

지반조건에 따른 동다짐의 개량심도 평가

Estimation of Depth of Improvement by Dynamic Compaction with Soil Conditions

이봉직* · 윤준식** · 이종규***

Lee, Bong-Jik · Youn, Jun-Sik · Lee, Jong-Kyu

Abstract

Dynamic compaction is a ground improvement technique which is particularly effective for loose granular soils. It has also been used successfully to the cohesive soils with high void ratio, and wastes and fills. For the design of dynamic compaction method, prediction of depth of improvement is very important. The depth of improvement is influenced not only by compaction energy but also by many parameters such as grid spacing, soil property, degree of saturation and site conditions. Based on the test results, the depth of improvement were evaluated with considering compaction energy, soil type and ground water level.

Keywords : Dynamic compaction, Depth of improvement, Degree of saturations, Compaction energy

요 지

동다짐공법은 느슨한 지반의 개량에 주로 사용되는 공법으로 짐착성 토사나 폐기물과 성토지반에도 성공적으로 적용되고 있다. 동다짐공법의 설계에 있어 지반개량심도의 결정은 중요한 요소이다. 그러나 개량심도는 다짐에너지 뿐만 아니라 다짐간격, 대상토질 특성, 포화정도 및 현장여건 등에 영향을 받고 있다. 본 연구에서는 개량심도 예측을 위하여 현장실험결과를 이용하였으며 다짐에너지, 토질특성 및 포화도에 따른 개량심도를 평가하였다.

주요어 : 동다짐, 개량심도, 포화도, 다짐에너지

* 정회원 · 충주대학교 건설도시공학과 부교수

** 정회원 · (주) 진산이엔지 대표이사

*** 정회원 · (주) 진산이엔지 지반실장

1. 서론

동다짐공법(Dynamic Compaction)은 무거운 중량의 추를 상당 높이에서 자유낙하시켜 지반에 충격에너지를 가함으로써 지반을 상당 깊이까지 강제 다짐시키는 지반개량 공법이다. 이 공법은 중량 10~60ton, 저면적 3~7m² 정도의 강제 및 콘크리트 등으로 제작한 추를 100~200ton의 대형크레인이나 전용장비를 이용하여 10~40m 높이에서 자유낙하시켜 지반을 개량하는 것으로 일반 다짐공법에 비해 다짐에너지가 크기 때문에 느슨한 사질토 지반이나 폐기물 지반에 주로 적용되고 있다.

이와 같은 동다짐공법은 시공 기간이 짧고 다른 공법에 비해 경제적이며 시공 방법이 간단하고 특별한 약품이나 재료가 필요없으며, 특히 여러 지반조건에 적용이 가능한 장점을 지니고 있어 점성토층에서 사질토층까지 다양하게 적용되고 있다.

하지만 설계시 불확실한 요소가 많아 경험적인 부분들을 실제현장에 시험시공을 통하여 반영하고 있다. 동다짐 설계 시에는 대상 흙의 종류, 지반깊이별 표준관입시험 결과, 지하수위, 하중조건, 중추의 체원 등을 통하여 지반개량심도, 중추의 무게와 낙하고 및 저면적, 타격점의 간격, 타격회수 및 타격단계수 등을 결정하게 된다. 특히 개량심도의 합리적인 결정은 지반의 개량효과 및 공사비에 중요한 요소로서 지금까지 이를 합리적으로 결정하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다.

이와 관련된 대부분의 연구는 Menard(1975)가 제안한 경험적인 식에 근거하여 지반종류에 따른 개량심도계수의 결정에 초점을 두고 있으며, 국내에서도 대부분이 개량대상층을 단순히 사질토, 점토, 자갈 및 쇄석 등으로 분류한 후 경험적인 개량심도 계수를 적용하여 설계가 이루어지고 있다.

하지만 개량심도는 개량대상층이 투수성 여부, 개량지층 하부의 지층상태, 장비종류에 따른 개량심도의 한계성, 중추의 접지압력, 중추 케이블의 마찰 손실, 지하수위 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문에 단순히 개량 대상지층의 종류에 따라 분류할 경우 그 외의 요소들을 효과적으로 반영하지 못할 수 있다.

특히 국내의 경우, 주 개량대상층이 되는 표토 및 매립 지반 하부에는 여러 종류의 지층이 분포하고 있는 경우가 많으며, 지표층의 변화가 큰 경우가 많기 때문에 단순히 하나의 지층으로 가정하여 설계할 경우, 예측치와 다른 개량효과가 나타날 가능성이 크다.

이에 본 연구에서는 총 16개소에서 실시된 시험동다짐 자료를 이용하여 다짐에너지, 지반의 종류, 지하수위 및 하부 지층 조건에 따른 개량심도를 평가하였다.

2. 동다짐공법의 개량원리와 개량심도

2.1 동다짐 공법의 개량원리

동다짐 공법의 기본원리는 개량하고자 하는 지반에 충격을 가하여 지반을 상당 깊이까지 강제 다짐시키는 지반개량 공법이다.

점성토 등과 같은 포화지반에 충격에너지를 가할 경우에는 그림 1과 같이 과잉간극수압이 발생하여 이 간극수압의 배출과 함께 강도가 증진되며, 사질토지반의 경우에는 그림 2와 같이 충격에 의하여 한계공극비 이하로 다져 지진시 및 진동시의 유동화를 방지할 수 있다.

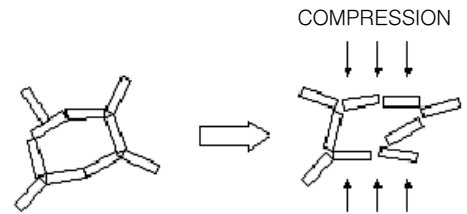


그림 1. 다짐시 토립자의 미시적 거동(점성토)

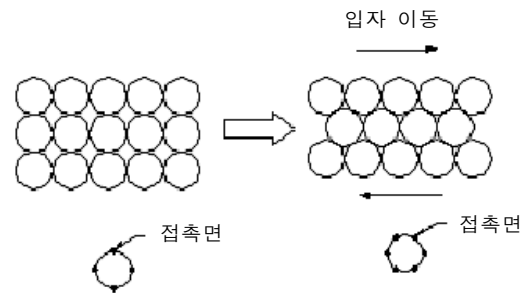


그림 2. 다짐시 토립자의 미시적 거동(사질토)

그림 3은 동다짐 모식도를 나타낸 것으로 다짐시 발생하는 진동은 P, S, R파의 복합체이며, 진동에 의해 토립자간의 상대변위를 유발시키고, 이로 인하여 지반의 간극비를 감소시키는 원리를 이용한다. 그러나 조밀한 사질토의 경우 다짐에 의한 토립자의 상대변위는 다짐에너지에 의해 오히려 느슨한 상태가 될 수도 있다.

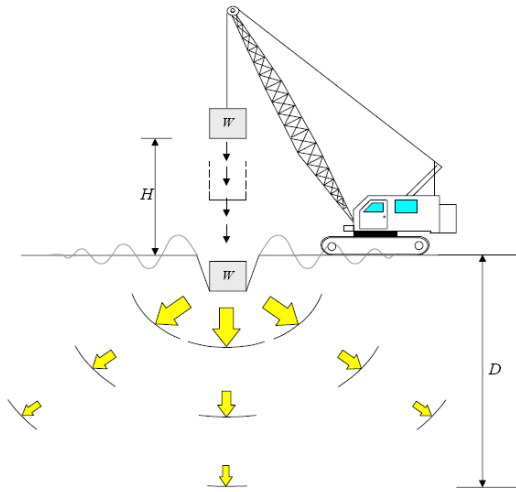


그림 3. 동다짐 모식도

동다짐 공법에 의한 Tamping시 지반의 거동은 토질에 따라 다르다. 흙은 포화된 점토층이라 하더라도 흙속에 미세한 기포가 존재하므로 즉각적인 압축반응을 보이게 되며, Tamping에 의하여 즉시 침하가 발생한다. 침하량은 토질 및 Tamping Energy에 따라 다르나 대체로 개량 대상층 두께의 3~8% 정도이다. 상기 지반의 경우 Tamping을 계속해서 가함으로써 흙을 점진적으로 액상화시켜 과잉간극수압을 소산시키므로 향후 발생하는 진동이나 지진에 대한 액상화 가능성을 방지할 수 있다.

Tamping으로 인하여 지반내에는 과잉간극수압이 발생하고 타격종료 후에도 잔류하게 되지만 정적하중에 비해 과잉간극수압의 소산시간이 매우 짧다. 이러한 원인은 동다짐 작업시 고체조각이 흐트러지면서 새로운 균열이 생기고 인위적인 간극수의 유로가 형성되어 흙의 투수성을 증대시키기 때문이다.

포화되지 않은 모래, 자갈 등의 조립토는 타격 즉시 강도 증가가 기대되며, 포화조립토도 과잉간극수압의 소산후에는 불포화토와 같은 강도 증가 현상을 나타내게 된다. 점성토의 경우, 타격 직후에는 지반강도가 저하하나 과잉간극수압의 소산에 따라 초기 강도를 상회하는 개량효과를 얻을 수 있다.

2.2 개량심도평가

개량 깊이와 1회 타격당 에너지(중추의 무게 × 낙하고)의 관계는 식(1)과 같은 경험식으로 표현할 수 있는데, 여기서 이들 관계를 결정해 주는 계수값 α를 개량심도계수라 한다. 이 값은 지반의 종류에 따라, 그리고 경험적인 자료에 따라 0.3에서 1.0 사이의 값을 가진다.

Leonards(1980)는 이 값을 약 0.5 정도로, Menard & Broise(1975)는 약 1.0 정도로, Lukas(1980)는 0.65

~0.80 정도의 값으로, Mitchell(1981)은 0.4~0.7, Mayne(1984)은 0.5 정도로 발표하였다.

이 값들을 지반의 조건에 따라 나누어 보면, 사질토 지반에서는 0.4~0.6, 쇄석 및 자갈 지반에서는 0.5~0.7, 폐기물 지반에서는 0.3~0.5 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있다(그림 4 참조).

$$D = \alpha\sqrt{WH} \quad (1)$$

여기서, D : 개량 심도(m)

W : 중추의 무게(ton)

H : 중추의 낙하고(m)

α : 개량심도계수

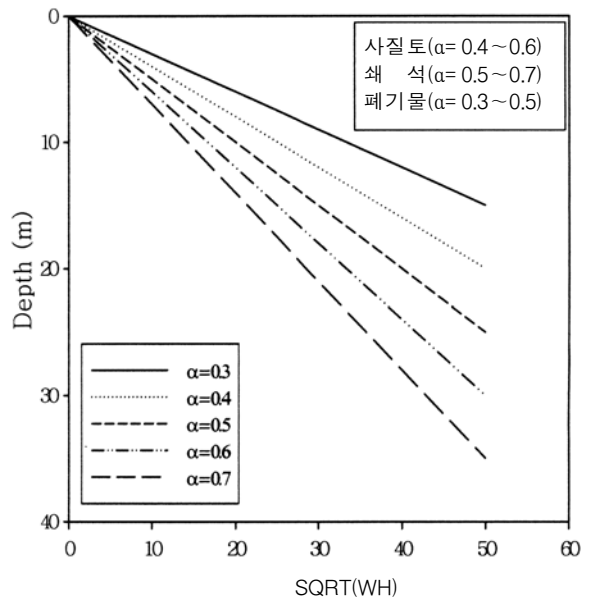


그림 4. 일반적으로 적용되는 개량심도

개량심도와 관련된 이론은 적용하는 다짐에너지와의 관계식을 이용하여 발전하여 왔으며, 지금까지 제안된 개량심도식을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 개량심도 제안식

제안자	제안식
Menard(1975)	$D < \sqrt{WH}$
Charles(1978)	$D < 0.35\sqrt{WH}$
Leonards(1980)	$D < \frac{1}{2}\sqrt{WH}$
Lucas(1992)	$D < n\sqrt{WH}$
Lungo(1992)	$D = k_1 + k_2(WH)$
Slocombe(1993)	$D = 0.586(WH)^{0.5} - 0.009(WH)$

여기서, W : 중추무게, H : 낙하고, k_1 : 깊이상수,
 k_2 : 에너지 상수

3. 현장실험방법

현장실험은 각 현장부지를 대표할 수 있는 지점을 선정하여 총 16개소에서 실시하였으며, 실험에 사용된 장비는 중량이 80~100ton의 크레인에 중량 15~20ton, 지름 1.5~2.0m 중추(Pounder)를 사용하였다. 실험위치별 각각의 제원은 표 2와 같다.

표 2. 실험위치별 제원

	W(ton)	H(m)	N(회)	E(ton-m)
Site 1	15	20	10	30
Site 2	15	12	8	22.5
Site 3	10	10	5	20
Site 4	15	15	9	25
Site 5	15	15	6	37.5
Site 6	15	20	7	42.86
Site 7	15	20	5	60
Site 8	15	20	4	75
Site 9	15	7	8	13.123
Site 10	15	10	8	18.75
Site 11	15	15	10	22.5
Site 12	12	10	12	10
Site 13	15	18	10	27
Site 14	12	15	10	18
Site 15	15	16	8	30
Site 16	15	15	9	25

실험위치는 군산, 안동, 아산, 광주, 안동 등 전국에 걸쳐 분포하고 있으며, 동치환으로 실험된 현장은 분석에서 제외하였다. 회당 다짐에너지는 0.6~3.5(ton-m)의 범위에 분포하고 있으며, 지반의 포화 및 건조조건은 동다짐 중추 직경(D)을 기준으로 지하수위가 1D 이상이면 건조, 1D 이내이면 포화조건으로 정의하였다(Luongo, 1992).

또한 허부점성토층의 층후는 5D~7D의 범위에서 분포하고 있다. 실험위치별 지반 및 지하수위 조건을 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 실험위치별 지반 및 지하수위 조건

	개량층	지하수위 조건	개량층 하부조건
Site 1	자갈층	건조	단일층 자갈
Site 2	모래층	건조	모래
Site 3	모래층	포화	모래
Site 4	모래층	포화	모래
Site 5	모래층	포화	모래
Site 6	모래층	포화	모래
Site 7	모래층	포화	모래
Site 8	모래층	포화	모래
Site 9	자갈층	건조	모래
Site 10	자갈층	건조	모래
Site 11	자갈층	건조	모래
Site 12	자갈층	포화	모래
Site 13	모래층	건조	모래자갈
Site 14	모래층	포화	점토
Site 15	모래층	포화	점토
Site 16	모래층	포화	점토

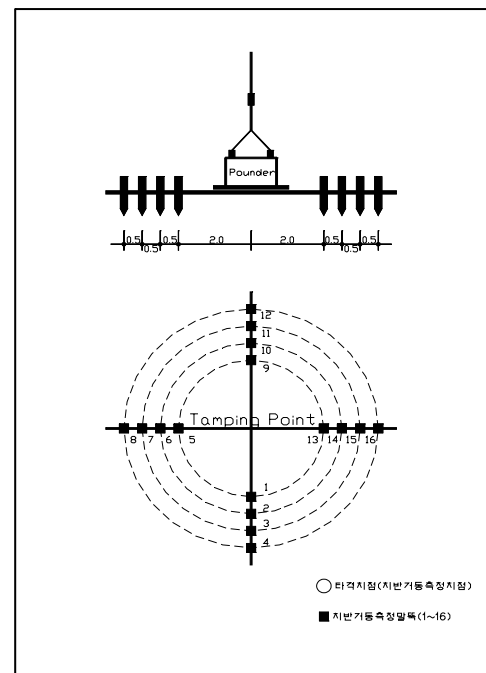


그림 5. 실험말뚝 배치도

지반개량범위를 평가하기 위하여 실험 전, 후에 시추조사와 표준관입시험을 실시하였으며, 개량지반의 지지력 및 침하 특성을 평가하기 위하여 평판재하시험을 실시하였다. 또한 동다짐시 낙하회수에 따른 지반의 체적변화를 평가하기 위하여 그림 5와 같이 시험말뚝을 배치하여 변위를 계측하였다.

4. 분석 및 고찰

4.1 지반개량심도계수 산정결과

지반개량심도는 현장실험 후 시추조사와 표준관입시험 결과를 이용하여 N값이 증가된 범위까지 분석을 실시하였다. 기존에 제안되어 사용되고 있는 지반개량심도계수와 비교하기 위하여 관찰된 지반개량심도와 동다짐시의 중추낙하중량 및 낙하고를 이용하여 지반개량심도계수를 역산하였으며, 지반개량 대상층에 따라 회귀분석한 결과는 그림 6과 같다.

자료의 분산정도가 크지만 일반적으로 사질토 지반에서는 0.4~0.6, 쇄석 및 자갈 지반에서는 0.5~0.7의 지반개량심도계수를 적용하는 것을 감안할 때, 모래지반에서는 0.526, 자갈지반에서는 0.607로 분석되어 비교적 좋은 일치성을 보이는 것으로 나타났다.

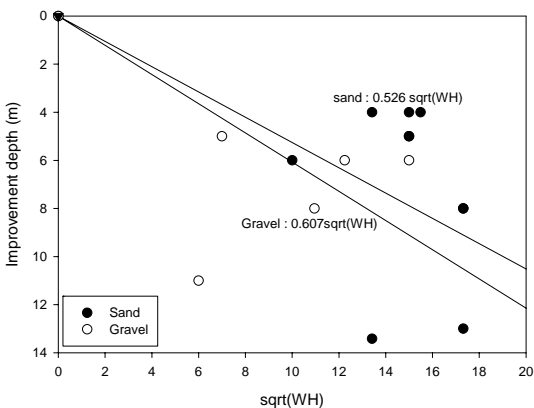


그림 6. 지반개량 대상층에 따른 지반개량심도계수

그림 7은 개량 대상지반 하부지층의 강도에 따른 지반개량심도계수를 도시한 것으로 개량대상지반 하부층에 비교적 견고하고, 투수성이 큰 모래지반이 분포할 경우가 연약하고 투수성이 낮은 지반이 분포할 경우에 비해 개량심도가 큰 것으로 분석되었다. 이는 하부연약층이 다짐에너지를 흡수함에 따라 다짐효과가 충분히 전달되지 못하는데 기인하는 것

으로 판단된다.

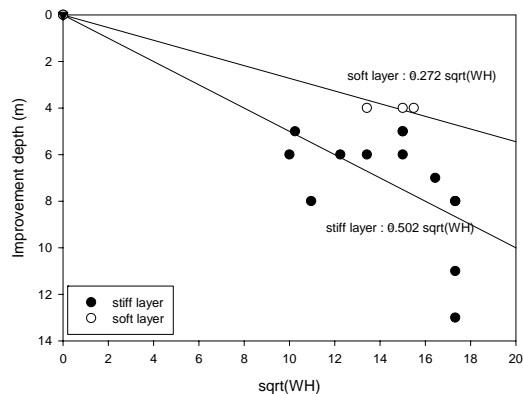


그림 7. 하부지층의 강도에 따른 지반개량심도계수

포화도에 따른 지반개량심도계수 산정결과(그림 8 참조) 포화도가 큰 경우 지반개량심도계수는 0.440, 건조한 경우 0.488로 나타나 전체적으로 큰 차이는 보이지 않는 것으로 분석되었다. 이는 대부분의 실험에서 투수층이 개량대상층 인근에 분포하고 있어 공극수압의 소산이 비교적 빠른 것과 원점을 지나는 선형회귀분석 기법이 다양한 조건을 반영하기에는 다소 효과적이지 못하는데 기인한 것으로 판단된다.

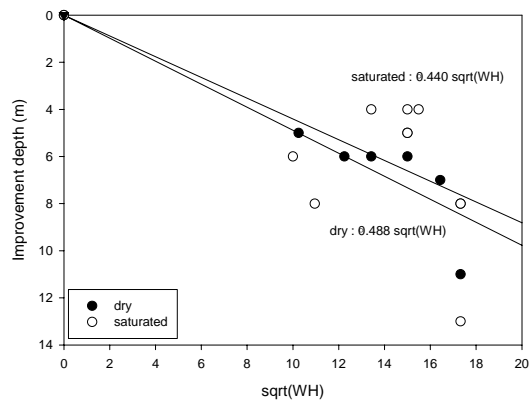


그림 8. 포화도에 따른 지반개량심도계수

건조지반의 경우 지반개량심도계수가 회귀분석결과와 비교적 일치하지만 포화지반의 경우 분포가 분산되어 있어 지반개량효과가 일정하지 않음을 유추할 수 있다.

4.2 깊이 및 에너지상수 산정결과

Luongo(1992)는 지반개량심도계수를 일차원 회귀분석

을 통하여 개량대상층의 포화도, 지하수위 위치 및 중추의 접지압력에 따라 분류하여 깊이 및 에너지상수로 분리하여 개량심도를 추정하였다. 이에 본 연구에서도 측정된 자료를 이용하여 깊이 및 에너지상수를 각 조건에 따라 분석하였다.

그림 9와 그림 10은 개량대상지반의 투수성 및 반투수성에 따른 개량심도를 나타낸 것으로 투수성 지반(깊이상수: 3.9, 에너지상수: 0.175)이 반투수성 지반(깊이상수: 2.78, 에너지상수: 0.103)에 비해 깊이 및 에너지 상수가 크게 나타나 전반적으로 투수성지반의 개량효과가 불투수성 지반에 비해 큰 것으로 분석되었다.

또한 Luongo(1992)의 제안된 식과 비교하여 볼때 깊이상수는 1.46~10.1사이에서 분포하며 에너지상수는 0.009~0.016 분포하므로 에너지 상수는 국내 지반에서 조사된 결과가 더욱 크며, 깊이상수는 Luongo의 제안식이 더욱 큰 것으로 분석되었다.

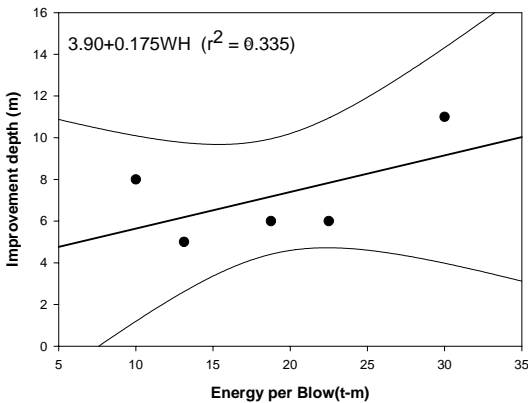


그림 9. 투수성 지반의 깊이/에너지 상수

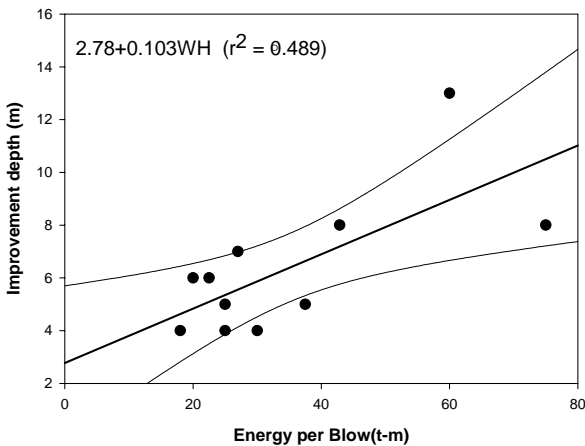


그림 10. 반투수성 지반의 깊이/에너지 상수

그림 11과 그림 12는 개량대상지반의 지하수위를 기준으로 1(DD : 중추직경)이상 지반은 투수성 1D 이내의 지반은 포화조건으로 분류하여 개량심도를 나타낸 것이다.

그 결과 건조조건 지반(깊이상수: 0.285, 에너지상수: 0.293)이 포화 조건 지반(깊이상수: 3.72, 에너지상수: 0.081)에 비해 에너지 상수는 크게 나타났으며, 깊이상수는 작게 나타나 다짐에너지에 따른 지반개량효과는 건조조건 지반이 우수하게 발휘되는 것으로 분석되었다. 또한 건조지반조건인 경우 결정계수가 0.672로 일치성이 비교적 좋은 것으로 나타났다.

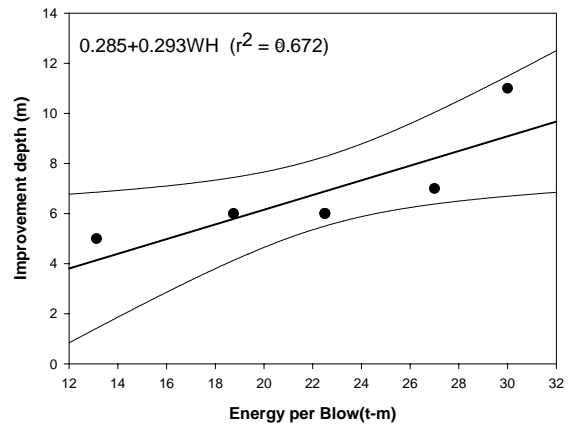


그림 11. 건조한 지반의 깊이/에너지 상수

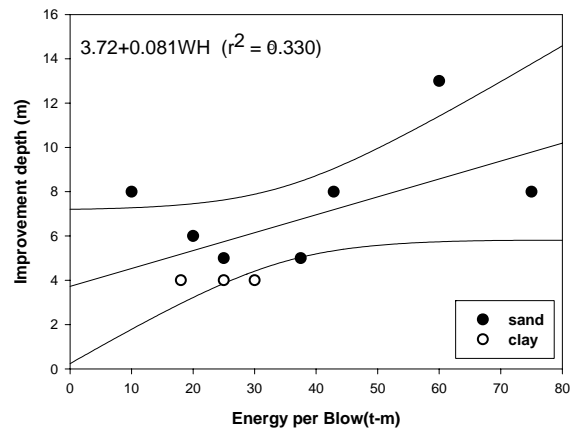


그림 12. 포화된 지반의 깊이/에너지 상수

그림 13은 포화지반의 개량심도와 더불어 포화조건에서도 하부지반조건이 점토인 경우와 사질토인 경우를 같이 나타낸 것으로 같은 포화조건에서도 하부지층이 점토인 경우에는 다짐에너지 증가에 따른 개량심도 증대효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

이는 과잉공급수압 소산이 충분히 이루어지지 않음에 따라 나타난 결과라고 판단된다. 또한 분석에 이용된 자료의 수가 비교적 적기 때문에 일반적인 경향으로 단정하기는 어렵지만, 하부지반조건이 동적다짐효과에 많은 영향을 미칠 수 있다.

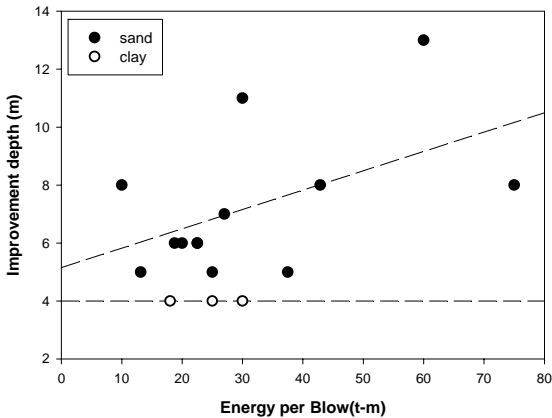


그림 13. 하부지반 강성에 따른 깊이/에너지 상수

상기의 결과를 Luongo의 제안된 식과 비교하여 볼 때 포화시 깊이상수는 4.6~10.1, 에너지상수는 0.012로서 에너지 상수는 국내 지반에서 조사된 결과가 더욱 크며, 깊이 상수는 Luongo의 제안식이 더욱 큰 것으로 분석되었다.

5. 결 론

총 16개소에서 실시된 시험동다짐 결과를 이용하여 다짐

에너지, 지반의 종류, 지하수위 및 하부지층 조건에 따른 개량심도 및 개량효과를 평가하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실험결과 산정된 지반개량심도계수는 모래지반에서는 0.526, 자갈지반에서는 0.607로 비교적 좋은 일치성을 보이지만 분산도가 큰 것으로 분석되었다.
- (2) 동다짐시 개량대상지반 하부층에 따라 지반개량심도가 변화하며, 특히 하부지층이 연약 점토층일 경우 하부층이 다짐에너지를 흡수함에 따라 다짐효과가 충분히 전달되지 못하는 것으로 나타났다.
- (3) 개량대상지반의 투수성 및 지하수위 분포에 따라 지반개량심도계수에 비해 깊이 및 에너지 상수는 비교적 각종조건을 잘 반영할 수 있는 것으로 분석되었으며, Luongo의 제안된 식과 비교하여 볼때 에너지상수는 국내의 지반에서 조사된 결과가 더욱 크며, 깊이상수는 Luongo의 제안식이 더욱 큰 것으로 분석되었다.
- (4) 국내의 경우 주 개량대상층이 되는 표토 및 매립지반의 하부에는 여러종류의 지층이 분포하고 있는 경우가 많기 때문에, 개량대상층 하부조건에 따른 동다짐효과에 대한 지속적인 연구와 자료축적이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2004학년도 충주대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

(접수일자 : 2005년 6월 14일)

참 고 문 헌

1. D. C. Moorhouse & G. L. Baker(1969), Sand Densification by Heavy Vibratory Compactor. ASCE, SM4.
2. D'Appolonia, D. J. and D'Appolonia, E.(1967), Determination of the Maxmum Density of Cohesionless Soil. Proc. 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng. Hafia, Israel, Sept.
3. Lukas, R. G.(1980), Densification of loose deposits bu pounding. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT4, pp. 709~710.
4. Luongo, V. and Yong, R. N.(1992), Dynamic compaction: Predicting depth of improvement. Proc. ASCE Specialty Conference on Grouting, Soil-Improvement and Geosynthetics. pp. 1~13.
5. Mayne, P. W., John, S. Jr, and Jean C. Dumas(1984), Ground Response to Dynamic Compaction. ASCE, Vol. 110, No. 6, pp. 757~771.
6. Menard, L. & Broise(1975), Theoretical and practical aspects of dynamic compaction discussion of dynamic compaction. Geotechnique 25, Vol. 2, N0. 1, pp. 797~800.