

Sand Drain공법의 압밀촉진효과에 관한 해석적 분석



岡田 一郎
Ichiro OKADA
日本 Civic Consulting
Engineers Co., LTD.,
事業統括本部 地盤構造Solution部
(okadai@nccnet.co.jp)



山根 勝悟
Shogo YAMANE
日本 Civic Consulting
Engineers Co., LTD.,
事業統括本部 地盤構造Solution部
(yamane@nccnet.co.jp)



田中 弘
Hiroshi TANAKA
日本 Civic Consulting
Engineers Co., LTD.,
事業統括本部
(h-tanaka@nccnet.co.jp)

1. 머리말

점성토지반의 압밀촉진을 목적으로 하는 연약지반대책의 하나로 Vertical Drain공법이 있다. 이 공법의 설계법은 1940년대에 확립되어 이후 세계 각지에 보급되어 실적도 풍부하다. 층적 연약지반이 도심부에 발달되어 있는 일본의 경우도 실적이 많고 매립지나 고속도로 성토의 연약지반대책으로도 활용되고 있다.

본 논문은 제방성토의 압밀촉진대책으로 Vertical Drain의 하나인 Sand Drain공법을 적용하고 그 설계검토를 수행하였다. 그 일련의 과정에 있어서 Sand Drain의 압밀촉진효과가 1차원 압밀의 관용설계법과 다차원압밀인 2차원 유한요소법 해석이 명확하게 다른 결과로 나타났다. 그 원인에 대한 분석과 함께 Sand Drain공법의 유효성 평가방법, 적용 및 설계시 유의사항에 대한 고찰을 서술하였다.

2. 검토지반의 압밀상태

그림 1에 검토개소의 지층단면도를 나타내었다. 제방성토를 조성할 예정인 기초지반은 연약한 층적점성토층(Yu-c, Yl-c)이 약 23m의 두께로 퇴적되어 있다. 이 점성토층의 압밀상태와 성토하중과의 관계를 파악할 목적으로 압밀항복응력과 현 유효상재압 Line 및 성토 후 유효상재압 Line을 비교하여 나타내었다. 또한 그림 3에는 Yl-c층의 $e-\log p$ 곡선과 압밀계수 C_v 의 분포도를 나타내었다. 그림 2를 보면, Yu-c, Yl-c층은 현재 지반에 대해 정규압밀에서 약간 과압밀상태에 있는 것을 알 수 있다. 이러한 지반상에 제방성토를 구축하는 경우 성토재하 후 유효상재압 Line은 Yu-c층 및 Yl-c층의 압밀항복응력 P_c 를 상회하는 결과가 되므로 이러한 층에서는 압밀침하가 발생할 것으로 추정되었다. 또한 성토에 의해 압밀침하를 동반한 주변 연약지반의 침하와 측방유동이 발생하여 그 변형이 인접한 隅田川(Sumidagawa)측의 기존 호안에 영향을 생길 것으로 판단되었다.

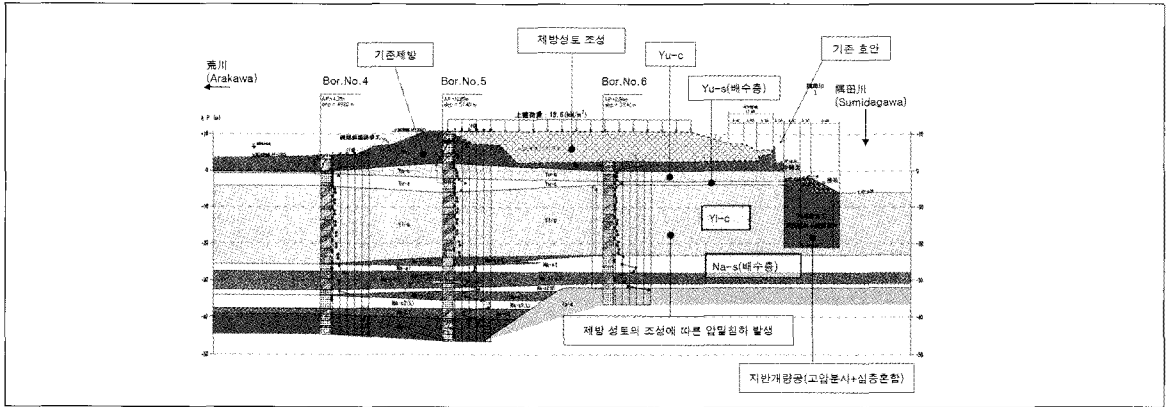


그림 1. 검토개소의 지층단면도

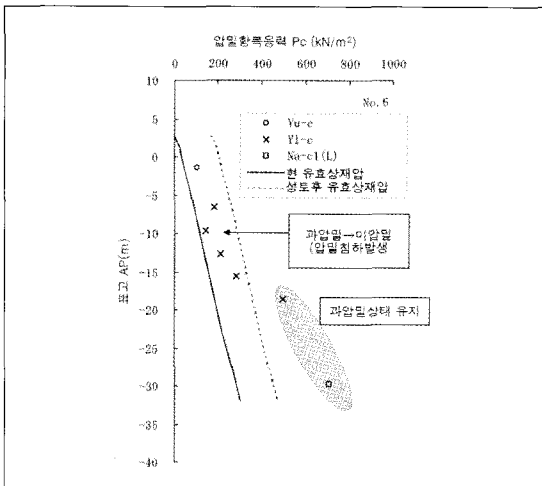


그림 2. 성토체 하부지반의 압밀향복응력 분포

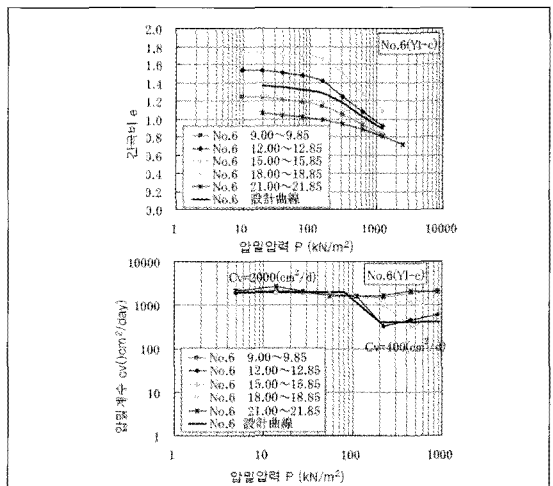


그림 3. YI-c층의 e-logp, Cv곡선

그래서 이러한 연약지반의 변형문제에 대처할 방법으로 Sand Drain을 이용한 압밀축진과 이에 따른 연약지반의 강도증가를 목적으로 설계에 대한 검토를 수행하였다.

3. 1차원 압밀의 관용계산법에 의한 Drain의 유효성

제방성토하중에 의한 축적점성토층(Yu-c, YI-c)의 압밀침하거동을 사전예측하기 위해 먼저 설계에서 많이 사용되는 Terzaghi의 1차원 압밀이론을 바탕으로 압밀침하량과 압밀도 계산을 수행하였다. 그 결과, 무처리의 경우

YI-c층의 최종 침하량은 $S_f=92\text{cm}$, 압밀도 $U=90\%$ 에 도달시간 $t=1,340\text{일}$ 로 나타나 압밀이 수렴하기까지는 과도한 시간이 필요하였다. 이러한 상황에서는 압밀에 따른 강도증가의 조기발현을 기대할 수 없고 장기간의 압밀침하가 기존 호안에 영향을 미칠 가능성이 크다. 연약점성토층의 조기 강도증가를 꾀하기 위해 Sand Drain공법에 의한 압밀축진공법을 계획하였다. 설정한 Sand Drain의 제원을 표 1에 나타내었다. Drain을 고려한 압밀도의 산정은 Barron에 의한 중공원주의 압밀방정식 근사법을 적용하여 수행하였다. 그 결과, 압밀도 $U=90\%$ 에 도달하는 시간은 140일로 단축 가능한 결과를 구하였다.

표 1. Sand Drain 제원

Drain직경	φ400mm
Drain배치	정방형
Drain간격	3.0m
Drain길이	25.6m(YI-c층 하단까지)

4. 다차원 압밀해석에 의한 Drain의 유효성

4.1 해석모델

본 검토에서는 점성토지반의 압밀침하뿐만 아니라 측방 유동에 의한 수평방향 변형이 기존 호안에 미치는 영향을 고려하여야 하기 때문에 변형률을 사전에 예측하기 위해 2차원 유한요소법에 의한 다차원 압밀해석을 수행하였다. 해석에 이용한 역학모델은 점성토층에 대한 압밀과 크리프의 시간의존성 변형을 고려할 수 있는 関口・太田에 의한 탄소성모델⁸⁾을 적용하였다. 또한 성토층과 사질토층은 선형 탄성체 모델로 적용하였다.

해석에 사용한 토질정수는 단위체적중량, 압밀계수, 압축지수 등 토질시험결과에 의한 시험값을 사용하고 시험 결과가 없는 것은 Iizuka and Ohta에 의한 정수 산출식⁹⁾을 사용하여 설정하였다. 이 토질정수는 제방위치와의 관계에서 토피압이 상이한 점, 지층변화가 예상되는 점을 고려

표 2. 성토 직하부 YI-c층의 토질정수

토질정수	기호	적용값
포아송비	ν	0.335
단위체적중량	γ' (kN/m ³)	8
한계상태지수	M	1.19
압축지수	λ	0.22
팽윤지수	κ	0.03
초기간극비	e_0	1.31
이방성지수	η_0	0.25
점소성 변형속도	v_0 (1/day)	1×10^{-7}
이차압밀계수	α	0.0029
수평압밀계수	C_{vx} (m ² /day)	0.04
연직압밀계수	C_{vy} (m ² /day)	0.04

하여 성토형상과 지층분포에 따라 영역을 분할하여 토질 정수를 각각 설정한다. 한 예로써 성토 직하부에 있어서 YI-c층의 토질정수를 표 2에 나타내었다.

해석 Case는 무처리지반과 Sand Drain을 적용한 경우, 또한 수치 Parametric으로 압밀계수를 $C_v = 50(\text{cm}^2/\text{day})$ 으로 하는 경우의 총 3 Case로 수행하였다. Sand Drain을 적용한 지반의 모델은 Sand Drain에 의한 압밀시간과 등가인 압밀계수를 가지는 점성토지반으로 하는 방법을 적용하였고, 현 지반의 압밀계수에 대해 38배의 값 $C_v = 15,000(\text{cm}^2/\text{day})$ 을 설정하였다.

4.2 해석결과

2차원 유한요소법 해석의 본래 목적은 성토단부에 있어서 변형상태를 파악하는데 있지만 여기서는 1차원 압밀에 의한 계산결과와 비교하기 위해 성토 직하부의 침하량에 결과를 나타내었다. 그림 4에 성토 직하부의 YI-c층에 있어서 시간-침하량의 관계를 나타내었다. 그림 5에 동일 장소에 있어서 과잉간극수압의 소산상태를 나타내었다. 수치 Parametric 계산 Case의 결과도 함께 나타내었다.

그림 4의 무처리와 Sand Drain의 침하경향을 비교하면 명확한 차이가 나타나지 않는다. 단 $C_v = 50(\text{cm}^2/\text{day})$ 의 결과를 비교하면 Sand Drain에 의한 압밀축진 효과가 명확하게 나타나고 있다. 한편, 그림 5의 과잉간극수압의 소산상태를 보면 Sand Drain에 대해 무처리가 과잉간극수압의 소산속도가 다소 늦는 것을 알 수 있다. 그리고 $C_v = 50(\text{cm}^2/\text{day})$ 의 계산결과에서는 소산속도의 지연이 명확하게 나타나고 있다.

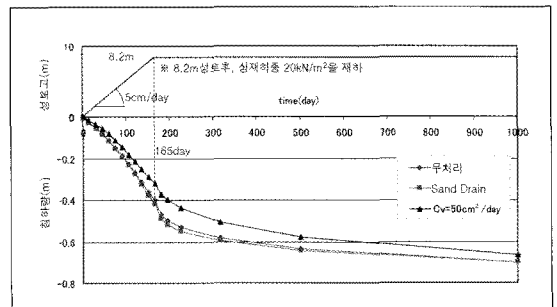


그림 4. 성토 직하부 YI-c층의 시간-침하곡선

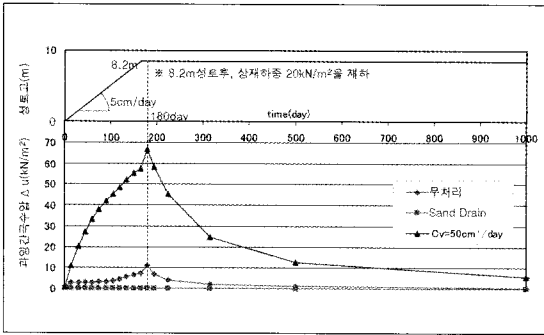


그림 5. 성토 직하부 Y1-c층의 시간-과잉간극수압곡선

이러한 것로부터 본 검토지반에 Sand Drain을 사용한 경우의 압밀축진 효과에 대해서는 1)침하속도에 관해서는 무처리의 경우와 차이가 보이지 않고, 침하축진을 피한다고 하기 어렵지만, 2)과잉간극수압의 소산속도에 대해서는 무처리의 경우보다 빠르므로 소산에 의해 발휘되는 강도증가에 관해서는 효과가 확인되었다.

5. Sand Drain의 유효성 평가에 관한 고찰

5.1 Sand Drain에 의한 침하축진효과에 관한 고찰

설계에 많이 사용되는 1차원 압밀의 간편계산법을 이용하는 경우에는 압밀도에 관한 Sand Drain의 유효성을 확인할 수 있는 결과가 구해지지만 다차원 압밀해석의 결과에서는 침하축진의 효과를 확인할 수 없는 결과가 구해졌다. 그 원인에 대해 고찰해 보면 다음과 같다.

다차원 압밀해석에 있어서 무처리와 Sand Drain의 침하거동에는 차이가 나타나지 않지만, $C_v = 50(\text{cm}^2/\text{day})$ 으로 수행한 수치 Parametric에서는 침하거동에 명확한 차이가 나타나고 있다. 이러한 점으로부터 현 지반의 압밀계수의 크기가 Sand Drain의 침하축진효과에 영향을 미치는 요인으로 판단된다. 즉 현 지반의 압밀계수가 작다면 Sand Drain에 의한 침하축진효과가 현저하게 나타나겠지만, 본 검토 지반의 압밀계수는 다소 큰 값을 나타내는 상태에 있기 때문에 Sand Drain에 의한 침하축진효과가 기대

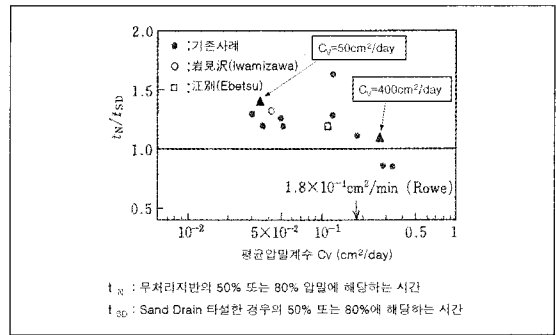


그림 6. 현 지반의 압밀계수와 침하속도의 관계

하는 정도로 나타나지 않았다고 판단된다.

이와 같이 현 지반의 압밀계수와 Sand Drain의 침하축진효과와의 관계에 대해서는 실측에 의한 비교실험결과를 그림 6에 나타내었고⁴⁾ Sand Drain의 침하축진효과는 현 지반의 압밀계수에 의해 변화하며 압밀계수가 큰 경우는 효과가 적은 경향을 나타내고 있다. 본 검토의 C_v 값(Δ)을 나타내면, $C_v = 50(\text{cm}^2/\text{day})$ 의 경우는 약간 왼쪽 상부에 위치하고 있고 압밀축진효과가 현저한 영역인 반면 $C_v = 400(\text{cm}^2/\text{day})$ 으로 하는 본 검토대상 현 지반상태는 그림의 오른쪽 중앙부에 위치하여 압밀축진효과를 기대하기 어렵다고 하는 경향과 일치하고 있다.

따라서 본 검토대상의 현 지반 압밀계수가 비교적 큰 값이었던 점이 Sand Drain에 의한 압밀축진 효과가 나타나지 않았던 요인의 하나로 판단된다.

5.2 1차원 압밀의 간편계산법과 다차원 압밀 해석법의 차이에 관한 고찰

Barron에 의한 중공원주의 압밀방정식 근사법으로 수행한 간편계산법의 결과와 달리 다차원 압밀해석에서는 Sand Drain 침하축진효과를 구할 수 없었다. 다차원 압밀해석에서의 침하량은 압밀침하와 전단에 의해 발생하는 변형의 수직성분이 모두 포함되었기 때문이다. 즉 2차원 상태에서 수직방향 변형으로 나타나는 값에는 압밀침하에 의한 것만이 아닌 전단변형을 동반한 수직방향의 변형도 고려되어 무처리 지반의 경우에서는 그 전단변형에 의한 수직방향 변형이 현저하여 결과적으로 수직방향 변형량이

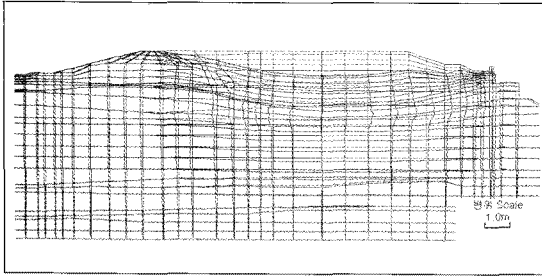


그림 7. 성토 개시부터 180일만에 있어서 무처리 지반의 변형

크게 산출되었다. 한편, Sand Drain을 적용했을 때의 2차원 압밀해석에서는 오히려 1차원 압밀에 의한 간편 계산법보다 압밀촉진효과가 작게 나타났다. 이러한 이유로 2차원 압밀해석시 무처리 지반의 침하량과 Sand Drain적용지반의 침하량의 차이가 거의 없었던 것으로 판단된다.

이런 점은 재하성토폭이 점성토층 두께에 비해 작고 성토단부의 전단변형에 의한 영향이 현저한 경우에는 설계에 많이 사용되는 1차원 압밀의 간편계산법만으로는 Sand Drain의 침하촉진효과를 정확하게 사전평가할 수 없다는 것을 나타낸다.

6. 맺음말

본 검토에서는 설계실무에서 체험한 1차원 압밀의 간편 계산법과 다차원 압밀해석에 의한 2차원 유한요소법 해석의 결과를 바탕으로 Sand Drain의 유효성평가에 관한 고찰결과를 소개하였다. 그 결과, 본 검토대상 지반과 같이 압밀계수가 큰 지반조건인 경우는 침하촉진을 목적으로 한 Sand Drain의 적용효과는 크게 기대할 수 없지만, 강도 증가를 목적으로 하는 경우는 약간의 효과를 기대할 수 있는 점을 명확하게 하였다. 또한 Sand Drain의 침하촉진효과를 평가하는 경우의 침하거동은 실제 현장환경에서는 전단변형을 동반한 수직방향 변형이 침하량으로 추가되는 점으로부터 이와 같은 전단변형이 발생하는 재하성토폭이

작은 조건에서는 Sand Drain에 의한 침하촉진효과는 기대할 수 없는 것으로 판명되었다. 이러한 거동에 대해서는 간편하게 설계실무에서 사용되는 1차원 압밀의 관용계산법에서는 예측할 수 없는 점이 확인되었다. 따라서 설계검토단계에서 Sand Drain공법의 적용을 고려하는 경우는 압밀계수와 재하성토폭의 크기를 고려하여 다차원압밀해석에 의한 상세검토를 수행하고 그 개량효과를 확인할 필요가 있다.

마지막으로 이러한 설계 및 검토에 있어서 기술자들이 고려해야 하며, 본 검토를 통해 습득한 사항에 대해 정리하면 다음과 같다.

- 1) 원지반의 압밀계수가 큰 경우는 Sand Drain에 의한 침하촉진효과는 기대할 수 없다.
- 2) 재하성토폭이 작은 조건에서는 Sand Drain에 의한 압밀촉진효과는 기대할 수 없다.
- 3) 단, 상기 1), 2)에서도 과잉간극수압의 소산에 따른 강도증가에 대해서는 효과를 기대할 수 있는 경우도 있다.
- 4) 상기 1), 2)의 상황에 대해서는 다차원 압밀해석으로 유효성을 확인할 필요가 있다.

참고문헌

1. 吉国洋(1979), パーチカルDrain工法の設計と施工管理, 技報堂出版, pp49-58.
2. Sekiguchi, H. and Ohta, H.(1977), Induced anisotropy and time dependency in clays, Specialty Session 9, 9th ICSMFE, pp.229-238.
3. 地盤工学会編(2002), 地盤の變形 1 -基礎理論から応用まで-, 地盤工学会, p77.
4. 地盤工学会編(2002), 地盤改良効果の予測と実際, 地盤工学会, p97.