

# 부산신항 1-1단계 SCP 개량지반 압밀특성

정종범\* · 양상용\* · 변기준\*

\*삼성물산(주) 건설부문

## Consolidation Behavior of SCP Improved Ground at Pusan New Port Part 1-1

JONG-BUM JUNG\*, SANG-YONG YANG\* AND JUN-GI BYUN\*

\*Samsung corporation Co. Ltd., Korea

**KEY WORDS:** Sand Compaction File 샌드컴팩션 파일, Composite Ground 복합지반, Consolidation Velocity 압밀속도, Consolidation Settlement 압밀침하량,

**ABSTRACT:** The sand compaction pile (SCP) method, which forms a composite ground by driving sand piles into clay deposit, is the most commonly used soil improvement techniques in many countries for more than 30 years. Installation of sand compaction piles reduces the amount of consolidation settlement and increases the bearing capacity of soft clay deposit. In this paper, field survey conducted to investigated the consolidation behavior of the composite ground improved by SCPs. It is suggested that the measured consolidation velocity is later than design theory, however measured consolidation settlement is higher than design theory.

### 1. 서 론

SCP공법은 진동 또는 충격하중을 이용하여 연약점토지반중에 일정한 간격으로 모래 말뚝을 타설함으로써 연약 점토지반과 모래말뚝이 일체를 이루도록 하는 즉 복합지반을 형성하는 공법으로, 연약지반 개량공사에 일반적으로 사용되는 대표적인 지반개량공법 중의 하나이다.

특히, 해성점성토 지반에 적용할 경우에는 원지반과 다져진 모래말뚝으로 이루어진 복합지반을 형성함으로써 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위 억제, 압밀침하 저감 등의 효과를 목적으로 하고 있다. 이 공법은 1956년 Oka에 의해서 특허를 받은 이후 주로 일본에서 개발되어온 공법이다. SCP공법은 1957년과 1960년에 Murayama와 Tanimoto의 연구결과에 의한 자료에 기초하고 1957년에 항타 방법이 발전되었다(1957년 일본건설부). 이 공법은 1960년(Ogawa, Ichimoto 1963 : Ibragi 1965)이래로 연약지반에서 더욱더 많이 개선되었다. 다른 지반개량공법과 비교하여 지반개량기간이 짧고 동시에 지반강도가 크게 개선되기 때문에 1970년대 이래로 일본에서 해상이나 육상 구조물에 많이 적용되고 있다. 우리나라에서는 1984년 광양제철소 기초지반 조성시 모래다짐말뚝과 샌드드레인을 병용한 지반개량공법이 육상에서 처음 채택되었으며 해상에서는 1998년 부산신항만 개발사업에 본격적으로 채택되고 있는 공법이다.

### 2. 점성토 지반의 SCP 설계방법

#### 2.1 SCP 설계방법 개요

SCP 공법에 의해 기대되는 지반개량 효과는 개량지반의 지지력증대 효과와 침하저감 효과로 크게 두가지로 나눌 수가 있다. 특히, 부산신항과 같은 연약한 해성점성토 지반상에 해안구조물을 축조할 경우 기초지반 개량공법으로서 SCP공법을 적용함으로써 구조물 지지하고 압밀침하를 억제하는 효과를 단시간에 얻을 수 있다. 즉 모래말뚝과 점토로 구성된 복합지반을 형성하여 지반의 지지력을 증가시키고 압밀시간을 단축하는 동시에 압밀침하량을 감소시킨다.

#### 2.1 SCP 개량지반의 설계방법

복합지반은 Fig.1과 같이 복합지반 위에 평균응력  $\sigma$ 가 재하되면 연직방향의 힘의 평형방정식으로부터 응력분담비 ( $m = \sigma_s / \sigma_c$ )와 치환율( $a_s = A_s / A_c$ )을 파라메트로 한 모래말뚝응력  $\sigma_s$ , 점성토 지반의 응력  $\sigma_c$ 이 계산된다.  $A_s, A_c$ 는 각각 모래말뚝의 단면적과 점성토 지반의 단면적을 나타낸다.

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \tag{1}$$

$$\sigma A = m \sigma_s A_s + \sigma_c A_c = \sigma_c (m A_s + A_c) \tag{2}$$

제1저자 정종범 연락처: 경상남도 진해시 안골동 75 삼성물산  
055-552-9871 jongbum12.jung@samsung.com

$$\sigma_c = \frac{1}{(m-1)a_s + 1} \cdot \sigma = \mu_c \cdot \sigma \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{m}{(m-1)a_s + 1} \cdot \sigma = \mu_s \cdot \sigma \quad (4)$$

여기서,  $\mu_c$ 는 응력저감계수이고  $\mu_s$ 는 응력집중계수이다. 따라서 이를 치환율과 조합하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\mu_s \cdot a_s + \mu_c(1 - a_s) = 1 \quad (5)$$

위의 식을 기본으로 SCP 개량지반에 대한 안정해석이나 침하해석이 이루어진다. SCP 개량지반에 대한 침하해석은 다음과 같은 방법으로 이루어진다. SCP 개량지반에 대한 침하량( $S$ )은 무처리되었다고 가정한 침하량( $S_0$ )에 침하저감계수( $\beta$ )를 곱하여 구한다. 침하저감계수( $\beta$ )는 처치환개량에서는 응력집중효과, 고치환개량인 경우에는 치환효과를 고려해서 다음 식과 같이 나타낸다.

저치환인 경우  $\beta = \mu_c = 1 / (1 + (m-1)a_s)$ , ( $a_s \leq 50\%$ )

고치환인 경우  $\beta = 1 - a_s$ , ( $a_s \geq 50\%$ )

일반적으로 SCP 개량지반에 사용되는 응력분담비는 치환율이 70%인 경우에는 1를 적용하며, 치환율이 40%~70%인 경우에는 2, 치환율이 40% 이하인 경우에는 3를 적용한다. 한편 압밀침하속도는 일반적인 Vertical Drain공법에서 적용하는 방법과 동일하다.

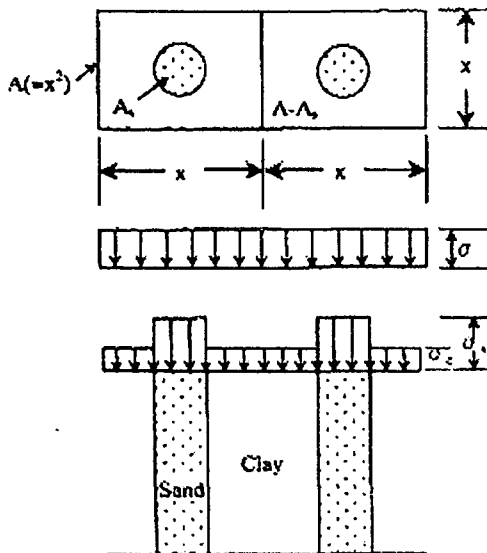


Fig. 1 Basic concept of SCP ground

### 3. 부산신항 1-1단계 SCP 개량공사 현황

#### 3.1 부산신항 1-1단계 공사개요

부산신항 1-1단계는 북컨테이너 터미널 총 13선석 중 6선석 구간에 해당되며 부산시 강서구 송정동 및 경남진해시 용원동 해역에 위치하고 있고 공식적인 사업의 명칭은 부산신항개발 민간투자 시설사업 1-1단계 부두시설 축조공사이다. 2001.11.17에 착공한 부산신항 1-1단계는 총 6선석이며 이 중 3선석은 2006.1.1에 완공할 예정이며 나머지 3선석은 2006.12.31에 완공할 예정으로 순조롭게 공사가 진행되고 있다. 부산신항 1-1단계의 공사규모로는 컨테이너 터미널인 안벽(케이슨식) 및 컨테이너 야드부 2.0km x 600m와 소형선 부두 600m x 50m, 컨테이너 운영에 관련된 건축과 전기통신공사등이 있다. 부산만자부두에 가능한 선석수는 5만 DWT급이 정박할 수 있는 6선석이며, 수심은 DL(-)16.0m로 되어있다.

#### 3.1 부산신항 1-1단계 지반조건

부산신항 1-1단계의 지반은 Fig 2에서 보는 바와 같이 해성퇴적토층으로서 약 5m~75m까지 광범위하게 분포하고 있으며, 평균적으로 약 40m 정도의 층후를 나타낸다. 해성퇴적토층은 크게 퇴적이력이 다른 두개의 층(점성토층과 사질토층)으로 구분할 수 있으며, 상부 점성토층은 연경도에 따라 2개의 층으로 세분화 할 수 있다. 상부 연약지반은 전형적인 해성퇴적 점성토로서 최대 50m 정도까지 분포하고 있다. 구체적인 결과는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 1 Subsoil layer description

Layer	USCS	Thiciness	Remarks
Marine Deposit A (Fine Grained)	CL/CH	0~40m	상부연약층 (N<8)
Marine Deposit B (Fine Grained)	CL/CH	0~36m	하부연약층 (N>8)
Marine Deposit C (Coarse Grained)	SM/SW/GP	0~28.5m	사질토층
Residual Soils	SM	0.7~14m	풍화암층
Bedrock		Rock	

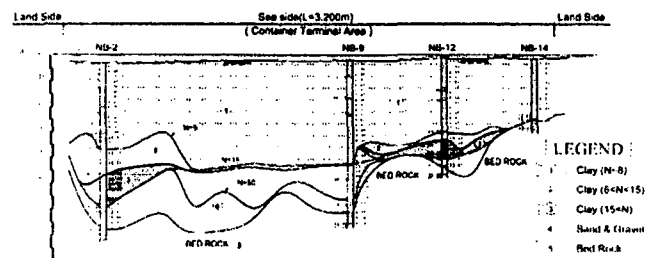


Fig. 2 Soil section of Pusan New port ground

### 3.2 부산신항 SCP 개량공사 시공순서

대표적인 부산신항 1-1단계 안벽 케이슨식 단면을 나타내면 Fig. 3과 같다. 안벽 케이슨 하부는 SCP 치환율 71%의 고치환율로 개량하였으며, 안벽 배면에는 SCP 치환율 40% 시공하여 PBD에 의한 과대침하에 대한 완충지역을 설정하였다.

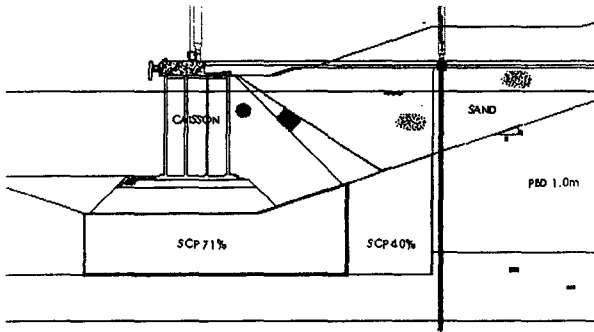


Fig. 3 Typical section of quay-wall caisson

SCP 개량공사는 Photo 1에서 보는 바와 같이 SCP 전용 시공 장비(SCP전용 작업선, 예인선, 모래저장선, 모래운반선등) 조합으로 케이슨식 안벽기초 하부지반을 개량하였다.



Photo 1 SCP Equipment

SCP 시공을 위한 위치선정은 GPS를 이용하였으며 약 10cm의 오차 이내에서 시공되도록 하였다. SCP 모래말뚝의 직경은 1.0m 케이싱에 반복하중을 가하면서 모래말뚝이 2.0m가 되도록 하였다. SCP 시공상 가장 중요한 점은 모래가 소정의 심도까지 소용량이 투입되는 것이다. 이를 위한 시공관리로서 케이싱 선단에 심도를 탐지하는 장치를 부착하고(이를 GL관리라고 함), 케이싱 내부에 있는 모래 상단면을 감지하는 장치를 부착하여(이를 SL관리라고 함) 모래의 투입량을 관리하였다. SCP 개량심도는 원지반의 N치가 15인 지역까지 개량하는 것으로 하였다.

안벽 케이슨 공사에 관한 시공순서는 다음과 같다. 원지반을 준설한 후 SCP 개량공사를 수행한다. SCP 개량공사에 의해서 발생하는 용기토를 제거한 후 케이슨 하부기초사석 공사를 수행하고 기계작된 케이슨(총 중량 2,607.3ton, 18.9m(L) x 18.1m(H) x 11.4m(B))을 거치한다. 케이슨 거치가 완료되면 케이슨 내부(격실 15개)에 모래를 채운 후 케이슨 배면에 사석으로 뒷채움

을 실시한다. 뒷채움이 완료된 구간에 대해서 뒷채움 배면에 모래를 시공이 완료되면 케이슨 상단에 재하블록(케이슨 1함당 95개, 총중량 5,155.6ton, 재하하중 24tf/m<sup>2</sup>)을 거치하여 케이슨 하부 SCP 개량지반에 대해서 압밀침하를 촉진시킨다. 재하블록은 총 13개조(1,235개 재하블록)가 제작되었으며, 케이슨 13함에 재하블록이 동시에 재하되어 SCP 개량지반에 지중응력이 최대한 확보되도록 하였다. 케이슨 하부 SCP 개량지반의 침하에 영향을 많이 미치는 각 공정인 케이슨 내부 모래속채움, 케이슨 배면 뒷채움 및 재하블록 공사에 대한 사진을 나타내면 다음과 같다.

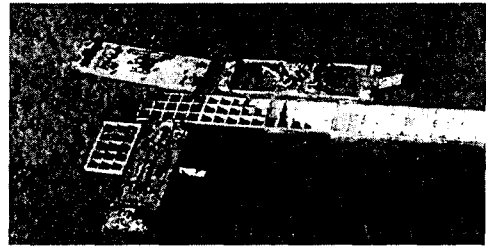


Photo 2 Sand fill construction

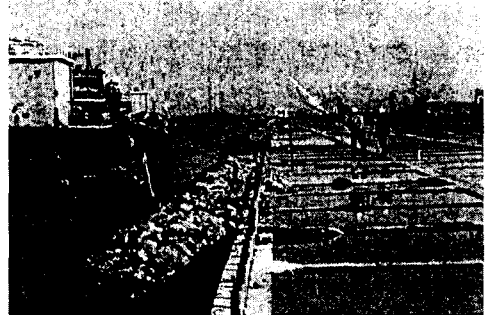


Photo 3 Backfill construction

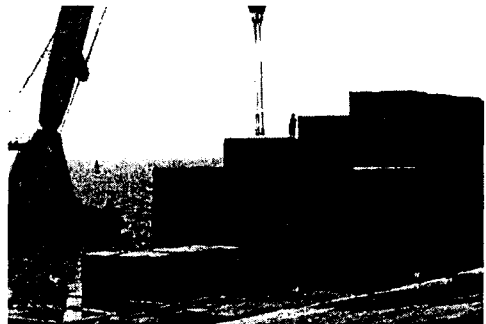


Photo 4 Preloading construction

## 4. 부산신항 1-1단계 SCP 개량지반 측량결과

부산신항에 시공된 케이슨 총 109함이며 시공길이는 약 2.0km에 해당된다. 이중 재하블록까지의 시공이 완료된 구간은 케이슨 47함까지이며 재하블록의 재하기간은 총 45일을 방지하고 약 7일간 정밀측량을 실시한 후 침하가 종료되면 제거를 한다. 시공조건은 SCP개량지반의 지중응력이 최대한 확보되도록 케이슨 양쪽에 인접한 케이슨의 침하가 종료되면 제거하는 것으로 하였다. 재하블록에 제거기준은 항 후 안벽상단에 운영될 크레인의 허용변위량인 10cm인 점을 감안하여 SCP 개량지반의

잔류침하량 10cm 이내 압밀도 90% 이상이 만족되도록 하였다. 모래다짐말뚝의 타설시 점성토지반의 교란으로 계산에 의한 압밀속도 보다 일반적으로 늦어지는 경향이 있으며 이러한 압밀속도에 대한 보정치는 실측데이터로부터 다음과 같이 제안하고 있다.

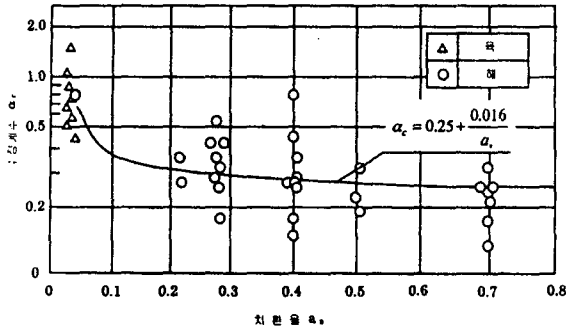
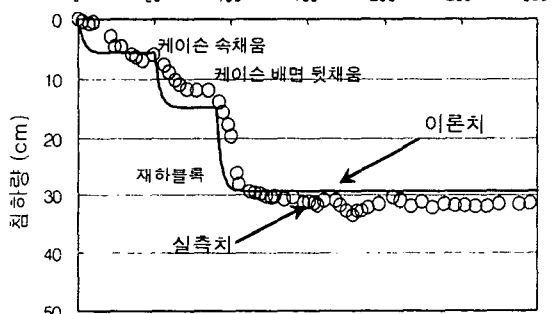
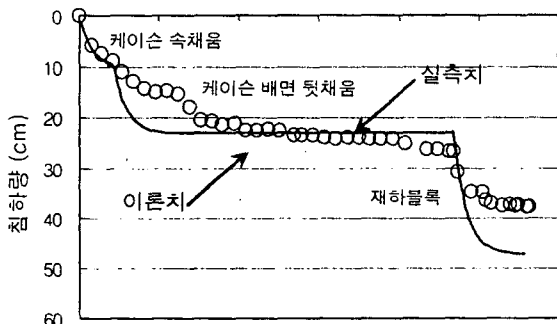


Fig. 4 Revision of consolidation velocity by replacement ratio

위에서 언급한 SCP 개량지반에 대한 침하량계산 및 압밀속도에 관한 보정치를 고려한 실제 측량된 대표 케이스(21함(시험시공함)과 40함)에 대한 측량결과를 나타내면 Fig. 5와 같다. 케이스 21함의 SCP 개량심도는 6.7m이며, 케이스 40함의 SCP 개량심도는 11.1m이다. 시험시공함인 21함은 재하블록을 6개월 이상 방치하여 SCP 개량지반의 침하수렴 여부를 관찰하였다.



(a) Time-settlement Curve (Caisson No. 21)



(b) Time-settlement Curve (Caisson No. 40)

Fig. 5 Time-settlement curve

위의 결과를 보면, SCP 개량심도가 짧은 케이스 21함의 최종압밀침하량은 실측치와 이론치가 거의 유사한 경향을 나타내고 있지만, SCP 개량심도가 10m 이상인 케이스 40함의 경우에는 실측치가 이론치에 비해서 최종침하량이 작게 나타나고 있다. 이는 고치환율 SCP에 대한 최종침하량 예측방법이 단순히 치환율만의 함수로 고려하는 이론적인 한계가 있을 것으로 판단된다. 실제 점토지반의 71%가 SCP 모래말뚝으로 시공되는 점을 감안한다면 단순한 치환율만의 함수로 SCP 개량지반의 최종침하량을 예측한다는 것은 이론적으로 무리가 따를 것으로 판단된다. SCP 시공중에 SCP 전용장비에 의한 모래말뚝의 형상이 이론적으로 가정한 원주형이 되기 어려우며, 실제 일본의 실측 예를 보면 고치환율 SCP는 원주형이 아닌 아메바형으로 형성된다. 이렇게 아메바형으로 형성되는 과정 때문에 실제에서 가정한 치환율보다 더 높게 나타나는 경향이 있다(Fig. 6). 이러한 경향은 고치환율일수록 또한 개량심도가 깊을수록 높게 나타날 확률이 높다. 따라서 실측치의 최종침하량이 이론치의 최종침하량 보다 작게 나타나는 것으로 판단된다. 한편 압밀침하속도는 SCP 개량심도에 관계없이 실측치가 이론치보다 늦어지는 경향을 나타내고 있다. 이는 SCP 시공 중에 주변지반이 교란되었거나 위에서 언급한 바와 같이 SCP 모래말뚝이 이론적으로 가정한 정확한 원주형이 형성되지 않음으로서 나타나는 것으로 판단된다. 각 주요 시공단계별의 침하량을 개량심도에 대한 비교 및 이론치와 실측치에 직접적인 비교를 하면 다음의 그림과 같다. Fig. 7에는 케이스 거치 후 모래속채움에 의한 침하정도를 비교하였으며, Fig. 8에는 케이스 배면 뒷채움 완료시에 대한 비교를 하였고 Fig. 9에 재하블록에 의한 최종침하 정도를 비교하였다.

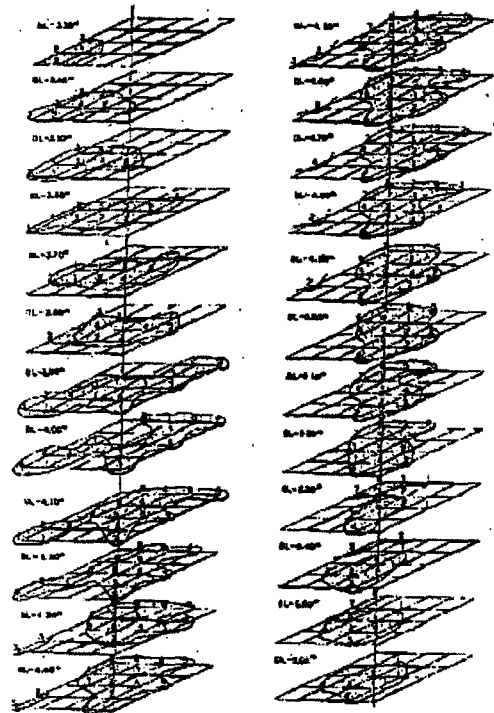
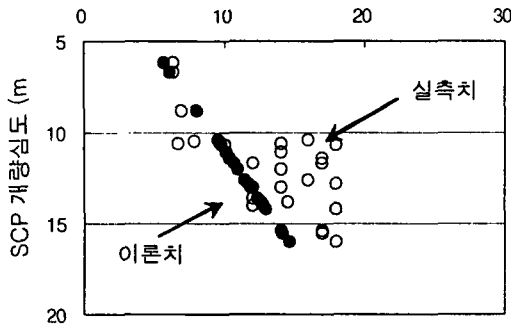
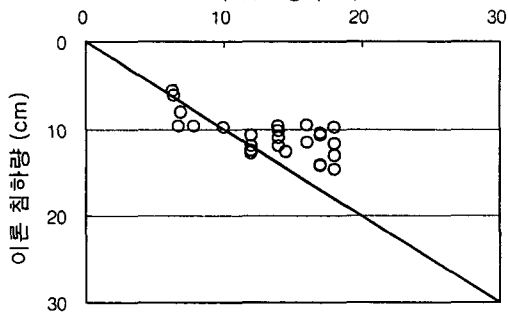


Fig. 6 Measured SCP shape by SPT test(Japan, Kansai airport)

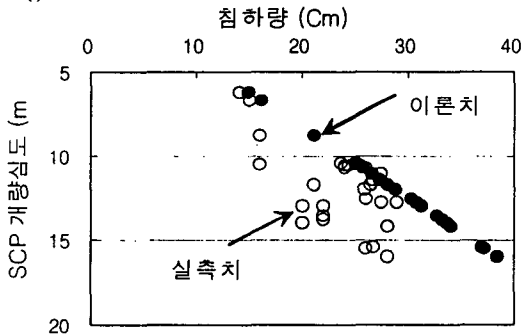


(a) Consolidation settlement by SCP improvement depth

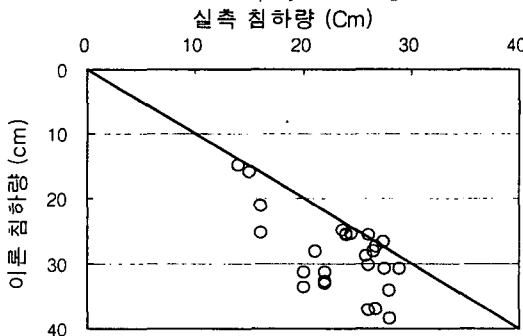


(b) Relationship of measured and calculated results

Fig. 7 Settlement trend after sand fill construction

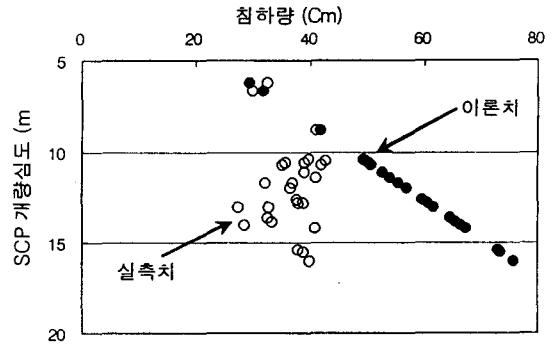


(a) Consolidation settlement by SCP improvement depth

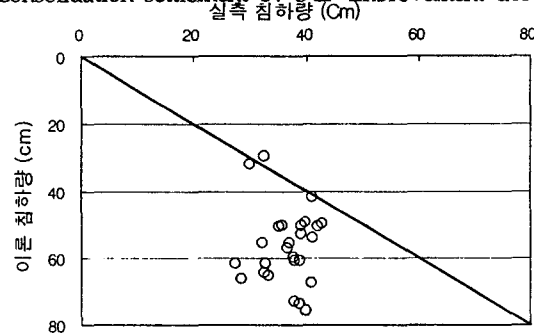


(b) Relationship of measured and calculated results

Fig. 8 Settlement trend after back-fill construction



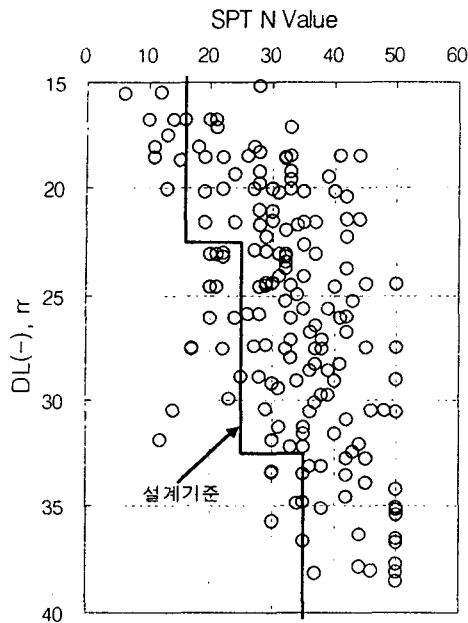
(a) Consolidation settlement by SCP improvement depth



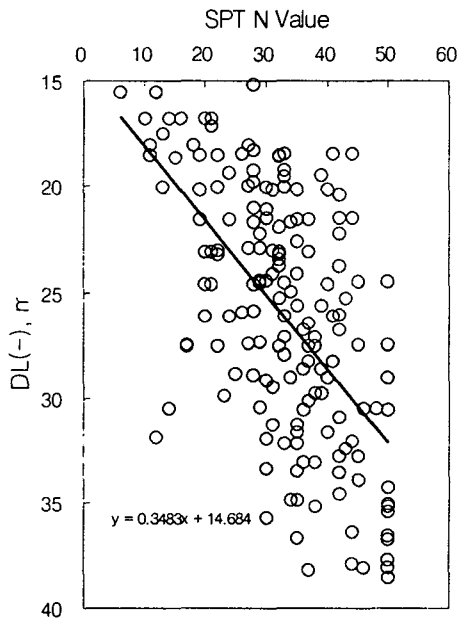
(b) Relationship of measured and calculated results

Fig. 9 Settlement trend after Pre-loading construction

위의 결과를 보면, SCP 개량지반의 침하량에 대한 이론치와 실측치의 상관관계를 정량적으로 표현하기는 어렵다는 것을 알 수가 있다. 다만 정성적인 경향을 보면, 케이슨 속채움시에는 실측치의 침하량이 이론치의 침하량보다 크게 나타나고 있으나, 케이슨 속채움의 공정인 케이슨 뒷채움 시공시나 재하블록이 시공시에는 실측치의 침하량이 이론치의 침하량보다 작게 나타나고 있다. 이는 SCP 개량을 완료한 후, SCP 개량지반 상부에 발생하는 융기토(약 4m 정도발생)를 제거하는 과정에서 발생하는 SCP 상단면의 교란 영향으로 침하량이 다소 크게 나타나는 것으로 보여진다. 이러한 교란의 영향이 감소되는 케이슨 뒷채움 시공시나 재하블록을 이용한 프리로딩시에는 실측침하량이 이론침하량보다 작게 나타나는 경향을 보이고 있다. 또한 SCP 개량심도가 10m 이상이 되면 SCP 개량지반의 실측침하량은 케이슨 속채움시에는 약 20cm 이하, 뒷채움시에는 30cm 이하이고 재하블록을 이용한 프리로딩시에는 40cm 이하의 일정한 값으로 수렴하고 있다. 이러한 결과는 SCP 시공 완료후의 SCP 확인지반조사 결과로부터 다음과 같이 유추할 수가 있다. 실제 SCP 시공은 설계기준보다 상당히 상회하는 품질이 확보되어 있으며, 개량심도가 깊을수록 SCP에 대한 표준관입시험 N치는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 설계보다 표준관입시험의 N치가 증가되면 SCP의 지지력은 증가되며, 또한 SCP 개량지반의 침하량은 감소하게 된다. SCP 개량체에 대한 N치 증가는 SCP 개량지반의 안정성을 향상시키며, 압밀 침하를 감소시키게 된다.



(a) Relationship of measured N-value and design criteria



(b) Relationship of N-value and depth

Fig. 10 Check boring results after SCP installation

## 5. 결 론

본 논문에서는 부산신항만의 안벽기초 공법인 SCP공법에 대한 실제 측량결과를 분석하였으며, 이론치 및 지반조사 결과를 바탕으로 다음과 결론을 얻을 수 있다.

(1) 실제 SCP 개량공법은 실제 시공결과를 중심으로 발전된 공법이다. 특히 고치환율이 적용되는 SCP 개량지반은 이론적으로

설명하기 상당히 어려우므로 시공방법 및 지반조건등으로 고려한 현장특성에 맞는 설계개념을 보완할 필요가 있다. 이를 위해서는 반드시 시험시공을 실시하여 이론적인 설계법을 보완하여야 하며, 향후 SCP 공법이 적용되는 구역에 대한 보완이 필요하다.

(3) 부산신항 1-1단계의 SCP 개량지반에 대한 실측침하량은 이론치에 의한 침하량보다 전반적으로 작게 나타났으며, 압밀침하 속도는 실측치가 이론치보다 늦게 나타나는 경향을 보이고 있다. 또한 SCP 타설 후 확인지반조사 결과를 보면 예상한 기준보다 훨씬 상회하는 결과를 보이고 있다. 이로 부터 실제 부산신항의 SCP 개량지반은 이론적으로 예상했던 결과보다 상당히 양호한 결과를 나타내고 있어 향후 항만 중요구조물에 대한 기초지반 처리공법으로서 적용성이 높다고 할 수가 있다.

(2) 향후 SCP 공법에 대한 모형시험이나 이론적인 연구가 추가적으로 필요하며, 실제 측량결과나 계측결과 및 이론적인 연구를 바탕으로 안정성 및 침하에 대한 SCP 치환율을 조정할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- 부산신항만개발 민간투자시설사업 복컨테이너 실시설계 보고서. (1999). 부산신항만주식회사.
- Murayama, S. (1957). "Improvement of soft ground by sand compaction piles(Compozer method)", Proc. of Osaka construction works., Japan, pp 1-17. (in Japanese).
- Ogawa, M. and Ichimoto, E. (1963). "On applying vibro-compozer method for clay ground", Tsuchi to Kiso, Vol.1, No 3, pp 3-8. (in Japanese).
- Ibaragi, T. (1965). "An experimental research of composite ground by direct shear test", Tsuchi to Kiso, Vol.13, pp.33-39. (in Japanese).