

동다짐 공법이 적용된 준설패립지반의 개량효과 평가에 관한 연구

A Study on the Evaluation of the Effect of the Ground Improvement of Reclaimed Land Based on Dynamic Compaction Method

김 종 국¹ Kim, Jong-Kook

채 영 수² Chae, Young-Su

Abstract

The purpose of this study is to examine the method of liquefaction potential occurring at the reclaimed land in Incheon district and to compare the result obtained by the method based on the earthquake of 6.5 magnitude. In addition, the effects of ground improvement and liquefaction potential were evaluated on the basis of SPT and CPT, which have been performed before and after the compaction pilot test. As a result, we realized that the bigger the energy of dynamic compaction test was, the better effect we got. After the dynamic compaction test, as the strength of ground increased, the safe factor also increased. It was evaluated that the method of dynamic compaction improved the seismic performance. Accordingly, the method of the quality control of reclaimed land based on dynamic compaction method was presented.

요 지

본 연구에서는 인천지역 준설패립지반을 대상으로 액상화 평가방법들에 대해 검토하고, 국내 지진특성을 고려하여 지진규모 6.5을 기준으로 액상화 가능성을 비교하였다. 그리고 다짐시험시공 및 동다짐 전·후에 수행한 표준관입시험(SPT) 및 정적콘관입시험(CPT)을 토대로 지반개량효과 및 액상화 보강효과를 평가하였다. 그 결과, 동다짐은 다짐에너지가 클수록 개량효과가 우수한 것으로 나타났으며, 동다짐 후 지반강도 증가에 따라 액상화 안전율도 크게 증가되어 내진성능 향상을 크게 도모 할 수 있는 것으로 평가되었으며, 이에 따른 패립지반의 다짐관리 방안을 제시하였다.

Keywords : Dynamic compaction method, Liquefaction potential, Reclaimed land, Seismic performance

1. 서 론

최근 우리나라에서는 해안의 도서지역을 매립하거나 연안의 공유수면 매립으로 대규모의 부지를 조성하여 공항, 항만 등 해양개발 프로젝트가 계속적으로 이루어지고 있는 실정이다. 준설토에 의해 인공매립된 부지는 불균질한 지층분포를 보이며, 모래, 실트질 모

래, 실트 그리고 실트질 점토 등이 불규칙하게 구성되어 있는 경우가 많다. 느슨한 상태로 매립된 지반은 다짐도가 불량하고 액상화 발생 가능성이 잠재해 있는 경우, 지지력이 부족한 상태를 보이게 되며 지반침하를 유발하게 된다. 이러한 매립지반에 지진이 발생하면 낮은 강도의 지진에서도 큰 피해가 발생할 수 있으므로 시설물을 축조할 경우 해당지반에 지진 및 지

1 정회원, 한국건설품질시험원 지반기술팀 부장 (Member, Chief Engineer, Institution of Korea Construction Quality Test, qcpower@hanmail.net, 교신저자)

2 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

2.2.2 동다짐공법의 설계 및 시공

본 연구대상 부지는 원지반 해성퇴적층 위에 인위적으로 매립한 준설패립지반으로 구분된다. 퇴적층내에 연약층이 존재하는 경우에는 단순 Preloading공법 혹은 연직배수재(P.B.D) + Preloading공법을, 준설패립지반의 경우에는 지반강도 증대 및 액상화 방지 대책의 일환으로 동다짐공법이 설계되었다. 당초 설계된 동다짐 공법은 목표 개량심도를 약 10m로 증가 N치(ΔN) 5회를 기준으로 다짐간격 및 타격에너지가 결정되었다. 그러나 시공사례에 의하면 지반개량효과가 시공구간에 따라 부분적으로 크게 저하된 것으로 검토되었다. 이에 따라 본 현장의 불규칙한 지반조건에 대한 개량효과를 증진시키기 위하여 다짐시험시공을 계획하였다.

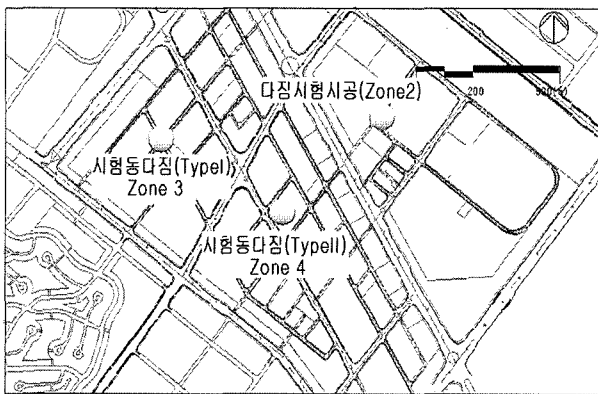
다짐시험시공은 지반개량효과를 증대시키고 다짐평

가방법 및 다짐관리기준을 마련하고, 본 다짐공사의 경제적이고 안정된 작업을 수행할 수 있도록 기초자료를 확보하기 위해 실시하였다. 다짐공법은 표 1과 그림 3과 같이 다짐 패턴, 타격에너지를 고려하여 typeI, typeII로 구분하였고, 유압햄머다짐은 동다짐 typeII와 동일한 다짐에너지로 실시하였다. 그리고, 본 공사의 시공성 및 개량효과를 검토 하기 위하여 추가적으로 시험동다짐을 수행하였다.

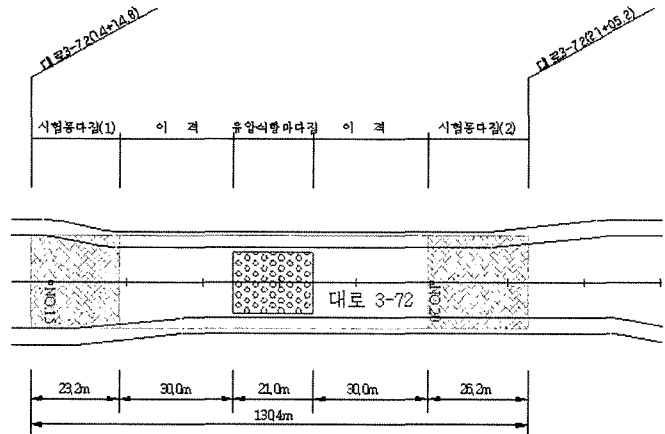
3. 확인시험 및 액상화 평가방법

3.1 지반개량 확인시험

당초 동다짐 전·후의 확인시험은 매 200m 간격으로



(a) 다짐시험시공 및 시험동다짐 위치도



(b) 시험시공의 공법 배치도

그림 3. 다짐시험시공 및 시험동다짐 현황도

표 1. 다짐시험시공의 다짐간격 및 타격에너지

구분		추무게 (ton)	낙하고 (m)	타격횟수 (회)	타격간격 (m×m)	타격에너지 (t·m/m ²)
동다짐 TypeI	1단계	22	25	10	8×8	85.9
	2단계	22	25	9	8×8	77.3
	3단계	22	18	7	5.65×5.65	86.8
	4단계	15	8	2	2.2×2.2	49.6
	계					299.6
동다짐 TypeII	1단계	22	18	9	7×7	72.7
	2단계	22	18	8	7×7	64.6
	3단계	22	14	5	4.94×4.94	63.1
	4단계	15	8	2	2.2×2.2	49.6
	계					250.0
유압햄머 다짐	1단계	10	1.2	40	3.0×3.0	53.3
	2단계	10	1.2	40	3.0×3.0	53.3
	3단계	10	1.2	33	2.1×2.1	89.8
	4단계	10	1.2	10	1.5×1.5	53.3
	계					249.7

표 2. 시험항목 및 시험목적

구분	시험항목	시험목적	얻어지는 값	실시기준
현장 시험	정적콘관입시험 (CPT)	· 토층 굳기/ 다짐정도 파악 · 지반개량효과	· 콘관입저항치(q_c) (연속적으로 측정)	ASTM D3441에 의거 매 5.0cm간격으로 측정
	표준관입시험 (SPT)	· 다짐정도 파악/교란시료채취 · 지반개량효과 확인	· N 치 (30cm 관입된 타격수)	KSF2307, 2318에 의거 매 0.8m심도로 측정
	밀도시험 (FDT)	· 현장의 흙의 밀도파악 · 다짐정도 추정	· 건조밀도 $r_d, (t/m^3)$ · 다짐도 $R_c, (%)$	KSF2311에 준용 - 0.4m마다(시굴심도까지)
지반 거동	체적변화 측정	· 다짐효율 파악	· 개량효율	계측기 설치

표 3. 간이평가 방법의 특징

구분	지진규모	특징
SPT	Seed 등(1983)의 방법	· 지진시 전단응력비 [그림 4] 참조 · 액상화 저항강도비 산정곡선이 지진기록을 토대로 도시 · 전단저항응력비 산정곡선을 세립분함유량 5, 15, 35%로 도시
	Iwasaki 등(1978)의 방법	· 진동삼축시험을 토대로 간편식 제안(일본도로교 시방서) - $L_{max} = \frac{a_{max} \cdot \sigma_{3c}}{g \cdot \sigma_{3c}} \cdot r_d$ (지진시 발생하는 최대전단응력비) - $R_{max} = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 R_1$ (최대저항강도비(보정계수 C_i)) · SPT- N 치 따른 변화양상이 Seed이론과는 다름(제곱근 함수) · 간편식에서 평균입경(D_{50})과 세립분 함유량(40%기준) 고려
CPT	Robertson과 Wride(1998)의 방법	· 상재응력만으로 정규화 콘관입저항 → 무차원 콘관입저항보정 - $q_{c/N} = C_Q(q_c/P_a)$ 여기서, $C_Q = (P_a/\sigma'_{vo})^n$ · 액상화 저항강도비 산정시 세립분 함유량을 직접 추정 - $I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2] \cdot 0.5$ 여기서, $Q = [(q_c - \sigma_{vo})/(P_a/\sigma'_v)]^n$ $F = [f_s/(q_c - \sigma_{vo})] \times 100\%$ · 평형콘관입저항치를 구하기 위한 입경특성에 대한 보정계수 · 콘관입저항치를 정규화

주1) a_{max} 는 지진가속도, σ_{3c} '는 유효상재압, r_d 는 응력감소계수

주2) C_Q 는 정규화계수이며, P_a 값은 100kPa, 지수 n 는 흙의 입경특성(모래 : 0.5, 점토 1.0)

동적콘관입시험(DCPT), SPT에 의하여 지반개량효과의 영향정도를 평가하고, 평판재하시험과 현장밀도시험은 상부 교란층의 다짐도를 평가하도록 시방에 규정되었다. 그러나, 동다짐의 지반개량효과에 대한 다짐관리기준이 불분명하고 DCPT의 동적콘관입저항치(N_d)의 신뢰도가 다소 떨어지는 것으로 검토되었다(김종국과 채영수, 2004b).

표 2는 다짐시험시공 및 시험동다짐시의 시험항목으로 CPT시험을 추가하여 다짐 전·후의 지반강도를 측정하였다. 이와 더불어 준설토 시료에 대해서는 기본물성 등의 실내시험을 수행하였다.

3.2 액상화 평가 방법

준설매립지반의 개량전 부지를 대상으로 현장시험에 의한 간이평가 방법과 진동삼축시험에 기초한 상세평

가 방법으로 액상화 가능성을 평가하였다.

3.2.1 간이평가 방법

현장시험은 동다짐 전에 수행한 SPT 및 CPT를 이용하였다. SPT의 경우에는 Eurocode 및 일본 건축물 시방서의 근간이 되는 Seed 등(1983)의 방법과 진동삼축시험 결과를 토대로 제안된 Iwasaki등(1978)의 방법을, CPT의 경우는 Robertson과 Wride(1998)방법으로 액상화 가능성을 평가하였다. 이들 간이평가 방법의 특징을 개략적으로 비교하면 표 3과 같다(김종국과 채영수, 2005).

그림 4는 Seed 등(1983)의 액상화 평가방법으로 액상화 안전율은 지진시의 전단응력비와 지반의 액상화 저항강도를 비교함으로써 산정하게 되며, 지진시 발생하는 전단응력비는 설계가속도와 동적특성치를 토대로 한 지진응답해석을 통하여 산정되게 된다. 지진응답해석은 주로 SHAKE91을 많이 이용한다.

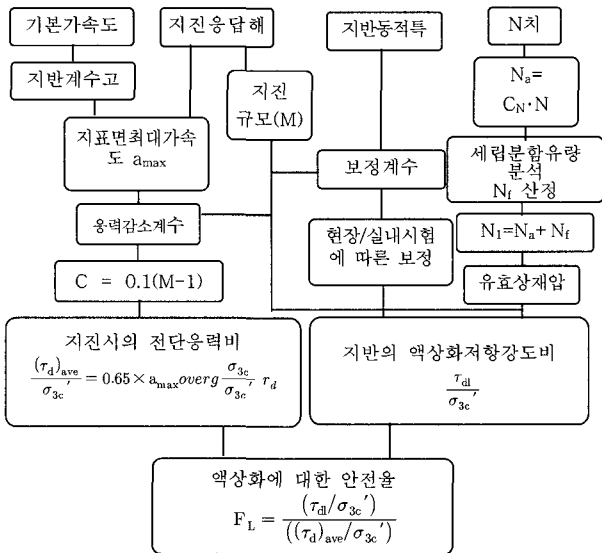


그림 4. Seed 등(1983)의 액상화 평가방법

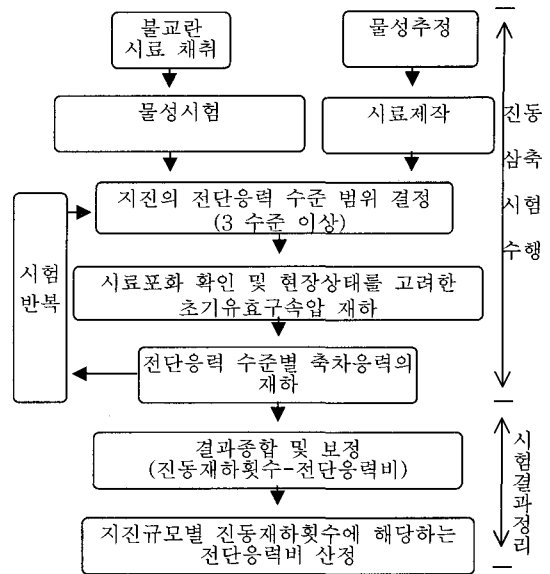


그림 5. 진동삼축시험에 의한 액상화 평가

3.2.2 상세평가 방법

그림 5는 진동삼축시험에 기초한 상세평가 방법으로 시료의 세립분 함유량 및 상대밀도 등의 현장조건을 재현하여 액상화 저항강도비를 산정하는 절차이다.

지반의 액상화 저항응력비는 3회 이상 진동하중 변화에 따른 진동삼축시험을 실시하고 그 결과를 Seed와 Idriss(1971)의 제안식(1)으로 보정하여 등가반복 재하 횟수와 액상화 저항응력비와의 관계를 도출한다.

$$C_r = 0.9 \times \frac{1 + 2K_0}{3} \quad (1)$$

여기서, C_r 는 보정계수로 K_0 값에 따라서 결정된다. K_0 는 $1 - \sin \phi'$ 값으로 ϕ' 값은 0이며, C_r 값은 0.9가 된다. 또한, 진동삼축시험을 바탕으로 산정한 액상화저항강도를 현장시험자료와 연관시켜 기존의 간이평가 방법과 비교 분석을 통해 상호관계를 살펴보았다. 먼저, 실내시험조건 중 결과에 크게 영향을 미치는 상대밀도와 현장에서 얻을 수 있는 표준관입저항치(N)와의 관계를 규명해야 한다. 간이방법을 통해 산정한 세립분 함유량별 액상화 전단저항응력비는 진동삼축시험결과와의 비교를 위해 상대밀도를 N 치로 환산하여 산정한다. 이 때, 이용된 환산식은 1957년 Gibbs와 Holtz의 시험결과를 토대로 Meyerhof(1956)가 제안한 식 (2)를 사용하였다(신윤섭 등, 1999). 본 연구에서는 준설패립지반의 지진규모 6.5를 기준으로 반복 재하횟수를 10회로 규정하여 최종 액상화 저항응력비를 산출하였다.

$$D_r = \left[\frac{N_{SPT}}{23\sigma'_{3c} + 16} \right]^{0.5} \quad (2)$$

여기서, D_r 은 상대밀도 백분율을 의미하고, N_{SPT} 는 표준관입저항치를 나타내며 σ'_{3c} 는 유효상재압을 나타낸다. 이때, 유효상재압의 단위는 kg/cm^2 이다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 준설패립지반의 전반적 특성

4.1.1 준설토의 물리적 특성

준설토 지반을 대상으로 그림 3(a)구간에서 채취한 SPT시료의 입도시험결과는 그림 6과 같이 나타났다. 준설토의 입자크기는 대상구간에 따라 많은 차이를 보이며, 크게 A(zone3), B(zone2), C(zone4)그룹으로 구분되는 성향을 보인다.

표 4는 각 구간의 대표적인 입도특성치와 최대, 최소 건조밀도값을 나타낸 것이다. 이때, D_{50} 은 약 0.07~0.88mm, #200체 통과량은 4.6~46.2%정도의 분포범위를 보이며, 준설토의 최소 건조밀도는 1.315~1.594t/m³, 최대 건조밀도 1.594~1.805t/m³를 보인다. 특히, 일부 매립지반의 준설토층과 원지반의 경계층사이에서 실트질 점토가 존재하는 경우에는 세립분 함유량이 크게 증가하는 경향을 보이고 있다.

이와같이 준설토는 양호한 사질토(SM)부터 세립질 사질토(SP-SM)가 대부분으로 액상화 현상이 발생하기

표 4. 준설토의 대표적인 입도특성 및 최소, 최대 건조밀도

구분	D _{max} (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _u	#200통과량 (%)	γ _{atmin} (t/m ³)	γ _{atmax} (t/m ³)
A 그룹	9.52	1.30	0.14	0.88	9.3	4.6	1.594	1.805
B 그룹	2.0	0.21	0.04	0.21	4.0	20.9	1.469	1.775
C 그룹	2.0	0.08	0.05	0.07	1.6	46.2	1.315	1.594

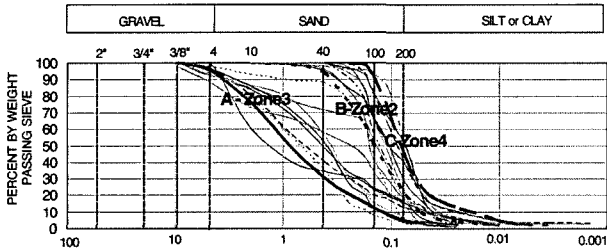


그림 6. 준설토의 입도분포곡선

쉬운 조건을 가지고 있고, 부분적으로 점토질 실트, 실트 등이 혼재되어 있는 것으로 나타나 함수비 조절이 어려워 다짐작업이 곤란한 것으로 나타났다.

4.1.2 매립지반의 액상화 가능성 분석

최근 건설교통부(2004)에서 발표한 액상화 평가 동향을 살펴보면, 그림 7의 액상화 평가 흐름도와 같이 예비평가 후, 그 검토결과에 따라 간이평가를 실시하고, 액상화 안전을 산정 결과 $F_s \geq 1.5$ 의 기준을 만족하지 못하면 상세평가를 실시하는 방법을 제시하고 있다.

본 연구에서는 그림 7의 절차에 따라 준설토매립지반의 액상화 가능성을 평가하였으며, 대상구간은 지진 I 구역으로 재현주기는 500년, 대상지반의 최대 가속도(α_{max})는 0.11g, 지진규모(M) 6.5를 지진강도 정수로 이용하였다. 그림 3(a)의 시험구간을 대상으로 실시한 표준관입 시험결과를 표 5와 같이 정리하였다. 특히, 준설토의 세립분 함유량이 액상화에 미치는 영향 등을 살펴보기 위하여 각 그룹의 입도특성별로 정리하였다. 이들 시험공의 지하수위는 지표로부터 약 2.5~4.4m로 매립층내에 분포하고 있다.

표 5의 N치를 토대로 Seed 방법에 기초하여 산정한 액상화 안전율은 그림 8과 같고, Iwasaki 방법으로 산정한 액상화 안전율은 그림 9와 같다.

그림 8, 9와 같이 각 방법에 의해 산정한 액상화 안전율은 각 그룹에 상관없이 매립층 전심도에서 안전율이 1.5보다 낮은 값을 보이는 지층이 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 Seed 방법은 매립층 전 심도층에서 안전율이 1.5보다 낮은 값을 보이고 있는 반면에, Iwasaki 방법

표 5. 준설토매립지반의 표준관입저항치(N)

구분	표준관입저항치(N)							
	1.5m	3.0m	4.5m	6.0m	7.5m	9.0m	10.5m	
A 그룹 (Z3)	BA-1	16	12	14	5	4	6	8
	BA-2	5	6	6	6	7	5	6
	BA-3	6	5	7	11	16	7	12
	BA-4	20	5	5	8	7	5	-
	BA-5	5	7	5	-	-	-	-
	BA-6	9	13	8	7	6	5	4
	BA-7	1.5	5	-	-	-	-	-
B 그룹 (Z2)	BB-1	9	9	5	6	4	4	-
	BB-2	11	6	7	5	6	-	-
	BB-3	13	11	8	9	6	4	-
	BB-4	6	8	6	4	5	13	15
	BB-5	14	7	2	2	-	-	-
	BB-7	12	6	7	8	10	7	33
	C 그룹 (Z4)	BC-1	21	2	6	2	5	8
BC-2		12	5	2	3	9	7	-
BC-3		3	2	3	7	4	4	5
BC-4		15	10	4	4	5	8	-
BC-5		14	8	9	3	4	5	11
BC-6		3	4	3	6	4	4	6

주1) '-'는 퇴적층

주2) Z2 : Zone2, Z3 : Zone3, Z4 : Zone4

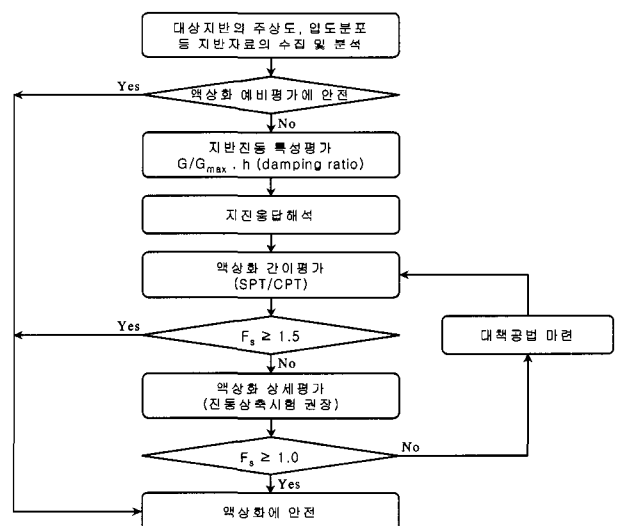


그림 7. 기초 및 지반의 액상화 평가 흐름도

은 지표에서 약 4~5m까지는 안전율이 1.5보다 크고, 4~5m이하의 심도에서는 안전율이 1.5보다 낮은 값을 보인다. 준설토의 세립분 함유량 증가 즉, A그룹에서 B

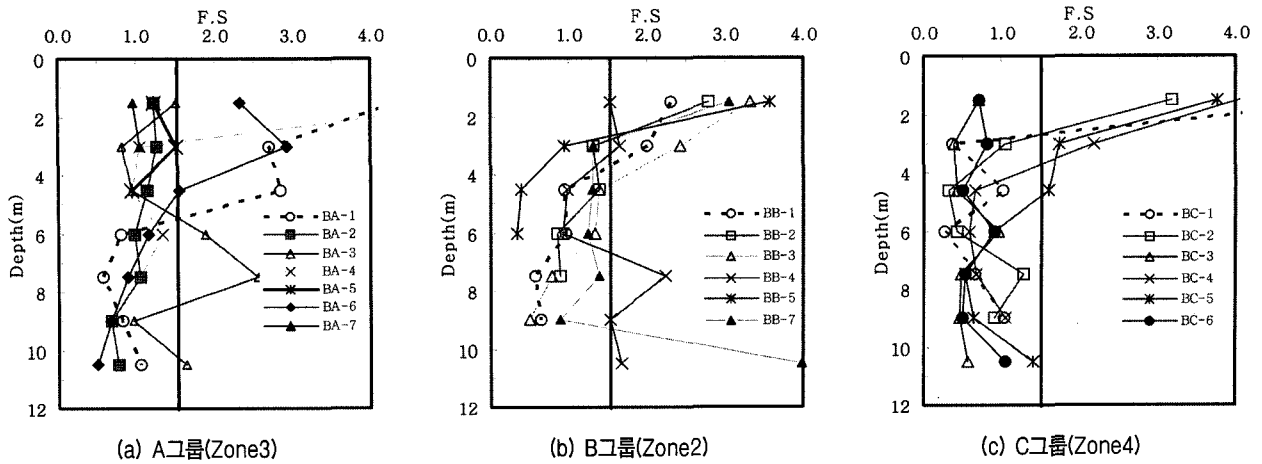


그림 8. Seed 등(1983)에 의한 액상화 안전을 비교

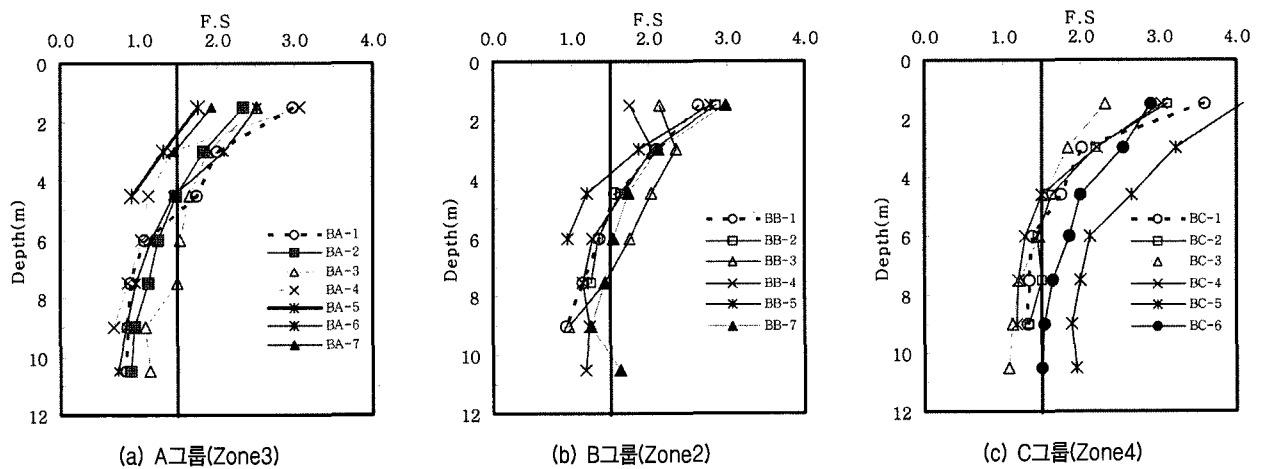


그림 9. Iwasaki 등(1978)에 의한 액상화 안전을 비교

그룹, C그룹으로 갈수록 액상화 안전율은 Iwasaki방법이 Seed 방법보다 약 1.2, 1.5, 1.7배 이상 크게 증대되는 것을 볼 수 있다. Seed 방법은 세립분 함유량 변화에 따른 안전율 변화폭이 작고, Iwasaki(1978)은 세립분 함유량이 증가할수록 안전율은 크게 증가하는 경향을 보인다.

그림 10은 정적콘관입시험(CPT)의 콘관입저항치(q_c)를 이용하여 Robertson과 Wride(1998)방법으로 산정한 액상화 안전율을 도시한 것이다. 그림 10(a)는 각 그룹 구간에서 대표적으로 수행한 CPT- q_c 값으로 대략 2~15Mpa 정도이고, 매립층 약 3.8~5.8m심도에서의 q_c 는 약 1.5~4.0Mpa로 연약한 지반강도를 보인다. A그룹(zone3)의 CPT- q_c 값은 B그룹(zone2)과 C그룹(zone4)의 q_c 값에 비해 하부지층까지 다소 큰 값을 보이고 있다. 그림 10(b)는 각 그룹별 액상화 안전율을 비교한 것으로 A그룹(zone3)에서 B(zone2), C그룹(zone4)으로 갈수록 안전율이 커지는 경향을 보이며, 연약층이 존재하는 심도층을 제외한 전 심도에서의 안전율은 1.5보다 작은 값

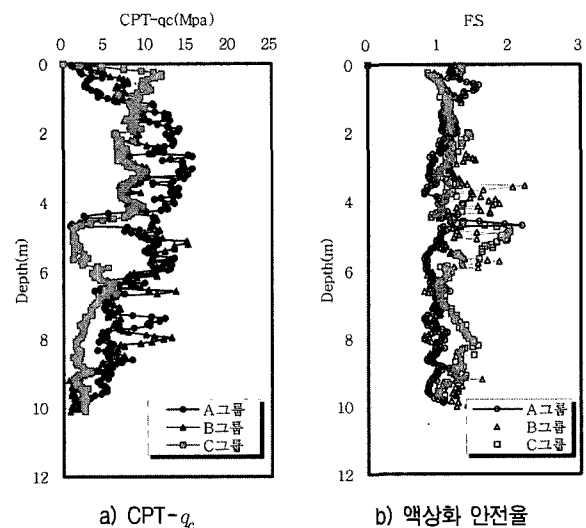


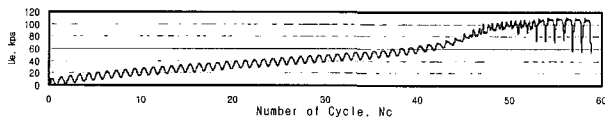
그림 10. CPT- q_c 에 의한 액상화 안전을 평가

을 보이고 있다.

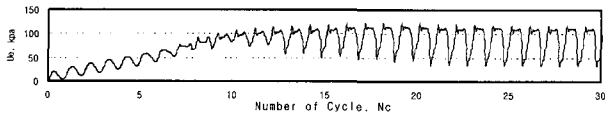
한편, 2004년 건교부에서 발표한 진동삼축시험에 기초한 상세평가는 간이평가에 의하여 허용안전율이 1.5

미만으로 액상화 안전성이 확실치 않거나 내진 1등급과 같은 중요구조물이 건설되는 부지에 대하여 수행하도록 권장하고 있다. 진동삼축시험은 표 4의 A, B, C그룹의 대표 시료를 대상으로 구속압, 상대밀도 등 현장조건을 고려하였다. 그림 11은 진동삼축시험 결과의 예로, 축차응력에 따른 진동하중 재하횟수별 과잉간극수압의 변화를 나타내었다. 이는 A그룹에 해당하는 시료이고, 상대밀도(D_r)는 50%로 초기 유효구속압은 100kPa로 고정시켜 얻은 결과이다. 그림 11(a)는 과잉간극수압이 초기 유효구속압 100kPa과 같아지는 시점의 진동하중 재하횟수(N_c)는 48회이고, 그림 11(b)와 그림 11(c)의 진동하중 재하횟수(N_c)는 각각 11회, 5회로 나타났다.

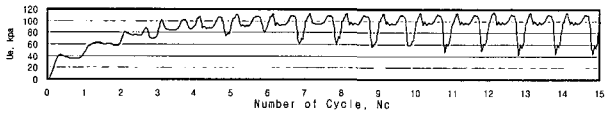
그림 12는 각 시료에 대한 반복재하횟수(N_c)와 저항강도비의 관계를 도시한 것이며, 이 결과를 토대로 보정 저항강도비를 산정하게 된다. 그림처럼 준설토의 세립분 함유량이 증가할수록 액상화 저항강도비는 더 크게 증가하는 경향을 보인다. 그리고, 다짐 전 상대밀도



(a) 액상화 저항 강도비 - 0.20



(b) 액상화 저항 강도비 - 0.24



(c) 액상화 저항 강도비 - 0.28

그림 11. 준설토의 진동삼축시험결과 예

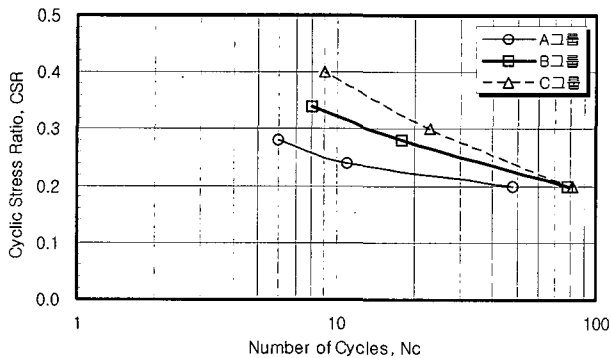


그림 12. 진동삼축시험의 CSR과 N_c 의 관계

(D_r)는 약 50%정도의 경우와 다짐 후의 상대밀도를 60, 70%로 가정하여 산정한 액상화 저항강도비는 표 6과 같이 나타났다.

그림 13은 동일대상층에서의 액상화 평가방법에 따른 액상화 안전율 비교결과이다. 그림처럼 준설토층의 액상화 안전율은 허용안전율 1.5보다 낮은 값을 보이며 액상화 발생 가능성이 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 평가방법에 따른 안전율을 비교하면, 상세예측법 > Robertson과 Wride방법 > Seed방법 순으로 나타났으나, 매립층 상부 약 4m까지는 상세평가방법에 의한 안전율이 간이평가방법의 안전율보다 큰 값을 보이고, 그 하부 심도에서는 서로 상반되는 특징을 보인다. 이는 Seed방법의 경우 매립층 깊이에 따른 세립분 함유량 변화를 정확하게 반영하기 어렵기 때문으로 사려되며, CPT의 경우에는 흙 고유입자 특성 즉, 세립분의 함유량과 소성에 따라 콘관입저항치 및 마찰비의 영향을 고려해 보정하기 때문으로 추정된다.

이와 같이 준설토매립지반에 대하여 수행한 액상화 분석결과, 다짐전 액상화 안전율은 허용안전율보다 낮은 값을 보이고 있어 액상화에 불안정한 것으로 나타났다. 따라서, 본 준설토매립지반은 다짐도 증진 및 액상화 방지를 위해 다짐공법을 적용하는 것이 타당한 것으로 사료

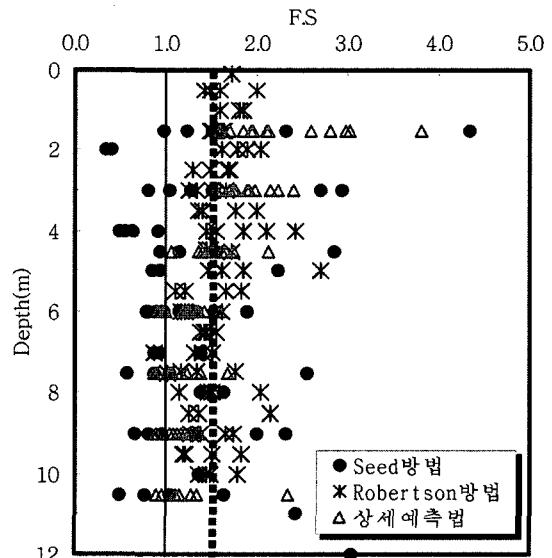


그림 13. 평가방법에 따른 액상화 안전율 비교

표 6. D_r 에 따른 액상화 저항강도비(보정후)

구분	A그룹		
상대밀도(D_r)	50%	60%	70%
액상화 저항강도비	0.220	0.292	0.350

되며, 다짐 후의 지반개량효과 평가 및 액상화 평가를 통해 보강 효과를 검증하는 것이 필요한 것으로 판단되었다.

4.2 준설매립지반의 지반개량효과 평가

4.2.1 다짐시험시공 결과분석

동다짐공법의 다짐시 타격횟수는 다짐효과와 긴밀한 관계가 있고, 타격지점에 가해지는 타격에너지는 지반의 한계체적 변화와의 관계 즉, 단계별 타격횟수가 너무

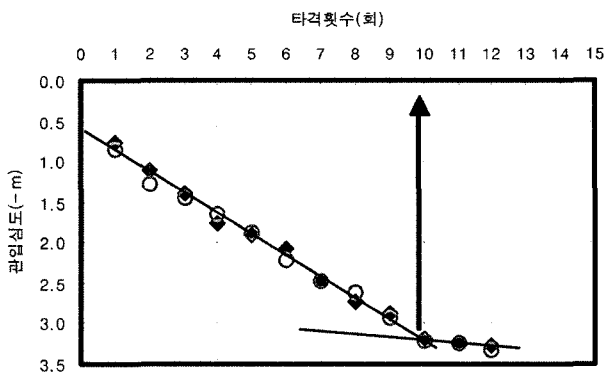


그림 14. 타격횟수와 관입심도와의 관계

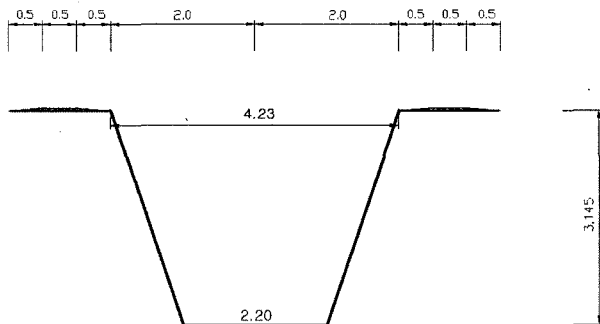


그림 15. 타격에 따른 체적변화

적계되면 다짐효율이 떨어지는 반면 타격횟수가 너무 많게되면 흙이 파쇄되어 오히려 지반강도가 떨어지기 때문에 지반상태에 적합한 최적 타격횟수를 결정할 필요가 있다. 시험동다짐시 나타난 타격횟수와 관입심도와의 관계를 통해 최적타격횟수는 그림 14와 같이 약 10회 정도로 나타났다. 또한, 추의 관입에 의한 웅덩이 (crater)의 체적변화가 한계점에 도달한 상태를 판단하기 위해 그림 15처럼 타격에 따른 타격효율(P_e)을 구하게 되는데 이는 식 (3)에 의하여 결정한다. 그 결과 준설매립지반에서의 웅기나 침하가 거의 유사한 형상의 지반거동을 보이며 타격효율은 약 97~103%정도로 매우 양호한 것으로 나타났으며, 이를 토대로 다짐공법의 다짐간격 및 타격에너지의 최적상태를 확인할 수 있었다.

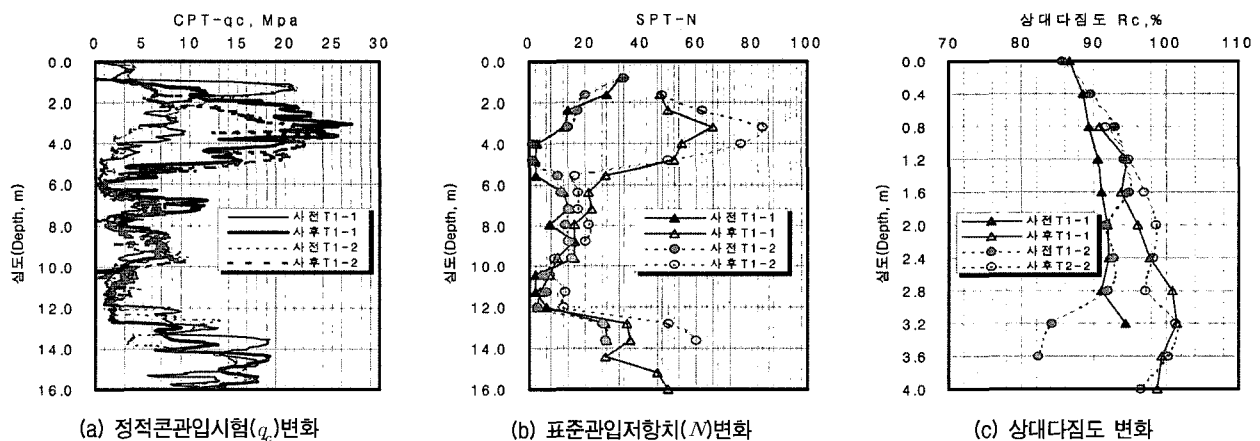
$$P_e = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (3)$$

여기서, P_e : 타격효율(%)

V_1 : 추의 타격에 의한 한계체적변화량(m^3)

V_2 : 임의 타격횟수시의 체적변화량(m^3)

또한 다짐시험시공은 표 1의 타격에너지를 고려해 typeI과 typeII 그리고 유압햄머다짐을 수행하였다. 다짐 전·후의 지반개량효과는 CPT- q_c , SPT- N , 그리고 상대다짐도를 측정하여 그림 16~18과 같이 비교하였다. 각 다짐공법에 의한 개량심도는 대체적으로 7~9.6m까지 다짐영향이 미치는 것으로 나타났다. 특히 지표 상부층부터 5m내외의 사질토층에서는 지반개량효과가 상당히 크고 그 하부 심도에서는 개량효과가 다소 저하되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 한편 동다짐의 경우 상부교란심도는 약 0.9~1.2m정도로 다짐에너지가 커질



(a) 정적콘관입시험(q_c)변화

(b) 표준관입저항치(N)변화

(c) 상대다짐도 변화

그림 16. 동다짐 type I의 다짐 전·후의 지반강도 변화

수목 교란정도는 다소 증가하는 경향을 보이고, 유압햄머다짐은 동다짐에 비해 상부 교란정도가 약간 감소하는 것으로 나타났다.

다짐시험시공 결과를 정리하면, 표 7과 같이 다짐 후 CPT- q_c 와 SPT- N 치에 의한 개량효과는 상부층 0~5m 사이에서 상당히 크게 증가하였고, 하부 5~8m 심도에서는 급격히 감소하는 경향을 보였다. 다만, 상부층과 하부층 사이에 점토층이 존재하는 경우 다짐시 정적 충격 에너지를 충분히 지지할 수 없어 지반강도가 크게 감소

하는 것으로 추정된다. 이는 충격력에 대하여 충분한 반력을 제공하지 못하고, 다짐시 전달된 지반진동이 매립토와 점성토 경계면에서 인장파로 반사되어 접촉경계면에서 개량정도가 떨어지기 때문이다.

본 준설매립지반의 다짐효과 즉, 상부 0~5m의 낮은 심도에서는 유압햄머다짐공법이 동다짐공법보다 약 1.4 배정도 큰 값을 보인 반면에, 10m내외의 깊은 심도에서는 동다짐공법의 개량효과(약 1.7배)가 유압햄머다짐의 개량효과(약 1.1배)보다 양호한 것으로 나타났다. 이와 같이

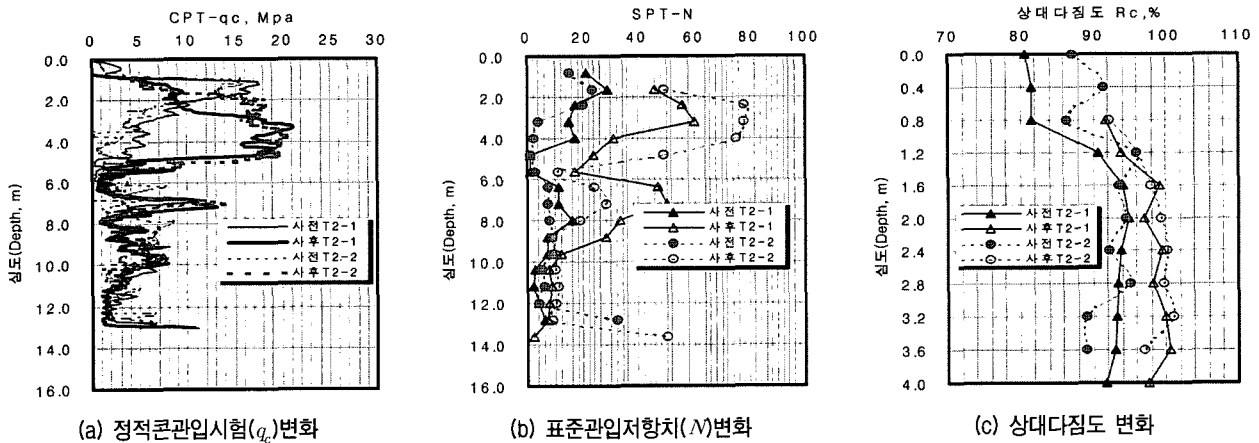


그림 17. 동다짐 type II의 다짐 전·후의 지반강도 변화

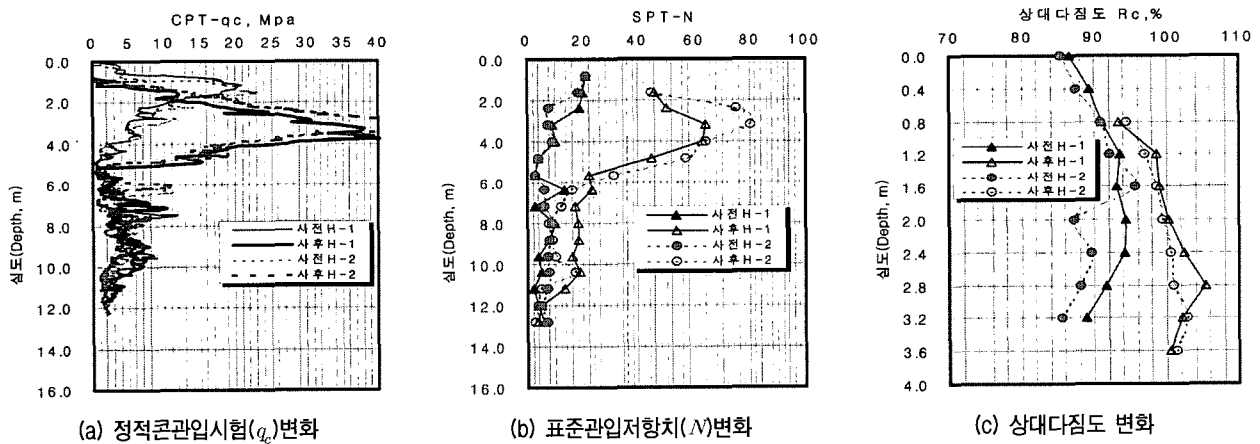


그림 18. 유압햄머다짐의 다짐 전·후의 지반강도 변화

표 7. 다짐 전·후의 지반개량효과 비교

공법	정적콘관입시험 (q_c , Mpa)		표준관입저항치 (N)		상대다짐도 (R_c , %)		비고
	다짐 전	다짐 후	다짐 전	다짐 후	다짐 전	다짐 후	
동다짐 typel	7.2	14.9	15	59	89.9	97.1	상부0~5m
	4.6	7.7	9	24	-	-	5m ~
동다짐 typell	6.5	14.0	14	55	90.7	97.8	상부0~5m
	4.1	7.4	7	19	-	-	5m ~
유압햄머다짐	7.7	20.9	13	59	90.1	99.9	상부0~5m
	5.2	5.9	6	15	-	-	5m ~

각 공법의 개량효과, 개량심도, 시공성 및 경제성 등을 종합적으로 평가할때, 동다짐공법의 다짐에너지가 클수록 개량효과가 우수한 것으로 나타났다. 그리고, 다짐 전·후의 개량효과 평가방법은 CPT- q_c 를 이용하는 경우가 SPT-N치의 경우보다 매립지층의 지반특성 및 다짐효과를 정밀하게 평가할 수 있어 매우 효과적인 것으로 판단된다.

4.2.2 액상화 보강효과 평가

그림 3(a)의 대상구간에서 실시한 동다짐 전·후의 SPT-N 및 CPT- q_c 결과를 바탕으로 액상화 안전율을 산정하여 그림 19~21과 같이 비교하였다.

그림 19~21처럼 다짐전·후의 SPT-N 및 CPT- q_c 결과는 다짐에너지가 미치는 영향심도 8~10m까지는 지

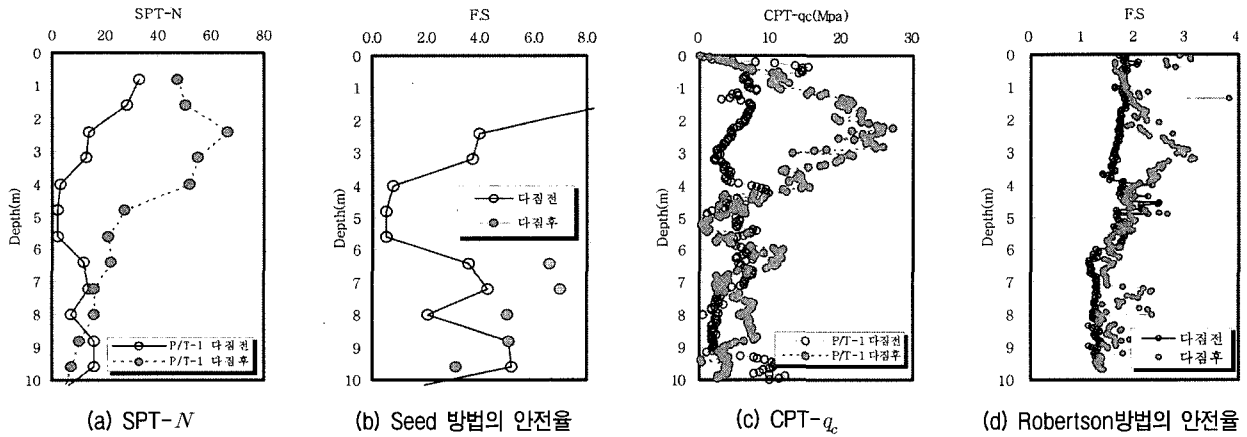


그림 19. Zone2(동다짐 type I)구간의 동다짐 전·후의 액상화 평가

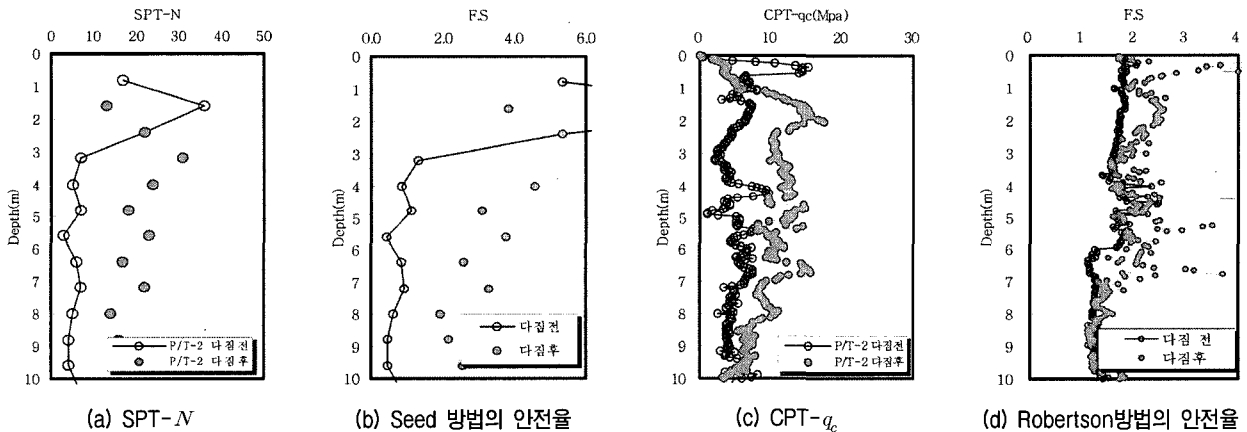


그림 20. Zone 3(동다짐 type I)구간의 동다짐 전·후의 액상화 평가

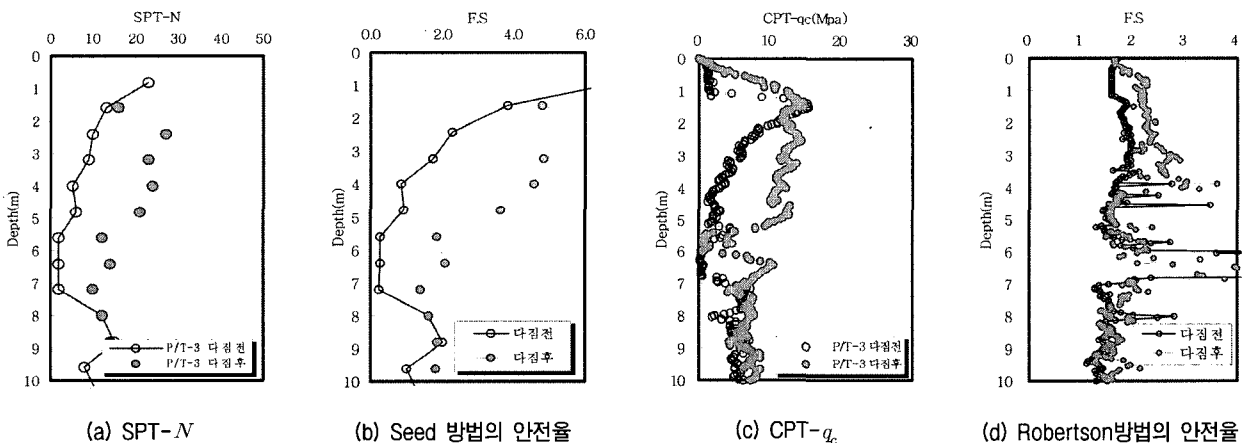


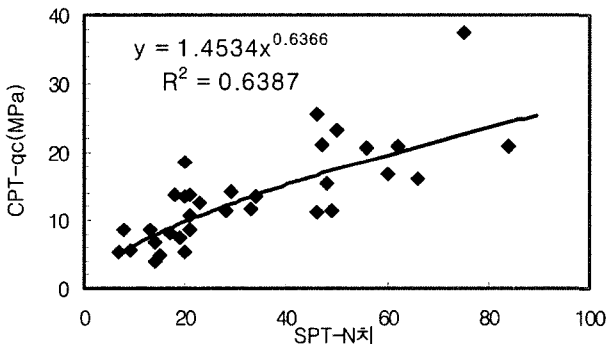
그림 21. Zone4(동다짐 type II)구간의 동다짐 전·후의 액상화 평가

반강도가 대체적으로 크게 증가한 것으로 나타나, 액상화 안전율도 크게 증가한 것으로 나타났다. Seed 방법에 기초한 액상화 안전율은 다짐 전 안전율 0.3~8.0보다 다짐 후의 안전율이 1.4~17.0이상으로 약 2~4배정도 크게 증가하였다.

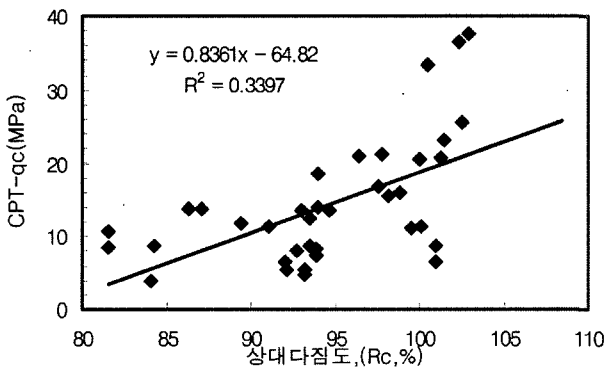
그리고, Robertson과 Wride(1998)방법의 경우에도 액상화 안전율은 대체적으로 지반강도 증가 범위내에서 허용안전율 1.5보다 더 크게 증가한 것으로 나타났다. 특히, 매립층내 점토질 실트층에서는 CPT- q_c 값이 0~4 Mpa 정도의 낮은 값을 보인 반면에 액상화 안전율은 상당히 크게 증가되는 것으로 나타났다. 이는 I_L (soil behavior type index)값이 2.6보다 큰 경우 세립토로 분류되어 액상화 가능성이 거의 없는 것으로 나타나기 때문이다. 또한, Robertson과 Wride방법에 의한 안전율은 동다짐의 타격 에너지가 미치는 다짐영향과 더불어 세립분 함유량이 미치는 영향범위를 보다 쉽게 평가 할 수 있었다.

4.3 준설매립지반의 다짐관리 방안에 대한 고찰

동다짐공법의 개량효과를 평가하기 위하여 수행한 CPT- q_c , SPT- N , 그리고 상대다짐도 등의 결과를 토대로



(a) SPT- N & CPT- q_c



(b) 상대다짐도 & CPT- q_c

그림 22. 동다짐에 대한 상대다짐도 및 지반강도의 관계

준설매립지반의 다짐관리 방안을 제시하고자 이들 상호관계를 분석하였으며, 그 결과는 그림 22와 같다. 그림 22(a)는 SPT- N 과 CPT- q_c 와의 관계이고, 그림 22(b)는 현장밀도에 의한 상대다짐도와 정적콘관입시험의 q_c 와의 관계이다.

시험시공결과에서 지반강도는 콘관입저항치(q_c)을 이용한 경우가 표준관입저항치(N)를 이용하는 경우보다 정확도가 좋고 다짐관리가 용이한 것으로 나타난 바와 같이, 현장 다짐시험시공을 통해 얻은 SPT- N 치와 CPT- q_c 관계에서 각각의 CPT- q_c 값에 상응하는 SPT- N 치를 구하였다.

또한, 준설매립지반의 불규칙한 지층의 변화특성을 반영하여 개량 심도 이내에서 원지반이 나타날 때에는 개량 심도를 매립층 깊이까지로 제한하였으며, 자갈층, 혼합토층 등에서는 표준관입시험을 병행하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

이처럼 준설매립지반의 동다짐의 적부 판정은 시방서의 다짐도를 기준으로 하고 이에 대응하는 CPT- q_c 와 SPT- N 등과 상관성 분석을 토대로 다짐관리기준은 표 8과 같이 설정하였다(서울대 2003; 김종국 등 2004a). 특히, 매립층 내에 연약한 점성토층이 존재하는 경우, 상기의 CPT- q_c 관리 기준을 만족하도록 하고, 최소 관리 기준에 못 미치는 경우에는 동일 지역에서의 SPT- N 치 결과를 참고하여 결정하되, 다음 식 (4)의 판정 방법을 만족하도록 한다.

이는 CPT- q_c 기준 적용시 개량 다짐도가 q_c -깊이 곡선 평면에서 면적비의 95%이상이면 다짐 기준을 만족하는 것으로 하였다.

$$Ar = \frac{q_{c(after)} \times (H - h_{(d)})}{q_{c(com. stand.)} \times (H - h_{(d)})} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서, Ar(%)는 면적비이고, $q_{c(com. standard)}$ 는 기준 콘관입 저항치이며, $q_{c(after)}$ 는 개량후 콘관입저항치이며, $(H - h_{(d)})$ 는 지표교란층을 제외한 개량깊이이다.

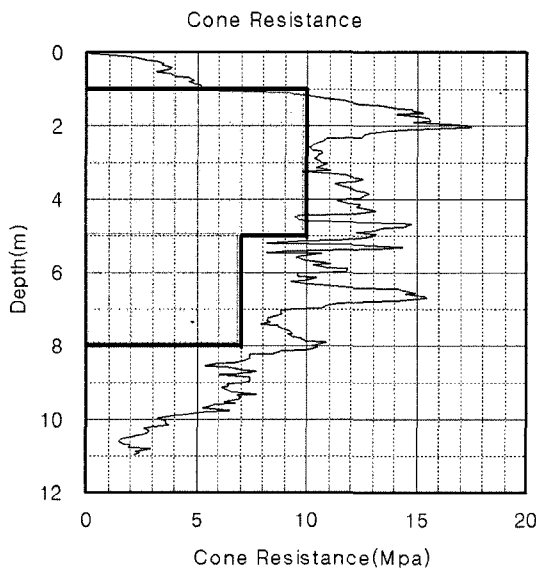
표 8. 다짐관리 기준

구 분	CPT- q_c , (Mpa)	SPT- N	비 고
상부층 (0~5m)	10	14	노상 및 노체 구분 없이 적용
하부층 (5~8m)	7	10	

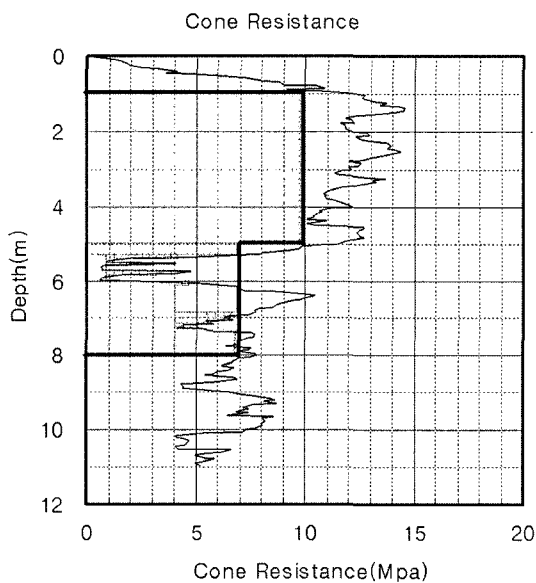
시험동다짐 구간에서 대상심도내에 연약층이 없는 경우와 연약한 점토층이 존재하는 경우를 구분하여 식 (4)의 면적비를 이용하여 그림 23과 같이 지반개량정도를 평가하였다.

그림 23과 같이 면적비를 계산하면, type I 구간에서는 100%, type II 구간에서는 93%로 나타났다. 즉, type I 구간에서는 면적비가 95% 이상으로 다짐 기준을 만족하고 있으나, type II 구간에서는 5.5~6.0m에 존재하는 연약층의 영향으로 면적비 다짐 기준을 만족하지 못하고 있다.

따라서, 연약 점토층이 존재하는 준설매립지반의 지



(a) 연약층이 없는 경우(Type-I)



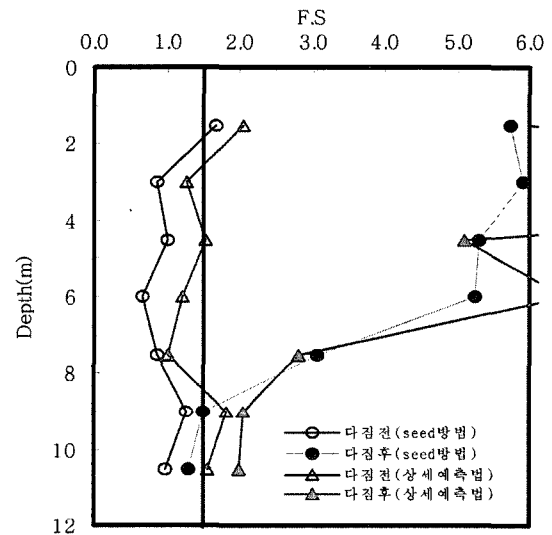
(b) 점토층이 존재하는 경우(Type-II)

그림 23. 다짐 관리기준에 의한 면적비 계산 예

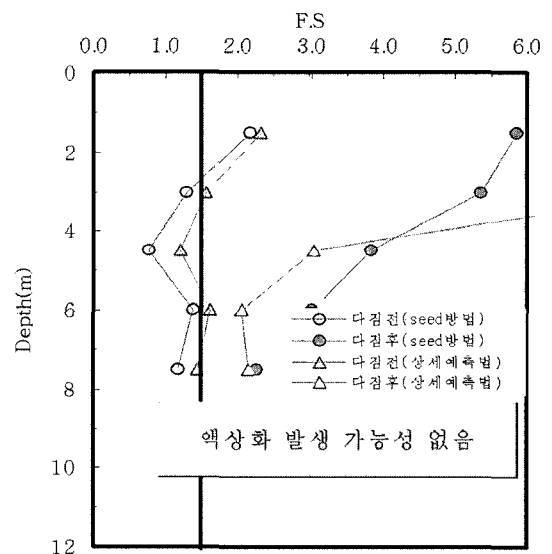
반개량효과 평가는 표 8의 “CPT- q_c (Mpa), 과 SPT- N 의 기준”과 그림 23의 “면적비 \times 95%의 기준” 등을 종합적으로 분석하여 최소 한가지 기준에 만족한 경우 적합한 것으로 평가하였다.

그리고, 동다짐 구간에서 수행한 SPT- N 치를 이용하여 Seed 방법으로 산정한 액상화 안전율과 진동삼축시험에 의한 상세평가방법으로 산정한 안전율을 비교하여 그림 24와 같이 도시하였다.

그림 24와 같이 동다짐 후의 액상화 안전율은 다짐전 안전율보다 크게 증가하여 허용안전율 1.5보다 크게 나타나 액상화 보강은 만족한 것으로 확보되었다. 특히, Seed 방법으로 산정한 액상화 안전율이 허용안전율 1.5



(a) Zone 3구간(Type-I)



(b) Zone 4(Type-II)

그림 24. 본다짐 구간의 액상화 보강효과

보다 더 클 경우, 상세평가에 의한 안전율 1.0보다 크게 나타남에 따라 간이평가방법에 의하여 동다짐의 액상화 보강효과를 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

이와같이 동다짐공법에 따른 지반개량효과 및 액상화 보강효과를 평가한 바와같이 표 8의 다짐관리기준에 만족하는 경우 액상화 보강은 충분히 이루어진 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 송도신도시 개발부지의 준설매립지반을 대상으로 준설토의 물리적 특성과 매립지반에 대한 액상화 가능성을 분석하였으며, 다짐공법에 따른 개량효과를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 준설매립지반은 사질토(SM)부터 세립질 사질토(SP-SM)가 대부분으로 액상화 현상이 발생하기 쉬운 조건을 가지고 있으며, 부분적으로 점토층이 혼재되어 있는 특성을 보인다. 이에 대한 액상화 평가 결과, SPT를 이용하는 경우에 있어 Iwasaki 등(1978)의 방법에 의한 액상화 안전율은 Seed 방법보다 약 1.2~1.7배 정도 크게 산정되며, 지표 부근에서의 액상화 안전율이 하부층보다 크게 산정되는 경향을 보이고 있고, 세립분 함유량이 증가할수록 안전율은 크게 증가한 것으로 나타났다. 반면에, Seed 방법은 매립층 전 심도층에서 안전율이 1.5보다 낮은 값으로 세립분 함유량이 많은 지층에서 다소 보수적인 결과를 보이는 것으로 나타났다. CPT- q_c 값에 기초한 Robertson과 Wride(1998)방법의 경우, 콘관입 저항치(q_c)가 0~4Mpa정도의 혼합점토층 일때, 액상화 안전율은 상당히 크게 증가하는 경향을 보이며 액상화 가능성이 거의 없는 것으로 나타나 세립분이 미치는 영향범위를 확인하는데 유용한 것으로 판단되었다.
- (2) 동 준설매립지반에 대한 다짐시험시공결과, 상부 0~5m의 낮은 심도에서는 유압햄머다짐의 개량효과가 동다짐공법보다 더 양호한 것으로 나타났고, 10m내외의 깊은 심도에서는 동다짐공법의 개량효과가 유압햄머다짐보다 양호한 것으로 나타났으며, 시공성과 경제성 등을 고려할 때 동다짐공법의 다짐에너지가 클수록 개량효과가 우수한 것으로 나타났다. 특히, 동다짐의 지반개량효과는 표 8의 다짐

관리기준을 만족하는 경우 액상화 보강이 충분히 이루어져 내진성능 향상을 크게 도모할 수 있는 것으로 평가되었다. 그리고, 다짐 전·후의 개량효과 평가 방법은 CPT- q_c 를 이용하는 경우가 SPT-N치의 경우보다 매립지층의 지반특성 및 다짐효과를 정밀하게 평가할 수 있어 매우 효과적인 것으로 사료되었다.

이와같이 향후 본 준설매립지반과 유사한 조성부지는 사전 설계 및 시공시 대상지반의 지반특성을 반영한 시험시공 등을 실시하고, 다짐관리방안을 마련하여 고품질을 확보하는 것이 중요한 것으로 판단되었다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2004), *기존 시설물의 기초 및 지반의 내진성능 평가요령*.
2. 김명보 (2003), *송도신도시 건설공사 지반개량 다짐관리 연구보고서*.
3. 김종국, 채영수, 김명모 (2004a), "CPT를 이용한 준설매립지반의 지반개량효과 평가에 관한 연구", *한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집*, pp.910-921.
4. 김종국, 채영수 (2004b), "인천지역 준설매립지반의 품질개선 사례연구", *한국지반공학회 연약지반위원회 논문집*, pp.61-83.
5. 김종국, 채영수 (2005), "현장시험 및 실내시험을 이용한 준설매립지반의 액상화 평가에 관한 연구", *한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집*, pp.1528-1537.
6. 신윤섭, 박인준, 최재순, 김수일 (1999), "국내 발생 지진규모를 고려한 액상화지향강도 산정", *한국지반공학회 논문집*, pp.307-317.
7. Iwasaki, T., Tatuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S. (1978), "A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan", *Proceedings of 5th Japan Earthquake Symposium*, pp.641-648.
8. Gibbs, H.J. and Holtz, W. G. (1957), "Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing", *Proceedings, Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*.
9. Menard, I. and Brois, Y. (1975), "Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation", *Geotechnical*, Vol.25, No.1, pp.3-18.
10. Meyerhof, G.G. (1956), "Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soil", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.82, SM.1, pp.866.
11. Robertson, P.K. and Wride. (1998), "Evaluation Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test", *Journal of the Canadian Geotechnical*, 35: pp.442-459.
12. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.97, No.SM9, pp.1248-1272.
13. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I. (1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.109, No.3, pp.458-482.

(접수일자 2005. 6. 27, 심사완료일 2006. 5. 9)