

SCP 개량지반의 압밀침하 결과 분석

Analysis of Consolidation Settlement of SCP Improved Ground

정선영¹⁾, Sun-Young Jung, 정종범²⁾, Jong-Bum Jung, 양상용³⁾, Sang-Yong Yang,
김태형⁴⁾, Tae-Hyung Kim

- 1) 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., Korea Maritime Univ.
- 2) 삼성물산 건설부분 과장, Samsung corporation Co. Ltd., Korea
- 3) 삼성물산 건설부분 상무, Samsung corporation Co. Ltd., Korea
- 4) 한국해양대학교 공과대학 건설환경공학부 전임강사, Full Time Instructor, Div. of Civil and Environ. Engrg., Korea Maritime Univ.

SYNOPSIS : In this paper, the measured results obtained from the ground improved by SCP method at quay-wall caisson foundation in Pusan New Port 1-1 phase are analyzed and then compared with the values predicted by a consolidation theory. The measured settlement is generally smaller than the predicted settlement. For consolidation velocity, the measured velocity is later than the predicted value. According to the execution of caisson placing phases, the predicted value shows higher settlement than the measured one with time being.

Key words : sand compaction pile, improved ground, consolidation velocity, consolidation settlement

1. 서 론

연약지반개량 공법 중 하나인 모래다짐말뚝(SCP)공법은 진동 또는 충격하중을 이용하여 연약점토지반중에 일정한 간격으로 모래 말뚝을 타설함으로써 연약점토지반과 모래말뚝이 일체를 이루도록 하는 즉 복합지반을 형성하는 공법이다.

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 Oka(1956)에 의해서 특허를 받은 이후 주로 일본에서 개발되어온 공법이다(Murayama, 1957; Tanimoto, 1960, 일본건설부, 1957; Ogawa, Ichimoto 1963 : Ibragi 1965). 최근에는 다른 지반개량공법과 비교하여 지반개량기간이 짧고 동시에 지반강도가 크게 개선되는 효과 때문에 일본에서는 해상이나 육상 구조물에 많이 적용되고 있고 공법의 효율을 높이기 위한 연구가 진행이 되고 있다 (神田 勝己 and 寺師 昌明, 1990, Asoka et al., 1994; Oda et al., 2001; Rahman et al., 2000). 우리나라에서는 1984년 광양제철소 기초지반 조성에 모래다짐말뚝과 샌드드레인을 병용한 지반개량공법이 육상에서 처음 채택되었으며 해상에서는 1998년 부산신항만 개발사업에 본격적으로 채택되고 있는 공법이다. 특히, 부산신항만의 경우 연약해성퇴적토층이 평균적으로 약 40m 정도의 대심도의 연약층에 SCP공법을 적용한 아주 특별한 현장이다.

본 연구에서는 부산신항만 1-1단계 공사구간에서 안벽케이스 하부 SCP로 개량된 해성퇴적토층의 침하 결과를 분석하고, 기존의 압밀이론에 의한 침하거동과 비교하고자 한다. 또한 SCP 개량지반의 침하에 영향을 많이 미치는 케이스 거치 단계별 침하 이론치와 실측치를 비교하여 공정별 침하 특성을 알아보하고자 한다.

2. 점성토 지반의 SCP 설계방법

복합지반은 Fig.1과 같이 복합지반 위에 평균응력 σ 가 재하 되면 연직방향의 힘의 평형방정식으로부터 응력분담비($m = \sigma_s / \sigma_c$)와 치환율($a_s = A_s / A$)을 파라메타로 한 모래말뚝응력 σ_s , 점성토 지반의 응력 σ_c 가 계산된다. A_s , A_c 는 각각 모래말뚝의 단면적과 점성토 지반의 단면적을 나타낸다.

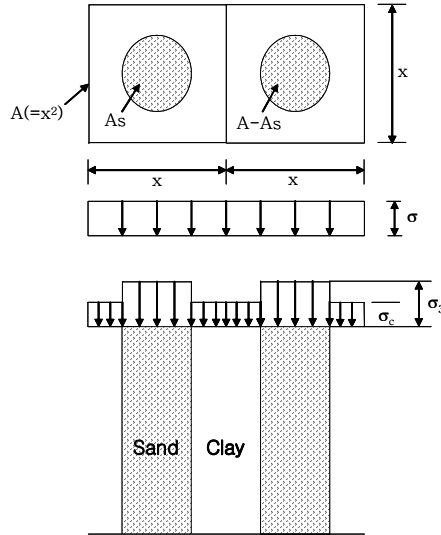


Fig. 1 Schematic diagram of SCP ground

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c \quad (1)$$

$$\sigma A = m \sigma_c A_s + \sigma_c A_c = \sigma_c (m A_s + A_c) \quad (2)$$

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

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

여기서, μ_c 는 응력저감계수이고 μ_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 무처리 되었다고 가정한 침하량(S_0)에 침하저감계수(β)를 곱하여 구한다. 침하저감계수(β)는 저치환 개량에서는 응력집중효과, 고치환 개량인 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 1을 적용하며, 치환

율이 40% ~ 70%인 경우에는 2, 치환율이 40% 이하인 경우에는 3을 적용한다. 한편 압밀침하속도는 일반적인 Vertical Drain공법에서 적용하는 방법과 동일하다.

3. 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 Soil profile description

Layer	USCS*	Thickness	Remarks
Marine Deposit A (Fine Grained)	CL/CH	0~40m	upper soft layer (N<8)
Marine Deposit B (Fine Grained)	CL/CH	0~36m	low soft layer (N>8)
Marine Deposit C (Coarse Grained)	SM/SW/GP	0~28.5m	sandy layer
Residual Soils	SM	0.7~14m	weathered rock layer
Bedrock			Rock

* USCS : Unified Soil Classification System

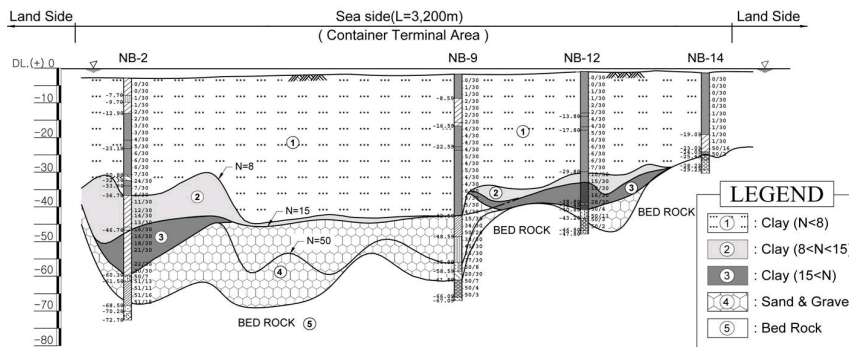


Fig. 2 Soil profile in Pusan New port ground

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%로 시공하여 PBD에 의한 과대침하에 대한 완충지역을 설정하였다.

안벽 케이슨 공사는 원지반을 준설한 후 SCP 개량공사를 수행한 후 시행되었다. SCP 개량공사에 의해서 발생하는 용기토를 제거한 후 케이슨 하부기초사석 공사를 수행하고 기제작된 케이슨(총 중량 2,607.3ton, 18.9m(L) x 18.1m(H) x 11.4m(B))을 거치하였다. 케이슨 거치가 완료되면 케이슨 내부(격실 15개)에 모래를 채운 후 케이슨 배면에 사석으로 뒷채움을 실시하였다. 뒷채움이 완료된 구간에 대해서 뒷채움 배면에 모래를 시공이 완료되면 케이슨 상단에 재하블록(케이슨 1함당 95개, 총중량 5,155.6ton, 재하하중 24tf/m²)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.

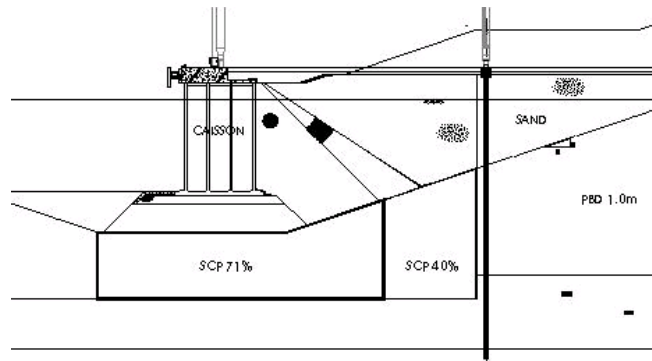


Fig. 3 Typical section of quay-wall caisson

4. SCP 개량지반 침하 측량결과

부산신항 1-1 단계에 시공된 케이슨은 총 109함이며 시공길이는 약 2.0km에 달한다. 이중 재하블록까지의 시공이 완료된 구간은 케이슨 47함까지이며 재하블록의 재하기간은 총 45일을 방치하고 약 7일간 정밀측량을 실시한 후 침하가 종료되면 제거를 하고 있다. 시공조건은 SCP개량지반의 지중응력이 최대한 확보되도록 케이슨 양쪽에 인접한 케이슨의 침하가 종료되면 제거하는 것으로 하였다. 재하블록의 제거기준은 향후 안벽상단에 운영될 크레인의 허용변위량이 10cm인 점을 감안하여 SCP 개량지반의 잔류침하량 10cm이내 압밀도 90% 이상이 만족되도록 하였다.

모래다짐말뚝의 타설시 점성토지반의 교란으로 설계시 계산에 의한 압밀속도 보다 일반적으로 늦어지는 경향이 있으며 이러한 압밀속도에 대한 보정치는 수정계수(해양수산부, 1999)를 이용하여 실측 데이터로부터 그림 4와 같이 제시되었다. 여기서 수정계수는 SCP 타설후 압밀계수에 대한 SCP 타설전 압밀계수의 비이다.

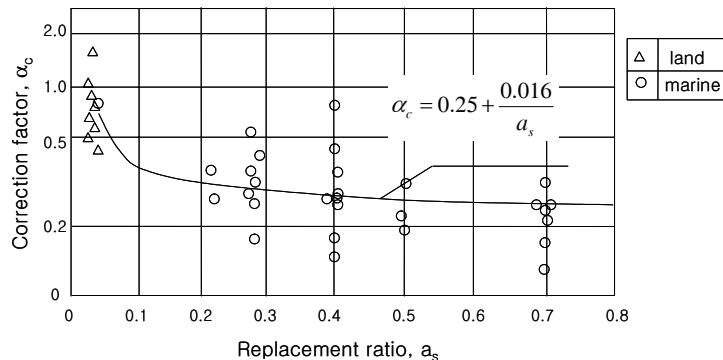
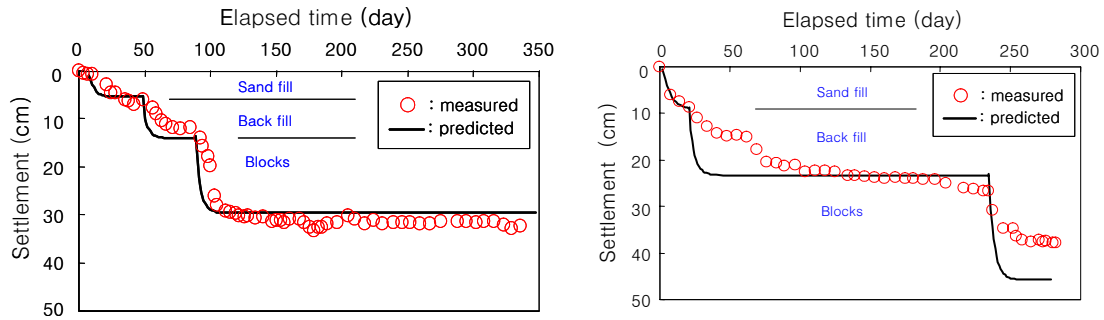


Fig. 4 Correction factor(α_c) for consolidation velocity ratio vs. replacement ratio(a_s)

그림 5에는 위에서 언급한 SCP 개량지반(대표 케이슨 21함(시험시공함)과 40함)에 대하여 실제 측량한 결과와 압밀속도에 관한 보정치를 고려한 이론치를 함께 표시하고 있다. 케이슨 21함의 SCP 개량심도는 6.7m며, 케이슨 40함의 SCP 개량심도는 11.1m이다. 시험시공함인 21함은 재하블록을 6개월 이상 방치하여 SCP 개량지반의 침하수렴 여부를 관찰하였다.



(a) Caisson No. 21 (b) Caisson No. 40
 Fig. 5 Comparison between measured and predicted time-settlement data

5. 침하량 결과 분석

5.1 전체공정

그림 5에 비교를 위해 측량결과와 이론치를 같이 도시하였다. 압밀침하속도는 SCP 개량심도에 관계없이 실측치가 이론치보다 늦어지는 경향을 나타내고 있다. 이는 SCP 시공 중에 주변지반이 교란되어 나타나는 것으로 판단된다. 침하 결과를 보면, SCP 개량심도가 짧은 케이스는 21함의 최종압밀침하량은 실측치와 이론치가 거의 유사한 경향을 나타내고 있지만, SCP 개량심도가 10m 이상인 케이스는 40함의 경우에는 실측치가 이론치에 비해서 최종침하량이 작게 나타나고 있다.

개량심도가 10m 이상인 경우 이론침하량이 크게 나타나는 이유는 고치환율 SCP에 대한 최종침하량 예측방법이 단순히 치환율만의 함수로 고려하고 있기 때문이다. 실제 점토지반의 71%가 SCP모래말뚝으로 시공되는 점을 감안한다면 단순한 치환율만의 함수로 SCP 개량지반의 최종침하량을 예측한다는 것은 이론적으로 무리가 따를 것으로 판단된다. SCP 시공 중에 시공 장비에 의한 모래말뚝의 형상이 이론적으로 가정한 원주형이 되기 어려우며, 실제 일본의 실측 예를 보면 고치환율 SCP는 원주형이 아닌 아메바형으로 형성된다. 이것은 SCP 공법이 반복하중에 의한 모래다짐으로 모래가 점성토지반으로 스며들어가기 때문으로 추측된다. 이렇게 아메바형으로 형성되는 과정 때문에 설계에서 가정한 치환율보다 더 높게 나타나는 경향이 있다(Fig. 6). 따라서 실측치의 최종침하량이 이론치보다 작게 나타나는 것으로 판단된다.

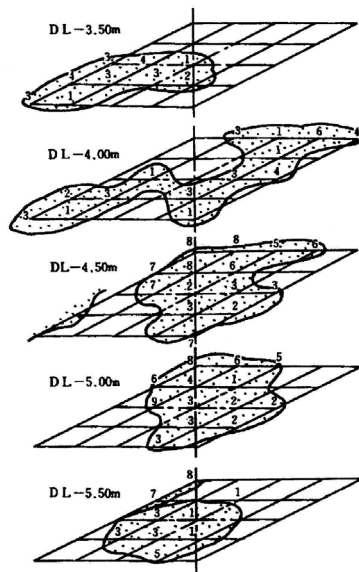


Fig. 6 Measured SCP shape by SPT test (平尾寿雄, 1996)

5.2 시공단계별

각 주요 시공단계별 침하량을 개량심도에 대한 비교 및 이론치와 실측치에 직접적인 비교를 하면 다음 그림과 같다. 실측 데이터는 이미 시공된 20 ~ 45함의 케이슨으로부터 측정된 결과로 대부분 SCP 개량 심도가 10m 이상인 개량지반위에 안치된 경우이다.

Fig. 7은 케이슨 거치 후 모래 속채움에 의한 침하정도를 비교하였으며, Fig. 8에는 케이슨 배면 뒷채움 완료시에 대한 비교를 하였고, Fig. 9에서는 재하블록에 의한 최종침하 정도를 비교하였다.

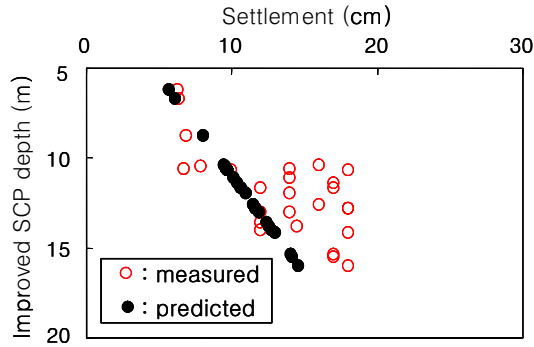


Fig. 7 Consolidation settlement vs. improved SCP depth after sand fill inside the caisson

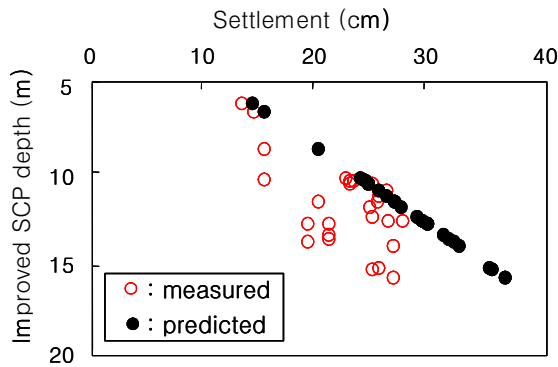


Fig. 8 Consolidation settlement vs. improved SCP depth after back-fill the rear of the caisson

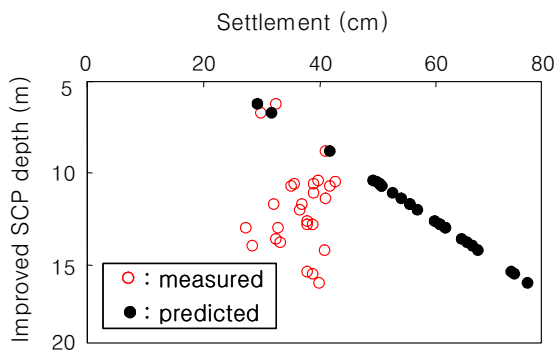


Fig. 9 Consolidation settlement vs. improved SCP depth after blocks loaded on the caisson

위의 결과를 보면, SCP 개량심도가 10m 이상인 경우 SCP로 개량된 지반의 실측침하량은 케이슨 속채움시에는 약 20cm 이하, 뒷채움시에는 30cm 이하이고 재하블록을 이용한 프리로딩시에는 40cm이하의 일정한 값으

로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이론치와 비교해 보면 케이슨 속채움시에는 실측치의 침하량이 이론치의 침하량보다 크게 나타나고 있다. 이것은 SCP 개량을 완료한 후, SCP 개량지반 상부에 발생하는 용기토(약 4m 정도 발생)를 제거하는 과정에서 발생하는 SCP 상단면의 교란 영향으로 침하량이 다소 크게 나타나는 것으로 보여진다. 그러나, 케이슨 속채움의 공정인 케이슨 뒷채움 시공시나 재하블록 시공시에는 실측치의 침하량이 이론치의 침하량보다 작게 나타나고 있다. 이것은 시간의 경과에 따른 교란 영향의 감소로 케이슨 뒷채움 시공시나 재하블록을 이용한 프리로딩시에는 실측침하량이 이론침하량보다 작게 나타나는 경향을 보이고 있다.

이러한 결과는 SCP 시공완료후의 SCP 확인지반조사 결과로부터 다음과 같이 유추할 수가 있다. 실제 SCP 시공은 설계기준보다 침하저감효과의 관점에서 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, 압밀침하를 감소시키게 된다.

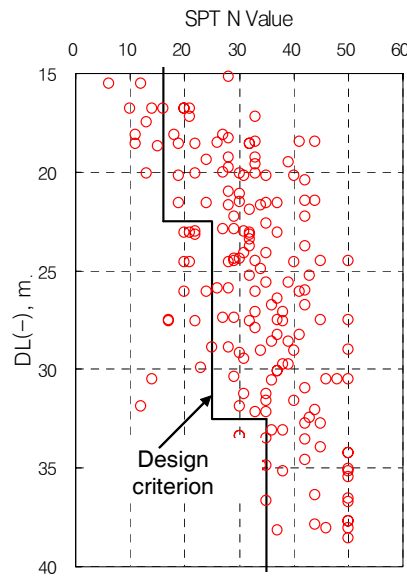


Fig. 10 Check boring results after SCP installation : Comparison between measured N-value and design criterion

6. 결 론

본 논문에서는 부산신항만의 안벽케이슨의 기초지반인 SCP공법이 적용된 해성연약퇴적토층의 침하에 대한 실제 측량결과를 분석하고 기존의 압밀이론에 의한 침하거동과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압밀침하속도는 SCP시공시 지반교란의 영향으로 실측치가 이론치보다 늦게 나타나는 경향을 보이고 있다.
- (2) 부산신항 1-1단계의 SCP 개량지반에 대한 실측침하량은 이론치에 의한 침하량보다 전반적으로 작게 나타났다.
- (3) 케이슨 거치 공정단계별로 살펴보면 초기 속채움시에는 실측치의 침하량이 이론치의 침하량보다 크게 나타나고 있는 반면, 케이슨 속채움 후 케이슨 뒷채움 시공시나 재하블록 시공시에는 실측치의 침하량이 이론치의 침하량보다 작게 나타나고 있다.
- (4) SCP 타설 후 SPT 시험에 의한 지반품질 확인 결과를 보면 설계 기준보다 훨씬 상회하는 결과를 보이고 있다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부의 지방대학혁신역량강화사업(O4-자-C-03)의 산학협동 연구 사업에 의해 지원받은 과제이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 해양수산부 (1999), 항만 및 어항설계기준, pp.548~550
2. Asoka, A., Kodaka, T. and Nozu, M. (1994), "Undrained shear strength of improved with sand compaction piles", Soils and Foundations, Vol. 34, No. 4, pp. 23-32
3. Ibaragi, T. (1965). "An experimental research of composite ground by direct shear test", Tsuchi to Kiso, Vol.13, pp. 33-39. (in Japanese)
4. Juran, I. and Guermazi, A. (1988), "Settlement response of soft soils reinforced by compacted sand columns", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 930-943
5. Murayama, S. (1957). "Improvement of soft ground by sand compaction piles(Compozer method)", Proc. of Osaka construction works, Japan, pp. 1-17. (in Japanese).
6. 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).
7. Oda, K., Matsui, T. and You, S.K. (2001), " Model tests and numerical simulations on consolidation behavior of clay groud improved by SCP with low replacement area ratio", International Symposium on Recent Developments of Ground Improvement (ISRDCI 2001), Special Technical Publications -2, pp. 9-12.
8. Rahman, Z., Takemura, J., Kouda, M., and Yasumoto, K. (2000), "Experimental study on deformation of soft clay improved by low replacement ratio SCP under backfilled caisson loading, Soils and Foundations, Vol.40, No.5, pp. 19-35.
9. 茨木 龍雄 (1965), "複合土の直接せん断試験による實驗的研究(第1報)", 土と基礎 Vol.13, No.3, pp. 19-24.
10. 神田 勝己, 寺師 昌明 (1990), 粘性土地盤を對象とするSCP工法の實用設計法, 港灣技術資料, No.669.小林 肇, 古郷 誠, 鈴木建一, 酒井成之(1995), 東京横断道路川崎人工島内部掘鑿時におけるSCP改良地盤調査報告, pp. 41-48
11. 平尾寿雄 (1996), 沙抗打設による海底隆起地盤の特性と工學的活用に関する研究, 名古屋大學 博士論文