

쇄석의 진동다짐 특성에 관한 실험적 고찰

An Experimental Study on the Characteristics of Vibro-compaction of Crushed Stones

정길수* 박병수** 홍영길*** 유남재****

Jeong, Gil-Soo Park, Byung-Soo Hong, Young-Kil Yoo, Nam-Jae

Abstract

This Study is results of experimental works to investigate the characteristics of vibro-compaction of crushed stones having coarse grain sizes. For testing material, crushed stone, sieved within very narrow ranges of grain size distribution, was used. Cyclic loading apparatus was used to apply cyclic loading to the specimen prepared in the mold. Tests were performed by changing the ratio of the maximum to the minimum stress, frequency and the magnitude of the maximum and the minimum stresses. Settlement of specimen due to cyclic loading was measured to analyze the compaction efficiency and sieve analysis test after cyclic loading test was also carried out to find the crushing rate of the specimen.

As results of cyclic loading test, normalized settlement in terms of specimen height tends to be converged around loading cycle number of 1500. The magnitude of normalized settlement is in the range of 3.11 ~ 8.57%. The crushing rate is in the range of 4.46 ~ 8.78%. Normalize settlement and the crushing rate tend to increase with decreasing the ratio of the maximum to the minimum stresses and they tend to increase with increasing the frequency and the magnitude of the maximum and the minimum stresses for the given ratio.

In conclusions, compaction rate of crushed stone is controlled by the dynamic stress (difference between the maximum and the minimum stresses) and the crushing rate is dominated by applied energy to the specimen.

키워드 : 쇄석, 진동다짐, 최대 최소응력비

Keywords : *Crushed Stone, vibro-compaction, Ratio of the maximum to the minimum stress*

1. 서론

일반적으로 점착력이 없는 조립토의 경우 진동

에 의한 다짐방법을 사용하고 있다. 진동다짐은 19세기에 프랑스에서 제안되었으나, 1930년대 중반 독일에서 흙의 밀도를 증가시키기 위해 진동기(Vibrator)를 이용한 것을 시초라 할 수 있다. 진동다짐은 점착력이 없는 토립자 사이에 발생하는 상호 마찰력보다 진동력을 크게 하여 토립자를 제배열시켜 간극비를 감소시키고 지반의 침하를 유발시킴으로써 지반의 밀도와 내부마찰각, 탄성계수 증가를 기대할 수 있는 지반개량공법이다. 진동다짐에 의해 지반은 느슨한 상태에서 조밀한 상태로 이동

* 강원대학교 대학원 토목공학과, 박사수료

** 강원대학교 토목공학과 연구원 공학박사

*** 한림성심대학 토목과 교수, 공학박사

**** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

하므로, 효율적인 진동다짐을 위해서는 다음의 두가지 사항을 만족해야 한다(Wallays, 1982).

첫째, 각각의 토립자는 이동해야한다. 즉, 진동다짐에너지는 접촉부분의 전단저항보다 커야한다. 전단저항력은 Mohr-Coulomb의 파괴규준식에 의하여 알려진 바와 같이 연직응력, 마찰계수, 부착력의 함수이다.

둘째, 지하수위 아래의 지반에서 혹은 지하수위가 증가할 때 과잉간극수압은 간극비 감소와 일치하면서 빠르게 소산되어야 한다. 포화지반의 배수조건에서 과잉간극수압의 소산결과에 의해 체적변화가 유발되기 때문이다.

Wallay의 연구결과에 의하면, 토립자의 이동이 발생하기 위해 토립자에 작용하는 힘은 토립자의 내부 마찰 저항력보다 훨씬 커야한다. 그러므로 진동다짐을 위한 적정의 최대입경이 주어져야 하며 극단적으로 큰 입경의 전단저항력보다 큰 힘을 진동장비로 가하기 어려운 시공상 현실적인 문제가 있기 때문이다. 또한 포화 지반에서는 과잉간극수압이 소산되면서 간극비가 감소하는데 이와 같은 조건에서 밀도를 증가시키기 위해서는 현장지반의 투수계수가 충분히 커야한다. 흙의 투수계수가 작으면 간극수압은 순간적으로 증가한다. 그러나 실제로 어떠한 간극수도 이동이 없다.

따라서 본 연구는 현장에서 사석과 같이 입경이 매우 큰 조립의 성토재의 진동다짐에너지에 따른 다짐특성을 실험적으로 고찰하는 것을 목적으로 한다. 입경이 큰 조립토의 다짐효율 특성을 연구하기 위하여 파쇄된 쇠석 시료를 이용하여 다짐에너지조건을 변화시켜가며 반복재하시험을 실시하고 그 결과를 분석하였다, 시험에 사용된 시료의 광물학적 특성을 분석하기 위하여 편광현미경 분석을 실시하였으며, 물리적 특성을 파악하기 위하여 비중, 흡수율, 최대, 최소 단위중량시험 등의 시험을 실시하였다. 시험에 사용된 시료는 분쇄기(Crusher)로 파쇄한 쇠석을 시험망체로 분류하여 일정한 입경범위의 시료를 이용하였으며, 동일한 시험조건에서 각각 최대 최소응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$), 진동주기(Frequency), 최대 최소응력을 변화시켜가며 반복재하시험을 수행한 다음 입도분석을 통하여 입자 파쇄율을 측정함으로써 각각의 매개변수에 따른 다짐효율 특성을 분석하였다.

2. 사용시료 및 물리적 특성

본 연구에 사용된 시료는 장석을 주구성 광물로 하여 각섬석, 녹니석, 녹염석 등의 광물이 포함된 안삼암으로서 물리적 특성은 표 1과 같다. 먼저 공시체를 건조시킨 다음 체적과 중량을 측정하여 구한 암석의 단위 중량은 2.623 gf/cm³으로 나타났으

며, 일반적인 의미에서 암석의 건조단위중량을 의미하기도 하는 암석의 비중은 2.62로 나타났다. 또한 진공압(-50mmHg)조건에서 24시간 동안 수침시킨 다음 완전 건조시켜 구한 흡수율(Absorption Ratio)은 0.26%로 나타났으며, 일축압축시험을 통하여 구한 시료의 포아슨비(Poisson's Ratio)는 0.24로 나타났

표 1 시료의 물리적 특성

구 분	단위중량 (gf/cm ³)	비중 Gs	흡수율 (%)	포아슨비
결과	2.623	2.62	0.26	0.24

또한 다짐효율시험시 시료의 단위중량조건을 결정하기 위하여 최대·최소 단위중량 시험을 실시하였다. 최대단위중량시험은 KS F 2346규정에 명시된 바와 같이 직경 15cm, 높이 35cm의 몰드에 일정중량의 시료를 넣고 10 kN/m²의 상재하중을 올려놓고 진동대를 이용하여 50Hz조건으로 8분이상 진동을 가한 다음 체적을 측정하여 최대단위중량을 계산하였다. 그리고 최소단위중량시험은 ASTM 4254 규정에 명시된 바와 같이 2,000 cm³용량의 실린더에 일정중량의 건조시료를 투기한 다음 용기를 흔들어서 시료를 재배열시킨 다음 높이를 측정하여 최소단위중량을 구하는 방법을 사용하였다.

이와 같은 조건으로 실시한 쇠석의 최대 최소 단위중량시험 결과 최대단위중량의 경우 1.615 gf/cm³로 나타났으며, 최소단위중량은 0.917 gf/cm³으로 나타났다.

3. 실험방법

다짐에너지에 따른 쇠석재의 다짐효율을 산정하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같은 반복 재하장비를 이용하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 장비는 하부에 반복하중을 재하할 수 있는 유압재하장치(Hydraulic Actuator), 하중계(Load Cell) 등으로 구성된 재하장치(Load Unit Assemblies)와 하중을 가하는데 필요한 동력을 공급하는 유압 공급장치(Hydraulic Power Supply) 그리고 실험조건 설정과 장비를 제어하는 제어장치(Controller)와 PC로 구성되어 있다.

실험에 사용되는 시료는 몰드의 제원등을 감안하여 최대입경 9.52mm체를 통과하고 4.75mm체에 잔류한 시료를 사용함으로써 일반적으로 현장에서 사용되는 재료의 균등계수를 고려하였다. 또한 시료의 단위중량은 건조단위중량은 자연상태로 포설할 때

의 건조단위중량을 측정한 결과 평균치 1.336 gf/cm³(상대밀도 60%)을 적용하였다.

이와같은 조건으로 몰드(내경15cm, 30높이cm)에 15cm 높이만큼 시료를 넣은 다음, 제어장치를 이용하여 시료에 작용하는 최대하중과 최소하중 반복제하주기 등의 실험조건을 설정하고 5분동안 유압장치를 가동하여 주기하중을 가하고, 경시변화에 따른 하중-변위관계는 PC를 통하여 기록 저장하였다.

시험이 종료된 이후 다짐에너지에 따른 입자의 파쇄특성을 분석하기 위하여 4.75mm체 통과율을 측정하였다. 세부적인 실험조건은 표 2와 같이 동일한 시료조건에서 반복 제하주기를 변화시켜가며 실험을 실시하였다.



그림 1 반복제하시험 개요

표 2 다짐효율시험 조건

Test No.	최대응력 (kgf/cm ²)	최소응력 (kgf/cm ²)	진동주기 (Hz)	최대최소 응력비 $\sigma_{max}/\sigma_{min}$
1	5.09	0	20	0.0
2	5.09	1.27	20	0.25
3	5.09	2.55	20	0.50
4	5.09	3.82	20	0.75
5	5.09	1.27	10	0.25
6	5.09	1.27	30	0.25
7	5.09	1.27	40	0.25
8	5.09	1.27	50	0.25
9	2.55	0.64	20	0.25
10	7.64	1.91	20	0.25

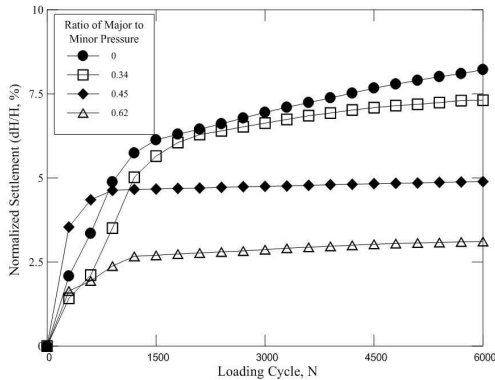
4. 결과분석

쇄석에 대한 진동다짐시 최대 최소응력비 변화에 따른 다짐효율특성 변화를 분석하기 위하여 최소응력, 진동주기, 몰드 재원을 동일한 조건으로 유지시킨 다음 최대응력 조건을 변화시켜가며 반복제하시험을 실시하여 그 결과를 표 3과 그림 2에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 시험에 사용된 유압장치의 제어특성상 초기 설정된 최대 최소하중을 정확하게 재현하지 못하는 한계가 있어 각각의 조건에서 실제로 재하된 최대 최소하중을 최대 최소치와 평균치를 정리 기록하였으며, 그래프 작도시 최대 최소하중은 실제 측정된 값의 평균치를 이용하였다.

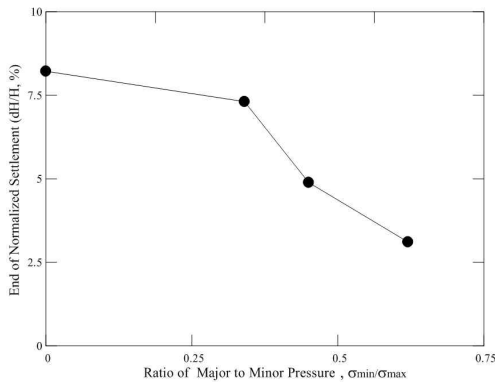
표 3 최대 최소응력비 변화에 따른 시험 결과

Test No.	시험조건				시험결과	
	σ_{max} (kgf/cm ²)		σ_{min} (kgf/cm ²)		dH/H (%)	<4.75mm (%)
	Max.	Ave.	Min.	Ave.		
1	5.81	5.14	0.00	0.00	8.22	5.26
2	5.50	4.95	2.43	1.70	7.31	6.86
3	6.67	5.32	2.47	2.40	4.89	8.78
4	5.97	5.24	3.57	3.25	3.11	7.30

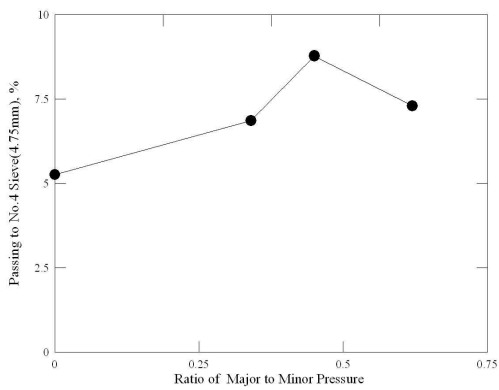
그림 (a)에서 보는바와 같이 하중이 재하된 초기(1500 Cycle이내)에 대부분의 침하가 발생하는 것으로 나타났으며, 초기 접선의 기울기는 비교적 유사하게 진행되는 것으로 나타났다. 정규화시킨 침하량 결과중 최종치를 정리하여 그림 (b)에 도시하였다. 그림(b)에서 보는 바와 같이 최대 최소응력비가 증가할수록 정규화시킨 침하량은 감소하는 것으로 나타나 쇄석의 다짐효율은 동일한 조건하에서 정적하중(최소응력)보다는 동적하중(최대응력-최소응력차)이 클수록 다짐효율이 증가함을 알 수 있다. 시험이 종료된 후에 입자의 파쇄율을 알아보기 위하여 4번체 통과량을 측정하여 그 결과를 그림 (c)에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 재하된 반복하중에 의해 4번체를 통과하는 입자의 비율은 5.26~8.78%으로 나타났으며, 최대 최소응력비가 증가할수록 입자의 파쇄율이 증가하는 것으로 나타나 시료에 가해진 다짐에너지의 누적량이 클수록 파쇄가 증가하는 것으로 판단된다.



(a) 재하주기-정규화시킨 침하량 관계곡선



(b) 정규화시킨 침하량 최종치 변화



(c) 4번체 통과량 변화

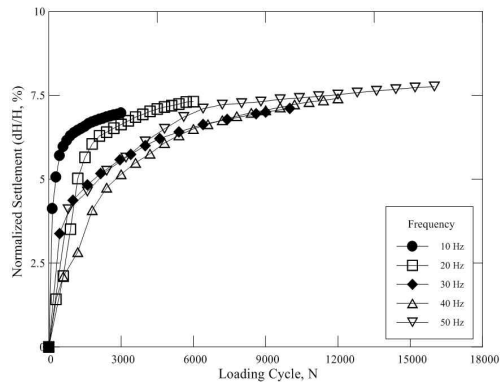
그림 2 최대, 최소응력비 조건에 따른 시험결과

표 4와 그림 3은 동일한 최대 최소 응력, 몰드 제한하에서 진동주기(Frequency)를 변화시켜가며 반복재하시험을 실시하여 그 결과를 나타낸다. 그림에

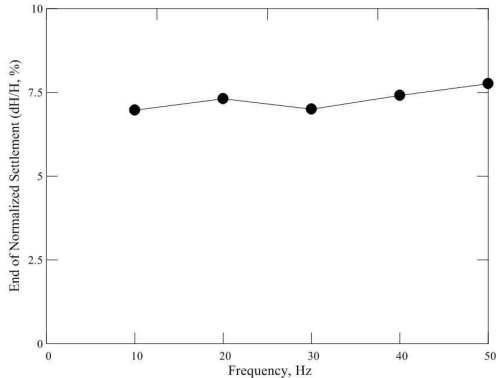
서 보는바와 같이 대부분의 침하가 재하초기에 발생되기 때문에 대부분의 실험결과는 비교적 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 최종적인 정규화시킨 침하량은 그림(b)에서와 같이 실험조건에 따라 6.97~7.76%의 분포를 보이며, 진동주기가 증가할수록 다짐에너지가 증가하여 전반적으로 다소 증가하는 경향을 보인다. 또한 실험종료후 측정된 4번체 통과량은 4.46~8.11%로 나타났으나 파쇄된 쇠석을 이용하는 실험방법의 특성상 입자의 불균질성으로 결과의 분산이 심하게 나타나며, 전체적인 경향을 분석해 볼 때 다짐에너지가 증가할수록 파쇄되는 입자의 비율은 증가하는 것으로 추정된다.

표 4 진동주기 변화에 따른 시험 결과

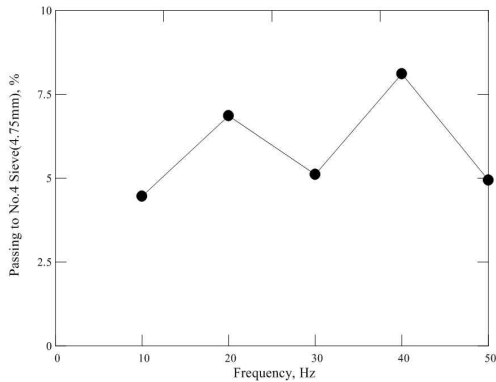
Test No.	시험조건				시험결과	
	σ_{max} (kgf/cm ²)		σ_{min} (kgf/cm ²)		dH/H (%)	<4.75mm (%)
	Max.	Ave.	Min.	Ave.		
5	5.66	5.17	1.89	1.78	6.97	4.46
2	5.50	4.95	2.43	1.70	7.31	6.86
6	5.17	5.10	1.80	1.76	7.00	5.11
7	5.27	5.07	2.39	1.78	7.41	8.11
8	5.32	5.05	2.24	1.72	7.76	4.94



(a) 재하주기-정규화시킨 침하량 관계곡선



(b) 정규화시킨 침하량 최종치 변화



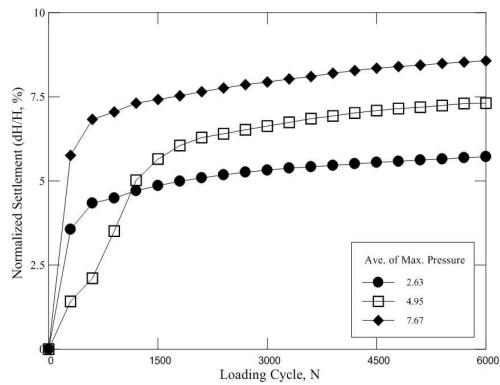
(c) 4번체 통과량 변화곡선

그림 3 진동주기 조건에 따른 시험결과

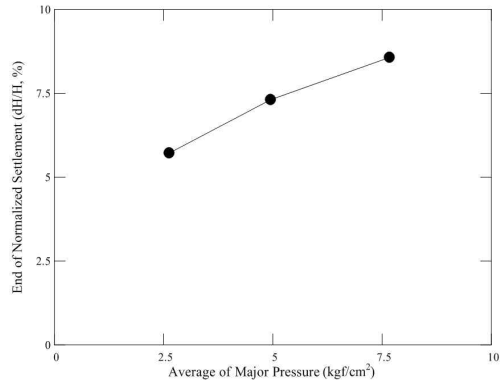
동일한 최대 최소응력비 조건하에서 최대 최소응력을 증가하였을 때 발생하는 쇄석의 다짐효율 특성을 분석하기 위하여 최대 최소응력비를 0.25조건으로 설정하고 그 비율에 상응하는 크기의 최대 최소응력을 가하여 반복재하시험을 실시한 결과를 정리하여 표 5와 그림 4에 나타내었다. 그림 (a)의 재하주기가 증가할수록 정규화시킨 침하량도 같이 증가하는데 1,500 Cycle에 도달하기 전에 대부분의 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 정규화시킨 침하량의 최종치와 실측된 최대응력의 평균치를 도기한 결과 그림 (b)에서와 같이 정규화시킨 침하량은 5.72~8.57 %의 분포를 보이며, 최대응력이 증가할수록 정규화시킨 침하량도 증가하는 것으로 나타났다. 실험종료후 4번체 통과량을 측정한 결과 실험과정에서 파쇄된 입자의 비율은 5.32~8.71%로 나타나 진동다짐시 최대응력이 증가할수록 지반의 다짐에너지의 증가로 인하여 침하량도 증가하며, 동시에 입자의 파쇄도 증가하는 것으로 나타났다.

표 5 최대 최소응력 변화에 따른 시험결과

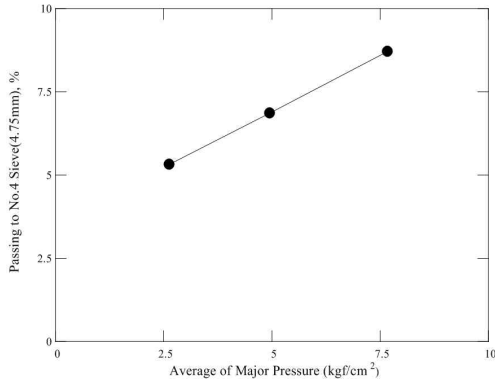
Test No.	시험조건				시험결과	
	σ_{max} (kgf/cm ²)		σ_{min} (kgf/cm ²)		dH/H (%)	<4.75mm (%)
	Max.	Ave.	Min.	Ave.		
9	3.16	2.63	0.85	0.81	5.72	5.32
2	5.50	4.95	2.43	1.70	7.31	6.86
10	8.69	7.67	2.62	2.49	8.57	8.71



(a) 재하주기-정규화시킨 침하량 관계곡선



(b) 정규화시킨 침하량 최종치 변화



(c) 4번체 통과량 변화곡선

그림 4 최대응력(평균치) 조건에 따른 시험결과

이와같이 최대·최소응력비, 진동주기, 최대 최소응력의 크기(동일 응력비 조건)를 변화시켜가며 반복재하시험을 수행한 결과 정규화시킨 침하량은 1,500 Cycle에 도달하기 전에 대부분의 침하량이 발생하는 것으로 나타났으며, 시험조건에 따라 정규화시킨 침하량은 3.11~8.57%의 크기를 보이며, 쇄석의 파쇄율은 4.46~8.78%로 나타났다. 실험결과 최대 최소응력비가 감소할수록, 진동주기와 최대 최소응력(동일응력비 조건)을 증가시킬수록 정규화시킨 침하량과 쇄석의 파쇄율은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 쇄석의 다짐효율은 정적하중보다는 동적하중(최대응력-최소응력 차)에 지배되며, 입자의 파쇄율은 시료에 가해진 다짐에너지의 지배를 받는 것으로 나타났다.

5. 결론

다짐에너지에 따른 쇄석재의 다짐효율을 산정하기 위하여 진동주기, 최대 및 최소응력, 최대·최소응력비 조건을 변화시켜가며 반복재하시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 반복재하시험 결과 정규화시킨 침하량은 1,500 Cycle에 도달하기 전에 대부분의 침하가 발생하는 것으로 나타났다
- 2) 최대·최소응력비 조건에 따른 시험결과 정규화시킨 침하량은 3.11~8.22%의 분포로 시험조건에 따라 최대·최소응력비가 증가할수록 정규화시킨 침하량은 감소하는 경향을 보이며, 쇄석의 파쇄율은 4.46~8.78%로 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.
- 3) 진동주기에 따라 정규화시킨 침하량은 6.9~

7.76%의 분포를 보이며 진동주기가 증가할수록 다소 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

라. 동일한 최대·최소응력비 조건하에서 최대 및 최소응력을 증가하였을 경우 정규화시킨 침하량은 5.72%~8.57%의 분포로 시험조건에 따라 점진적 증가경향을 보이며, 쇄석의 파쇄율은 4.46~8.78%로 증가경향을 보이는 것으로 나타났다.

4) 본 연구의 시험조건에 대한 반복재하시험 결과 쇄석의 다짐효율은 정적하중보다는 동적하중(최대응력-최소응력 차)에 지배되며, 입자의 파쇄율은 시료에 가해진 다짐에너지의 지배를 받는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] 유건선, "쇄석의 진동다짐특성 연구", 2003 대한토목학회 정기학술대회, pp. 4055-4059, 2003.
- [2] D'Appolonia, E., "Dynamic Loadings", J. of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM1, pp.49-72, 1970.
- [3] Das, B. M., "Principles of Soil Dynamics", PWS- KENT Publishing Company, 1993.
- [4] Griffith, C. J., "Soil Improvement Through Vibro-compaction and Vibro-replacement", University of Maryland, 1991.
- [5] Wallays, M., "Deep Compaction by Casing Driving", Proc. ASCE Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Technique, Bangkok, 1982.