

동압밀공법을 이용한 지반개량 사례연구

EFFECTIVENESS ANALYSIS OF GROUND IMPROVEMENT TREATED BY DYNAMIC CONSOLIDATION.

양 정 수, JEONG-SOO YANG *1
 손 준 익, JOON-IK SOHN *2

*1 현대엔지니어링 토목사업부 과장, Senior Engineer, Civil Division, Hyundai Engineering Co., Ltd., Seoul
 *2 한국건설기술연구원 지반 연구실 수석연구원, Research Fellow, Geotech. Eng. Division, Korea Institute of Construction Technology, Seoul

SYNOPSIS

This paper reports a case study of dynamic consolidation. The objective of the study is to evaluate the effectiveness of ground improvement at the site for Hyundai Petrochemical Compound constructed at Daesan-Myeon, Seosan-Gun in the western shores of Korea. The site ground was prepared by filling on the existing soft marine deposit which consists of a loose granular soil layer and a medium stiff clay layer. For the stabilization of site ground, the compaction was executed in three different procedures with same pounder weight, drop height and imprint spacing.

The post investigation showed that the object was successfully achieved indicating a significant increase of bearing capacity of the treated ground. In this study the effectiveness of dynamic consolidation is evaluated for various factors: the applied energy, tamping sequences, the radial distance from the imprint location and the depth of bed rock.

1. 서론

최근 우리나라에서는 해안 매립지에 대단위 플랜트 공사가 활발히 시행되고 있으며 이에 따라 효율적이고 경제성 높은 연약지반 처리공법의 필요성이 날로 증대되고 있다. 연약지반 처리에 대해서는 현재 여러 공법이 이용되고 있으나 각 현장에 적합한 공법의 선택은 기술적인 측면은 물론 시공기간 및 공사비 등과 관련된 경제적 측면에 의해서도 크게 좌우된다 할 수 있다.

동압밀공법은 1960년대 말 프랑스의 L. Menard에 의해 오늘날과 같은 형태로 개발된 공법으로서 적용범위가 확대됨에 따라 세계 각국의 각종 건설현장에 채택되어 수백회의 시공실적이 있으나 국내에서는 아직 대규모로 적용된 사례가 드문것으로 사료된다.

초기에 비해 현재는 다양한 종류의 흙에 적용되고 있으나 본 공법의 효과는 흙의 종류, 타격에너지를 비롯한 여러 요인이 복합적으로 작용하여 결정되며 적용 현장마다 각기 다른 시공 조건과 개량 목적 또는 계층 시스템 등으로 인하여 현재까지 공법에 대한 일반적인 경향이 충분히 정립되어 있지 않은 상태로 이론적인 면 보다는 경험적인 면이 선행되고 있는 실정이라 할 수 있다.

본 연구에서는 서해안 매립지에 건설된 현대석유화학 대산현장의 기초지반 개량공사에 적용한 동압밀공법의 실험자료를 기초로 하여 지반개량 효과를 분석하였다. 대상지역은 해성퇴적토층의 원지반을 인근의 산토로 매립 성토하여 조성되었으며 대략적으로 상부층은 연약한 사질토층이며 하부층은 점성토층으로 구성되어 있다. 지반조건, 시공성 등을 감안하고 특히 축박한 시공기간을 고려하여 본 공법을 선택하였으며 약 6m 깊이의 지표면 개량을 시공 목표로 하였다. 동압밀 시공 전후에 실시한 표준관입시험 결과를 통하여 동다짐 에너지 제공으로 인한 지반강도의 증가 효과를 각 타격 방법별로 비교 분석하였으며 연구 결론의 주요 내용은 다음과 같다.

첫째, 타격에너지에 따른 개량심도 측정치를 기존 발표자료와 비교하였다.

둘째, 지반강도 증가 효과를 N치 변화를 기준으로 각 타격 방법별로 비교 분석하였다.

셋째, 지반개량 한계심도, 즉 지표로부터 개량효과가 가장 큰 지점까지의 깊이를 조사하였다.

넷째, 타격지점에서 부터의 거리 변화에 따른 지반개량 효과를 분석하였다.

다섯째, 기반암 까지의 깊이에 따른 지반개량 효과를 분석하였다.

2. 타격에너지에 의한 개량심도

동압밀공법(DC공법)의 효과에 영향을 미치는 요소는 다양하여 흙의 종류, 지층구조, 지하수위, 타격당 에너지, 단위면적당 총 에너지, 타격지점 간격(Imprint Space), 타격 순서(Sequence), 정지기 간 및 추의 특성 등을 들 수 있다. Mayne (1984)은 세계 120개 현장의 시공자료를 분석한 결과 일반적인 경향으로서 타격공(Crater)의 크기, 지반 진동 크기와 개량심도 등은 타격당 에너지와 비례하며 지반의 침하정도, CPT, SPT, Limit pressure, Pressuremeter modulus 등은 단위 면적당 에너지(타격횟수)와 관계가 있음을 밝힌 바 있다. 그러나 지하수위, 입도분포(200번체 통과량), 정치시간, 추의 특성 등에 따른 일반적인 경향은 규명하지 못 하였다.

DC공법에 의해 다짐되는 토층의 두께와 타격에너지 사이의 관계에 대하여 Menard와 Broise (1975)는 경험적으로 다음 (1)식을 제안하였으며

$$WH \propto D^2 \quad \text{---(1)}$$

여기서, W : 추의 중량 (ton)
 H : 낙하고 (m)
 D : 개량심도 (m)

Leonards et al. (1980) 과 Lucas (1980)는 실제 시공결과로 부터 (1)식을 보정하여 DC에 의한 개랑심도 (Depth of Influence, Dmax) 로서 각각 (2), (3)식을 제안하였다.

$$D_{max} = 1/2 \sqrt{WH} \text{ -----(2)}$$

$$D_{max} = (0.65 \sim 0.80) \sqrt{WH} \text{ -----(3)}$$

그러나 개랑심도의 정의는 어느정도 주관적인 것으로서 측정방법이나 지반개랑을 나타내는 자료를 엔지니어가 어떻게 판단하느냐에 따라 다를 수 있으며 때때로 이를 결정하기가 곤란한 경우도 있다. 개랑심도와 관련하여 Mitchell (1981)은 점토로부터 사질토 및 채석에 이르는 여러 지반을 대상으로 한 연구사례를 그림 1 과 같이 요약하였다. 이 자료는 현장조건이 서로 다르고 현장마다 개랑 판정 기준이 일정하지 않으므로 그 결과가 정확하다고 할 수는 없으나 개랑심도는 가해진 에너지와 일정한 관계가 있음을 시사해 준다. 그림 1의 자료에 의하면 식(1)을 만족하며 식(2)가 비교적 자료의 대표성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

개랑심도는 타격에너지 외에 다른 요소에 의해서도 좌우되며 흙의 종류는 가장 중요한 요소일 것으로 예상된다. 일반적으로 세립토의 경우는 조립토와 같은 수준까지 개랑되지 않으며 결토 및 peat 등 중간에 연약층이 있는 경우 동적하중에 대해 완충효과가 있는 것으로 알려져 있다.

현장에 따라 측정 가능한 최대 개랑정도가 있는데 그림 1의 자료로 부터 조사한 바에 의하면 최대로 개랑되었을 때 clean sand의 경우 콘관입 저항치는 180 kg/cm², N= 45/30, Pressuremeter의 Limit pressure 3 MPa 그리고 Pres-suremeter Modulus 25 MPa가 기록되었으며 세립질의 압축성 흙의 경우는 이 값들의 1/2 정도인 것으로 확인되었다.

한편 개랑정도 (Degree of Influence)에 있어서는 일반적으로 지표면이 아닌 한계심도 (Critical Depth, Dc)에서 개랑효과가 가장 크며 최대 개랑심도 (Dmax)에 이르기 까지 감소한다. Mayne (1984)은 느슨한 실트질 모래지반으로 된 미국 Massey Coal Terminal의 지반개랑 사례의 경우 Dc 는 대략 Dmax의 1/2 정도이며 대체로 Dc 는 1/2 Dmax와 지표면 사이에서 변화하는 경향이 있음을 발표하였다.

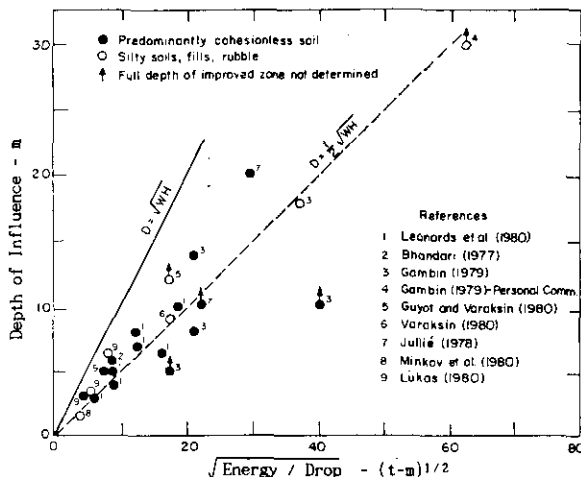


그림 1 DC 타격당 에너지와 개랑심도와의 관계 (Mitchell, 1981)

3. 시공 예

3.1 공사 개요

본 공사 실시 지역인 충남 서산군 대신면에 위치한 현대석유화학단지에는 연산 35만톤의 나프타 분해공장을 비롯하여 8개 계열공장 및 접안시설, 유틸리티 시설 등을 갖춘 종합석유화학 콤플렉스로서 1990년 1월 부터 본격적인 공사에 들어간 이래 총 투자비 약 1조 2천 억원과 3백만 명을 투입하여 91년 10월 준공을 봄으로서 현재 본격적인 가동 중에 있다.

본 현장의 부지는 대신면 일대 해안 매립지 약 80만 평 으로 본 공사에 앞서 전반적인 지반조사를 통하여 기초지반 상태를 파악하였으며 기초지반 처리를 위하여 여러 연약지반 개랑공법을 검토한 결과 지반조건이 비슷한 인근의 극동정유공장 부지에 효과적으로 시공된 바 있으며 특수한 장비가 필요치 않아 경제적이고 시공성도 양호하며 특히 축박한 공사기간을 고려하여 동압밀공법을 택하게 되었다.

적용 대상지역은 탱크지역 및 기반암이 매우 얇은 심도에 분포하고 있어서 지반조건이 양호한 지역을 제외한 약 180,000 m²의 면적이며 89년 10월 부터 약 6개월에 걸쳐 약 23,000 공의 동압밀을 시행하였다. (그림2 및 표1) 또한 화학 플랜트 내의 각종 기기 및 VESSEL 기초와 구조물 등의 중요성을 감안하여 침하 방지를 위하여 대부분 말뚝기초 시공을 하였다.

DC 에 의한 지반 개랑심도의 목표는 지표면 약 6 m 로 계획하였으며 DC 실시 후 개랑심도를 조사해 본 결과 당초 계획과 잘 일치하였다. 지반개랑에 의한 효과로는 동다짐 에너지의 제공에 의한 지반의 밀도 증가로 지반강도 (N치)의 증가가 확인되었으며, 부수적으로 지진시 느슨한 사질토 지반에서 발생할 가능성이 있는 지반의 액상화에 대한 저항력이 커졌고 아울러 지표면을 다짐으로써 기초말뚝의 지내력을 증가시켜 말뚝의 소요 분수를 크게 감소시킬 수 있었다.

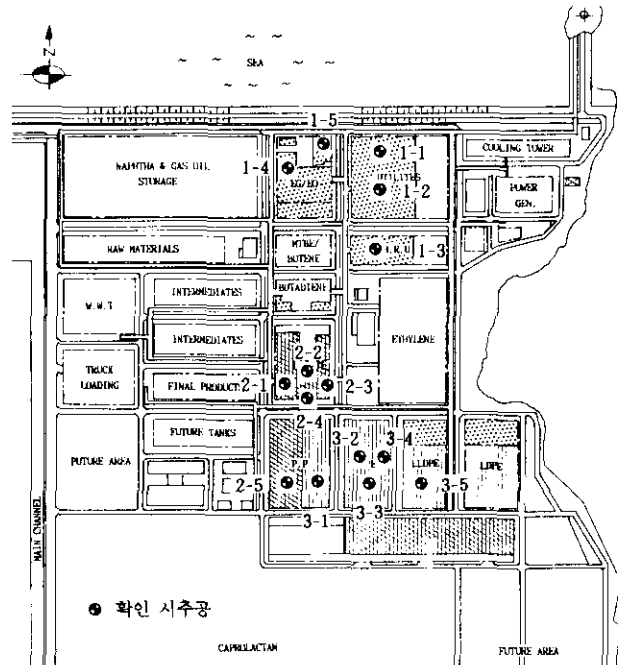


그림 2 현장 평면도

표 1 DC 시공 현황

DC 방법	시공면적 (M ²)	타격공수 (공)				
		제1단계	제2단계	제3단계	마무리	계
제 1 방법	74,940	2,755	2,390	-	4,485	9,630
제 2 방법	36,100	1,310	1,100	-	2,000	4,410
제 3 방법	67,140	1,100	2,200	1,150	4,225	8,675
계	178,180	5,165	5,690	1,150	10,710	22,715

3.2 지반 조건

본 단지의 대상 지역은 해안 간척지를 인근의 산토로 매립 성토하여 조성 되었으며 방조제에 의해 바다로 부터 보호되고 있는 비교적 평탄한 지형으로 지반조사에 의하면 대략적으로 상부층은 연약한 사질토 층이며 하부층은 점질토층으로 구성되어 있다.

시추조사 성과에 의거 부지의 기초지반을 생성기원과 층수에 따라 대별하면 매립토층, 해상퇴적 토층, 잔류토층 및 기반암 등으로 구성되어 있으며 이들 각층의 성층상태 및 토성을 요약하면 표 2 와 같다. 부지 내의 지하수위는 지표면에서 1.0 ~ 1.2 m 의 얕은 깊이에 분포되어 있다.

표 2 지층상태

지 층	지층 상태
매립토층	느슨한 상태의 실트질 모래(SM) 또는 자갈(GM)
해상퇴적토층	느슨한 상태의 실트질 모래(SM)
상부 퇴적토층	연약한 내지 중간정도의 실트(ML) 또는 점토(CL)
중간 퇴적토층	중간 내지 치밀한 상태의 모래 또는 자갈
하부 퇴적토층	중간 내지 매우 치밀한 상태의 실트질 모래(SM)
잔류토층	화강암질 편마암 (선 캄브리아기)
기반암	

DC 시공 지역의 대표적인 지층 단면 형상은 그림 3 과 같으며 N = 35 이상의 잔류토층이 대체적으로 (-) 5.0 m 에서 (-) 27.0 m 의 깊이로 부지 전반에 걸쳐 분포하므로 각 지층의 두께는 지역에 따라 차이가 있다.

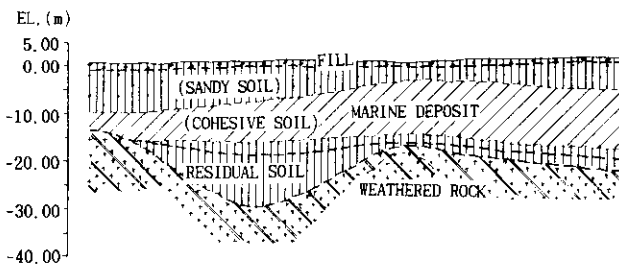


그림 3 지층 단면도

표 3 토층 특성

특 성	토 층		비 고
	매립토층	상부퇴적토층	
토질분류 (U.S.C.S)	SM/GM	SM	
함 수 비	ω (%)	16.3	20.5
초기 공극비	e_0	0.99	
비 중	G_s	2.76	2.72
#200 체 통과량 (%)		23.0	23.7
5 μ 보다 작은 입자의 함량 (%)		9.5	6.6
2 μ 보다 작은 입자의 함량 (%)		6.0	4.8
선형압밀하중 압축지수	P_c (kg/cm ²) C_c	0.39 x Z + 5.4 0.003 x Z + 0.21	Z: 심도
지반의 강성계수	E_s (t/m ²)	500 - 850	500 - 1000 (200 - 600) () : 남측
내부 마찰각	Φ (deg.)	24 - 27	24 - 28 (21 - 25)

동압밀공법에 의한 지반개량 목표치를 고려하면 대상 지층은 대략 상부의 매립토층 및 상부해상퇴적토층이 해당된다. 매립토층은 부지 조성시 인근의 야산을 절취하여 얻은 조립토사를 사용하여 매립한 지층으로 두께는 0.3m ~ 2.8m 이며 표준관입저항치는 N = 3 - 31의 범위로 넓게 분포하나 대체로 N = 6 - 10의 범위에 있어 느슨함 내지 중간 정도의 상대밀도를 나타내고 있다. 상부 해상퇴적토층은 대체로 2.5m ~ 6.5m 두께로 분포하며 표준관입저항치는 부지의 북부 지역은 대체로 N = 6 ~ 13 이며 남부 지역은 N = 2 ~ 8로서 매우 느슨한 상대밀도를 나타내고 있다. 이들 두 토층의 특성을 요약하면 표 3 과 같다.

3.3 동압밀공법의 적용

본 공사에 앞서 4개 구간을 선정 예비시험을 실시하여 단계별 타격수, 과잉 간극수압 소산에 필요한 정지시간, 채석 등 재료투입량과 지반의 강도 변화 등을 측정하였다.

이들 토대로 본 현장에서는 다짐방법 및 순서가 각기 다른 3개 방법에 따라 대상 지역을 분할하여 (그림2 및 표1) 동압밀공법을 적용하였다. 먼저 각 방법의 대상지역별로 대체적인 지층두께를 비교하면 표 4 와 같다. 제 3 방법은 다른지역에 비해 압밀 대상층인 해상 퇴적토층의 두께가 더 큰 지역에 적용되었다.

표 4 각 방법 대상지역별 지층상태 (두께)

지 층	제1방법 지역	제2방법 지역	제3방법 지역
매립토층	1 ~ 2 m	1 ~ 2 m	1 ~ 2 m
해상퇴적토층	5 ~ 19 m	10 ~ 18 m	15 ~ 25 m
잔류토층	2 ~ 15 m	4 ~ 18 m	5 ~ 20 m

타격에 사용한 추 (Pounder)의 제원과 낙하고, 타격 간격 등은 방법에 관계없이 모두 동일하게 하였으며 그 공통적인 사항은 다음과 같다.

- . Pounder 중량 : 12 ton
- . Pounder 크기 : Φ 1.5 m
- . Pounder 낙하고 : 13 m
- . 타격 간격 : 4m x 4m
- . 사용 크레인 : 100 ton

표 5는 3 개 방법을 요약한 것으로 방법별로 단계수(Series), 총 타격수 및 정치기간 등의 차이를 나타내고 있다. 타격 후 타격공(Crater)은 준설사, 양질의 토사 또는 쇠석으로 충전하였으며 제 3 방법은 시작전 지표면에 30 cm 두께로 잡석을 포설하였다. 또한 타격 후 발생한 과잉 간극수압의 소산을 위하여 각 단계 사이에 7 - 10 일 간의 정치기간을 두었다.

각 방법별 다짐방법 및 순서는 그림 4, 5, 6에 나타낸 바와 같다. 제 1 방법과 제 2 방법은 제 1 단계, 제 2 단계, 마무리 단계로 구분되며 제 3 방법은 여기에 제 3 단계를 마무리 단계 전에 포함시켰다. 각 단계별 타격횟수는 방법별로 차이가 있으며 이는 그림에 표기된 바와 같다. 그림에 나타난 각 타격방법의 개요를 설명하면 아래와 같다.

제 1 단계 : 8 m 간격의 격자형 및 그 중앙에 1단계 타격횟수를 3, 4회로 분할하여 타격하였으며 도중에 준설사 또는 쇠석을 충전하였다.

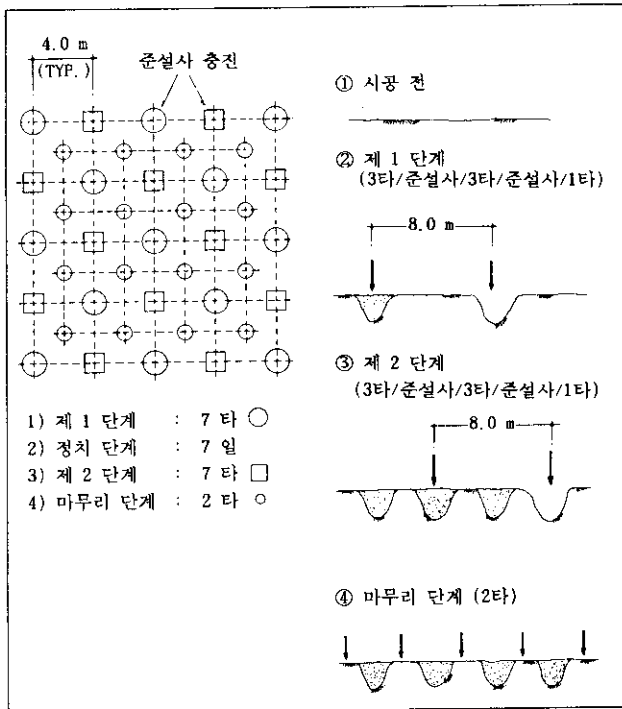


그림 4 다짐방법 및 순서 (제 1 방법)

제 2 단계 : 1 단계 이후 정치기간이 경과한 후 1 단계의 타격 지점과 4 m 간격이 되도록 중간지점마다 1 단계와 같은 방법으로 분할 하여 타격하였다.

제 3 단계 : 제 3 방법에 한하여 1, 2 단계의 격자형 타격 지점 사이를 타격하였다.

최종적으로 지표면을 다지기 위해 격자형 타격점의 중간지점마다 각 2회의 마무리 타격을 실시하였다.

표 5 방법별 타격방법 및 순서

단계 방법	제1단계	정치기간	제2단계	정치기간	제3단계	마무리	비고
제 1 방법	7 타 (준설사)	7 일	7 타 (준설사)	-	-	2 타	() : 충전제
제 2 방법	10 타 (쇠석)	10 일	7 타 (양질토사/준설사)	-	-	2 타	
제 3 방법	15 타 (쇠석)	10 일	10 타 (쇠석)	10 일	10 타 (쇠석)	2 타	

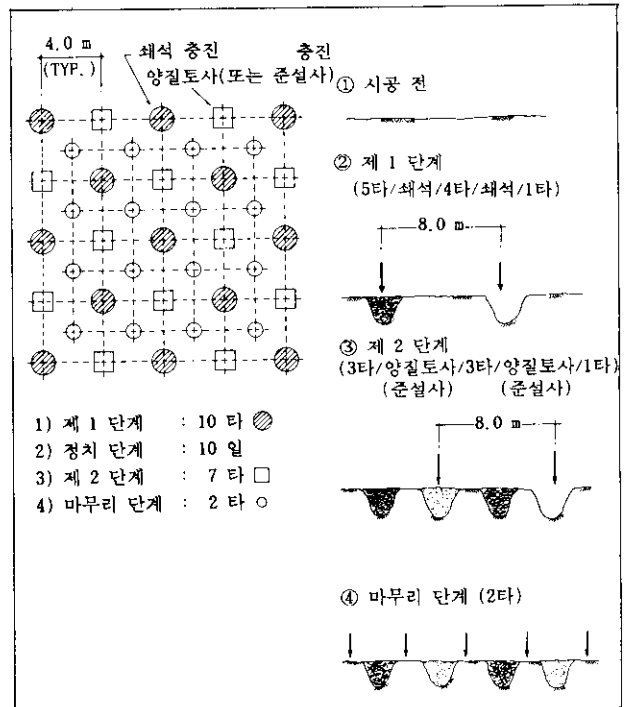


그림 5 다짐방법 및 순서 (제 2 방법)

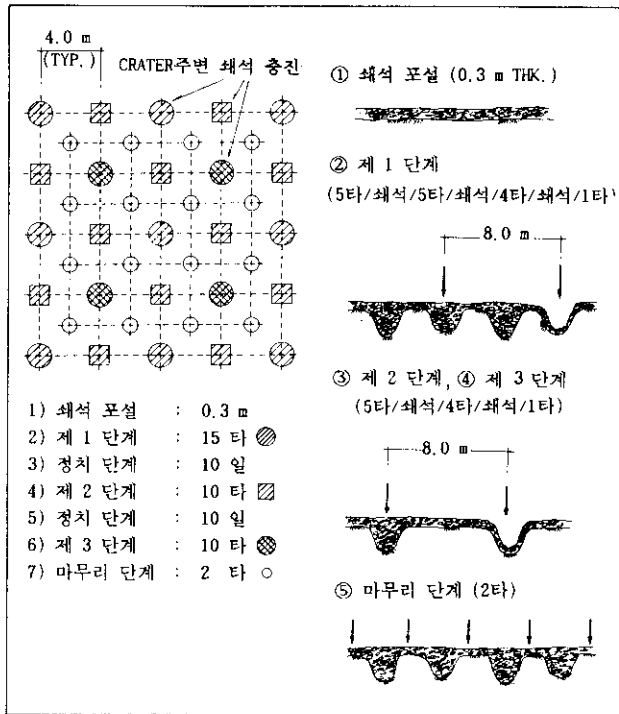


그림 6 다짐방법 및 순서 (제 3 방법)

4. 과잉 간극수압 소산 자료 분석

4.1 Piezometer 설치 현황

시공중 발생하는 과잉간극수압의 변화를 측정하고 이에 따른 단계 간 정처기간 등을 조절하기 위하여 제 3 방법 지역에 한하여 8개소에 Piezometer를 설치하였다. 설치 기준은 그림 7 에서 보인 바와 같이 4m x 4m 간격으로 배치된 49공의 타격공에 대해 1 개소 씩 설치하였으며 매설깊이는 지역에 따라 각각 다르게 하였다. 또한 각 단계에 해당하는 타격공의 수 및 총 타격수는 그림에 표시된 바와 같다.

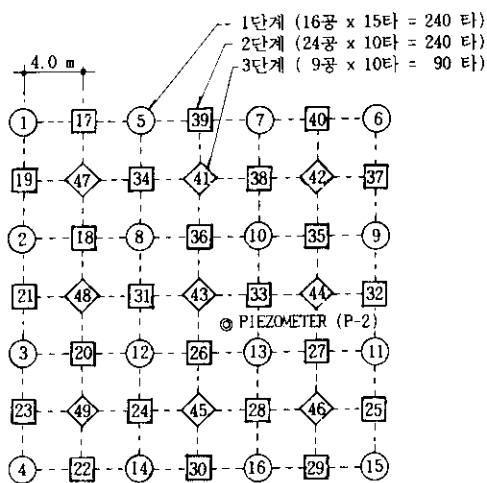


그림 7 Piezometer 설치 평면도 및 타격순서

4.2 과잉 간극수압 측정기록 분석

과잉 간극수압의 측정은 그림 7 에 번호로 나타낸 타격순서와 같이 Piezometer에서 먼 지점으로 부터 가까운 지점으로 타격점이 이동하는데 따른 수압 변화를 측정하였다. 그림 8 은 1개 지점 (P-2)의 실측치를 예로서 표시한 것이며 각 위치별 과잉 간극수압 측정치 및 소산시간은 표 6 과 같다.

이 표를 보면 대부분의 경우 각 단계별 마지막 타격 후 5일 이내에 과잉 간극수압이 소산된 것을 알 수 있으며 각 단계별로 측정된 과잉 간극수압의 크기는 1 단계와 2 단계에서 비슷한 크기를 나타내고 있으며 최대치에 있어서 2 단계에서 큰 수치를 나타낸다. 3 단계에서는 간극수압이 전체적으로 감소하는 추세를 보이고 있다. 이는 그림 7에 보인 바와 같이 총 타격수에 있어서 차이가 있기 때문인 것으로 사료된다.

그리고 과잉 간극수압의 최대치가 2 단계에서 가장 크게 기록된 것은 총 타격수가 같음에도 불구하고 1 단계의 타격으로 인하여 일단 지반이 다져지므로서 2 단계 타격시는 에너지 감쇄효과가 감소하여 최대치에 있어 더 크게 나타난 것으로 사료된다.

과잉 간극수압의 소산을 위한 실제 정처기간은 표 6 과 같이 실측치를 고려하고 현장여건 등을 감안하여 약 10일 전후의 충분한 시간을 두었다.

표 6 PIEZOMETER 검측 결과

NO.	설치 심도 (M)	1 단계		정처 기간 (일)	2 단계		정처 기간 (일)	3 단계	
		ΔU^* (M)	소산 (일)		ΔU^* (M)	소산 (일)		ΔU^* (M)	소산 (일)
P-1	5.6	5.0	2.6	9.9	5.5	7.0	14.1	4.0	3.8
P-2	4.0	4.0	1.6	7.6	5.0	2.9	13.3	2.5	2.0
P-3	5.3	2.0	1.0	12.0	3.0	0.7	15.1	0.5	2.0
P-4	3.8	4.0	3.8	10.8	4.0	3.6	19.0	2.5	3.0
P-5	4.0	3.0	2.1	10.0	3.5	4.2	6.8	2.5	4.9
P-6	7.4	2.0	2.0	15.0	3.5	2.3	6.5	1.0	2.4
P-7	4.0	1.5	3.0	6.1	2.5	2.8	12.8	2.0	8.9
P-8	6.7	4.0	4.0	10.2	3.5	4.4	11.4	3.0	7.3

* ΔU : 최대 과잉 간극수압 (Kg/cm²)

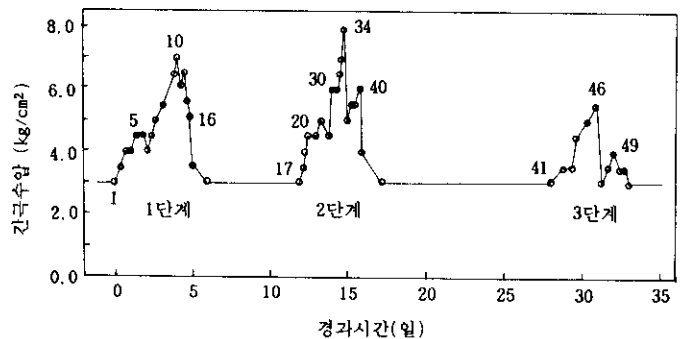


그림 8 간극수압 변화 예 (P-2)

5. 개량효과 분석

5.1 타격에너지에 따른 개량심도

본 공사에 앞서 전반적인 지반조건을 파악하기 위하여 약 95개소에 대한 시추조사와 30개소에 대한 동적콘 시험을 실시하였으며 개량효과를 판정하기 위하여 시공 후 초기시추 위치와 인접한 지역에 확인 시추 (Check Boring)를 실시하였다. 개량 효과를 판정하기 위해서는 일반적으로 SPT, CPT, PMT 외에 여러 방법을 사용하나 본 현장에서는 SPT에 의한 N치를 기준으로 개량효과를 비교하였다.

방법별 개량 효과를 비교하기 위하여 그림 2에 표시한 바와 같이 각각의 적용 지역에서 대표적인 시추공 5개소 씩을 선택하여 시공 전후 표준관입저항치를 비교하면 대체적으로 그림 9와 같은 형태로 나타나 지반 개량 효과를 확인할 수 있었다. 개량심도의 평균치는 대략 6.0m 정도였으며 식 (1)에 의한 값의 약 50%에 해당된다.

타격에너지와 개량심도의 관계를 기존의 값들과 비교하기 위해 그림 10에서와 같이 Mitchell(1981)의 그래프 상에 본 현장의 측정 결과를 도시한 결과 기존의 값들과 잘 일치하였다. 따라서 개량심도를 예상하는데 있어서 식(2)을 사용하는 것이 무난한 것으로 판단된다.

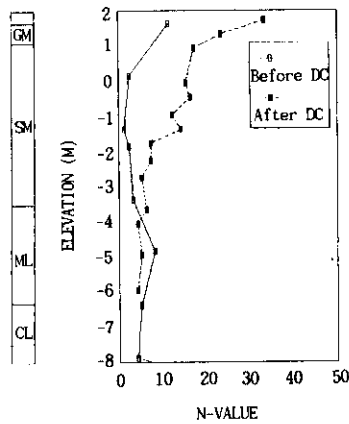


그림 9 개량 전후의 N치 (시추공 No.3-3)

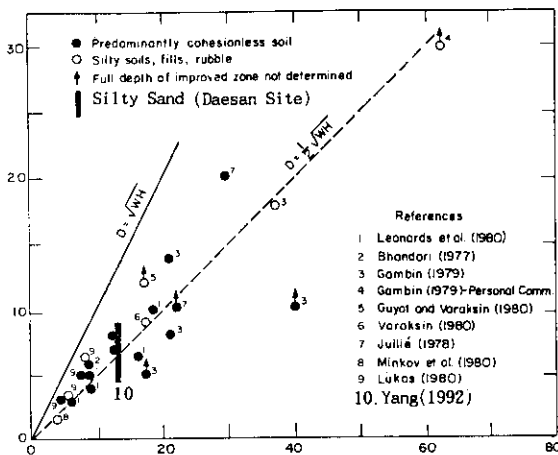


그림 10 개량심도와 타격당 에너지와의 관계
- 본현장 자료와 기타 자료의 비교 -

5.2 타격 방법별 개량효과

본 현장에서는 3.3절에 나타난 바와 같이 3개의 타격방법으로 지역을 나누어 시공하였는데 각 방법의 차이는 단계(Series)의 횟수와 총 타격횟수의 차이를 들 수 있다. 따라서 이들 타격 방법에 따른 개량효과를 비교하기 위하여 개량심도의 경우와 같은 위치를 대상으로 개량 후의 N치 (N_A)를 개량 전의 N치(N_B)에 대한 상대비로 표시하면 그림 13과 같다. 그림에서 보면 개량심도에 있어서는 제 2 방법이 가장 크게 나타났으며 개량정도 (N_A/N_B)는 제 3 방법의 경우가 전반적으로 증가폭이 크며 최대 10 배 이상의 N 치 증가를 보였다.

Mayne(1984)이 조사한 바에 의하면 개량심도는 타격당 에너지와 비례하며 개량정도는 단위면적당 에너지와 관계하는 것으로 알려져 있는데 본 현장의 경우는 타격당 에너지가 일정하였으므로 이의 변화에 따른 개량효과는 확인할 수 없었다. 따라서 타격횟수에 따른 개량효과에 대해 검토하면 N_A/N_B 의 최대치는 제 1 방법, 제 2 방법, 제 3 방법 순으로 타격횟수에 비례하여 증가하는 일반적인 경향을 나타내었다.

반면 개량심도에 있어서는 타격횟수가 적은 제 2 방법의 경우가 제 3 방법보다 다소 큰 것으로 나타났다. 이는 각 방법의 적용 위치 및 지반조건 등이 서로 다르며 표 4에서와 같이 제 3 방법 시공지역의 압축성 지반의 두께가 제 2 방법 지역보다 크기 때문에 에너지가 깊게 전달되지 못한 것으로 사료된다.

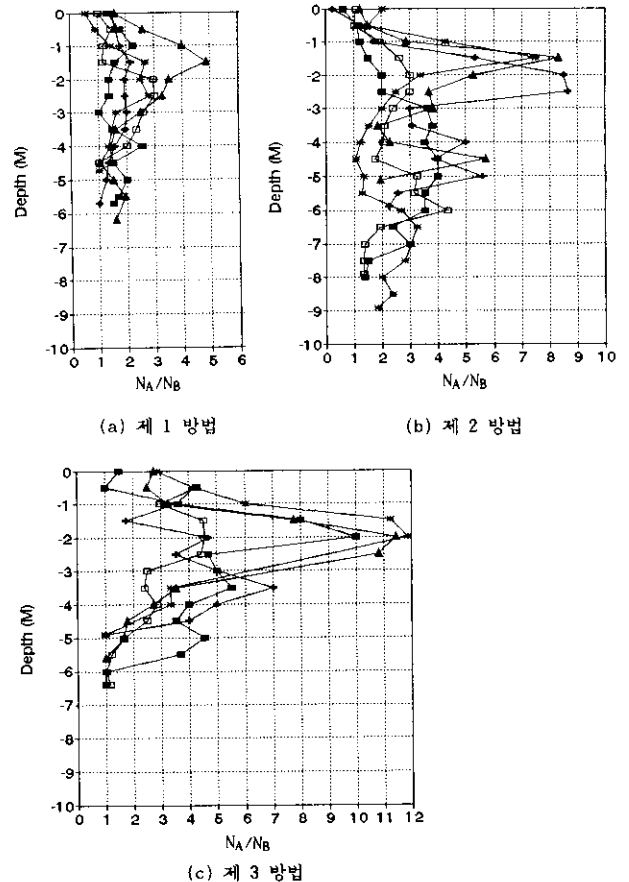


그림 11 DC 방법별 지반 개량효과

5.3 한계심도

지표로부터 개랑효과가 가장 큰 지점까지의 깊이인 한계심도 (Critical Depth, D_c)를 검토하기 위하여 각 방법별 개랑심도 자료를 기준으로 각 깊이 (Z/D_{max})에서의 N_A/N_B 값을 그림 12 와 같이 나타내었다. 단 기반암이 없을 경우 영향이 있을 것으로 예상하여 기반암의 깊이가 작은 경우는 제외하였다.

그림에서 보면 각 방법별 한계심도는 대체적으로 제 1 방법의 경우 $Z/D_{max} = 0.3 \sim 0.5$, 제 2 방법은 $Z/D_{max} = 0.3 \sim 0.6$, 제 3 방법은 $Z/D_{max} = 0.3 \sim 0.4$ 로 나타나고 있음을 알 수 있으며 이는 Mayne(1984)의 관찰 경향과 일치하고 있다. 이를 종합하여 볼 때 한계심도는 지표에서 부터 대략 최대개랑심도 (D_{max})의 30% 내지 50%의 깊이에 위치하는 것으로 볼 수 있다.

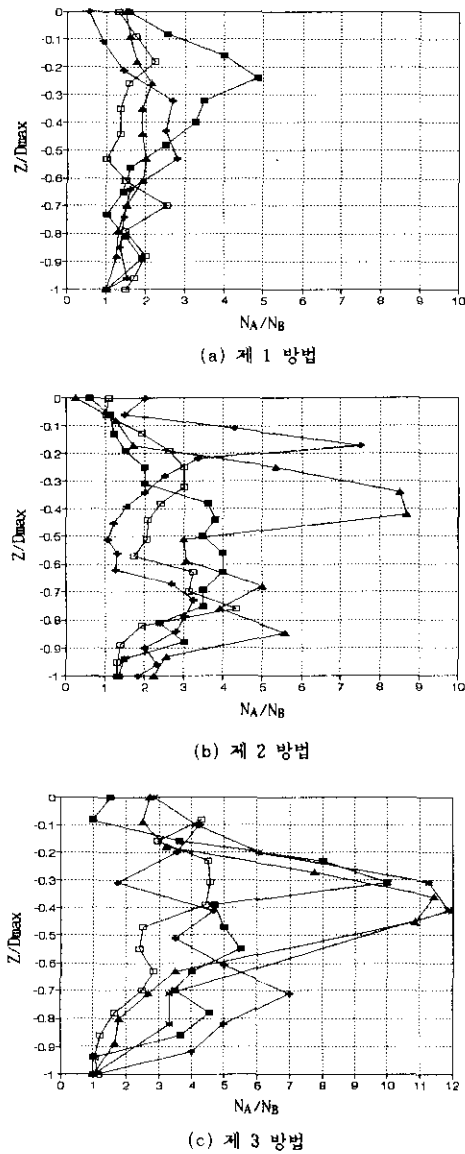


그림 12 DC 방법별 한계심도

5.4 타격지점으로부터의 거리변화에 따른 개랑효과

타격점 간격의 결정에 대해서는 현재까지 명확한 근거가 없으므로 과거의 시공예를 참고하거나 목표로 하는 개랑심도와 같은 간격으로 가정하여 배치하고 있다.

타격점 간격과 관련하여 본 현장의 결과로서 타격지점으로 부터의 거리변화에 따른 지반 개랑효과를 고찰하기 위하여 확인시추공 위치를 구분하여 대략적인 개랑정도 (N_A/N_B), 개랑심도 및 한계심도의 변화를 표시하면 그림 13 과 같다. 단, 초기 및 확인시추공의 위치는 대개 정확하게 일치하지는 않으나 DC 적용 전의 지반 조건은 DC 타격 지점과 확인시추공 지점 사이의 거리가 최대 2 m 이므로 같은 것으로 간주하였다.

그림 13에 나타난 바와 같이 약간의 차이는 있으나 개랑정도, 개랑심도 및 한계심도의 값은 대체적으로 타격지점 (A점)에서 크고 타격 지점에서 멀어질수록 (B, C점) 작아지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 개랑 목표치를 고려할 때 위치에 따른 개랑효과와의 큰 차이 없이 전반적으로 잘 개랑된 것으로 보아 본 현장의 타격간격 4m는 적절한 것으로 판단되며 이는 타격지점 거리를 개랑심도 이내로 두는 통상적인 기준을 만족한다.

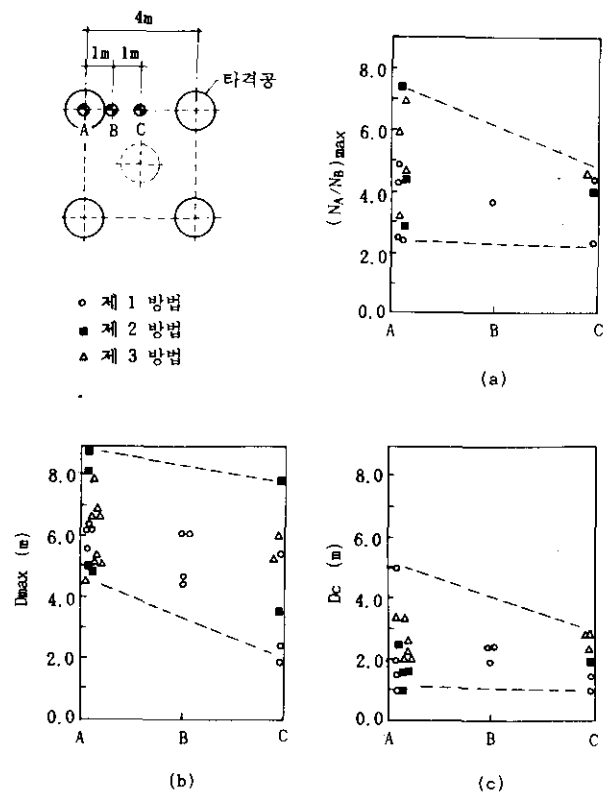


그림 13 위치별 개랑효과

5.5 기반암 깊이에 따른 개량효과

본 동압밀 시공 지역의 기반암 깊이는 약 25 m 이내이며 위치에 따라서는 10m 이내로서 개량심도와 비교할때 얕은 지역도 있다. 따라서 기반암 깊이가 지반 개량효과에 영향이 있을 것으로 예상하여 N=50 을 기준으로 한 기반암 깊이와 개량심도, 한계심도의 관계를 검토하였다.

전체적으로 볼때 기반암 깊이에 따른 개량심도의 변화는 그림 14 와 같이 기반암이 얕은 경우 (약 8~9 m 이하)는 개량심도가 이에 어느정도 비례적으로 증가하며 그 이상 일때는 크게 영향이 없는 것으로 나타났다.

또한 기반암이 얕은 경우 ($Z_b < 8-9m$)에는 상대한계심도 (D_c/D_{max}) 가 0.5 이상이 되어 지반 하부에서 다짐효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 보통 한계심도가 $1/2 D_{max}$ 이하인 점을 감안할 때 이는 기반암이 얕아서 에너지의 Rebound 효과로 인하여 아래부분이 더 다져진 것으로 여겨진다.

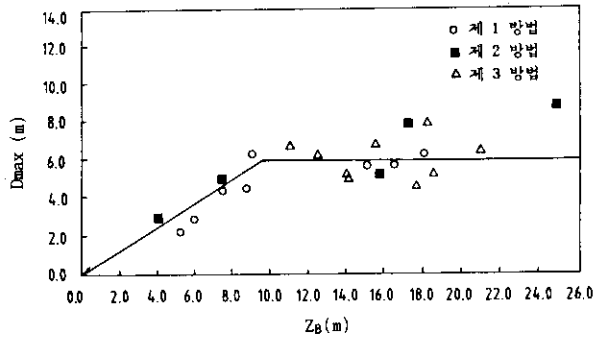


그림 14 기반암 깊이 (Z_b)에 따른 개량심도 (D_{max}) 분포

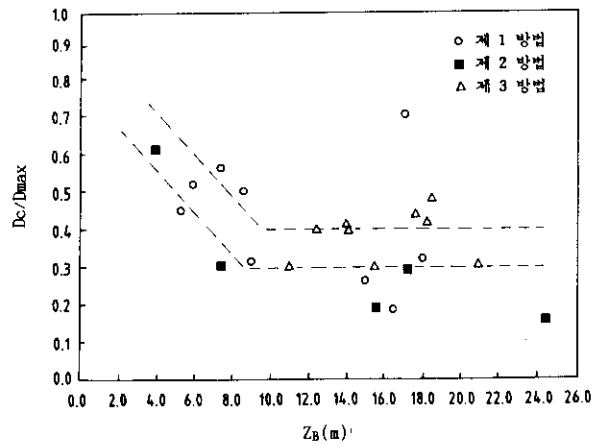


그림 15 기반암 깊이 (Z_b)에 따른 D_c/D_{max} 분포

6. 결론

현대석유화학 대산현장의 기초지반 개량공사에 적용한 동압밀공법의 실측자료를 기초로 지반 개량효과를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시공에 사용된 타격에너지와 측정된 개량심도의 관계를 기존의 값들과 비교한 결과 대체적으로 잘 일치하였으며 개량심도를 예상하는데 있어서는 식(2)를 사용하는 것이 무난한 것으로 판단되었다.

(2) 개량정도 (N_A/N_B)에 있어서는 타격횟수가 많을수록 강도증가의 폭이 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있었으며 개량효과가 가장 큰 지점까지의 깊이인 한계심도 (D_c)는 최대개량심도의 30% 내지 50% 깊이에 위치하였다.

(3) 타격지점으로 부터의 거리변화에 따른 개량효과는 타격지점으로부터 멀어질수록 효과가 작아졌으나 큰 차이가 없어 채택된 타격간격이 적절한 것으로 판단되었다.

(4) 기반암 깊이와 개량효과와의 관계는 기반암이 얕은 경우 최대개량심도가 어느정도 비례적으로 증가하였으며 그 이상 (기반암 깊이 $> 8m - 9m$) 에서는 별 차이가 없었다. 또한 기반암이 얕은 경우에는 상대한계심도 (D_c/D_{max})가 0.5 이상이 되어 지반 하부에서 다짐효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구를 지원해 준 현대엔지니어링 아카데미와 현장자료를 제공하신 故 趙瑞一 전무님과 이하 기초부 직원들께 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Charles, J.A., et.al., "Field Studies of the Effectiveness of Dynamic Consolidation." Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, Stockholm, Sweden 1981, pp.617-622
2. Chien, S.T., Chien, C.H., "On Dynamic Consolidation " Proceedings of the 8th European Conference and Foundation Engineering, Vol.1, Helsinki May 1983, pp.353-356
3. Hansbo, S., "Dynamic Consolidation of Rockfill." Proceedings, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, Tokyo 1977, pp.241-246
4. Leonards, G.A., Cutter, W.A., Holtz, R.D., (1980) " Dynamic Compaction of Granular Soils. " Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.106, No.GT4, Proc. Paper 15144, January, 1980, pp.35-44
5. Lukas, R.G., "Densification of Loose Deposites by Pounding." Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No.GT4, April 1980, pp.35-44
6. Mayne, P.W., Jones, J.S., Jr., "Impact Stresses During Dynamic Compaction," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.109, No.10, October 1983, pp.1342-1346
7. Mayne, P.W., Jones, J.S., Jr., and Dumas, J.C., " Ground Response to Dynamic Compaction. " Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.110, No.GT6, 1984, pp. 757-774
8. Ménard, L., and Broise, Y.,(1975), " Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation. " Geotechnique, Vol.15, No.1, March, 1975, pp.3-18
9. Mitchell, J.K., " Soil Improvement-- State -of-the-Art Report. " Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.4, Stockholm, 1981, pp. 509-520