인천지역 다층지반에 시공된 SCP의 침하거동 분석

The Settlement Behavior Analysis of SCP of Multi-Layered Ground in Incheon

윤원섭[1], Won-Sub Yoon, 김종국[2], Jong-Kook Kim, 박상준[3], Sang-Jun Park,
조철현[4], Chul-Hyun Cho, 채영수[5], Young-Su Chae

[1] 수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
[2] 한국건설품질시험원 지반공학센타 팀장, Chief of Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.
[3] 수원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
[4] 보강 엔지니어링 전무이사, Executive Director, Bokang Engineering.
[5] 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

SYNOPSIS : In this study, SCP method was used by purpose to improve loose sand and soft clay that is drilled Sand Compaction Pile in underground. Settlement behavior of field analyzed through SCP method. When sand Compaction Pile drilled in clay, forming composite ground that foundation and Sand Compaction Pile behavior. According to SCP method can expect bearing capacity improvement, Settlement reduction, lateral flow protection. SCP increase the consolidation settlement of ground and it reduce settlement for that purpose increase liquefaction resistance, lateral Resistance. Because SCP had been widely used for sand. Area of Inchon-A by sand compose clay and silt to upper Ground and compose soft clay to under ground. After pre-loading, it measured settlement by extensometer and settlement extensometer that purpose of ground improvement with 13% in replacement ratio. The result analyzed settlement behavior is similar to Multi-layered Ground that it happened to elastic settlement at upper ground and to consolidation settlement at under ground.

Key words : SCP, settlment behavior, multi-layer

1. 서 론

최근 각종 산업시설 및 주거시설의 부지확보를 위해 서·남해안을 중심으로 해안 및 연안부의 평야에 연약지반개량이 많이 이루어지고 있다. 서·남해안의 경우 대부분의 지반은 연약한 충적토가 퇴적되어 있어 구조물을 지지할 수 있는 지반이 많지 않다. 이러한 지리적인 여건뿐 만 아니라 급격한 경제성장으로 연약지반의 개량공법들이 많은 발전을 거듭하고 있다. 그 중 모래다짐말뚝공법(sand compaction pile, SCP)은 연약지반에 모래를 다지면서 압입하여 지름이 큰 모래말뚝을 지중에 형성시켜 지반을 개량하는 공법으로 지반개량효과가 큰 것으로 확인되었다. 그러나 SCP공법은 최근 모래부족의 영향을 크게 받고 종래 방식에 의한 시공이 갈수록 어려워 설계 및 시공의 합리화가 절실히 요구되고 있다.

SCP공법은 사질토 또는 점토로된 연약지반에서 지반내에 강관을 관입시켜서 관내에 모래를 투입하고 진동 또는 충격에 의해 다진 모래 말뚝을 지반 속에 조성하는 지반개량 공법으로 사질지반에서는 항타

진동에 의한 다짐효과를 얻을 수 있으며 지지력증가, 압축침하저감, 액상화방지, 수평저항의 증가효과가 있고 점성토 지반에서는 지지말뚝으로서의 작용과 배수 드레인 기능, 지지력증가, 압밀시간단축, 압밀침하량 저감의 효과가 있다. 점성토, 유기질토 지반에서는 단기적으로 주변 점토보다 큰 전단강도를 가진 모래다짐말뚝을 촘촘히 조성해서 모래말뚝과 점토로 된 복합지반을 형성하므로써 지반의 지지력을 증가시키고, 장기적으로는 모래말뚝의 배수효과와 모래말뚝의 응력분담에 의해 압밀시간을 단축함과 함께 압밀침하량을 감소시키는 효과가 있다. 이러한 각각의 지반지층에 대한 지반개량효과는 확인이 되었으나 사질토와 점성토가 같이 존재하는 다층지반에서 SCP공법에 의한 지반개량효과의 검증이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 인천지역 연약지반의 상부에는 사질토 지반으로 점성토와 실트가 일부 존재하며 하부에는 연약점토지반이 존재하는 상·하부 지층이 상이한 다층지반이 존재하는 인천 A지역의 치환율 약 13.3%로 지반개량을 목적으로 SCP시공현장에 프리로딩 후 침하판과 층별침하계를 이용하여 계측한 결과 상부층은 탄성침하, 하부층에는 압밀침하가 발생되는 지반개량현장의 침하거동을 분석 검토하였다.

2. SCP공법의 개요

SCP공법은 사질토 또는 점토로 구성된 연약지반에 모래를 압입하여 큰 직경의 다져진 모래말뚝을 조성하는 지반개량공법이다. SCP공법은 동일한 시공기계로 사질지반과 점성토 지반에 적용이 가능하며 시공은 진동식 해머로 케이싱 파이프를 지중에 관입하고 이것을 통해서 모래를 공급하여 다지면서 모래기둥을 조성한다(김명모 등, 2004).

사질토지반에 대한 개량효과는 모래를 진동 또는 충격으로 지반중에 압입함으로서, 모래지반을 한계간극비이하로 다져 지진, 진동시의 유동화를 방지하며 잘 다져진 모래기둥이 지반의 전단강도와 수평저항력을 증대시킨다. 또한 압축침하를 현저하게 저감시키고 다짐에 의한 지반의 균일화를 가진다. 점성토에 대한 개량효과로는 직경이 크고 비교적 잘 다져진 모래말뚝을 점성토 중에 일정한 간격으로 조성한 복합지반의 형성에 의하여 지반전체로써의 전단저항을 증대하여 지지력 증가와 활동파괴를 방지하며 모래기둥의 재하중 응력집중효과에 의하여 압밀침하를 저감한다. 그리고 촘촘한 드레인(drain)효과에 의해서 잔류침하를 조기에 완료시키며 복합지반 기능으로써 부등침하를 줄여준다. 시공 시 압입의 조작으로 샌드드레인에 비하여 3배~4배의 공사비가 보통 사용되어 강성구조물의 기초나 성토일 경우는 침하할 염려가 있는 구조물의 접속부 등에 일반적으로 사용된다.

표 1. 치환율의 범위(김명모 등, 2004)

지반조건	목 적	구조물 형식	치환율
해상점토	안정, 침하	중력식 호안, 방파제	0.3~0.8
육상, 해상 모래	액상화	널말뚝	0.05~0.25
육상점토	안정, 침하	성토	0.1~0.3
육상점토, 모래	안정, 침하, 액상화, k_h	교대, 교각, 배면성토	0.1~0.3
육상점토, 모래	안정, 침하, 액상화, k_h	탱크 건설	0.05~0.3
육상점토, 모래	액상화, 토압, 융기	지하매설물	0.05~0.3

표 1은 개략적인 치환율의 범위이다. SCP공법의 설계요인중 하나인 치환율은 지반 면적과 모래말뚝이 차지하는 부분의 면적비로 정의되며 주로 타설 간격에 의해 결정된다. 성토 등의 상부구조물이 비교적 경량인 경우 치환율은 20%에서 40% 정도인 저치환율의 SCP공법을 많이 사용되며 항만공사 등 말뚝 자체로 지지력, 전단강도 증가효과 등을 발휘해야 하는 경우에는 70% 정도의 고치환율 SCP공법을 많이 사용한다(末松直幹, 1984). 그러나 항만공사에서 주로 사용한 고치환율 SCP공법은 모래 부족현상으로 30%~40%의 치환율로 대치중이다. 저치환율 SCP공법 사용의 문제점으로 고치환율 SCP공법에 비해 모래말뚝 사이 점성토의 압밀에 의한 강도 증가, 모래말뚝과 점성토의 응력분담비 등이 해명되지 않

은 상태이다. 저치환율 SCP공법은 샌드드레인공법과 고치환율 SCP공법의 중간적인 형태라고 할 수 있다. 모래말뚝에 의한 치환율은 그림 1과 같다.

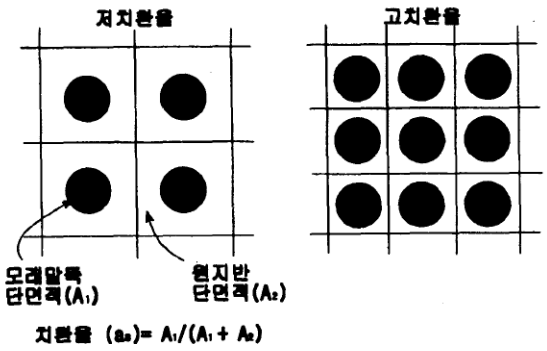


그림 1. 치환율(a_s)

복합지반의 거동 특성에 영향을 미치는 요소로는 치환율, 원지반의 비배수 전단강도, 말뚝 재료의 내부마찰각, 원지반과 모래말뚝 간의 상호작용 등을 들 수 있으며, 특히 이들은 복합지반의 전단강도를 지배하는 요소가 된다(Hughes et al., 1975). SCP공법의 사질토 지반에서 설계의 경우 사질지반의 조밀화로 인한 원지반 강도증가는 명확하지 않지만 점성토에 적용되었을 때에는 점성토와 모래말뚝으로 이루어진 복합지반으로서의 효과를 고려한 이론에 의하여 설명되고 있다. SCP가 연약한 점성토층에 다수 조성되어 이루어진 복합지반 위에 하중이 재하되면, 점성토와 압축조성된 모래말뚝과는 그 물리적, 역학적 성질이 서로 다르기 때문에 각각 분담하는 응력이 다르며, 이는 모래말뚝 쪽으로 응력이 분담하는 원인이 되어 점성토에 걸리는 응력이 대폭 감소하게 되고, 지지력 증대, 침하감소 등의 효과가 나타난다. 복합지반의 기본개념은 그림 2와 같다.

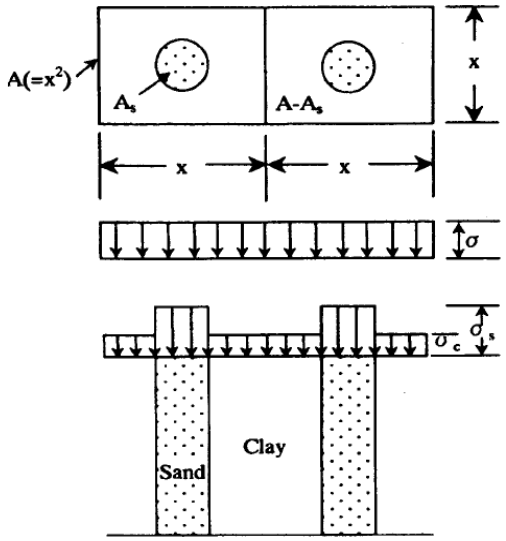


그림 2. 복합지반의 기본 개념도

복합지반의 침하량을 계산하는 방법은 다짐말뚝으로 개량된 지반의 침하저감효과를 예측함에 있어서 단위셀 개념에 근거한 Priebe(1976)이 제안한 식과 Aboshi et al.(1979)이 제안한 평형법, Bergado(1992)가 제안한 체적압축계수법, Chow(1996)이 단위셀 개념을 근거로 한 간편법을 이용한 제안식 등이 사용된다.

SCP공법을 이용한 사질토 개량 시 현장여건에 대한 주된 주의점은 준설매립토와 자연퇴적토에는 밀도분포의 변화가 차이가 많아 평균 N치를 취하는 방법에 주의를 요해야 하며 사질토층에 있어서 실트

이하 점성토의 함유량이 20%이상의 사질토에는 다짐효과가 감쇄되는데 모래다짐말뚝의 강도를 포함한 평균적 지반강도의 평가가 필요하다. 또한 세사층, 점토 심이 존재하는 경우 다짐 시의 과잉간극수압은 급격하게 소멸되지 않으므로 이에 대해 충분한 소산시간을 고려해야 한다.

3. 현장 조건

인천의 기반시설공사와 관련하여 준설 매립층은 동다짐공법에 의하여 다짐관리가 이루어져 왔으며, A지역의 연약지반개량은 동다짐, 유압다짐, SCP공법, CGS공법 등의 다양한 개량공법이 적용되고 있다. 본 연구의 인근지역은 공단 등 이미 상당부분 매립이 이루어진 지역으로 동북쪽에는 청량산(150m)과 문학산(214m)을 중심으로 각각 NS방향과 EW 방향의 산계가 이루어져 있고, 유수는 지하로 매설된 하수관로와 인공하천을 따라 해안으로 유입되며 해양은 조간대 지역으로 조석간만의 차가 8m~9m 내외로 해류가 비교적 빠르게 흐르고 있다.

본 연구지역의 지반지층 분포는 2구역으로 나뉘며 지반조사 위치 및 지층단면도는 그림 3, 그림 4와 같다. 그림 3, 그림 4는 대상지역의 지반조사위치도와 지층단면도이며 기존 설계 시 실시된 지반조사와 개량효과를 확인을 위한 확인조사로 구분하였다. 표 2는 대상지역의 지층심도이다. 매립층의 깊이는 5.2m~8.2m의 범위로 평균 6.3m이며, 퇴적층은 14.3m~17.8m의 범위로 평균 16m를 나타냈다.

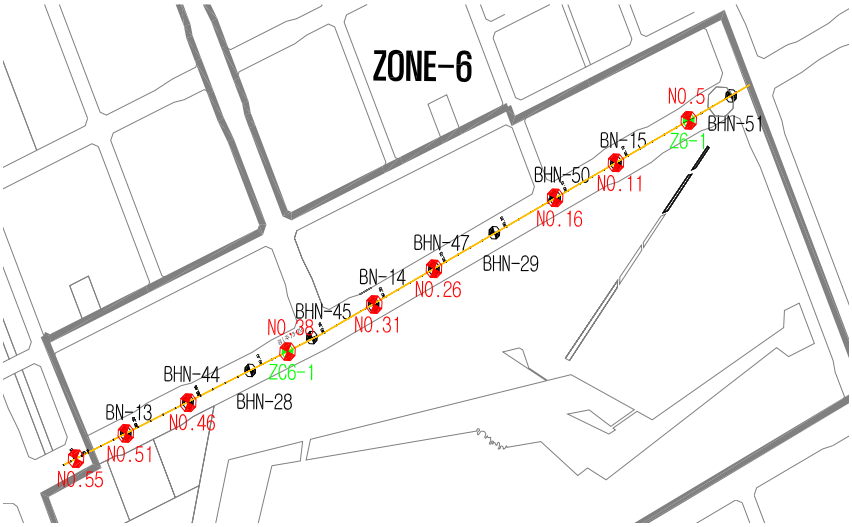


그림 3. 지반조사 위치도

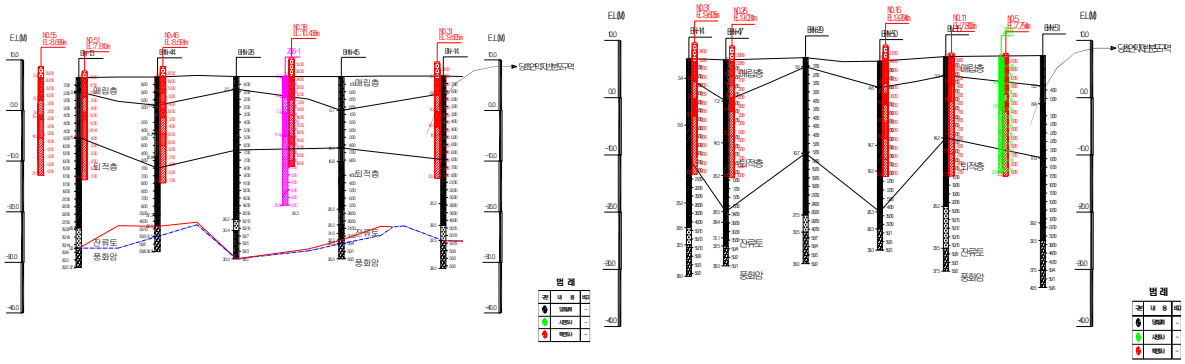


그림 4. 지층단면도

표 2. 대상지역의 지층심도

구분	매립층	퇴적층		심도 (m)
	사질토	점성토	사질토	
시추위치별 지반 지층의 깊이(m)	7.2	12.4	1.9	21.5
	5.4	16.1	-	21.5
	6.7	14.3	2.0	23
	5.3	15.3	2.4	23
	6.6	13.3	3.1	23
	8.2	14.1	0.2	22.5
	5.2	16.1	1.7	23
	5.2	14.7	1.6	21.5
	6.7	14.0	0.8	21.5
평균	6.28	14.48	1.52	22.28

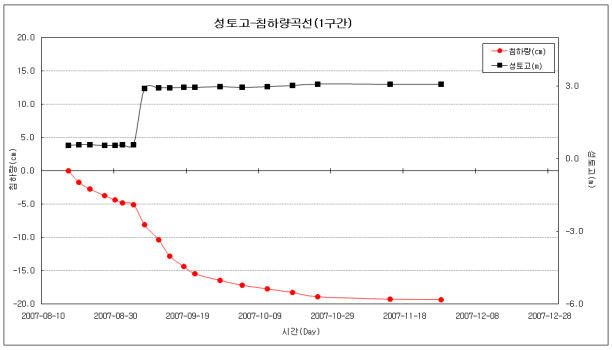
대상지역은 현재 연약지반에 SCP공법에 의해 개량이 되어있으며 성토에 의한 연약지반의 개량이 진행 중에 있다. 성토층은 잡석소량 혼재된 실트질모래이고, 매립층은 실트질모래로 느슨 내지 보통조밀한 상대밀도로 존재한다. 퇴적층은 실트질점토 및 실트섞인점토로 매우연약 내지 보통견고한 연경도의 점성토와 실트질모래로 느슨한 상대밀도의 사질토가 존재하고 있다. 따라서 본 연구지역에서는 상부에는 매립층의 사질토 지반이 형성되어 있으며 하부에는 사질토 지반이 일부 존재하지만 대부분이 점성토 지반으로 형성되어 있어 상부하중의 재하에 따른 지반의 침하양상은 상부는 사질토에 의한 탄성침하가 발생될 것으로 판단되며 하부는 점성토 지반으로 압밀침하가 발생될 것으로 판단되었다.

SCP공법으로 연약지반을 개량한 연구지역의 확인조사와 기존조사에 의한 비교 결과 표준관입시험결과 확인조사의 N치는 0.0m~5.0m 구간에서 기존설계 시 0/30~22/30에서 3/30 ~30/30으로 증가하였으며 5.0m 이하에서는 0/30~14/30에서 2/30~18/30으로 증가하였다. 실내시험결과 지반정수 증감 등의 변화를 통해 지반개량정도를 확인하였으며 비배수전단강도는 기존설계 시 비배수전단강도는 0.60t/㎡~6.90t/㎡에서 압밀방치 후에는 2.97t/㎡~7.26t/㎡으로 증가하였다. 압밀시험결과 압밀계수는 기존설계 시 6.6×10^{-3}㎠/sec에서 2.37×10^{-3}~7.20×10^{-3}㎠/sec으로 감소되어나 증가되었다.

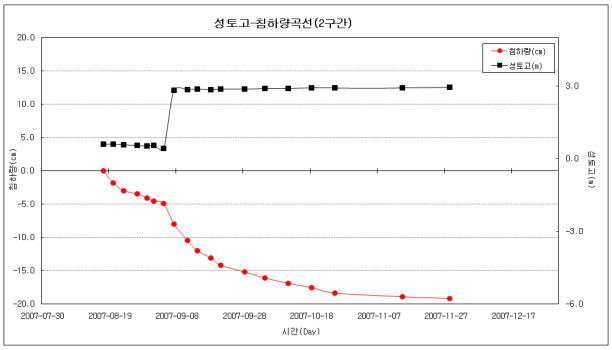
4. 인천지역 다층지반의 현장 계측결과 분석

연구지역의 연약지반 개량 효과를 확인하기 위해 지표침하계와 층별침하계, 간극수압계 등을 설치하였다. 또한 장래침하량을 예측하기 위해 Hypobolic법 및 Asaoka법, Hoshino법에 의해 최종침하량을 산정하여 계측에 의한 실측침하량과 비교하여 최종허용침하량을 산정하였다. 층별침하계는 각 층의 침하량을 계측하기 위해 3개의 침하계를 나누어 측정을 하였다.

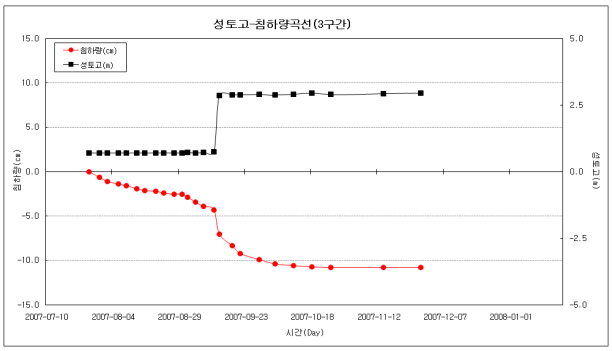
지표침하계 계측 결과는 그림 5와 같다. 계측결과 1구간에서는 최종침하량이 19.4cm, 2구간은 19.2cm, 3구간은 10.8cm, 4구간은 22.1cm로 계측되었다. 그림 6의 층별침하계 계측결과 1구간은 층별 최종침하량이 심도 0.8m에서는 8.8cm, 8.8m에서 6.2cm, 14.8m에서는 3.5cm였으며, 2구간은 심도 0.8m에서 8.9cm, 8.8m에서 5.2cm, 14.8m에서는 2.5cm, 3구간은 심도 0.8m에서 5.3cm, 2.2m에서 3.6cm, 6.7m에서 1.8cm, 4구간은 심도 1.7m에서 8.1cm, 5.3m에서 5.8cm, 10.3m에서는 3.1cm로 계측되었다. 층별침하계는 매립층의 심도가 평균 6.3m로 보아 첫 번째 층별침하계는 상부에 설치가 되어 매립층의 침하양상을 보였다. 3구간의 경우 상부 침하계는 성토와 동시에 대부분의 침하가 발생되어 최종침하량의 수렴 속도가 빠르게 나타났고, 나머지 3개 구간의 침하계의 침하는 발생이 서서히 진행되어 수렴의 속도가 느린 것으로 판단되었다. 그림 7은 4개 구간의 성토에 따른 지반의 간극수압곡선이다. 저치환 SCP공법의 연약지반 개량으로 성토와 동시에 간극수압이 크게 발생되지만 간극수압 소산이 빠르게 진행되었다. 초기 성토 시에는 간극수압의 변화가 없지만 2차 성토에서는 간극수압이 발생되어 소산되었다.



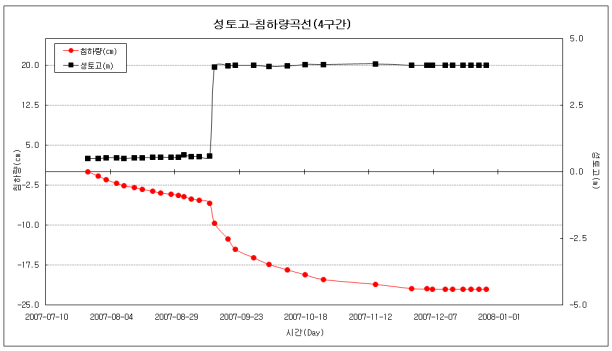
(a) 1구간 계측결과



(b) 2구간 계측결과

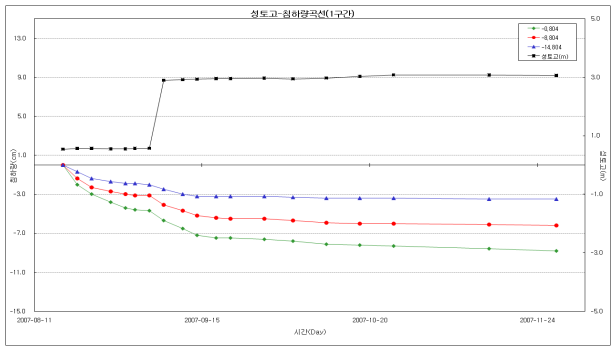


(c) 3구간 계측결과

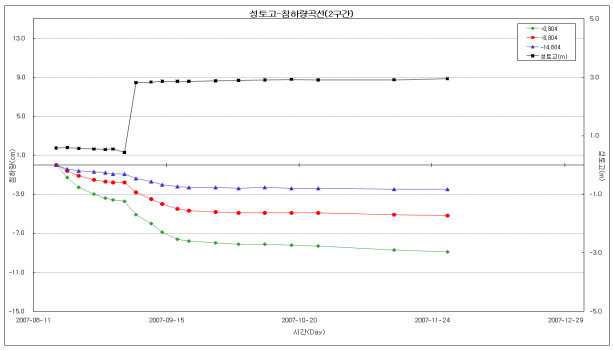


(d) 4구간 계측결과

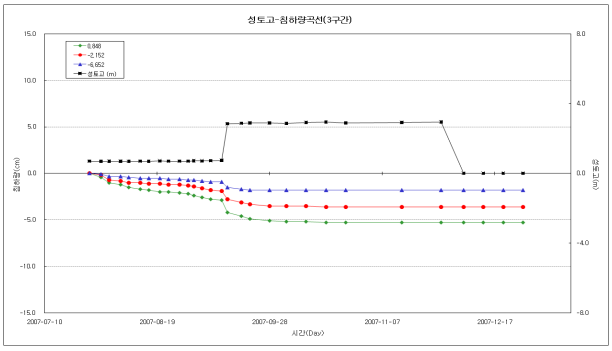
그림 5. 지표침하계 계측결과



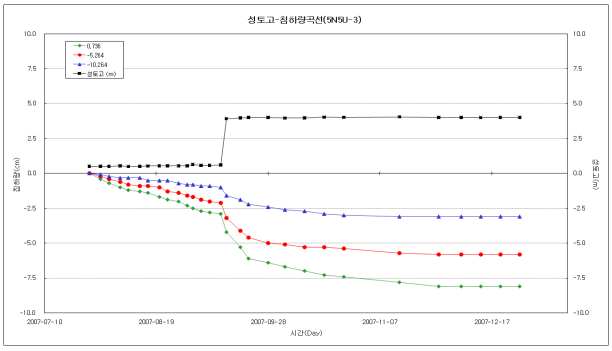
(a) 1구간 계측결과



(b) 2구간 계측결과

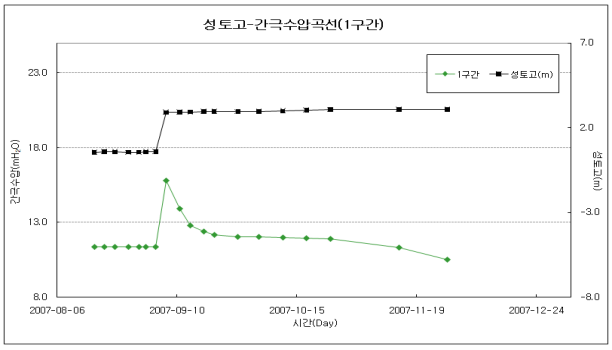


(c) 3구간 계측결과

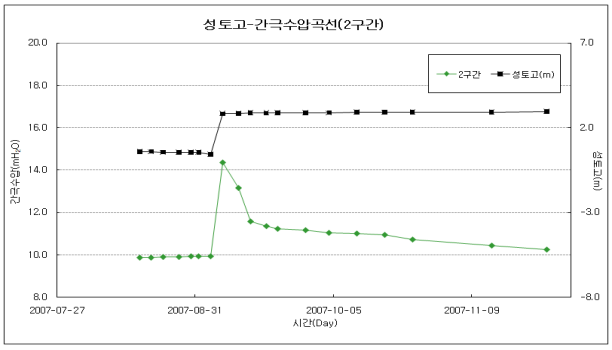


(d) 4구간 계측결과

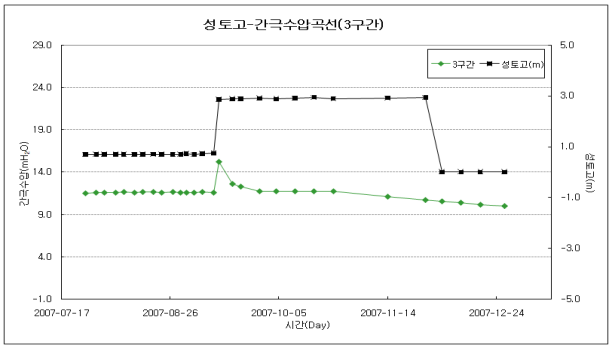
그림 6. 층별침하계 계측결과



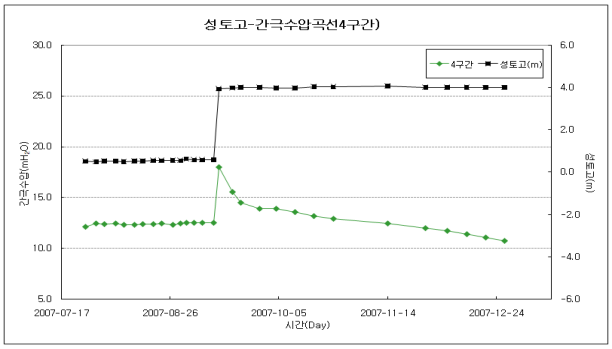
(a) 1구간 계측결과



(b) 2구간 계측결과



(c) 3구간 계측결과



(d) 4구간 계측결과

그림 7. 간극수압 계측결과

표 3. 각 구역의 침하량

구 분		압밀도 (%)	초기 침하량 (cm)	실측 침하량 (cm)	최종 침하량 (cm)	잔류 침하량 (cm)	압밀기간 (일)	비 고
1구간	Hyperbolic법	93.72	10.4	19.4	20.7	1.3	78일	
	Hoshino법	90.23			21.5	2.1		
	Asaoka법	99.49			19.5	0.1		
	평균	94.48			20.6	1.2		
2구간	Hyperbolic법	88.48	10.5	19.2	21.7	2.5	78일	
	Hoshino법	92.75			20.7	1.5		
	Asaoka법	98.46			19.5	0.3		
	평균	93.23			20.6	1.4		
3구간	Hyperbolic법	97.30	7.0	10.8	11.1	0.3	76일	
	Hoshino법	95.58			11.3	0.5		
	Asaoka법	100.00			10.7	0.0		
	평균	97.63			11.0	0.3		
4구간	Hyperbolic법	98.22	9.7	22.1	22.5	0.4	105일	
	Hoshino법	98.22			22.5	0.4		
	Asaoka법	93.64			23.6	1.5		
	평균	96.69			22.9	0.8		

Hypobolic법 및 Asaoka법, Hoshino법에 의한 최종침하량과 실측침하량, 초기침하량, 개량기간, 압밀도는 표 3과 같다. 1구역에서 4구역의 압밀도는 모두 90%이상을 보였고, 압밀기간은 1구역과 2구역은 78일 3구역은 76일, 4구역은 105일이었다. 최종침하량 계산결과 1구역은 평균 20.6cm로 실측침하량 19.4cm로 잔류침하량이 1.2cm로 계산되었으며, 2구역 최종침하량이 평균 20.6cm로 실측침하량

19.2cm로 잔류침하량이 1.4cm로 계산되었다. 3구간은 최종침하량이 11.0cm로 실측침하량 10.8cm로 계측되어 잔류침하량이 0.3cm였으며, 4구간은 최종침하량 22.9cm, 실측침하량 22.1cm로 잔류침하량 0.8cm로 계산되었다.

본 연구에서는 SCP공법으로 연약지반을 개량한 인천 A지역의 사질토와 점성토가 혼재한 다층지반에서의 현장 계측결과를 종합하면 성토 완료 후 지표침하판 계측결과 전체적으로 소요압밀도(90%) 및 허용 잔류침하량(10cm)을 만족하였다. 층별침하계 계측결과 성토완료 후 즉시 수렴하였다. Hypobolic법 및 Asaoka 법, Hoshino법에 의한 압밀도 추정결과 전체적으로 소요압밀도(90%) 및 허용 잔류침하량(10cm) 기준을 만족하였다. 간극수압계 계측결과 성토 종료 후 압밀진행에 따른 과잉간극수압 소산 압밀도는 대부분 소요압밀도(90%)에 근접하였다. 확인조사 및 계측결과를 종합적으로 살펴볼 때 전반적으로 지반 강도와 압밀도는 개량효과가 확인되었다. 또한 층별침하계의 상부구간의 침하량을 확인한 결과 3구간을 제외한 1구간, 2구간, 4구간은 성토에 따른 침하량이 침하기간은 3구간에 비해 크지만 대체적으로 직선적인 거동을 보였으며, 3구간은 초기 성토에서는 침하량이 서서히 진행된 후 2차 성토에 따른 침하량이 급속히 발생되는 즉시침하 양상을 보였다. 이는 상부구간의 계측은 매립층 구간에서만 이루어져 즉시침하가 발생된 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 사질토와 점성토가 혼재한 다층지반이 존재하는 인천 A지역의 SCP공법으로 연약지반을 개량한 현장에서 지표침하계 및 층별침하계, 간극수압계 등의 현장 계측결과와 압밀침하량을 계산하여 다층지반에 설치된 SCP공법의 거동을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. SCP공법으로 개량된 지역의 개량확인을 위한 지반조사결과 표준관입시험 N치는 증가하였고 비배수전단강도는 0.60t/㎡~6.90t/㎡에서 압밀방치 후에는 2.97t/㎡~7.26t/㎡으로 증가하였으며 압밀계수는 6.6×10^{-3}㎠/sec에서 2.37×10^{-3}~7.20×10^{-3}㎠/sec으로 감소되어나 증가되었다.
2. Hypobolic법 및 Asaoka법, Hoshino법에 의해 최종침하량을 산정한 결과 1구간과 2구간은 최종침하량이 평균 20.6cm로 나타났으며, 3구간은 11.0cm, 4구간은 22.9cm로 계산되어 현장 계측결과와 유사하였다.
3. 현장 지표침하계를 통한 실측침하량 계측결과 1구간은 19.4cm로 최종침하량과 비교하여 잔류침하량이 1.2cm였으며, 2구간은 실측침하량 19.2cm로 잔류침하량 1.4cm, 3구간은 실측침하량 10.8cm로 잔류침하량 0.3cm, 4구간은 실측침하량 22.1cm로 잔류침하량 0.8cm로 계측되어 허용잔류침하량을 만족하였다.
4. 층별침하계의 상부구간의 계측결과 3구간을 제외한 1구간, 2구간, 4구간은 성토에 따른 침하량이 침하기간에 대비하여 대체적으로 직선적인 거동을 보였으며, 3구간은 초기 성토에서는 침하량이 서서히 진행된 후 2차 성토에 따른 침하량이 급속히 발생되는 즉시침하를 보여 매립층 구간인 상부구간의 침하는 즉시침하가 발생되었다.
5. 다층지반에 시공된 SCP공법에 의한 연약지반의 개량효과는 확인조사 및 계측결과 압밀도 90%이상의 개량효과가 좋은 것으로 판단되며 향후 수치해석과 실험에 따른 다층지반의 개량효과를 재검증할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김명모, 김병일, 이승원, 조성민, (2004), “지반개량공법 설계”.
2. 末松直幹, 坪井英夫, (1984), “複合地盤の應力分擔比に關する考察, 複合地盤の强度および變形に關するシン ポジユウム 發表論文集”, 日本土質工學會, pp.165 ~ 170.
3. Aboshi, H., Ichinoto, E., Enoki, M., Harada, K., (1979), "The Compozer-A Method to Improve Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Large Diameter Sand Columns", Proceeding International

Conference on Soil Reinforcement : Reinforced Earth and Other Technique, Paris, 1, pp.211~216.
4. Bergado, D.T., (1992), "Ground Improvement Using Granular Piles", Geotech 92, Appl. Ground Improvement Technical of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment, Chapter 3, pp.57~96.
5. Chow, Y.K., (1996), "Settlement Analysis of Sand Compaction Pile", Soils and Foundations, 36(1), pp.111~113.
6. Hughes, J.M.O., Withers, N.J., Greenwood, D.A., (1975), "A Field Trial of Reinforcing Effects of Stone Column in Soil", Geotechnique, 125(1), pp.31~44.
7. Priebe, H., (1976), "Estimation Settlements in a Gravel Column Consolidation Soil", Die Bautechnik, German, 53, pp.160~162.