0.75범위에서 콘관입저항치(q_c)가 대략 12~21Mpa로 나타났다.

5. 결론

인천국제공항부지의 준설매립토의 다짐기준 및 효율적인 다짐평가를 위한 기초자료를 제시하고자 현장시험에 의한 다짐도와 지반강도 값을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 준설매립토의 다짐시험 결과, 수정다짐도 95%를 갖는 최적함수비(OMC)의 범위는 13~18%, 준설매립 후 자연상태의 수정다짐도는 약 85% 수준으로 나타났다.

(2) 현장밀도에 의한 다짐도와 지반강도치(N_c , q_c , N_d)를 회귀분석한 결과, 콘관입저항치(q_c)을 이용한 Harris모델 방법이 표준관입시험과 동적 콘관입시험의 경우보다 상관성이 높게 나타나, 다짐관리에 있어 지반강도에 의한 다짐도 평가가 가능한 것으로 판단되었다. 이때, 현장다짐도 90~95%범위에 대응하는 콘관입저항치(q_c)는 14~20Mpa로 나타났다.

(3) 현장밀도 및 상대밀도에 의한 다짐도를 각각 q_c 와 비교한 경우, 현장밀도에 의한 다짐도는 좁은 범위에서 q_c 변화가 크게 나타나, 현장밀도시험의 정밀도가 저하할 경우 q_c 의 예측치가 정확하지 않을 것으로 판단된다.

(4) 한편, 본 연구의 콘관입저항치(q_c)와 상대밀도(D_r)와의 상관성을 Skempton의 제안식과 비교한 결과, 유사한 경향을 보이고 있으며, 현장다짐도 90~95%범위에 해당하는 상대밀도를 Meyerhof의 상대밀도 분류와 비교한 결과, 조밀한 상태인 0.55~0.75범위에서 콘관입저항치(q_c)가 대략 12~21Mpa로 나타났다.

참고문헌

1. 신공항건설공단 (1996) 수도권 신공항 다짐시

험시공 용역보고서

2. 이선재.(1997), "피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구" 서울대학교 박사학위 논문
3. 한국지반공학회 (1994) 지반조사결과와 해석 및 이용
4. 한국지반공학회 (1995) 연약지반 (III) Vol 11, No.4 pp 141~170
5. 김인섭.(1996), "피에조콘 시험에 의한 토질정수의 추정", 동국대학교 석사학위 논문
6. Baldi, G, Bellotti, R, Ghionna, V, Jamiolkowski, M, (1986) "Interpretation of CPTs and CPTUs: 2nd Part Drained Penetration of Sand" Proceedings Of The Fourth International, Geotechnical Semina Singapore, pp 143~156
7. Robertson, P & Campanella, R, G (1986 B) " Interpretation of Penetration Tests : Part II . Canadian Geotechnical Journal .20 (4) 734-45
8. Skempton, A, W(1986) " Standard Penetration Test Procedures and The Effects In Sands : Relative Density, Particle Size, Aging, and Overconsolidation" Geotechnique, 36(3) 425-47
9. Tom Lunne, Peter K. Robertson and John J.M. Powoll(1997) "Cone Penetration Testing In Geotechnical Practice" . Blackie Academic & Professional. pp 81~94