

# Volume Displacement Pile에 의한 深層다짐工法

林 聖 喆\*  
沈 東 燮\*\*

## 1. 공법소개

### 1-1. 개요

느슨한 사질토의 DEEP COMPACTION 방법으로서 일반적으로 해외공사에서 시행되고 검토되는 방법으로 DYNAMIC COMPACTION(or DYNAMIC CONSOLIDATION) 및 VIBRO-FLOTATION 방법이 있으며 최근 일본에서는 여러 가지 개량된 형태의 VIBRO-COMPOZER 방법이 사용되어지고 있다.

여기에 소개하는 지반다짐공법은 현재 현대건설에서 시공 중인 아라비아 남단에 위치한 북예멘國의 AL-MUKHA SITE 변전소 축조공사의 지반개량에 시도되었던 방법으로서 개략적인 공법내용은 타입시 폐단(CLOSE ENDED)상태, 인발시는 개단(OPEN ENDED) 상태를 유지할 수 있는 개폐가 가능한 SHOE 를 가진 STEEL TUBULAR PILE 을 VIBRO-HAMMER 로서 소정의 깊이까지 타입하고 항타 PILE 내부공간을 주변흙으로 충진시키며 인발하는 것이다. 이 방법의 지반다짐효과는 폐단강관말뚝(CLOSE ENDED TUBULAR PILE)을 타입함으로써 유발되는 VOLUMN DISPLACEMENT 만큼 주변지반이 다져지는 것을 기대한 공법이다.

이러한 공법을 시도하게 된 동기는 AL-MUKHA SITE 의 지반조건이 2m 정도의 대단히 조밀한 상태의 성토층 아래 4~6m 정도의 포화된 느슨한 SILTY SAND 층 및 0~1m 정도의 연약한 점토층으로 구성되어 있으며 대부분의 기초는 포화된 느슨한 SILTY SAND 층 위에 놓이게 되므로 소요지내력 및 지진시 SILTY SAND 의 액상화 방지(설계지진강도  $a=0.12g$ )를 위해서 부득이 지반처리가 필요하였으나

1) 공기가 짧고

2) 그 나라 여건상 R.C. PILE 의 구입이 곤란하며(제작은 工期上 곤란) 경제적이 되지 못하여 PILE FOUNDATION 은 부적합하다고 판단되었으며,

3) 인접지역(약 15m 떨어진 곳)에 POWER PLANT 가 축조 중에 있으므로 그 구조물에 주는 영향을 고려하여 DYNAMIC CONSOLIDATION METHOD 는 제외되었고,

4) 처리대상지역 SOIL 의 #200번체 통과량이 평균 30% 정도의 SILTY SAND 임을 감안할 때 VIBRO-FLOTATION METHOD (VIBRO-COMPACTION METHOD 를 의미) 및 VIBRO-COMPOZER 방법은 곤란하며 더우기 장비 및 기계류의 반입 및 반출 허가조건이 까다로운 YEMEN 國의 실정을 고려할 때 사실상 불가능

\* 正會員 현대건설 해외토목 설계부 차장

\*\* 正會員 현대건설 해외토목 설계부 대리

한 공법이라고 판단하였다.

따라서 현장에 기 투입된 간단한 건설장비를 이용하여 지반을 처리하여야 하는 필요성에 의해 본 DEEP COMPACTION METHOD BY VOLUME DISPLACEMENT PILE(이하 DISPLACEMENT PILE로 약한다)을 시도하게 되었다. 본 다짐방법은 다짐모래말뚝(SAND COMPACTION PILE or VIBRO-COMPOZER METHOD)과 비교할 때 일견 비슷한 工法으로 보이나 다짐모래말뚝은 CASING의 VOLUME DISPLACEMENT 효과보다는 SAND COLUMN 자체를 진동다짐함으로써 복합지반으로서의 역할 및 주변토질의 다짐을 하는 공법인 반면 본 DISPLACEMENT PILE은 순수한 CASING 타입으로 인한 VOLUME DISPLACEMENT 량만이 주변토질을 다짐한다고 기대한 방법이다.

후술하는 타공법과의 비교표에서 볼 수 있듯이 VIBRO-COMPOZER 및 VIBRO-FLOTATION은 주로 VIBRATION으로 인한 주변지반의 다짐을 기대함으로써 #200 번째 통과량이 20% 이내의 토질조건에서만 적용하였으며 이러한 타공법들은 특수장비 및 복잡한 계측장비를 사용함으로써 소규모의 공사현장 및 일반건설업체에서

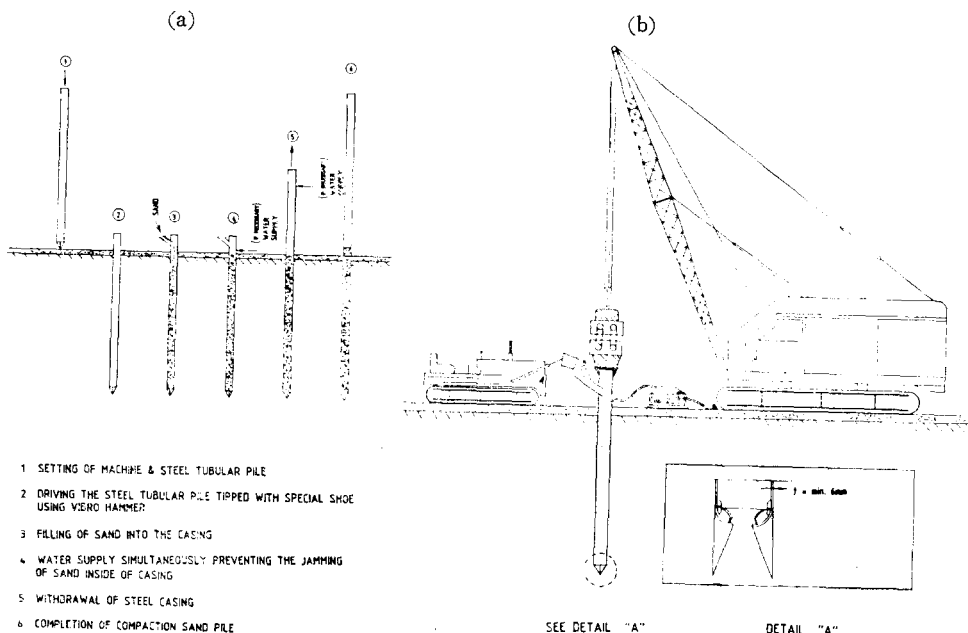
적용하기에 한계가 있겠다. 따라서 타공법에 비해 장비 및 시공이 훨씬 간단하고 공사의 규모 및 지반토질조건에 크게 좌우되지 않는 본 공법의 적용을 위하여 소요 지반 처리 정도에 따른 TUBULAR PILE의 직경 및 타입 SPACING을 결정할 수 있는 식과 도표를 아울러 개발하여 첨부하였다.

첨언하여 타공법과의 비교표에서 보듯이 #200 체 통과량이 평균 30% 정도인 토질조건에서 타공법의 결과보다도 더 좋은 결과를 얻을 수 있었던 이유는(특히 VIBRO-COMPOZER METHOD와 비교하여) 같은 토질조건하에서 결과를 비교하지 않았기 때문에 정확한 이유는 현재로서 알 수 없으나, 당 현장의 경우 순수한 VOLUME DISPLACEMENT만으로 지반의 처리정도가 예상치보다도 더 좋은 결과치를 얻을 수 있었다는 것은 본 공법이 앞으로 충분한 활용가치가 있다고 하겠다.

### 1-2. 시공순서

시공순서는 Fig. 1-1과 같으며, PILE 타입 및 인발시 필요에 따라 WATER JETTING을 할 수 있고, 특히 타입시 타입속도를 기록함으로써

Fig. 1-1 CONSTRUCTION PROCEDURE OF SAND COMPACTION PILE



대단히 느슨한 모래층(VERY LOOSE SAND LAYER)을 만나는 경우에는 그 층의 두께 및 깊이를 확인한 후 인발시 전술한 층에서는 PILE을 재타입함으로써 보강시킬 수 있다. 또한 처리대상토질이 모래로써 #200 체 통과율이 15% 미만일 경우는 VIBRATION 효과를 추가적으로 기대할 수 있으며, DRY 상태의 모래지반에서는 인발시 WATER SUPPLY를 지속시킴으로써 TIP 주변 SOIL을 포화시켜 전술한 VIBRATION 효과를 기대할 수 있다.

## 2. 소요장비(DISPLACEMENT PILE)

\* YEMEN AL-MUKHA SUB-STATION에서의 실시 예.

- a. STEEL TUBULAR PILE (DIAMETER =60 cm, THICKNESS=6 mm)
- b. 개폐가능 SHOE
- c. CRANE
- d. VIBRO-HAMMER
- e. PAY-LOADER

(\* 상기 장비 중 CRANE의 CAPACITY는 STEEL CASING 및 VIBRO-HAMMER의 취급이 가능하면 되며, VIBRO-HAMMER는 CAPACITY가 클수록 시공속도가 빠르다.)

## 3. 적용범위 및 효과의 비교

### 3-1. VIBRO-FLOTATION 및 VIBRO-COMPOZER

이 공법들은 PROBE 주변 SOIL을 VIBRATION함으로써 DENSIFICATION시키는 공법으로 VIBRO-FLOTATION은 SAND 지반을 처리하는 VIBRO-COMPACTION 방법과 점토지반에 GRAVEL COLUMN을 형성하는 VIBRO-REPLACEMENT 방법으로 나뉘며 이때의 사질토 및 점토의 구별은 #200번체 통과율로서 그 통과율이 20% 이상일 경우는 점토로 구분되어 VIBRO-REPLACEMENT 방법으로 처리한다. 통상 Fig. 4-4의 GRADATION CURVE에서 영역 [B]의 지반만이 상기 공법들이 유효한 것으로 되어 있다.

### 3-2. DISPLACEMENT PILE

이 공법은 VIBRATION으로서 지반을 처리하는 것이 아니라, 소정의 깊이까지 STEEL CASING의 타입 및 인발의 목적으로 VIBRO-HAMMER가 사용되므로 그 처리효과는 주변 SOIL의 #200 체 통과율에 그 효과가 민감하게 좌우되지 않으며, 다만 CASING에 의하여 DISPLACEMENT되는 SOIL의 VOLUME에만 관계된다. 단, 주변 SOIL이 VIBRATION으로 인해 다짐이 잘되는 포화된 SANDY SOIL의 경우에는 VIBRATION EFFECT를 부수적인 효과로 기대할 수 있다. 본 공법은 처리대상면적이 넓지 않는 구조물(옹벽 또는 PIPE LINE 등)의 다짐에 유용할 것이며 또한 CASING 내부의 BACKFILL 재료로서 SAND 대신에 GRAVEL을 사용할 경우, 무근 CONCRETE PILE (GRAVEL COLUMN 형성 후 CEMENT PASTE INJECTION)이나 GRAVEL COLUMN으로서 구조물의 지지가 가능할 것이며 SEISMIC 지역의 LIQUEFACTION 방지용 DRAINAGE로서 적용가능할 것이다.

## 4. DISPLACEMENT PILE의 실시예

북 YEMEN의 AL-MUKHA에 위치한 AL-MUKHA SUB-STATION 현장의 SUBSOIL CONDITION은 지표면에서 약 2m 깊이 정도까지 MAN-MADE FILL (S.P.T. N-VALUE가 36~45 BLOWS 정도의 치밀한 상태)이 있으며, 그 하부에는 4~6m 정도 두께의 느슨한 SILTY SAND층이 존재한다. 이러한 SUBSOIL CONDITION은 상부구조물의 소요 BEARING CAPACITY 및 SETTLEMENT에 충분치 못 할 뿐만 아니라 EARTH-QUAKE (ACCELERATION 0.12g) 발생시 이 SAND층은 액상화 (LIQUEFACTION)의 우려가 있으므로 SAND COMPACTION PILE을 적용하여 N치가 4~5 정도인 느슨한 층을 최소 N치가 10 이상인 층으로 처리할 목적이었다. 여기에 사용된 SAND COMPACTION PILE의 직경은 60cm이며, 심도는 지표면으로부터 6~8m 아래의 느슨한

Fig. 2

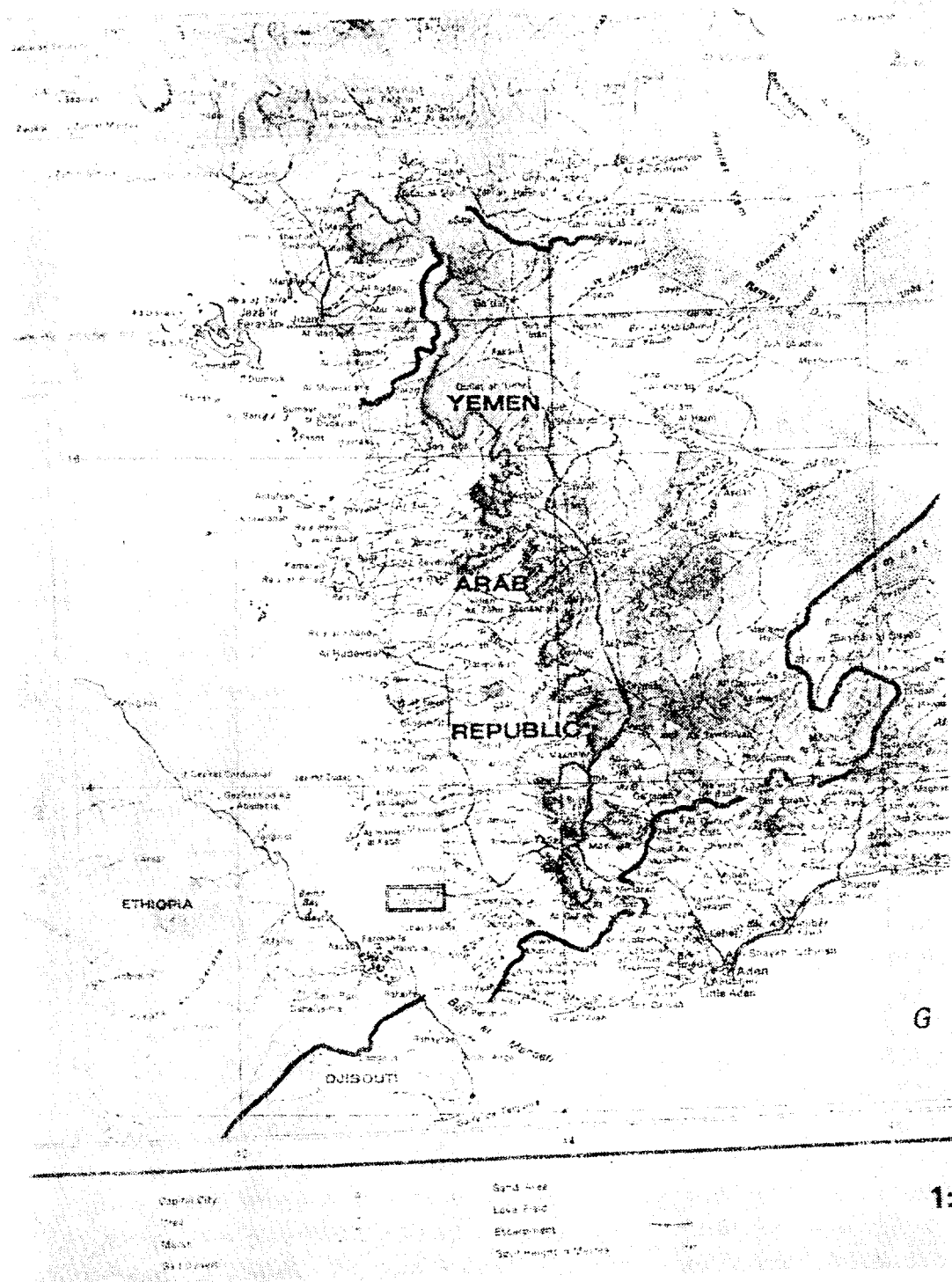
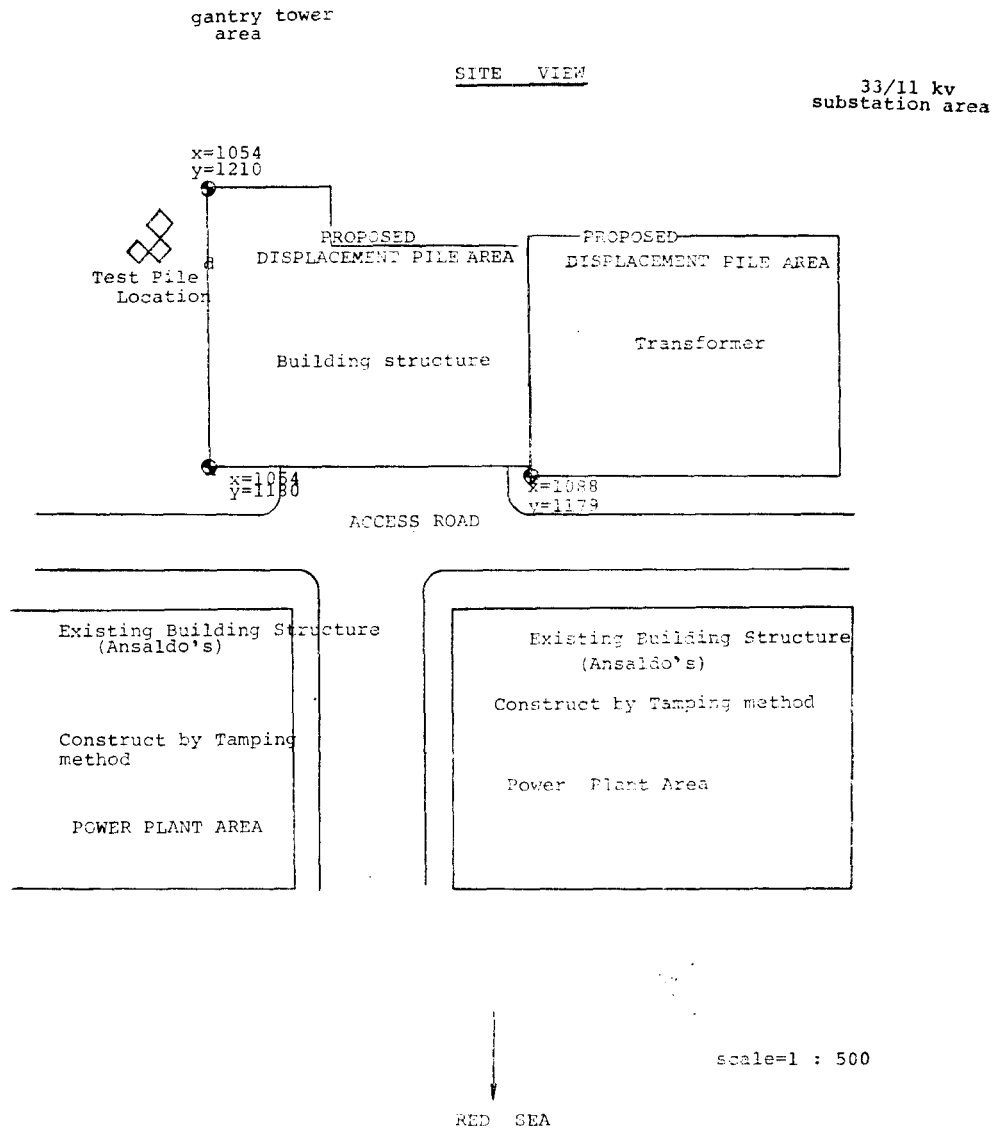


Fig. 4-1



SAND 층까지이고, DISPLACEMENT PILE의 SPACING은 1.8m와 2.0m(CENTER TO CENTER)의 정사각형 배열로 결정하였다.

여기서 특기할 사항은 처리대상인 SILTY SAND층의 #200번 체 통과율이 평균 30%로서 CLAUSE 3-1에서 언급한 바와 같이 VIBRO-COMPACTION METHOD는 적용 불가능할 것이라는 점이다(CLAUSE 4.2 Fig. 4-6 참조). 특히 본지역과 근접한 지역에 위치한 POWER

PLANT는 ITALY의 ANSALDO CO.에 의해 시공중이었으며, 여기에서 채택된 지반처리공법은 DYNAMIC CONSOLIDATION 후 PRE-LOADING 공법을 병행하는 방법이었다.

상기한 공법들을 병행한 이유는 DYNAMIC CONSOLIDATION으로 충분한 다짐효과를 얻을 수 없었으므로 CONSULTING ENGINEER로부터 PRE-LOADING의 공법이 지시되었기 때문이었다.

Fig. 4-2 A. TEST PILE LOCATION & TEST ITEMS

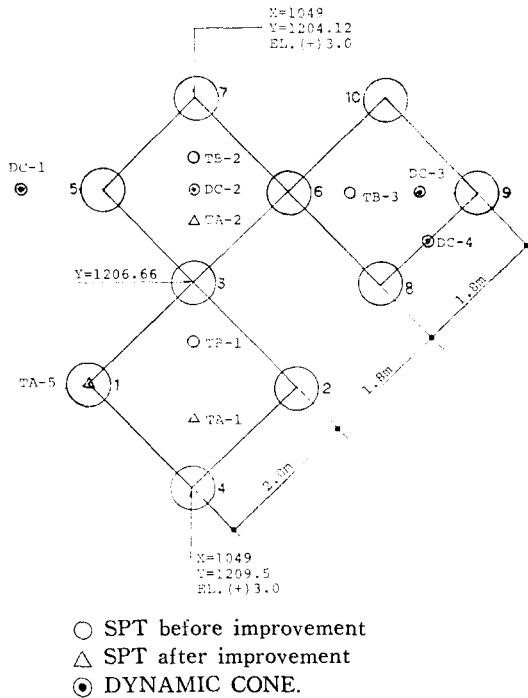


Fig. 4-3 TEST RESULT ANALYSIS  
(a) TA-1 & TB-1 (2.0 m spacing)

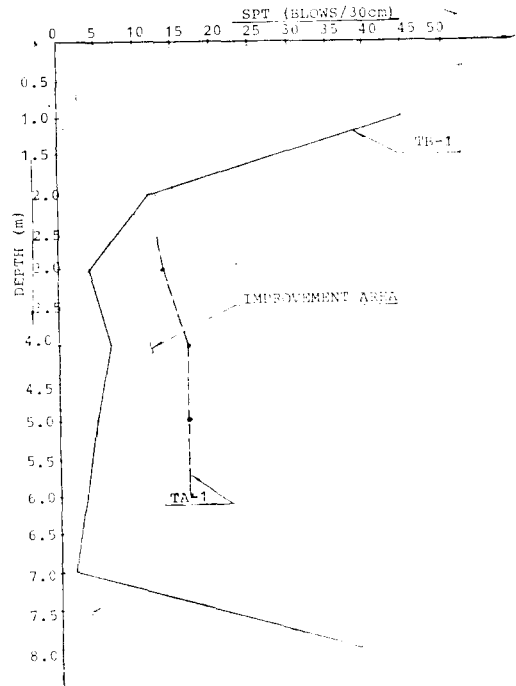


Fig. 4-4 지반처리 전후의 DYNAMIC CONE TEST

(b) TA-2 & TB-2 (1.8 m spacing)

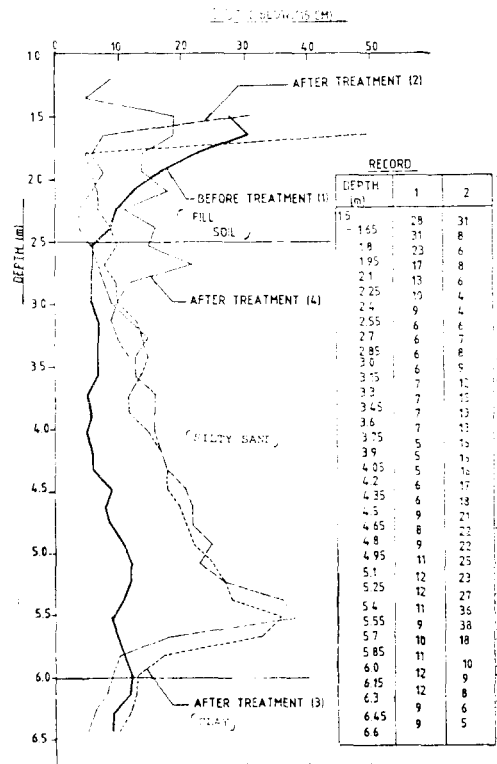
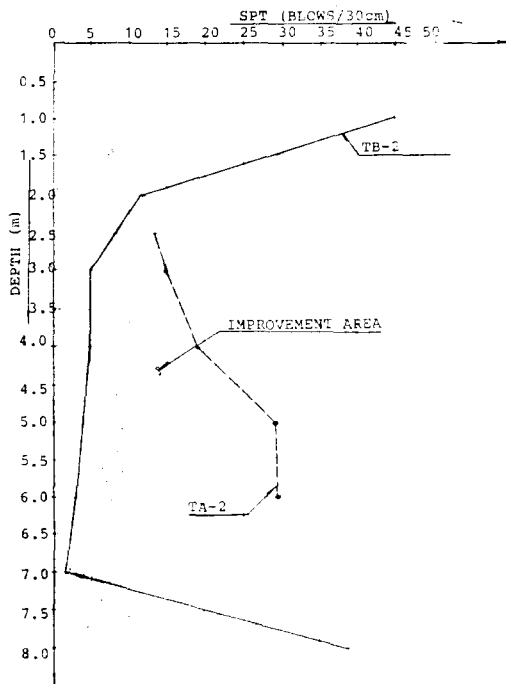


Fig. 4-5 (a) 시공사진



4-1. DEMONSTRATION RESULT OF DISPLACEMENT PILE.

ENGINEERING CO.인 서독의 LAMAYER INTERNATIONAL 의 ENGINEER 에게 승인을 받기 위하여 1985년 10월 10일에 ENGINEER 의 입회하에 DISPLACEMENT PILE 을 SPACING 1.8m 및 2.0m 로서 시공하였으며, 그 처리효과를 검토하기 위해 지반처리 전후에 SPT(표준관입시험) 및 DYNAMIC CONE TEST 를 실시하였다.

- a. TEST PILE LOCATION
- b. 지반처리 전후의 SPT 결과비교
- c. 지반처리 전후의 DYNAMIC CONE TEST 결과 비교
- d. 시공사진

(b) 시공사진

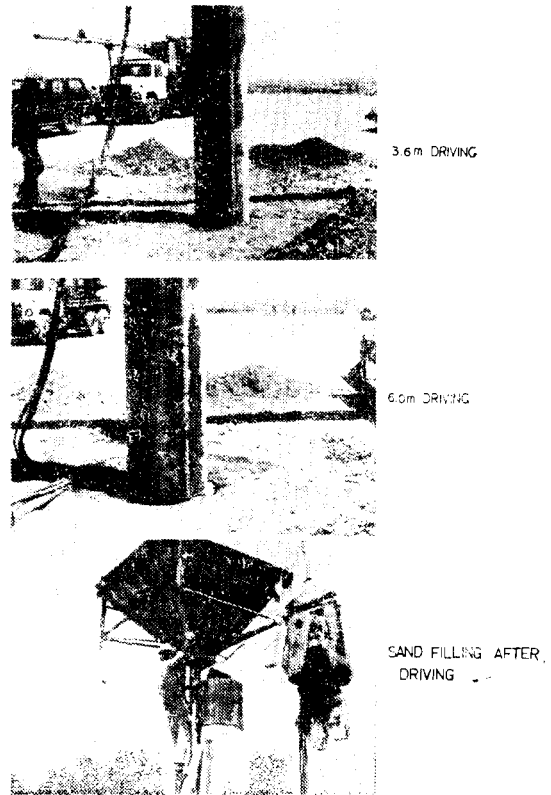
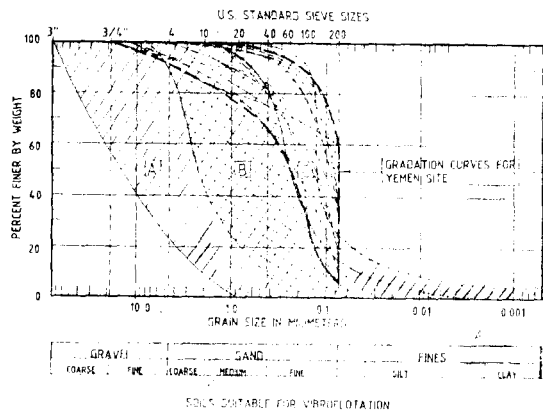


Fig. 4-6 SOILS SUITABLE FOR VIBRATION AND SITE SUBSOIL GRADATION CURVES



#### 4-2. 지반처리 결과 검토

Fig. 4-3(a)(b), Fig. 4-2 에서와 같이 DEMONSTRATION 시의 지반처리 전후의 SPT 결과 및 DYNAMIC CONE TEST 결과에 의하면 처리깊이가 깊을수록 IMPROVEMENT의 정도가 높아지는 것으로 나타나며, 이는 주로 토압에 의한 CONFINEMENT의 영향으로 추측된다.

#### 5. 타공법과의 처리결과 비교

VIBROFLOTATION 및 VIBRO-COMPOZER 방법과 DISPLACEMENT PILE 과의 지반처리 후의 결과는 다음과 같다.

5-1. VIBROFLOTATION의 처리에 알맞은 입도분포는 Fig.5-1과 같으며, DISPLACEMENT PILE의 경우는 VIBRO-REPLACEMENT 처리영역의 일부까지 처리가 가능하다.

5-2. VIBROFLOTATION 방법과 VIBRO-COMPACTION 방법

VIBRO-COMPOZER 방법과 DISPLACEMENT PILE의 처리결과 비교도는 Fig.5-2, Fig. 5-3, Fig.5-4, Fig.5-5에 나타난 바와 같다.

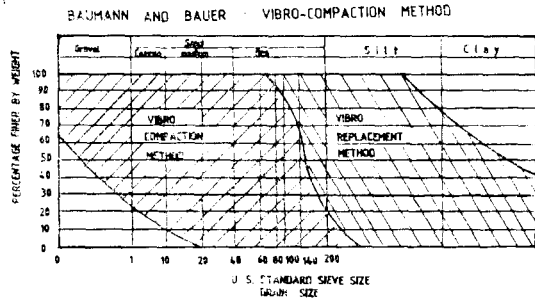


Fig.5-1 Range of soils suitable for stabilization

Fig.5-2는 VIBRO-COMPOZER 工法으로 처리된 지반의 처리전후의 표준관입시험결과이며, #200 체 통과량이 20% 이상의 경우는 거의 처리효과가 없는 것으로 나타난다. 그러나 DISPLACEMENT PILE 工法의 경우는 #200 체 통과량이 20%~40% 정도이며, 처리 전 N=4~7이었으나 처리 후의 표준관입시험결과는 N=15~30까지 얻을 수 있었다.

Fig.5-3, Fig.5-4는 VIBRO-COMPOZER 工法의 경우 SAND PILE AREA RATIO에 따른 처리 후 지반의 예상 및 결과 N치를 나타내며 DISPLACEMENT PILE의 경우도 이 계산

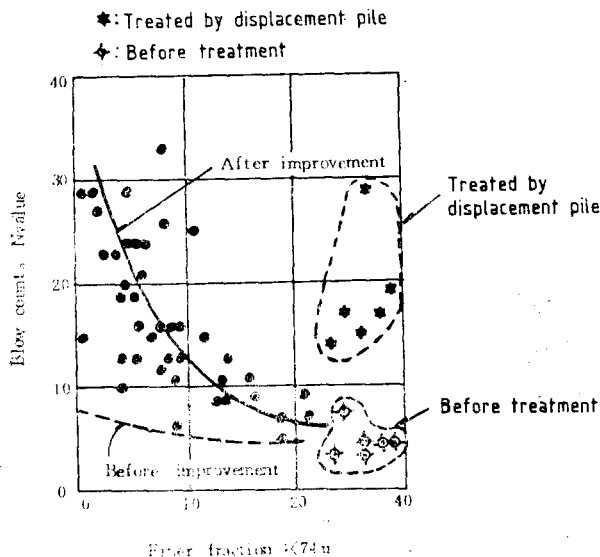


Fig.5-2 Compaction response with increasing silt content (ref.10)

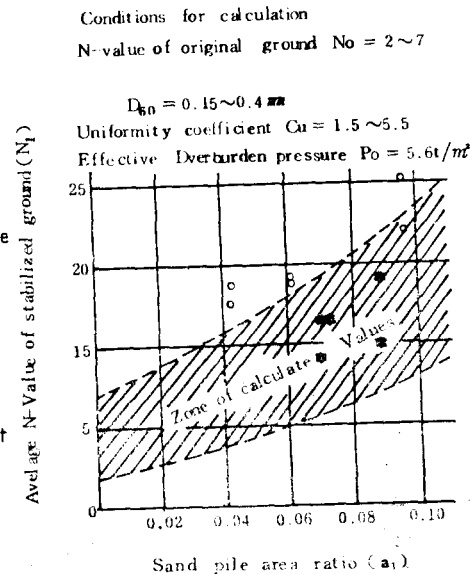


Fig.5-3 Comparison of stabilization effect in the test work



치 범위내에 들어감을 알 수 있다.

Fig. 5-5는 VIBRO-FLOTATION, VIBRO-COMPOZER 및 DISPLACEMENT PILE의 처리후의 N치를 나타낸 것으로 SILTY CLAY 함량이 20% 미만의 경우는 VIBRO-FLOTATION보다 VIBRO-COMPOZER방법이 더 효과적인 것으로 나타났으며 DISPLACEMENT PILE의 경우는 SILTY CLAY의 함량이 20% 이상이라 할지라도 타공법보다 오히려 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5-4 Empirical spacing SPT relationship for compozer (after Fudo Construction Co.)

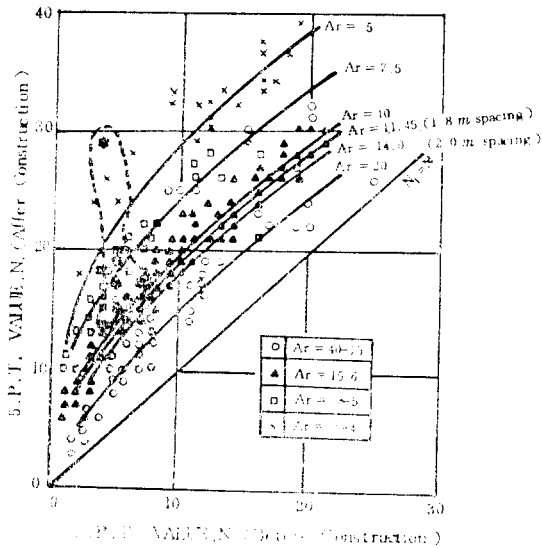
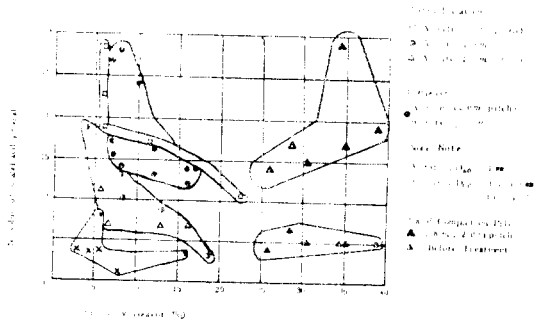
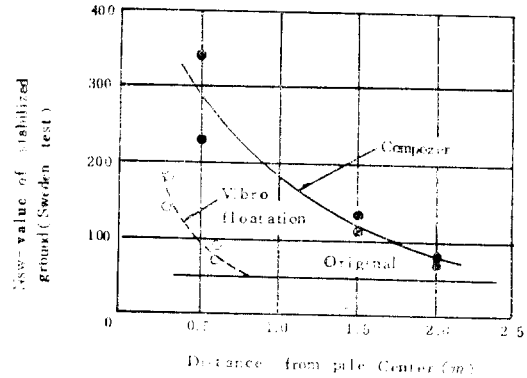


Fig. 5-5 The Effects of Compozer Method compared with those of Vibro flotation Method in case of Sandy Ground (Sakaguchi, 1965)



(a) Relationship between N-value of stabilized ground and Silt. Clay content of original ground



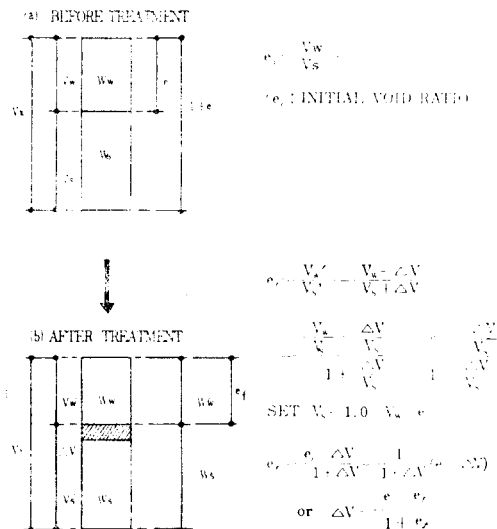
(b) Relationship between Nsw-value of Stabilized Ground and Distance from pile

## 6. DISPLACEMENT PILE의 설계

SAND COMPACTION PILE의 소요직경 및 SPACING의 결정은 목적하는 지반처리 후의 상대밀도(RELATIVE DENSITY) 및  $\gamma_{dmax}$  (MAXIMUM DRY DENSITY),  $\gamma_{dmin}$  (MINIMUM DRY DENSITY),  $\gamma_{din-situ}$  (IN-SITU DRY DENSITY)에 따라 다르며, 이의 결정을 위한 사용 공식 및 그래프를 첨부하였다.

### 6-1. PREDICTING OF REQUIRED CASING DIAMETER AND PILE SPACING.

Fig. 6-1 PHASE DIAGRAMS



〈표 6-1〉  $e_i$  (IN-SITU VOID RATIO),  $e_f$  (VOID RATIO AFTER TREATMENT), D (DIAMETER OF STEEL CASING) 및 (SPACING OF SAND COMPACTION PILE)와의 관계 (S=2.0 m, 1.5 m의 경우)

$e_i$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
D									
S=2.0									
0.1	0.697	0.796	0.896	0.996	1.096	1.196	1.295	1.395	1.495
0.2	0.687	0.786	0.885	0.984	1.084	1.183	1.282	1.381	1.481
0.3	0.670	0.769	0.867	0.965	1.064	1.162	1.260	1.358	1.457
0.4	0.648	0.745	0.842	0.939	1.036	1.133	1.230	1.327	1.424
0.5	0.620	0.716	0.811	0.906	1.002	1.097	1.192	1.288	1.383
0.6	—	0.681	0.775	0.868	0.961	1.055	1.148	1.242	1.335
0.7	—	0.642	0.733	0.824	0.916	1.007	1.098	1.189	1.281
0.8	—	—	0.688	0.777	0.866	0.954	1.043	1.132	1.221
0.9	—	—	0.639	0.726	0.812	0.898	0.984	1.071	1.157
1.0	—	—	—	0.672	0.755	0.839	0.923	1.006	1.090
1.1	—	—	—	0.616	0.697	0.778	0.858	0.939	1.020
1.2	—	—	—	—	0.637	0.715	0.793	0.871	0.949
1.3	—	—	—	—	—	0.652	0.727	0.802	0.877
1.4	—	—	—	—	—	—	0.661	0.733	0.805
1.5	—	—	—	—	—	—	—	0.665	0.734
S=1.5									
0.1	0.694	0.794	0.893	0.993	1.093	1.192	1.292	1.392	1.491
0.2	0.677	0.775	0.874	0.972	1.071	1.170	1.268	1.367	1.466
0.3	0.648	0.745	0.842	0.939	1.036	1.133	1.230	1.327	1.424
0.4	0.610	0.705	0.799	0.894	0.989	1.084	1.178	1.273	1.368
0.5	—	0.656	0.748	0.839	0.931	1.023	1.115	1.207	1.299
0.6	—	0.599	0.688	0.777	0.866	0.954	1.043	1.132	1.221
0.7	—	—	0.622	0.708	0.793	0.897	0.964	1.049	1.135
0.8	—	—	—	0.635	0.717	0.798	0.880	0.962	1.043
0.9	—	—	—	—	0.637	0.715	0.793	0.871	0.949
1.0	—	—	—	—	—	0.631	0.705	0.779	0.853
1.1	—	—	—	—	—	—	0.617	0.687	0.758
1.2	—	—	—	—	—	—	—	—	0.664
1.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—

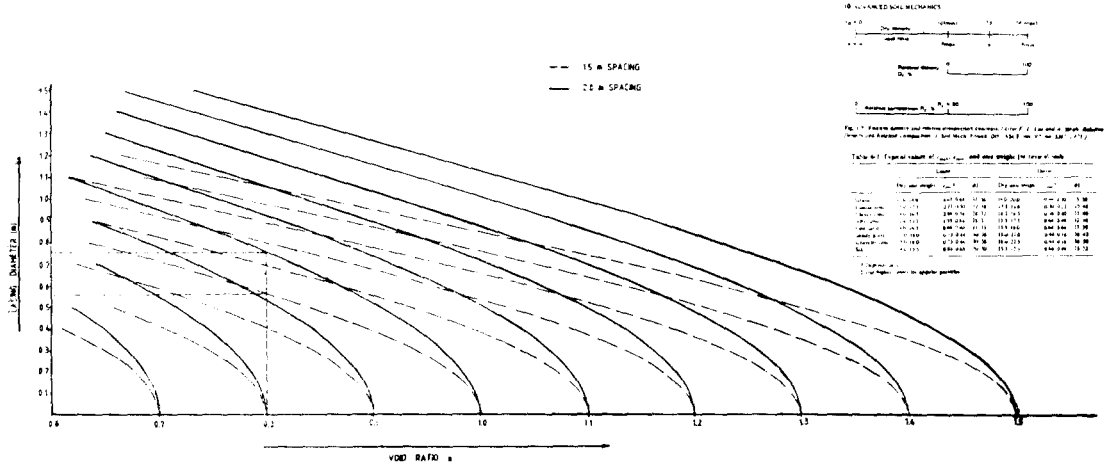
DISPLACEMENT PILE의 소요직경 및 SPACING 결정을 위하여 당사에게 개발한 공식 및 도표는 Fig. 6-1의 기본개념에 근거하였다.  
where,

- $e_f$  : VOID RATIO AFTER TREATMENT
- $e_i$  : VOID RATIO BEFORE TREATMENT  
(I.E. IN-SITU VOID RATIO)
- $\Delta V$  : VOLUMN OF DISPLACEMENT DUE

TO CASING  
(I.E. VOLUMN OF CASING)

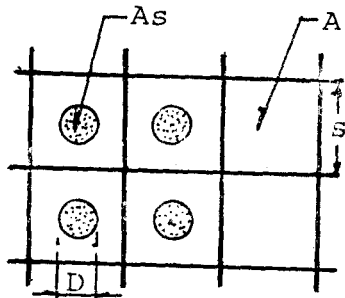
표 6-1과 Fig. 6-2는 DISPLACEMENT PILE에 의하여 지반을 처리할 때 CASING의 직경 및 SPACING을 결정할 수 있는 도표이다. 예를 들면 in-situ void ratio  $e_i=1.0$ 이며 처리 후의 void ratio를  $e_f=0.8$ 을 목표로하였을 때 0.75m 직경 CASING을 사용 2m SPALING으로 타

Fig. 6-2 Relationship Between Casing Diameter and Void Ratio



입하던가 또는 0.55 m 직경 CASING 을 사용 1.5 m SPACING 으로 하던가 하면 되겠다.

6-3. 매 PILE 이 처리할 수 있는 AREA RATIO(또는 VOLUMN RATIO)를 사용하면 전술한 6-1 공식은 아래의 식으로 변형된다.



$$n = A_s / A$$

$$F = A / A_s$$

Fig. 6-3 Explanation of displacement pile area ratio

$$e_f = \frac{e_i - n}{1 + n} = \frac{e_i - 1/F}{1 + 1/F} \quad (6-2)$$

$$\text{or } F = \frac{e_f + 1}{e_i - e_f} \quad (6-3)$$

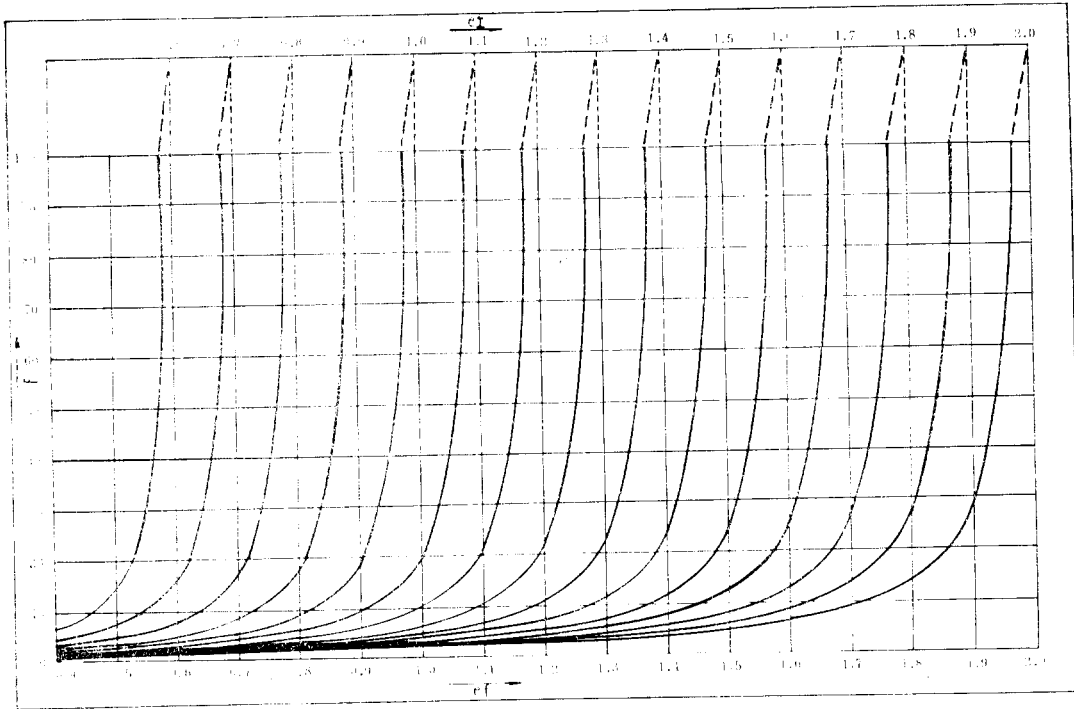
$$\text{WHERE, } n = \frac{\Delta V}{V} = \frac{A_s}{A} = \frac{1}{F} = \frac{\pi D^2}{4S^2}$$

: VOLUMN RATIO

즉, 상기  $F$  값으로서 SAND COMPACTION PILE 의 SPACING 및 직경을 결정할 수 있다.

여기에서  $F$  값은 DISPLACEMENT PILE 의 면적에 대한 처리되어야 할 면적의 비이다.  $F$  가 10 이라 함은 DISPLACEMENT PILE 1 개 가 그 면적의 10 배만큼의 면적을 처리하였을 경우이다. 따라서  $e_i = 1.0$ (처리 전 간극비),  $e_f = 0.8$ (처리 후 간극비)일 경우 약  $F = 9$  정도 가 나온다.

Fig. 6-4 Relationship Between  $e_i$ ,  $e_f$  and  $F$



参 考 文 献

1. JIRO NAKAYAMA, EIZABURO ICHIMOTO, "ON STABILIZATION CHARACTERISTICS OF SAND COMPACTION PILES" SOIL AND FOUNDATION, Vol. 13, No. 3, Sept. 1973.
2. D.A. GREENWOOD, K. KIRSCH, "SPECIALIST GROUND TREATMENT BY VIBRATORY AND DYNAMIC METHODS", PILING AND GROUND TREATMENT FOR FOUNDA-

TIONS, THOMAS TEIFORD Ltd LONDON, 1983.

3. D.A. GREENWOOD, "MECHANICAL IMPROVEMENT OF SOILS BELOW GROUND SURFACE" CONFERENCE ON GROUND ENGINEERING. Instn. Civ. Eng., London, 1970, pp. 11~22.
4. D.A. GREENWOOD, G.H. THOMSON, "Ground Stabilisation; Deep Compaction and Grouting" Thomas Telford rtd Londen, 1984.