

모래지반에서 콘 저항값의 정규화에 관한 연구

Normalization of Cone Resistance in Granular Soil

나 영 목¹ Na, Yung-Mook

Abstract

Sandfill at reclaimed sites is usually formed by more than one placement method. Reclaimed sandfill often shows highly variable profiles and the cone penetration test is most commonly used for site characterization. Correlations between cone resistance and geotechnical parameters for sand are influenced by in-situ stress level and it is important to incorporate stress level effect. In this study, cone penetration tests were performed at several elevations from the top of a 10m high surcharge, which was later removed step by step. In order to establish more reliable correlations between cone resistance and geotechnical parameters for sand, different ways of normalizing cone resistance by the corresponding in-situ vertical stress were investigated.

요 지

모래를 사용해서 매립하는 경우 일반적으로 한 가지 이상의 포설방법으로 매립이 수행된다. 따라서 모래매립지반은 그 특성이 층별로 다양하게 형성되며, 이러한 지반특성을 파악하기 위해서 일반적으로 콘관입시험이 널리 이용되고 있다. 콘저항값은 임의의 깊이에서 현장의 응력수준, 즉 상재하중의 크기에 따라 영향을 많이 받기 때문에 콘저항값을 현장의 응력수준으로 정규화할 필요가 있다. 그러므로 현장응력수준으로 정규화된 콘저항값을 이용하여 신뢰할 수 있는 지반정수와의 상관관계식을 도출하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 응력에 대해 최적으로 정규화된 콘저항값을 이용하여 더욱 합리적인 지반정수를 도출하고자, 싱가포르 창이 동부 매립현장에 위치한 10m 높이의 여성토를 약 2 m씩 단계적으로 제거하며, 각 단계마다 콘관입시험을 실시하였다. 여기서 측정된 콘저항값을 다양한 방법으로 응력 정규화하여 그 값들을 비교함으로써 최적의 정규화 방법을 제안하였다.

Keywords : Cohesionless soil, Cone resistance, Empirical correlation, Stress normalization

1. 서 론

모래를 사용하여 매립하는 경우 그 지반 특성은 포설방법에 따라 많이 달라진다. 사질토 지반에서는 불교란 시료의 채취가 어렵고 비용이 많이 들기 때문에 일반적으로 현장 원위치시험에 의존하게 된다. 이러한 이유로 현장 원위치시험을 통해 모래의 상대밀도, 강도특성 그리고 변형특성을 평가하려는 시도가 빈번히 이루어지고 있으며 현재까지 상당히 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히 다양

한 원위치시험 중에서 콘관입시험은 저비용, 높은 정밀도, 신속성과 연속적인 지반조사결과를 얻을 수 있다는 특징 때문에 현재 국내외에서 많이 사용되고 있다.

콘관입시험은 비배수조건으로 해석이 가능한 점성토에 비해 전단시 마찰(friction) 및 체적팽창(dilation)을 일으키는 사질토 지반에서 이론적 해석방법이 더욱 복잡한 것으로 알려져 있다. 사질토 지반에서 콘관입시험의 해석방법은 1) bearing capacity theories(Janbu & Senneset, 1974; Durgunoglu & Mitchell, 1975)와 2)

¹ 정회원, 현대건설 기술개발원(실계) 부장 (Member, Hyundai Institute of Construction Technology, ymna@hdec.co.kr)

cavity expansion theories(Vesic, 1972)로 크게 나누어 볼 수 있다. 각각의 방법은 여러 학자들에 의해 보완 발전되어 왔지만 현재까지 어느 것도 완벽하게 현장에 적용하지는 못하고 있는 실정이다. 따라서 지금까지 콘관입시험의 결과로부터 지반정수를 추정하는 방법들은 일반적으로 실험실 모형토조에서 실시한 콘관입시험결과를 통해 도출해 낸 경우가 대부분이었다. 실험실 모형토조를 통해 구한 상관관계는 모형토조의 크기에 한계가 있기 때문에 조밀한 사질토의 경우 항상 경계조건의 영향을 받는다는 단점을 내재하고 있다(Schnaid와 Houlsby, 1991). 이러한 단점을 극복하기 위해 현장밀도시험 및 평판재하시험 등의 현장시험을 통해 직접적으로 구한 지반정수와 현장에서 구한 콘관입시험결과 사이에 상관관계를 도출하여, 현장조건을 적절하게 반영한 보다 합리적인 상관관계식을 수립하기 위한 연구가 수행되어졌다(Na 등, 2005).

본 논문에서는 싱가포르 창이 동부 매립현장에서 여러 가지 포설방법으로 형성된 매립지반에서 여성토를 제거하면서 단계적으로 수행된 콘관입시험의 결과를 제시하였다. 여기서 얻은 결과로부터 콘저항값의 응력 정규화(stress normalization)를 다양하게 실시하고 이를 상호 비교하여, 모래지반에서 합리적인 지반정수를 구하는데 가장 적절한 콘저항값의 정규화 방법을 제안하였다.

2. 실험계획과 지반조건

2.1 현장개요

창이 동부 매립공사현장은 세계적으로 유명한 싱가포르 창이 국제공항 동쪽 해안에 위치하고 있다. 싱가포르 정부는 점차 증가하는 승객과 수화물을 수용할 수 있도록 하기 위하여 제 3 활주로 건설을 계획하였으며 그 계획의 일환으로 기존 공항 활주로의 동부지역 해안을 5백만 평 규모로 매립하였다. 창이 동부 매립공사 현장의 평균해수면이 (+)1.6mCD(chart datum)이고, 평균 해저면은 (-)4.0~(-)10.0mCD이며, 두께 10~30m 정도의 연약한 해성점토가 분포하고 있어 구조물이 건설되는 중요한 지역은 연직배수재를 이용한 선행 재하공법을 사용하여 지반을 개량하였다. 인접국가의 근해에서 채취한 모래를 자항식 대형 운반선 혹은 바지선을 이용하여 현장까지 운반하여, 수심이 깊은 곳은 자항식 대형 운반선으로, 수심이 비교적 얇은 곳은 흡수가 작은 바지선으로 각각 하방토출(bottom dumping)하여 매립을 수

행하였다. 이렇게 하여 더 이상 수심이 낮아져 바지선의 접근이 불가능한 경우 매립현장 주변 수심이 깊은 곳에 사토장을 만들어 모래를 가투기하고 그곳에서 펌프준설선으로 모래를 흡입·배송하여 이 지역을 매립하였다.

2.2 시험구간의 특징

시험을 수행한 장소는 싱가포르 창이 동부 매립현장(그림 1)으로, 시험구간은 총 크기가 20m x 40m 이다. 각각의 크기가 4m x 4m 인 작은 구간(Lot) 세 곳에서 다양한 종류의 원위치시험을 실시하였으며, 그림 2에서와 같이 각각의 작은 구간은 Lot 1, Lot 2, Lot 3라고 명명하였다. 이 시험구간은 약 120m x 500m 크기의 여성토 상부 끝단에 위치하고 있다. 시험구간의 매립 전 평균 해저면은 (-)4.0mCD이며, 펌프선을 이용하여 (+)4.0mCD까지 매립하였다. 활주로와 유도로가 건설되는 지역은 압밀침하를 조기에 완료시켜 시공후의 잔류침하를 최소화하고 지반의 강도를 증가시키기 위해 연직배수재를 이용한 선행 재하공법을 사용하였다. Lot 1과 Lot 2는 유도로에 위치하고 있어 연직배수재를 1.2m 간격의 정방향으로 설치하였고, Lot 3은 유도로와 바로 인접한 지역으로 무처리 구

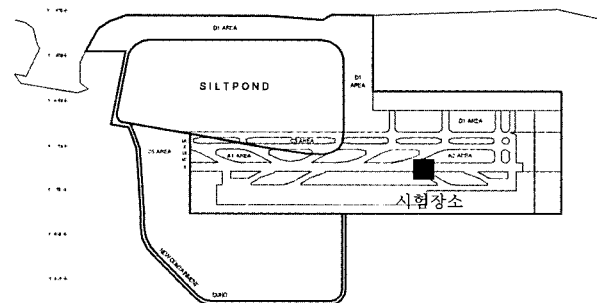


그림 1. 싱가포르 창이 동부 매립현장 및 시험장소 위치도

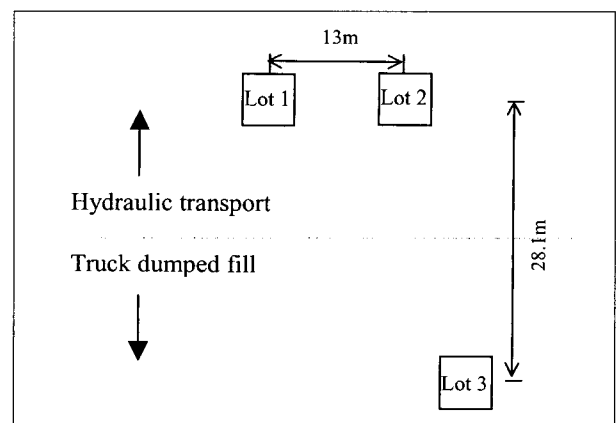


그림 2. 시험구간의 매립조건과 배치도

간이면서 여성을 하는 구간이다. Lot 1과 Lot 2에 PBD (Prefabricated Board Drain)를 타설한 후 펌프준설선을 이용하여 (+)14.0mCD까지 여성을 하였고 Lot 3은 덤프트럭으로 동일한 높이까지 여성을 수행하였다.

2.3 시험절차

현장시험은 그림 3에서 보여주듯이 현장밀도와 선행압 밀응력이 지반정수에 미치는 영향을 조사하기 위해 6단계로 나누어져 실시하였다. 각 단계별 콘관입시험을 수행한 지반고 및 시험회수는 표 1에서 시험절차는 그림 3에서 보여준다. 최초 여성 당시 약 (+)14.0mCD인 여성토의 상단높이가 단계 1의 시험이 수행된 시점인 1998년 1월에서 2월 사이에는 하부 해성점토의 압밀침하로 인하여 약 (+)12.5mCD로 낮아졌다. 일련의 원위치시험을 단계 1에서 수행한 후, 덤프트럭을 이용 약 3~3.5m 높이를 추가로 성토를 하였다. 이러한 추가 여성토는 소요 압밀도를 달성할 때까지 9개월 동안 재하하였다.

매립지반의 현장조건을 파악하기 위하여 광범위한 원위치시험을 단계 1에서 실시하였다. 그림 4는 단계 1에서 수행된 콘관입시험의 배치를 보여주는 것으로, 9개의 콘관입시험을 크기가 4m x 4m인 각각의 Lot 안에

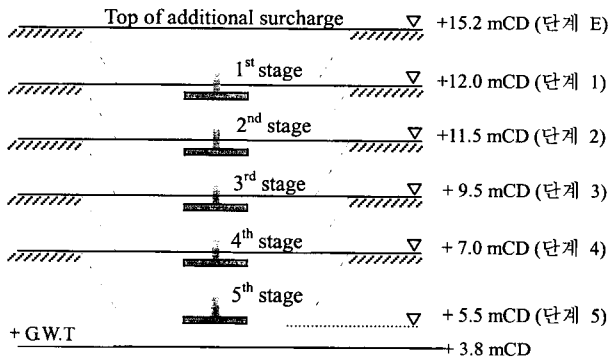


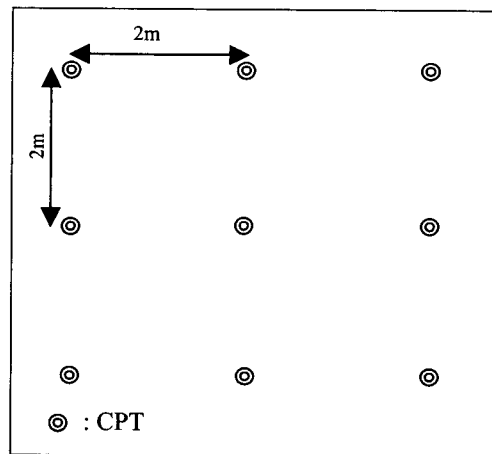
그림 3. 각 단계별 시험고 및 원위치 시험절차

서 2m 간격으로 수행하였다. 각 단계에서 측정된 콘저항값을 현재응력수준으로 정규화할 때 기준자료로 사용하기 위하여 최종 여성고 즉 단계 E에서 여성토를 제거하기 직전, 각 Lot에서 콘관입시험을 2회씩 실시하였다. 여성토를 2~3m씩 단계적으로 제거하면서 매 단계마다(단계 2에서 단계 5) 콘관입시험을 각각의 Lot에서 1회씩 실시하였다. 여섯 단계로 이루어진 시험은 1999년 4월에 모두 완료되었다.

시험절차를 요약하면, 표 1에서 보여 주는 바와 같이 각각의 Lot에서 9개의 콘관입시험을 단계 1에서 최초로 실시되었으며, 그 후 추가 성토를 하여 단계 E에서 두 번째 시험이 실시되었다. 단계 E에서 시험이 끝난 후 여성토를 2~3m씩 단계적으로 제거하면서 단계 2, 단계 3, 단계 4, 그리고 단계 5의 순으로 콘관입시험을 실시하였다.

2.4 지반조건

그림 5는 추가여성토를 제거하기 직전(단계 E)에 Lot 1, 2, 3에서 각각 2회씩 수행한 콘저항값을 보여주고 있



LOT 1

그림 4. Lot 1에서의 콘관입시험 배치도(단계 1)

표 1. 단계별 콘관입시험의 높이와 회수

단계	Lot 1			Lot 2			Lot 3		
	Test	EL	Nos.	Test	EL	Nos.	Test	EL	Nos.
1	CPT	11.70	9	CPT	11.75	9	CPT	12.70	9
E*	CPT	15.20	2	CPT	15.20	2	CPT	15.20	2
2	CPT	11.50	1	CPT	11.50	1	CPT	11.50	1
3	CPT	9.50	1	CPT	9.50	1	CPT	9.50	1
4	CPT	7.30	1	CPT	7.20	1	CPT	7.30	1
5	CPT	6.20	1	CPT	6.00	1	CPT	6.10	1

* : Extra stage

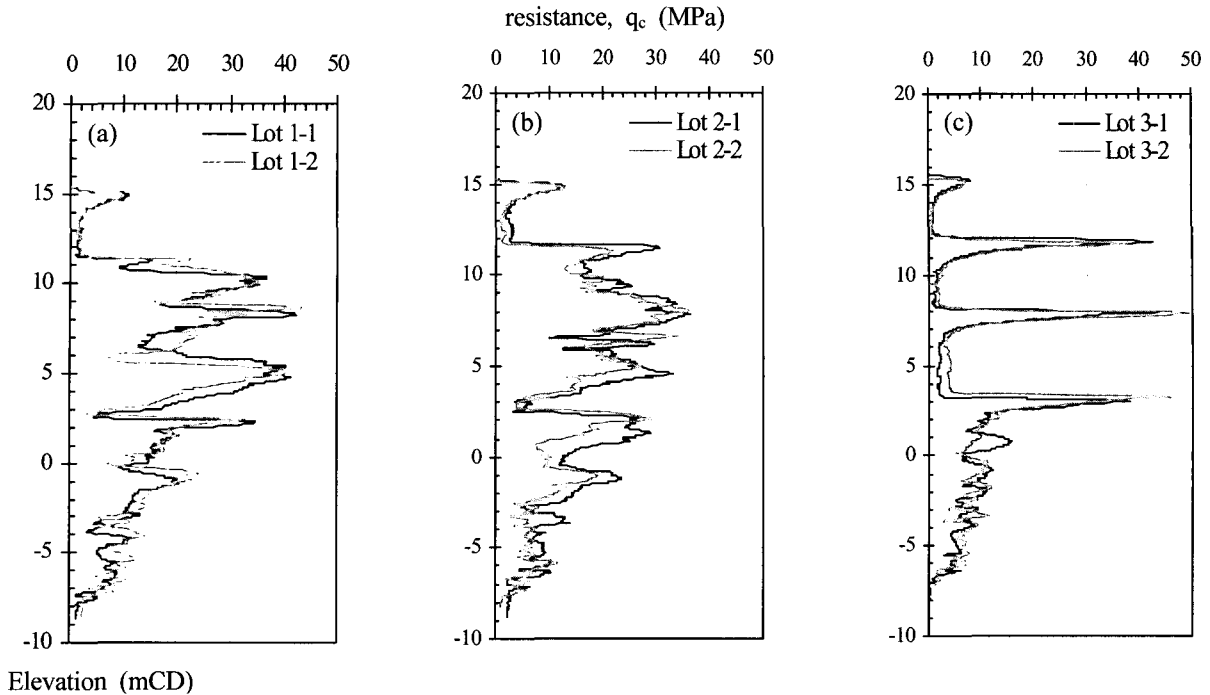


그림 5. Lot 1, Lot 2과 Lot 3에서의 콘저항값 주상도(단계 E)

다. 콘저항값의 주상도(profile)를 살펴보면, 각각의 Lot에서 수행된 2개의 콘저항치는 상당히 일치된 값을 보여주고 있다. 즉 작은 면적을 가진 각 Lot 내에서의 지반조건은 평면적 위치에는 관계없이 거의 동일하다고 가정할 수 있다. 여기에서 (+)12.0mCD 아래 지반은 콘저항값의 최고가 35MPa 이상이며 해수면 위 펌프준설선으로 매립한 구간의 평균값이 대략 25~30MPa인 대단히 조밀한 모래지반임을 보여준다. 추가로 여성한 상부 3m의 모래는 덤프트럭으로 매립하였기 때문에 대단히 느슨한 상태로 존재한다. 콘저항값은 Lot 1과 Lot 2에서와 같이 펌프준설선으로 배사관을 통해 해수면 위에서 매립된 지반에서 상대적으로 크게 나타나며, 반대로 Lot 3과 같이 덤프트럭으로 매립을 한 경우 극히 일부 40MPa의 콘저항값을 보이는 얇은 층을 제외하고는 전반적으로 콘저항값이 2~3MPa 정도로 낮게 나타난다. 여기서 나타나는 매우 큰 콘저항값을 가진 얇은 층은 덤프트럭의 접근로와 일치한다. 매립재는 인접국가의 근해에서 채취한 모래를 사용하였으며, 채취한 모래는 세립분이 거의 없는 중간 이상의 조립한 모래로써 조개껍질을 10% 내외 함유하고 있었다. 본 연구가 수행된 지역에서 사용한 매립재의 물리적 성질을 표 2에 나타내었다.

표 2. 시험구간 매립재의 물리적 특성

Index properties	Mean
Specific gravity	2.66
Natural water content (%)	6.8
Shell content (%)	10.1
Fines content (%)	0.1
D ₆₀ (mm)	0.55
Uniformity coefficient, C _u	3.05
Shape	Subangular

3. 시험결과분석

그림 6, 그림 7, 그림 8은 각각 Lot 1, Lot 2, Lot 3에서 여성토를 제거하면서 수행한 콘관입시험의 결과를 단계별로 상호 비교한 것이다. 여기에서 콘관입시험은 6단계로 거의 일년여에 걸쳐서 수행되었다. 따라서 단계별 콘관입시험의 정확한 높이는 각 단계 동안 발생한 압밀침하를 단계 2를 기준으로 하여 상호 보정하였다.

각 단계별 콘관입시험의 결과를 통해 콘저항값에 영향을 미치는 주요한 인자가 무엇인지 조사하였다. 콘저항값에 영향을 미치는 인자 중 사질토의 경우 지반의 상대밀도와 현장의 응력조건이 중요하다고 알려져 있다. 각각의 원위치 실험은 Lot 크기가 4m x 4m 인 작은 면적에서 수행되었기 때문에 주어진 Lot에서 동일깊이, 임의의 위치에서 지반의 상대밀도는 동일하다고 가정

할 수 있다. 임의의 깊이에 작용하는 현장 연직응력은 각 단계의 상재하중이고 수평응력은 여성토에 의해서 가해진 최대선행압밀응력과 관련이 있다.

3.1 Lot 1

Lot 1은 펌프준설선을 이용한 hydraulic filling으로 매립이 되었다. 그림 6(a)에서 단계 1과 단계 E의 콘저항값을 비교하여 보았다. 높이 +10.0mCD에서 단계 E의

콘저항값은 동일한 높이에서 단계 1의 콘저항값보다 훨씬 크지만 그 아래의 심도에서는 두 단계의 콘저항값이 비슷한 경향을 보여준다. 즉 추가 여성으로 인한 하중의 증가는 얇은 층에서는 콘저항값에 비교적 큰 영향을 미치지만 그 아래의 심도에서는 콘저항값에 그다지 영향을 못 미치는 것을 알 수 있다. 이것은 여성토의 추가재하로 인한 상재하중의 증가는 현장 연직응력이 작은 얇은 층에서 비교적 큰 콘저항값의 변화를 보여 주지만, 현장 연직응력이 큰 그 아래 심도에서는 콘저항값에 거

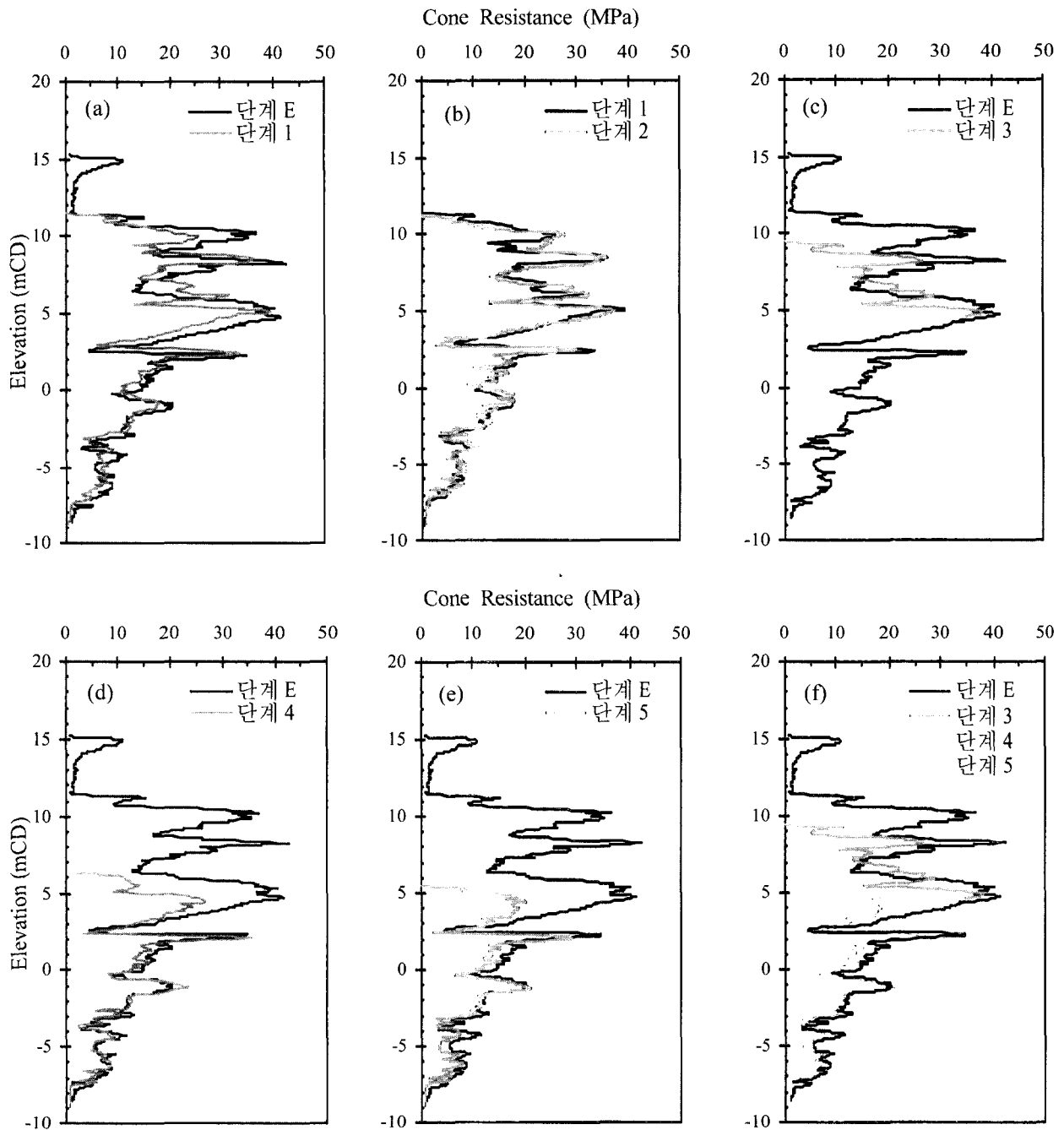


그림 6. Lot 1에서의 각 단계별 콘저항값 비교

의 영향을 미치지 못함을 의미한다.

그림 6(b)는 단계 1과 단계 2의 콘관입시험 결과를 상호 비교한 것으로 압밀을 고려한 시험 당시의 지반고는 각각 +11.7mCD와 +11.5mCD 이었다. 단계 2는 추가 여성토를 +15.2mCD까지 재하 했다가 소요압밀도가 도달된 9개월 후 여성토를 +11.5mCD로 제거하였다. 이 두 단계에서의 콘저항값은 실제적으로 거의 일치한다. 이것은 여성토의 재하 및 제거로 인한 과압밀효과 즉 수평응력의 변화는 콘저항값에 거의 영향을 미치지 못함을 의미한다. 예를 들

면, 여성토 높이 3~4m에 해당하는 70kPa 정도의 추가 여성토의 재하 및 제거로 인한 선형압밀응력 변화는 콘저항값의 변화에 큰 영향을 미치지 못했음을 알 수 있다. 또한 두 시험 간에는 9개월 이상의 방치기간이 존재했음에도 불구하고 콘저항값의 변화가 전혀 없다는 것은 그 기간 동안 aging 효과가 거의 없었다는 것을 보여 준다.

그림 6(c), (d) 그리고 (e)는 단계 E와 단계 3, 단계 4, 단계 5의 콘저항값을 각각 비교한 것이며, 그림 6(f)에서 이들 네 단계의 콘저항값을 한꺼번에 비교하여 보았다.

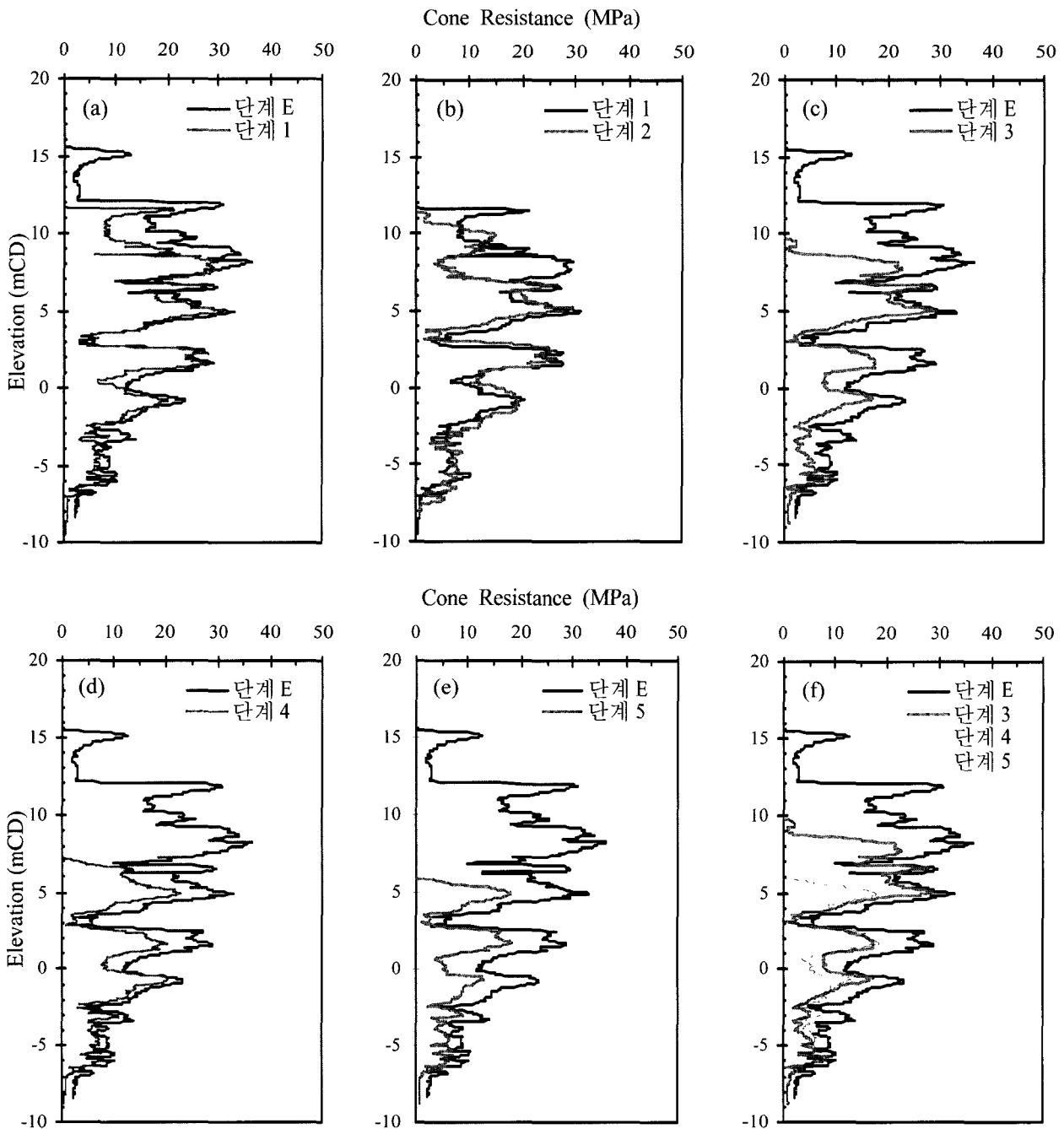


그림 7. Lot 2에서의 각 단계별 콘저항값 비교

단계 3, 단계 4, 단계 5는 추가 여성토를 +15.2mCD까지 재하 했다가 +9.5mCD, +7.0mCD, 그리고 +5.5mCD로 각각 제거한 상태에서 콘관입시험을 수행한 것이다. 이들 단계에서의 콘저항값은 기준이 되는 단계 E에서의 콘저항치보다는 작은 값을 보여주며, 그 차이는 심도가 얇은 곳에서 크고 심도가 깊어질수록 작아짐을 알 수 있다. 특히 그림 6(e)에서 잘 알 수 있듯이, 단계 E의 경우 높이가 +4mCD 부근에서 단계 5의 콘저항값보다 약 2배 이상 큰 반면, +3.0mCD 아래쪽으로는 심도가 깊어질수록 두

콘저항값은 상호 수렴을 하며 매우 유사한 경향을 보여주고 있다. 즉 단계 5의 경우 지표면으로부터 2~3m 이내 깊이에서 현장 연직응력수준은 그다지 크지 않지만, 여성토 재하 및 제거로 인한 선행압밀 효과가 상대적으로 크므로 이 층에서 과압밀비가 크다고 하겠다. 따라서 여성토 제거로 인한 상재하중의 감소가 상대적으로 과압밀비가 큰 상부 얇은 층에서는 콘저항값에 큰 영향을 미치는 반면, 과압밀비가 작은 깊은 층에서는 콘저항값에 그다지 큰 영향을 못 미친다는 것을 의미한다.

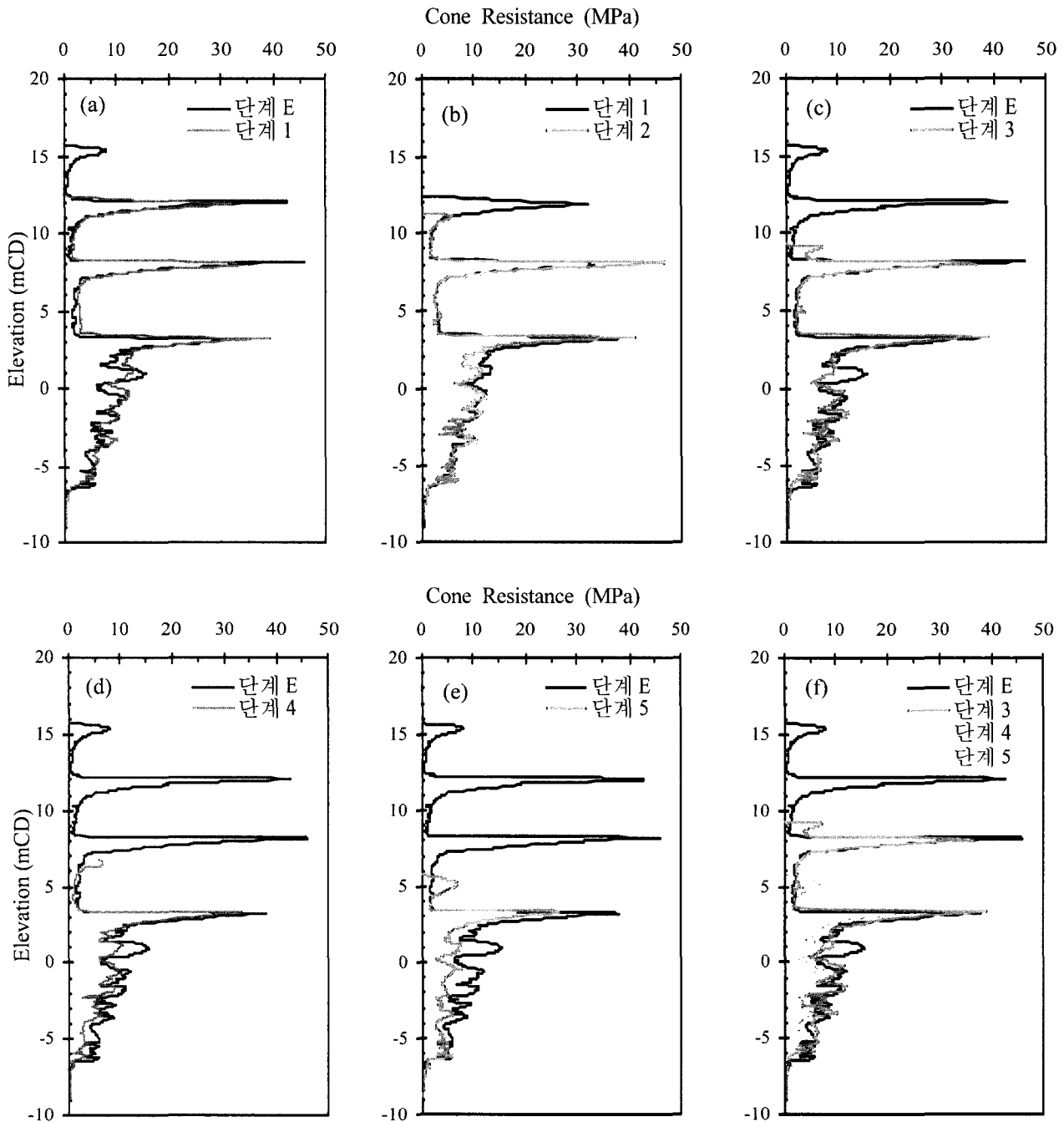


그림 8. Lot 3에서의 각 단계별 콘저항값 비교

3.2 Lot 2

Lot 2는 Lot 1과 동일한 조건으로 매립이 수행되었으며 Lot 1의 보완용으로 계획되었다. 그림 7은 Lot 2에서 실시한 콘관입시험의 결과를 나타내며, 그림 7(a)는 그림 6(a)에서 살펴본 바와 같이 추가 여성토로 인한 하중은 얇은 지반에서 상당한 큰 영향을 미치지만 그 아래 하부지반에 미치지 영향이 매우 작다는 사실을 다시 한번 확인시켜 준다. 즉 여성토를 제거했을 때 상재하중이 작은 상부 3m에서만 콘저항값이 감소하고, 그 아래 지반에서는 콘저항값이 거의 변하지 않았음을 보여준다. 그림 7(b) 역시 지반 교란으로 인한 상부 5m의 낮은 콘저항값을 제외하곤 Lot 1에서의 값과 유사한 결과를 확인할 수 있다.

그림 7(c), 그림 7(d), 그림 7(e)에 나타난 단계 3, 단계 4, 단계 5의 결과 역시 Lot 1에서 확인한 것과 같이 현장 연직응력수준이 작을수록 여성토 제거시 콘저항값의 감소가 크며, 심도가 증가함에 따라 콘저항값의 감소 폭이 적어지는 것으로 나타났다. 단계 3, 단계 4, 단계 5와 단계 E를 중첩하여 나타낸 그림 7(f)을 보면, 동일한 심도에서의 콘저항값은 각 시험 당시 상재하중의 크기에 일반적으로 비례한다는 것을 확인할 수 있다.

3.3 Lot 3

Lot 3은 +4.0 mCD 위의 여성토를 덤프트럭을 이용하여 매립하였기 때문에 매우 느슨한 모래지반으로 이루어져 있다. 그림 8은 Lot 3에서 실시한 콘관입시험의 결과를 나타낸다. Lot 3의 결과는 Lot 1과 Lot 2의 결과와 비교해 볼 때 전체적으로 낮은 콘저항값을 확인할 수 있다. 그러나 현장 연직응력의 크기에 따른 콘저항값의 변화양상은 Lot 1과 Lot 2의 경우와 거의 일치한다. 이 결과로부터 현장 연직응력수준과 콘저항값의 관계는 느슨하거나 조밀한 현장밀도에 모두 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 콘저항값의 응력에 대한 정규화

그림 6, 그림 7, 그림 8에 나타난 결과로부터 콘저항값은 각 시험 단계별 유효 상재 압력에 따라 변한다는 것을 확인할 수 있었다. Jamiolkowski(1995)에 따르면 모래지반의 콘저항값은 모래의 광물학적 구성, 유효응

력수준 그리고 현장 밀도 등에 의해 크게 영향을 받다고 하였다. 콘저항값으로부터 지반정수를 구할 때 현장 상황을 잘 반영한 상관관계를 유도하기 위해서는 현장 유효연직응력을 통한 콘저항값의 정규화가 필요하다. 현장 콘관입시험의 결과에 따르면, 콘저항값은 보통 현장 유효연직응력에 지수적으로 연관되어 있어 정규화 방법 조사시 이러한 점을 고려하였다.

Olsen(1994)은 콘관입저항의 정규화를 위해서는 흙의 종류를 고려해야 한다고 하였다. 또한 Na(2002)는 콘저항값은 현장 밀도의 크기에 따라 많은 영향을 받으며, 특히 D_{60} 이 0.5mm 이상이 되는 모래질 흙에서는 균등계수나 혹은 60% 통과입경의 크기에는 상대적으로 작은 영향을 받는다고 하였다.

그림 9, 그림 10, 그림 11은 각각 Lot 1, Lot 2, Lot 3에서 단계별로 수행된 콘관입시험을 높이에 따라 정규화한 콘저항값을 보여준다. 그림 9(a), 그림 10(a), 그림 11(a)는 각각 콘저항값의 기준분포를 알기위해, 콘저항값을 대기압으로 나누어 정규화 시킨 그래프이다. 그림 9(b), 그림 10(b), 그림 11(b)는 현장 연직응력을 그대로 정규화시킨 콘관입저항값 (q_c/σ_{vo})을 나타낸다. 각 단계에서의 정규화된 콘저항값은 단계 E에서 동일한 방법으로 정규화된 콘저항값의 기준 분포보다 상당히 크게 나타났다. 그림 9(c), 그림 10(c), 그림 11(c)는 콘저항값을 $(q_c/p_a)/(\sigma_{vo}/p_a)^{0.5}$ 로 정규화한 그래프이다. 깊이에 따른 정규화된 콘저항값의 분포도는 단순히 현장응력만으로 정규화시킨 콘저항값보다는 훨씬 양호하지만 여전히 단계 E의 콘저항값보다 큰 값을 나타낸다. 지수 0.5를 이용한 정규화 방법은 지금까지 여러 연구자들(e.g. Parkin, 1988; Bellotti 등, 1989; Mayne, 1995)이 사용한 방법이다.

그림 9(d), 그림 10(d), 그림 11(d)는 각각의 콘저항값을 0.25의 지수를 이용하여 정규화한 그래프이다. 이들 정규화한 그래프를 통해 0.25의 지수를 가지고 콘저항값을 정규화할 때 가장 좋은 결과가 도출됨을 확인할 수 있다. 따라서 모래 매립지의 콘저항값은 식 (1)과 같이 정규화하는 것이 타당하다고 판단된다.

$$Q_n = \frac{(q_c/p_a)}{(\sigma_{vo}/p_a)^{0.25}} \quad (1)$$

여기서, p_a 는 대기압으로 각 항의 단위를 동일하게 하기위해서 0.1MPa 혹은 100kPa 값을 사용한다.

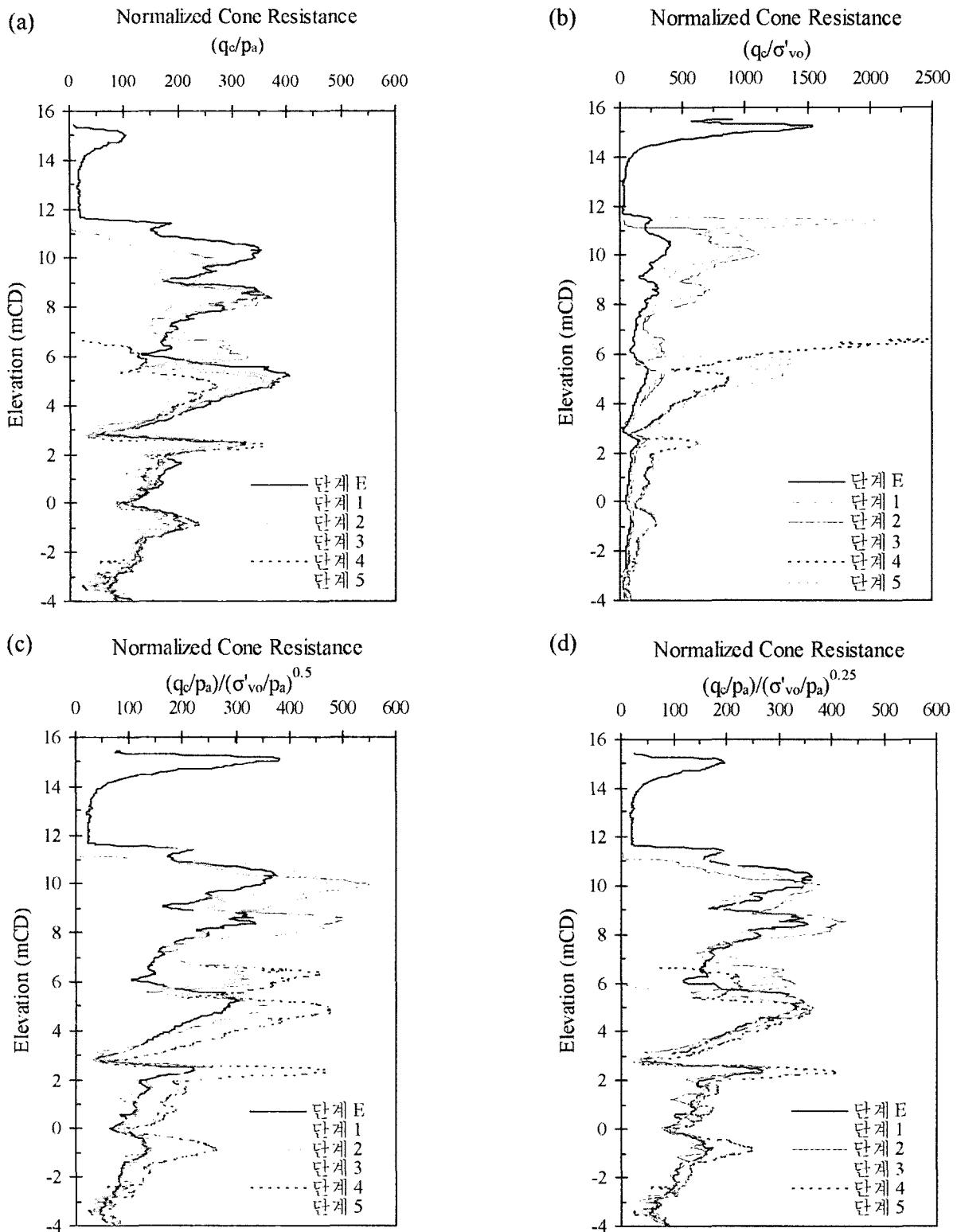


그림 9. Lot 1에서 각종 지수를 이용한 콘저항값의 응력에 대한 정규화

본 연구 결과를 살펴보면 모래 매립지의 콘저항값은 지표면으로부터 상부 3m 이내의 얕은 층에서는 과압밀로 인한(여성토 재하 및 제거로 발생한) 수평유효응력의 변화에 크게 영향을 받지 않는 반면, 상재하중의 변

화로 발생한 현장 연직유효응력의 영향은 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었다. 이와는 반대로 깊은 층에서의 콘저항값은 이러한 수평유효응력 및 현장 연직유효응력의 변화에 어느 정도 영향은 받지만 그 정도는 크지

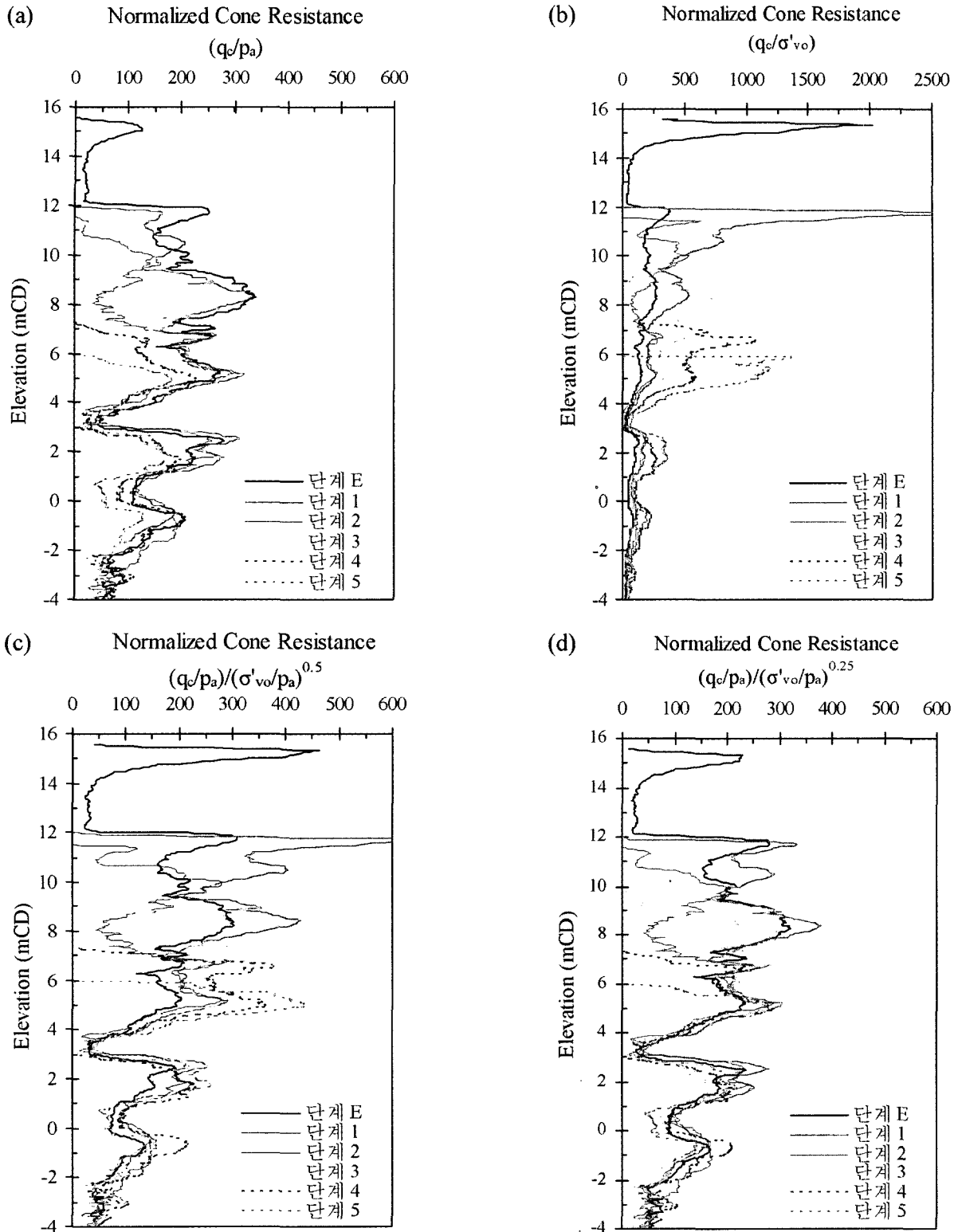


그림 10. Lot 2에서 각종 지수를 이용한 콘저항값의 응력에 대한 정규화

않아서, 0.25의 지수값으로 콘저항값을 응력에 대해 정규화할 때 가장 타당하다고 할 수가 있겠다. 따라서 모래지반에서 콘저항값은 현장밀도의 영향을 보다 크게 받으며, 수평유효응력이나 현장 연직유효응력의 영향은

상대적으로 작다고 하겠다.

콘관입시험의 결과를 이용하여 사질토의 지반정수를 산정하기 위해서는, 현장조건에 적합한 콘저항값의 응력에 대한 정규화를 우선 수행하여야 한다. 정규화된 콘저

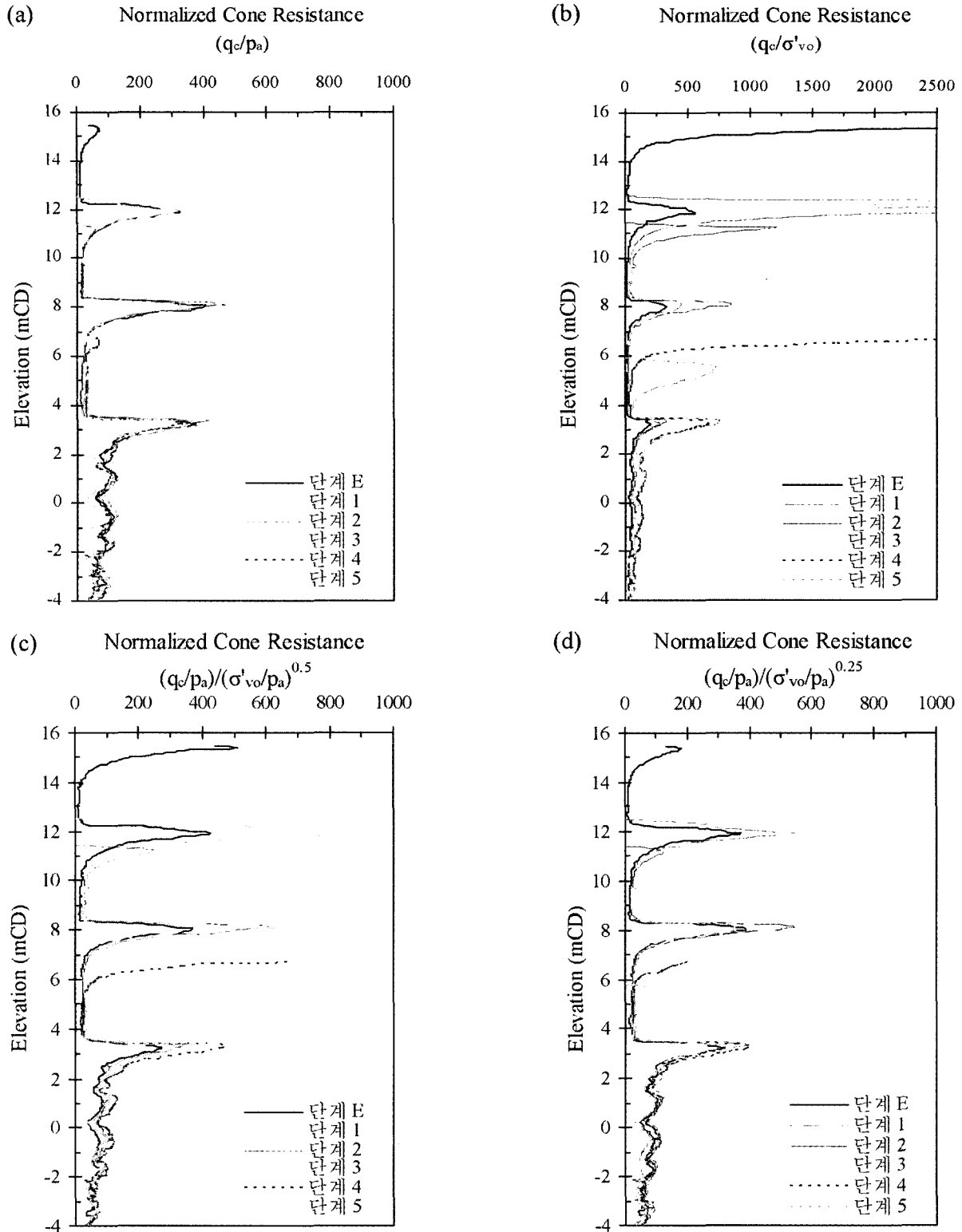


그림 11. Lot 3에서 각종 지수를 이용한 콘저항값의 응력에 대한 정규화

항값은 현장밀도, 자가굴착 공내재하시험 혹은 평판재하시험과 같은 직접적인 방법으로 지반정수를 구할 수 있는 특수 현장시험의 결과와 상호 비교함으로써 보다 신뢰성 있는 상관관계식을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 정규화된 콘저항값과 상대밀도와의 상관관계

정규화된 콘저항값을 동일한 시험위치 및 높이에서 직접 측정된 사질토의 상대밀도와 상호 비교하여 보았

다. 콘저항값은 사질토의 상대밀도와 응력이력의 함수이므로 동일한 응력이력을 갖고 있는 지반에서 정규화된 콘저항값과 상대밀도 사이에는 직접적인 상관관계를 갖고 있다고 할 수 있겠다.

Lot 1, Lot 2와 Lot 3에서 여성토를 +15.0mCD에서 +5mCD까지 제거하면서 0.5m 깊이마다 현장밀도시험을 수행하였고, 동일한 높이에서 시료를 채취하여 최대 및 최소건조단위중량시험 수행하고 상대밀도를 구하였다. 시험지역의 지하수위는 +5mCD 아래에 위치하여 육상에서 이들 시험을 수행하는데 전혀 문제가 없었다. 현장밀도시험은 3가지의 방법 즉 모래치환법(sand replacement method), 고무풍선법(rubber bolloon method), 그리고 방사선 동위원소를 이용한 방법(nuclear density method)으로 수행 하였으며, 각각의 방법으로부터 얻은 결과 값

이 매우 유사하였다(Na, 2002). 따라서 3가지 방법으로부터 구한 상대밀도의 평균값을 사용하여 정규화된 콘저항값과의 상관관계식을 유도하였다.

그림 12는 Lot 1, Lot 2와 Lot 3에서 측정된 상대밀도의 평균값을 정규화된 콘저항값과 비교하였다. 원 안에 표시된 몇 개의 데이터가 편차가 크지만 전체적으로 실측치와 예측치 사이에는 일정한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그림 12에서 편차가 큰 데이터를 제외하면 직접 측정한 상대밀도(D_r)와 정규화된 콘저항값(Q_n) 사이에 아래와 같은 상관관계식을 도출할 수 있다.

$$D_r = 50 \cdot \text{Log}(Q_n) - 50 \quad (2)$$

그림 12 및 13의 원 안에 표시된 자료는 식 (2)로 구한 예측 상대밀도가 현장에서 직접 측정한 상대밀도보다 상대적으로 큰 편차가 있음을 보여 준다. 이것은 시험장소 주변에 여성토를 제거하기 위해 장비 진출입시 매우 느슨한 표토지반이 다짐의 영향을 받은 것으로 판단된다. 그림 13은 각각의 시험장소에서 직접 측정한 상대밀도의 평균값을 식 (2)로 구한 예측 상대밀도와 비교한 결과이다. 이 그림은 모든 시험장소에서 예측된 상대밀도와 측정된 상대밀도가 비교적 잘 일치함을 보여 준다.

콘관입시험의 결과를 이용하여 사질토의 지반정수를 산정하기 위해서는, 현장조건에 적합한 콘저항값의 응력에 대한 정규화를 우선 수행하여야 한다. 정규화된 콘

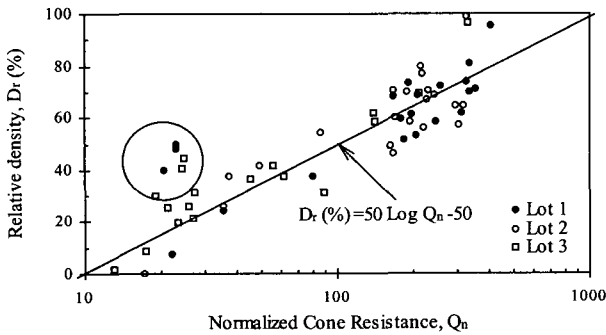


그림 12. 상대밀도와 정규화된 콘저항값과의 관계

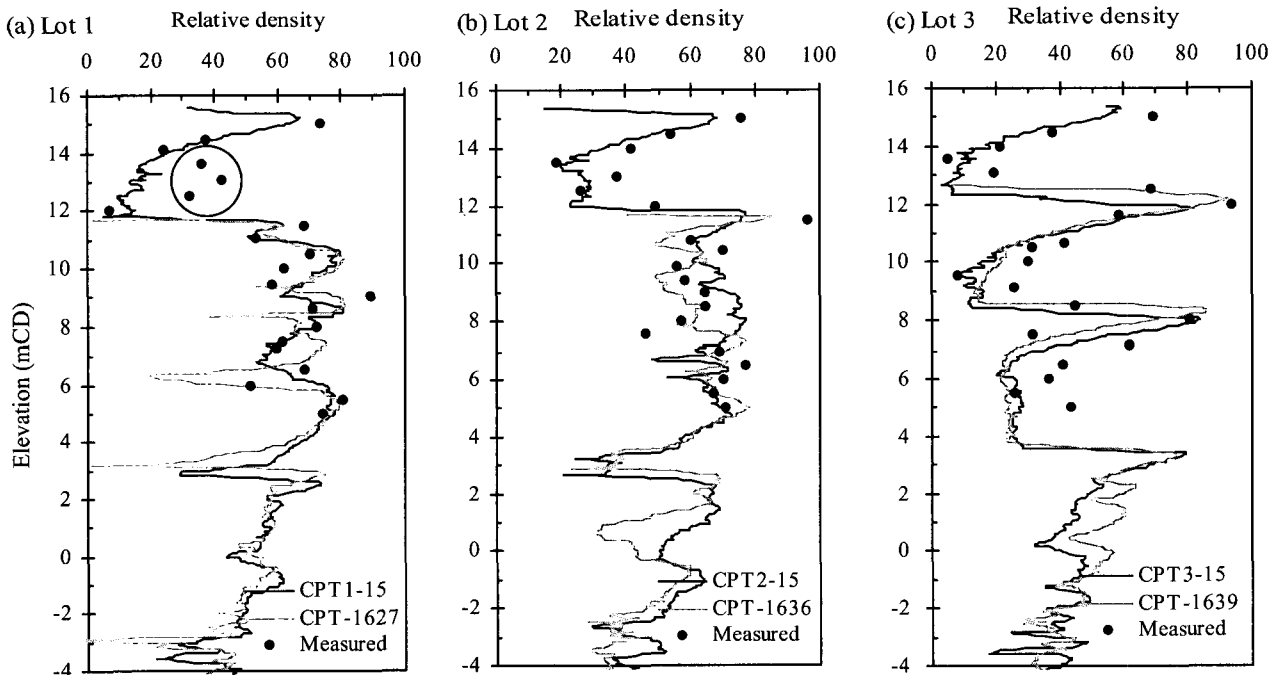


그림 13. 현장에서 직접 측정된 상대밀도와 콘관입시험결과를 이용 식 (2)로 구한 예측 상대밀도의 비교 : (a) Lot 1, (b) Lot 2, (c) Lot 3

저항값은 현장밀도, 자가굴착 공내재하시험 혹은 평판 재하시험과 같은 직접적인 방법으로 지반정수를 구할 수 있는 특수 현장시험의 결과와 상호 비교함으로써 보다 신뢰성 있는 상관관계식을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 사질토의 콘관입시험으로부터 합리적인 지반정수의 값을 도출하고자 대규모 매립현장에서 10m 높이의 여성토를 약 2m씩 단계적으로 제거하며, 각 단계마다 콘관입시험을 실시하여, 측정된 콘관입치를 각 단계별 현장 응력수준에 따라 여러 가지 방법을 통해 정규화하였다. 그 중 유효연직응력에 대해 최적으로 정규화된 콘저항값을 제안하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 여성토 높이 3~4m에 해당하는 70kPa 정도의 추가 여성토의 재하 및 제하로 유발된 선행압밀응력은 콘저항값에 큰 영향을 미치지 못하며, 매립 후 9개월 이상의 방치기간 동안 aging 효과가 거의 없었다.
- (2) 사질토에서의 콘저항값은 선행압밀효과로 인한 수평유효응력의 변화와 상재하중의 변화로 인한 연직유효응력의 영향은 상대적으로 적다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구현장 같은 사질토에서는 0.25의 지수값으로 콘저항값을 유효연직응력에 대해 정규화할 때 가장 타당하다고 판단된다.
- (3) 제안된 정규화 콘저항값을 이용하여 모래지반의 상대밀도 산정을 위한 상관관계식을 도출할 수 있었다.

참고 문헌

1. Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., and Robertson, P. K. (1989), "Design parameters of cohesionless soils from in-situ tests", Proceedings of conference on in-situ testing of soils for Transportation facilities, Transportation Research Board. Washington D.C. USA.
2. Durgunoglu, H. T. and Mitchell, J. K. (1975), "Static penetration resistance of soils: Part II", *Proc. ASCE Specialty Conf. In-Situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, NC, 151-189.
3. Janbu, N. and Senneket, K. (1974), "Effective stress interpretation of in-situ static penetration tests", *European Symp. Penetration Testing*, ESOPT I, Stockholm, Vol.2.2, pp.181-193.
4. Jamiolkowski, M. (1995), "Opening Address", *Int. Symp. Cone Penetration Testing, CPT'95*, Linkping, Vol.3, pp.7-15.
5. Na, Y. M. (2002), "Site characterization of reclaimed sandfill with particular reference to dynamic compaction", Ph.D. Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
6. Na, Y. M., Choa, V., Teh C. I., and Chang, M. F. (2005), "Geotechnical parameters of sandfill from cone penetration test", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42 (in print).
7. Mayne, P. W. (1995), "CPT determination of overconsolidation ratio and lateral stresses in clean quartz sands", *Proceedings of International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95 Sweden*, Vol.2, pp.215-220.
8. Olsen, R. S. (1994), "Normalization and prediction of geotechnical properties using CPT", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, CA.
9. Parkin, A. K. (1988), "The calibration of cone penetrometers", *Penetration Testing 1988 (1)*, Balkema, Rotterdam. pp.221-243.
10. Schnaid, F. and Houlsby, G. T. (1991), "An assessment of chamber size effects in the calibration of in-situ tests", *Geotechnique*, Vol.41, No.3, pp.437-445.
11. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil mass", *J. Soil Mech. and Found., ASCE* 98, No.SM3, 265-290.

(접수일자 2004. 6. 17, 심사완료일 2004. 12. 10)