

식생에 의한 영향으로 건물의 침하에 대해 종합적인 분석을 실시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 해외발생사례

국내의 경우 기상이변과 증발산 작용의 영향으로 인한 얇은기초를 가진 구조물 등의 피해에 대하여 앞서 언급한바와 같이 보고된바 없는 실정이다. 그러나 유럽 등의 경우에는 이와 같은 피해사례가 보고된바 있어 간략히 소개하도록 하겠다.

폴란드에서 1964년에 길이 62m, 폭 10m로 건설되어진 학교는 그림 1과 같은 지반에 기초를 시공하여 건설되어졌다. 이 학교에 처음으로 침하가 발생한 시기는 1971~1972년으로 100년 평균강우량 520mm인 이 지역에서 450mm의 강우량이 내린 시기이고 또한, 학교의 12m 주위에 포플러 나무들이 무성히 자라고 있는 시점이었다. 이 기간 이후에 침하가 크게 발생한 시기는 기상이변으로 인한 건조시기로 1975년 480mm, 1982~1984년까지 327mm, 440mm, 500mm, 그리고 1989년에 267mm의 강우량이 발생한 시기였다.

이 학교에서 기상이변과 증발산 작용으로 발생한 침하를 살펴보면 1975년에 그림 1에서 A로 표시된 Front Wall에서는 1975년에는 50~70mm의 침하가 발생되었고 1995년에는 120~150mm의 침하가 발생하였다. 그림 1에서 B로 표시된 Inside Wall에서는 1975년에 40mm의 침하가 발생하였고 1995년에는 80mm의 침하가 발생하였다. 그리고 침하로 인하여 학교 건물인 Front Wall과 Inside Wall에 균열이

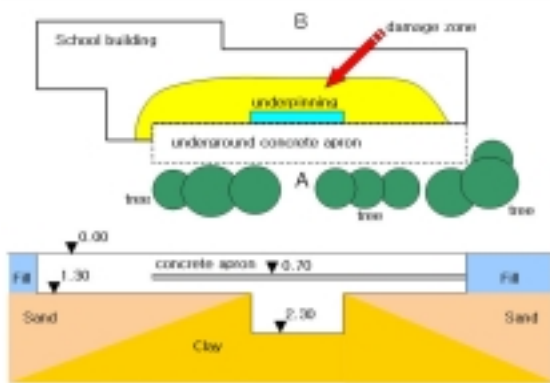


그림 1 발생사례 (school building)

발생하였다. 여기서 발생한 기초의 부등침하 및 건물 균열의 원인은 점토지반에서 건물에 인접해 있는 나무에 의해 발생된다고 밝혀졌으며 그 이유는 기상이변으로 인한 건조시기에 나무로 인한 증발산량의 증가로 지반이 건조되어 체적변화를 가져왔기 때문이다.

침하와 균열의 원인이 되는 학교주위의 나무를 제거한 후 건물에 나타난 균열을 시간의 경과에 따라 살펴본 결과 최대 15mm로 발생한 균열이 1996년에 비해 2000년의 경우 최대 3.5mm 감소하여 나타난 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 건물주위의 식생은 얇은기초를 가진 구조물에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

2.2 침하에 대한 기본 이론

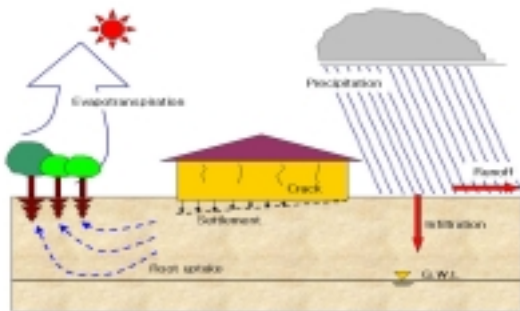


그림 2 얇은기초 침하의 기본 개념도

일반적으로 강우 및 증발산에 의하여 지반의 함수비는 변화하게 되고 나무뿌리의 경우 계절적 영향을 받아 얇은기초 아래에서 건조를 발생시키고 이로 인하여 지반은 체적변화를 일으킨다. 지반의 체적변화는 얇은기초로 구성되어진 빌딩 및 도로에 침하 및 균열을 발생시키며 그림 2는 증발산 작용으로 인한 얇은기초에서 발생하는 침하를 도시화하여 나타낸 것이다.

지반에서 변위를 발생시키는 가장 주된 요인은 간극수압의 소산이라고 말할 수 있다. 이는 지반내에서 유

체와 고체의 상호작용에 의해 발생하는 것으로 간극수압의 변화에 따른 유효응력의 변화와 간극수압 변화에 의한 역학적인 체적변화로 대표되어진다. 그러나, 이러한 유효응력 해석은 포화토에서 적용하는 것으로 대부분의 자연지반과 성토지반은 불포화상태 또는 부분포화의 상태로 존재하므로 포화토와는 다른 거동을 나타내므로 불포화지반 해석시 유효응력 해석은 적합하지 않다고 할 수 있다. 불포화토는 모세관현상, 삼투압 등에 의해 물을 흡수하려는 힘을 유발하여 지반에 대하여 체적변화를 일으키고 지금까지 연구된 대부분의 체적변화 예측의 방법은 토양 흡수력(soil suction)측정 또는 일차원 압밀 시험에 기초를 두고 있다. 본 연구에서 다루고자 하는 기상이변과 식생의 증발산의 영향으로 발생하는 얇은기초의 침하에 대한 기본적 해석방법은 불포화토 거동에서 큰 영향을 미치는 지반내의 물의 흐름을 유한차분법을 적용하여 지반의 역학적 해석을 수행하고, 지반의 변위를 간극수압의 증가와 시간의 증가에 대한 침투에 따라서 변위를 산정하는 것이다. 지반내의 물의 흐름은 Darcy's 법칙을 따른다고 가정되어진다.

2.3 증발산량 산정

식생의 뿌리는 지반에서 넓게 분포하여 수분을 빨아들인다. 이러한 현상은 지반의 함수비를 변화시키고 최종적으로 지반의 체적변화에 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 증발산 영향을 초기조건으로 주어 해석을 실시하였고 증발산량 산정은 아래와 같이 이루어졌다. 증발산이란 '식물이 필요로 하는 토양수분이 부족하지 않은 경우, 발생하는 수분의 감소'라 정의된다(Thornthwaite, 1955). 증발산량을 계산하는 방법은 잠재증발산을 계산한 후 증발가능한 수분의 양과 식생군의 종류에 따른 계수를 고려하게 되고 식 (1)의 증발산 산정식으로 계산되어진다.

$$E_{actual} = K_{co} \cdot ET_0 \quad (1)$$

여기서, K_{co} =작물계수(Crop Coefficient), ET_0 =잠재증발산

ET_0 (잠재증발산)을 산정하는 방법은 지금까지 많은 것이 제안되었으나 본 연구에서는 세계적으로 검증되고 적은 자료를 활용하여 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있는 Penman-Monteith(1981)을 사용하였다. Penman-Monteith(1981)은 복사량과 바람 및 습도의 두 가지 요소로 구성되어져있다.

$$ET_o = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n + f(u) \cdot (e_a) - (e_d) \right] \quad (2)$$

여기서, ET_o = 잠재증발산량 (mm/day)

Δ = 포화증기압 변화율 (mbar/°C)

γ = 습윤상수 (mbar/°C)

R_n = 상응 증발산의 Net 복사량 (mm/day)

$f(u)$ = 바람관련 함수

$(e_a - e_d)$ = 평균기온 포화증기압과 실제 평균대기증기압과의 차 (mbar)

c = 주간 및 야간의 기상상태의 차이에 대한 영향을 보정하는 조정인수

3. 기상이변과 증발산을 고려한 지반의 해석

3.1 해석 조건

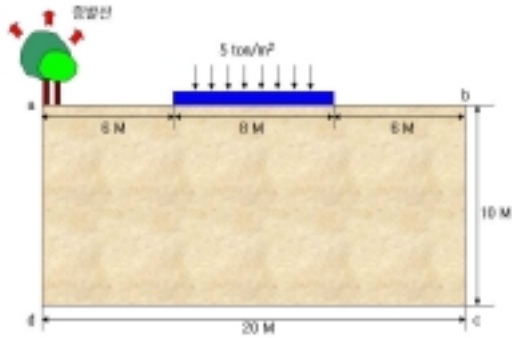
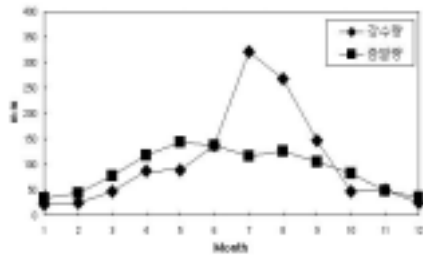


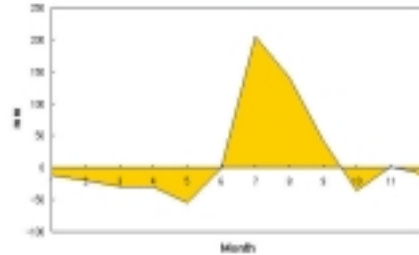
그림 3 해석단면

기상이변 및 식생의 증발산에 의한 얇은 기초의 침하에 대한 영향을 알아보기 위하여 그림 3과 같은 조건에서의 기초의 거동에 대하여 해석을 실시하였다. 경계조건으로 해석단면의 cd에서는 수평 및 수직방향을 고정시켰으며 증발산의 영향을 고려하기 위하여 a점에서 증발산이 발생시키도록 하였다.

그림 4는 서울-경기지방의 월별 강수량 및 증발량의 분포의 평균값으로 이는 앞에 제시한 식 (2)에 의하여 산정되어진 것이다(기상연보, 1972~2002). 그림 4에서 보는 바와 같이 우리나라 기후의 특징은 6월과 9월 사이에 집중적인 강수가 발생한다는 것을 나타내고 있다.



(a) 월별 강수량-증발량 분포



(b) 월별 강수량과 증발량 차

그림 4 서울-경기지방의 강수량과 증발량

결과적으로 우리나라의 경우 증발량이 강수량보다 큰 일수가 더 많다는 것을 의미하고 이것은 증발량으로 인한 지반의 건조가 크게 나타날 수 있는 조건이 된다는 것이다. 또한 지반에 식생이 많이 분포하는 경우에는 식생으로 인한 증발산량의 증가로 인하여 지반의 건조가 더욱 심하게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 지반의 조건 및 증발산량에 따른 얇은기초 침하의 거동에 대하여 해석을 실시하였으며 해석에 적용한 지반 물성치는 표 1과 같다. 기상이변과 증발산량에 대한 영향을 고려하기 위하여 식(2)로 산정되어진 서울-경기지방의 증발량과 강수량을 고려하여 Case A, Case B 및 Case C로 구분하여 시간의 경과에 따른 지반의 거동을 살펴보았다. 아래 표 2는 기상이변과 증발산량을 고려한 각각의 Case를 나타내고 있다.

표 1 지반 물성치

지반조건	단위중량 (t/m ³)	내부마찰각 (°)	점착력 (t/m ²)	투수계수 (cm/sec)	간극비	포화송비	탄성계수 (kg/cm ²)
Clayey silt	1.65	10°	3.0	5.0×10 ⁻⁹	0.55	0.4	60

표 2 Case별 조건

Case	증발산 조건	적용 증발산량 (mm/month)
Case A	강수량, 증발산량(단일식생)을 고려	41.34
Case B	증발산량 고려(단일 식생), 강수량은 고려하지 않음(기상이변)	88.86
Case C	증발산량 고려(다수 식생), 강수량은 고려하지 않음(기상이변)	177.72

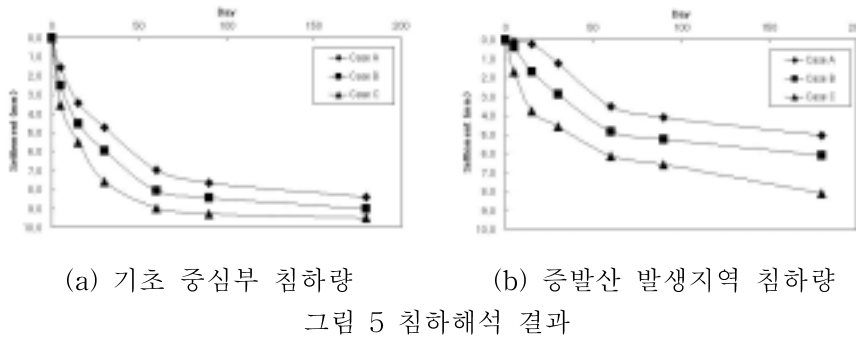
여기서 증발산량은 일반적으로 볼 수 있는 침엽수(Conifer Tree)의 작물계수(K_{co})를 고려하여 식 (1)을 이용하여 산정하였다. 여기서, 적용되어진 작물계수(K_{co})는 FAO(Food and Agriculture Organization; 국제 식량 농업기구)에서 제시한 값을 사용하였다. 또한 기준이 되는 증발량은 일년 평균

증발량(88.86mm/month)을 기준으로 산정하였으며 Case A에 적용되어진 강우량은 3월의 평균 강우량(47.52mm/month)을 사용하였다.

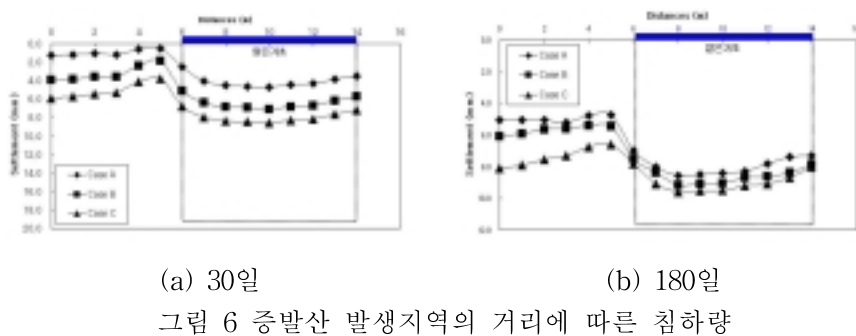
3.2 얇은기초 침하의 해석 결과

해석대상 지반에 대한 기상이변과 증발산의 영향으로 인한 침하의 해석결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a)는 기초 중심부의 침하결과를 나타낸 것이고 기초의 침하 양상은 강우량 및 증발산을 고려한 Case A의 경우 증발산을 고려한 Case B와 Case C에 비하여 침하가 적게 나타나는 것을 알 수 있었다. 증발산량을 달리 적용한 Case B와 Case C의 경우 다수식생을 적용한 Case C는 단일식생을 적용한 Case B에 비해 기상이변 기간이 최대 180일 경우 4.9%, Case A에 비해 12.9%의 침하가 더 발생하는 것으로 나타났다. 기초의 침하는 기상이변 기간을 기준으로 볼 때 시간이 늘어남에 따라 지속적으로 증가하는 양상을 보여주고 있다.

증발산이 발생하는 지역의 경우 침하 결과는 그림 5(b)에 나타나 있고, 다수식생을 고려한 Case C의 경우 Case A와 Case B에 비하여 크게 침하하는 것으로 나타났으며 180일의 경우 Case C는 Case A에 비해 59.8%, Case B에 비하여 13.3% 정도 크게 침하가 발생하였다. 증발산 발생지역 또한 기상이변 기간이 늘어남에 따라 지속적으로 증가하는 양상을 보여주고 있고 얇은기초에 비하여 기상이변으로 인한 증발산의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.



증발산 발생지역으로부터 거리에 따른 지반의 침하량은 그림 6과 같고 기상이변 기간을 30일 및 180일로 가정한 경우 얇은기초의 침하결과를 나타내고 있다.



기상이변 기간에 따른 그림 6(a) 및 6(b)의 경우 동일하게 나타나는 경향은 기초의 중심부를 기준으로 볼 때 얇은기초에서 발생한 침하가 시간의 경과에 따라 증발산 발생지역과 가까운 쪽에서 크게 나타난다는 것이다. 이 결과는 얇은기초에 부등침하를 발생시킬 수 있다는 것을 나타낸다고 할 수 있다. 또한, 증발산의 영향에 따른 얇은기초에서의 부등침하량을 비교하기 위하여 증발산 발생위치로부터 동일한 거리에 있는 얇은기초의 침하량을 시간의 경과에 따라 비교하여 표 3에 명시하였다. 표 3의 결과를 보면 얇은기초 시공 후 30일의 기간까지는 얇은기초에 작용하는 하중으로 인하여 기초 중심부에서

의 침하가 가장 크게 나타나고 있고 식생의 증발산 발생지역과 가까운 곳에서 침하가 크게 나타나고 있으며 각 Case의 경우 동일하다. 그러나 기상이변 기간을 180일로 가정하여 해석한 결과는 얇은기초의 중심부에서 제일 큰 침하를 나타내지 않고 증발산 발생지역과 근접한 얇은기초 부위에서 제일 큰 침하가 발생하였다. 이는 각 Case의 경우 동일하게 나타났으며 증발산량이 제일 큰 Case C의 경우 가장 큰 차이인 1.58mm의 부등침하를 보이고 있다.

표 3. 거리에 따른 얇은기초 침하량

단위: mm

기간 \ 거리	8M	10M(기초중심)	12M	14M	
30일	Case A	4.51	4.74	4.35	3.52
	Case B	5.65	5.94	5.64	4.92
	Case C	7.38	7.60	7.35	6.58
180일	Case A	8.52	8.45	7.80	7.31
	Case B	9.13	9.04	8.60	7.86
	Case C	9.59	9.47	9.09	8.01

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 지반에서 기상이변과 식생의 증발산 작용이 얇은기초에 미치는 영향에 대하여 증발산량의 변화에 따라 해석을 실시하여 비교하였고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 기상이변으로 인한 강우량 감소시 얇은기초의 주위에서 발생하는 식생에 의한 증발산의 영향으로 얇은기초는 일반적인 강우량이 발생할 경우 보다 침하가 크게 나타났으며, 얇은기초 주위의 식생의 범위에 따라 식생이 많은 경우에 보다 큰 침하가 발생한다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 또한, 다수식생을 고려한 Case C의 경우 기상이변 기간이 최대 180일 경우 단일식생을 적용한 Case B보다 4.9%의 침하가 더 발생하는 것으로 나타났으며, 강우량을 적용한 Case A와 비교하여 보면 12.9%의 침하가 더 발생하는 것으로 나타났다. 기초의 침하는 기상이변 기간이 길수록 더욱 증가한다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 증발산 발생지역이 얇은기초 주위에 존재하는 경우 기상이변과 증발산의 영향으로 얇은기초에 부등침하를 발생시킬 수 있으며, 기상이변 즉 건조한 기후가 오랜 기간동안 반복적으로 나타날 경우에는 기초의 부등침하를 발생시킴으로서 구조물에 피해를 발생시킬 수 있다고 판단되어진다.
- (4) 본 연구는 지반조건, 강우량 및 증발산량 등의 제한적인 조건에서 기상이변과 증발산의 영향으로 인한 얇은기초의 침하에 대하여 해석을 실시한 것으로 실제적으로 현존하는 다양한 조건을 충족시키기 위해서는 보다 많은 경우에 대하여 실질적인 계측 및 해석을 하여야 할 것으로 판단되어진다.

참고문헌

1. Biddle, Giles. (1998), "Tree Root Damage to Buildings", *Expansion Clay Soils and Vegetation Influence on shallow Foundations*, ASCE, pp.1~23.
2. Fredlund, D.G and Hung, V.Q. (2000), "Prediction of Volume Change in an Expansion Soil as a Result of Vegetation and Environmental Changes", *Expansion Clay Soils and Vegetation Influence on shallow Foundations*, ASCE, pp.24~43.
3. Fredlund, D.G and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons, New York
4. Mills, K.G. (2000), "A numerical model of ground moisture variations with active vegetation", *Proc of Asian. Conf. on Unsaturated Soils*. Singapore, pp.237~242.
5. Zawalski, A. and Woziwodzki, Z. (2002), "Chronic damage condition of a building founded on expansion soil", *Proc of 3rd Inter. Conf. on Unsaturated Soils*. Brazil. Vol.2, pp.871~876.