

## 무안 교촌리주거지역 지반침하 안정성 분석

한공창<sup>1)\*</sup>, 천대성<sup>1)</sup>, 류동우<sup>1)</sup>, 박삼규<sup>1)</sup>

### Analysis of Ground Subsidence on Gyochoon Residential Region of Muan City

Kong-chang Han, Dae-sung Cheon, Dong-woo Ryu and Sam-gyu Park

**Abstract** The analysis of ground subsidence stability was conducted for the residential area located on the limestone corrosion zone. For the investigation of the cavity distribution in limestone region, various geophysical investigations such as electroresistivity tomography, electromagnetic prospecting are carried out. Geotechnical field tests with drilling are also carried out for the evaluation of the ground characteristics. Based upon their results, numerical modeling is performed for the simulation and prediction of the ground subsidence with the conditions of cavity geometry and groundwater level. The main factor to cause the ground subsidence is estimated as the draw down of the groundwater level below soil overburden, which disturbs the mechanical equilibrium of ground and drives washing away the overburden soil through the cavity and surface subsidence. It seemed that it is essential to maintain the groundwater level continuously above the shallow cavity for the prevention of the ground subsidence on the limestone corrosion zone.

**Key words** Ground subsidence, Limestone, Cavity, Groundwater level

**초 록** 석회암 용식지역 상부에 위치한 주거지역에 대하여 지반침하 안정성을 분석하였다. 석회암지역에 분포한 공동을 조사하기 위하여 전기비저항 토모그래피, 전자탐사를 실시하였으며 지반특성을 규명하기 위하여 시추조사를 포함한 지반공학적인 조사를 실시하였다. 조사 결과를 바탕으로 공동의 형상과 지하수 조건에 대하여 지반침하 분석 및 예측을 위한 수치해석을 실시하였다. 지반침하를 일으키는 주요인은 지하수위의 하강으로 예측되었는데 이는 표토 하부의 지하수위가 감소함으로써 지반의 역학적 평형상태가 교란되고 공동이나 지표면의 침하가 발생해 표토 토양층이 유실되기 때문이다. 석회암 용식지역에서의 지반침하를 방지하기 위하여서는 천부 공동 상부의 지하수위를 지속적으로 유지시키는 것이 필수불가결한 것으로 보인다.

**핵심어** 지반침하, 석회암, 공동, 지하수면

## 1. 서 론

표토층 하부의 석회암이 지하수의 작용으로 용식되어 형성된 지하공동이 분포되어 있는 지역에서 지반침하, 건물 균열 등의 심각한 지반안전 문제가 대두되고 있는 전라남도 무안군 무안을 교촌리지역을 대상으로 지반침하 안정성 분석을 실시하였다.

조사지역의 지반침하 안정성 분석을 위해 석회암과 화강암의 분포상황, 석회암 내부에 발달하는 공동의 분포상황 및 그에 수반되는 연약대의 분포상황을 정확하

게 파악하여야 한다. 이에 대한 정확한 정보의 획득을 위해서 시추조사는 물론 정밀 물리탐사를 수행하여 지반의 상태를 파악하였으며, 또한 침하의 원인 규명 및 안정성 평가를 위해 필요한 지반의 역학적 특성을 파악하기 위하여 암반공학적인 조사를 실시하였다.

시추 및 물리탐사를 통한 공동 분포상황 조사와 암반공학적인 특성조사를 종합하여 지반 안정성 분석과 향후 침하의 가능성 등을 예측하기 위하여 지반안정성 수치해석을 실시하였다. 수치해석기법은 연속체해석 모델인 FLAC을 사용하였다. 공동의 형태 및 유형을 설정하고 지반침하의 주요인으로 평가되는 지하수 개발로 인한 지하수위 강하와 연계하여 조건 별로 지반침하 발생 양상을 해석함으로써 공동 유형 및 지하수위 조건에 대한 지반침하 안정성 여부를 평가하였다.

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원

\* 교신저자 : hankc@kigam.re.kr

접수일 : 2007년 2월 6일

심사 완료일 : 2007년 2월 23일

## 2. 조사개요

전라남도 무안군 무안읍 일대는 수차례 지반침하가 발생하여 3차에 걸쳐 시추조사, 물리탐사 및 암반공학적인 정밀조사가 수행되었다(농업기반공사, 2001, 2002, 2003). 최근 교촌리지역에 침하가 발생하여 기존에 수행되었던 종합적인 조사를 기반으로 무안종합고교, 무안북중학교, 공공도서관 부근을 중심으로 지반조사와 지반안정성 분석이 실시되었다. 교촌리지역에 대한 조사는 이전에 수행되었던 연구와 같이 지하구조를 밝히기 위한 물리탐사와 지반의 공학적인 특성을 밝히기 위한 암반공학적 특성조사로 나누어 수행되었다.

과거 2000년부터 2004년 사이에 수행되었던 조사결과에 따르면, 무안지역에서 발생하였던 지반침하의 근본적인 원인은 조사지역 하부에 발달하고 있는 석회암 공동임이 밝혀졌다. 또한 이 지역에 많은 피해가 발생하였던 근본적인 이유는 지질구조적으로는 광주단층과 이에 수반되는 파쇄대를 따라 유동하고 있는 지하수의 작용으로 석회암이 용식되어 형성된 지하공동이 조사지역을 포함하여 넓은 지역에 발달하고 있으며, 인위적으로는 인구증가 및 주거지역의 팽창에 따라 지하수 수요의 급증으로 지하수의 과다 양수로 인한 지하수위 강하 등으로 추정되었다. 이러한 기존 조사 결과에 따라 이번 조사지역에 대해서도 석회암과 화강암의 분포상황, 석회암 내부에 발달하는 공동의 분포상황을 정확하게 파악할 필요가 있으며, 이에 대한 정확한 정보의 획득을 위해서 시추조사와 정밀 물리탐사를 수행하여 지하의 고해상도 영상을 획득하여야 한다. 또한 침하 원인 규명을 위한 지반평가를 위해서는 지반의 암반공학적인 계층이 대단히 중요하며, 향후 침하의 가능성, 그 정도 등을 예측하고 대책을 수립하기 위해서는 조사결과를 토대로 하여 지반안정성 분석이 수행되어야 한다. 본 보고에서는 지반침하로 인해 균열이 심하게 발생된 민가를 중심으로 암반공학적 계층을 수행하여 지반의 안정성 분석을 수행하였다. 이를 위하여 시추자료분석 및 암석물성시험, 공내재하시험 및 수압파쇄시험을 수행하였다. 지반안정성 수치해석은 위의 암반공학적 계층에 의한 암반물성을 토대로 하여 지하수위의 변동에 의한 영향을 고려하였다. 그림 1은 교촌리지역에서 수행한 전기비저항 탐사 및 암반공학조사에 사용된 시추공 위치와 조사대상지역을 도시한 것이다.

## 3. 무안 교촌리지역의 지반침하유형검토

석회암과 같은 탄산염류 암석은 약산성의 물에 의해 발생하는 용해로 인해 지반의 공동이 형성된다. 대기

중이나 지반내부에 침투된 물은 공기나 토양으로부터 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 용해시켜 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 형태로 변한다. 이 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>가 토양에 스며들게 되면 석회암(CaCO<sub>3</sub>)이나 돌로마이트(CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)와 반응하게 된다. 탄산염 암석 내에 존재하는 공동이나 공극은 Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup> 그리고 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 이온에 의해 용해됨으로써 형성된다. 지하수가 용해된 광물로 과포화될 때 더 이상의 용해는 발생하지 않고 물로부터 칼슘(Ca)과 마그네슘(Mg)이 침전된다. 이 반응은 완전 가역적이며, 지하수가 불포화되면 이 침전물들은 다시 용해된다. 이러한 지구화학적 상호반응은 물의 순환에 의해 부분적으로 조절된다.

일반적으로 석회암 지대에서는 불규칙한 형태를 보이는 pinnacled rockhead 형태가 발달하게 된다. pinnacle의 발달심도 차는 수 미터에서부터 수십 미터까지 나타난다. 용해작용이 오랜 동안 진행된 경우 공동, 동굴이 형성되어 상부지반의 침하위험성을 나타내게 된다. 석회암 상부지반의 침하는 석회암 자체의 붕괴에 의한 경우는 드문 편이며, 상부 흙이 점진적으로 하부 공동으로 이동함에 따른 발생이 다수를 차지하고 있다. 이러한 석회공동의 분포는 지질구조, 상부지반의 종류, 지하수 특성에 의해 좌우된다(Goodman, 1993).

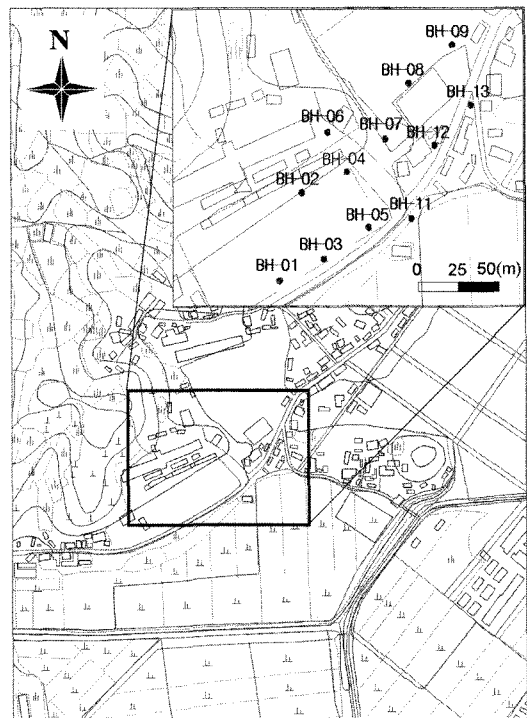


그림 1. 교촌리지역에서 수행한 물리탐사 및 암반공학조사에 사용된 조사 시추공 위치도

### 3.1 지질 구조적 측면

지질조사자료에 의하면 팽주 단층대가 조사대상지역을 통과하고 있으며, 경사를 가진 단층파쇄대가 존재하는 것으로 파악되었다. 또한 시추코어조사에 의하면 많은 절리 및 파쇄대가 발달해 있고, 파쇄대에 점토가 피복되어 있는 것으로 나타났다. 이들을 종합해 볼 때, 교촌리지역은 좁은 폭을 가진 소규모의 석회암 공동들이 존재할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

### 3.2 상부지반의 종류

상부지반의 경우 시추조사에 따르면 지표하부로부터 4~10 m 내의 두께의 토사층이 존재하며, 점토질이 많은 점성토의 특성을 보이는 것이 많았다. 일반적으로 상부지반이 사질토인 경우 하부 공동이 점차 붕락됨에 따라 그 영향이 지표까지 전달되어 점성토에 비해 상대적으로 완만하고 서서히 침하가 일어나는 경향을 보인다. 반면, 점성토의 경우는 사질토에 비해 그 자체의 역학적 지지력이 존재하여 하부 공동의 붕락 초기에는 그 영향이 지표까지 바로 나타나지 않다가 공동과 점성토층 하부의 붕락이 일정부분 진행되고 나서 지표에서 함몰형의 지표 붕락이 발생한다. 이러한 관점에 비추어 교촌리지역은 작은 싱크홀 형태의 지반함몰이 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

### 3.3 지하수 개발

지반침하는 기본적으로 대상지반에서의 역학적 평형상태가 깨짐으로써 발생한다. 이러한 지반의 역학적 평형상태를 깨뜨리는 요인으로는 인위적인 터널 굴착이나 상재건물의 건설, 지하수위의 변동 등을 들 수 있다. 본 교촌리지역은 인위적인 터널 굴착이나 상재건물이 건설되는 것과는 무관하며, 기본적으로 유량이 풍부하고 지질구조상 단층대, 절리 등의 존재로 지하수유동성이

클 것으로 추정되었다. 따라서 기존의 역학적 평형상태에 있는 지반에서 지하수위의 강하에 따라 천부의 작은 석회공동이 형성되거나 장기적으로 상부 토사층이 하부의 석회공동 내로 유입되거나 유실되어 소규모적인 지반함몰이 발생할 가능성이 있는 것으로 파악되었다.

하부 지반 내의 공동의 존재하는 경우 지하수위 강하와 이로 인한 지반침하 양상은 그림 2와 같이 설명된다.

## 4. 지반안정성 해석

지반안정성 해석은 시추자료 및 각종 암반공학적 계측에 의한 암반공학적 물성을 토대로 하여 여러 개의 해석모델을 구성하였다. 상재건물을 고려하고 지하수위의 변동에 의한 영향을 분석하여 지하수위 강하와 공동의 발생위치에 따른 지반침하정도의 변화를 알아보고자 FLAC 5.0을 사용하여 연속체해석을 수행하였다.

### 4.1 시추공 검증자료분석 및 지반분류

암반평가는 관심대상 지역의 안정성 평가를 위해 필수적인 공학적 입력 자료를 결정하고 산정하기 위한 중요한 공학적 작업 단계이다. 교촌리 지역에서 발생한 침하의 원인과 침하지반의 안정성을 검토하기 위해 시추공에서 실시한 검증자료를 토대로 심도별 지반 분류를 수행하였다. 평가단면은 침하현상으로 인해 붕괴된 토담가옥과 심각한 균열이 발생한 양옥집 그리고 공공시설물인 도서관을 가로지르는 단면을 평가단면으로 설정하였다. 따라서 이 평가단면의 공학적 입력 자료를 결정하기 위해 지층별 암반평가가 선행되어야 하며, 이를 위해 시추공 BH-09, 11, 12와 13공에 검증자료 및 토모그래피 단면 자료(BH11-12, BH12-13, BH13-09)를 분석하였다.

시추검증자료로부터 정성적으로 판단한 지반분류와

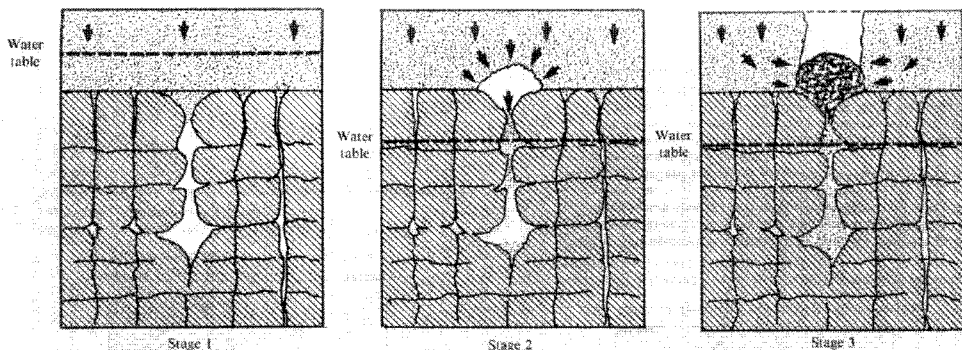


그림 2. 공동이 존재하는 경우 지하수위 변동에 따른 지반침하 유형

토모그래피 결과 단면을 비교한 결과, 전체적으로 낮은 전기비저항대를 보여주고 있다. 이는 풍화정도가 심하며 국부적으로 발달된 파쇄대와 충전된 점토층 등 지반 특성과 높은 지하수위로 인해서 고려할 수 있는 특성이라 할 수 있다. 이에 근거하여 전기비저항 값의 범위와 지반 특성을 비교하여 평가 단면의 지반 분류의 근거로 삼았다(표 1과 그림 3).

침하로 인한 피해가 확인된 건물들을 포함한 평가단면은 BH-12공과 인접하여 위치한다(그림 4 (a)). 해석 단면의 심도별 지반분포에 대한 정보를 제공할 수 있는 토모그래피 단면으로부터 안정성 평가를 위한 단면정보가 필요하다. 따라서 3차원 전기비저항 분포도를 재구성하기 위해, 전기비저항의 공간 분포를 대수정규 확률 집합체(lognormal random field)를 따른다는 가정 하에, 최대 엔트로피 추정자(maximum entropy estimator)를 이용하여 3차원 전기비저항 분포도를 재구성하였으며, 이로부터 평가단면의 전기비저항 분포를 작성하였다(그림 4 (b)).

4.2 해석단면 및 모델

해석단면은 침하현상으로 인해 붕괴된 토담집과 벽에 심각한 균열이 발생한 양옥집, 그리고 공공시설물인 도서관을 가로지르는 그림 5의 A-A'를 해석단면으로 사용하였다.

표 1. 전기비저항 및 RMR의 범위와 이에 따른 암반분류

지반 분류	전기비저항 분포	RMR
충적층 및 풍화토	$<20$	
풍 화 암	$20 < SR < 60$	$< 20$
연 암	$60 < SR < 120$	$20 < RMR < 40$
보 통 암	$130 <$	$40 < RMR < 60$

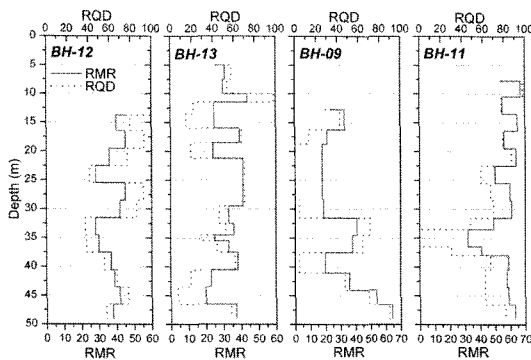
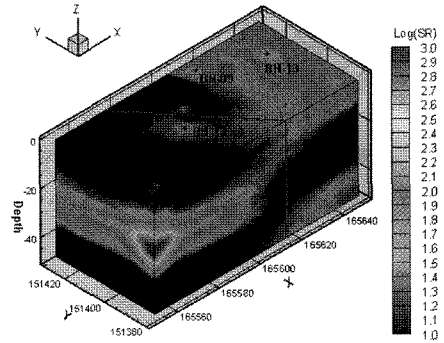
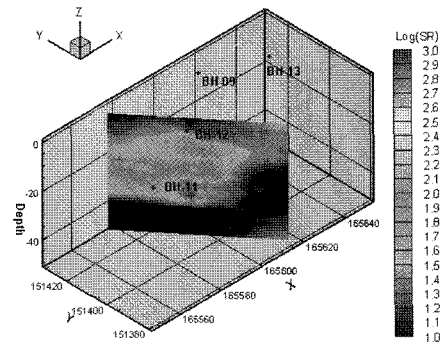


그림 3. 심도별 RQD 및 RMR 분포 (BH-12, 13, 09, 11)

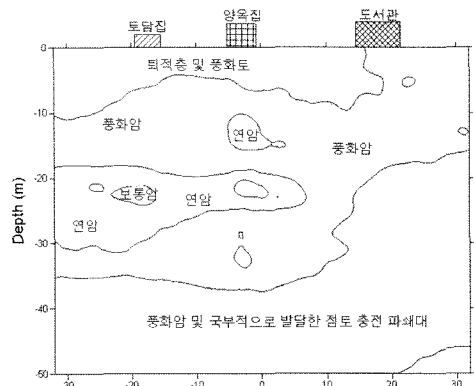
해석모델은 지층의 위치와 심도에 따라 달라지는 지질구조를 있는 그대로 모델화할 수 없지만, 시추 자료와 전기비저항 결과를 분석한 암반분류결과를 토대로 국부적인 지층을 가능한 그대로 모사하고자 하였다. 해석에 사용된 지층은 풍화토층, 연암층, 풍화암층으로 구분하였다(그림 6).



(a)



(b)



(c)

그림 4. 지반평가를 위한 정보: (a) 해석영역의 3차원 전기비저항 분포도, (b) 해석단면에서의 전기비저항 분포도, (c) 추정 지반 분포

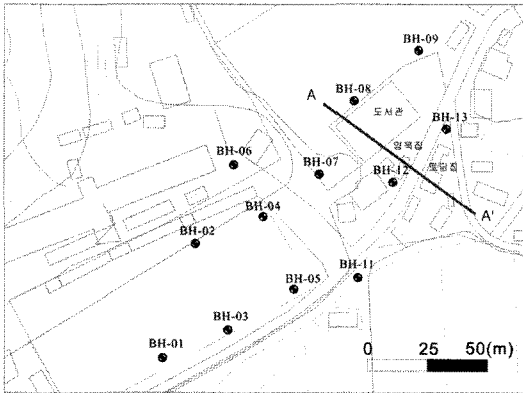


그림 5. 전산해석에 사용된 해석단면

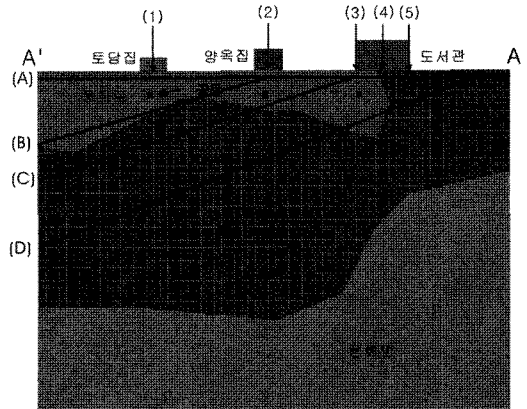


그림 6. 해석단면의 지층분포 및 지하수 조건(A)~(D): 지하수 위, (1)~(5): 수직변위 계측위치

표 2. 해석모델에 적용된 지층물성

지 층	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	변형률 (GPa)	포화승비	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)	인장강도 (kPa)
풍화토	1,800	0.01	0.30	24	50	0
연 압	2,700	5.62	0.16	30	1,850	80
풍화암	2,500	1.78	0.20	28	680	60

표 3. 지층별 포화단위중량

지 층	공극률	건조단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	포화단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )
풍화토	0.3	1,800	2,100
연암/풍화암	0.2	2,700	2,900

시추공에 따라 조금씩 차이는 있지만, 전반적으로 토사 및 풍화토층은 심도 5~15 m 부근에 위치하며, 지하수위는 1~2 m 심도에 위치하는 것으로 나타났다. 본 지역의 주된 기반암인 연암과 풍화암의 석회암층은 토사 및 풍화토층 하부에 존재하는 것으로 나타났으며, 연암층 하부에 풍화암층이 존재하는 것으로 나타났다.

교촌리지역의 시추조사에서 공동은 BH-04와 BH-12에서 관찰되었으나 기존 시추조사에 비해 명확하게 나타나지 않아 공동의 형태와 분포를 정확히 알 수 없었다. 그러나 기존 3차(농업기반공사, 2001, 2002 및 2003)에 걸쳐 수행한 연구결과에 따르면 석회암층 뿐만 아니라 풍화토층에서도 공동이 관찰되었으며, 이들은 지하수위가 높을 경우 점토로 충전된 상태를 유지하다가 양수 등에 의해 지하수위가 내려가면 공동 내에 충전되어 있던 점토가 지하수와 함께 이동하여 공동을 형성할 것으로 예상되었다. 따라서 본 해석에서는 지하수위가 강하게 되면 풍화토층에서도 국부적으로 공동이 생성되는 것으로 간주하였으며, 공동은 지반침하가 일어난 건

물의 하부에 사각형으로 설정하였다. 전산해석은 지하수위의 강하에 따라 지반침하에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하였다.

해석조건은 주변의 양수에 따라 지하수위의 강하를 -11, -16, -26 m로 나누어 수행하였으며(그림 6의 (B)~(D)), 그림 6의 (1)~(5)와 같이 주요 건물에서의 수직변위를 분석하였다. 초기조건을 구현하기 위하여 지하수위는 -1 m로 하였으며, 상재하중은 토담집의 경우 1.2 tonf/m<sup>2</sup>로, 양옥집과 도서관은 한 층당 1.5 tonf/m<sup>2</sup>으로 설정하였다.

4.3 압반물성 입력

해석대상은 상부의 풍화토층, 연암층, 풍화암층으로 구성되어 있으며, 물성은 공개재하시험과 기존의 연구결과(한국지질자원연구원, 2001~2004)를 근거하여, 표 2와 같은 값을 사용하였다.

지하수면 아래에 놓인 지층은 완전포화상태로 간주하여 표 3의 건조단위중량에 물의 중량을 더한 포화단위

중량을 적용한다. 지하수면이 하강했을 경우 새로운 지하수면 상부 지층의 수압은 소멸되나 물은 단기간 내에 이동하지 않으므로 전체 하중은 거의 변하지 않는다. 따라서 전산해석시 과거 지하수면 아래에 있던 지층에는 계속 포화단위중량을 적용하였다. 각 지층의 포화단위중량을 구하면 표 3과 같다(Hoek and Bray, 1981; Goodman, 1989). 또한 지하수의 단위중량은 점토를 포함하기 때문에 일반적인 물의 단위중량보다 높은 1300 kg/m<sup>3</sup>을 사용하였다.

BH-12 시추공을 대상으로 19~42.5 m 심도 범위에 대해 수압파쇄법을 이용하여 초기지압을 측정하였다. 측정한 5개 심도 결과에서 기존 균열의 영향을 많이 받은 37 m 및 지표에 아주 가까운 19 m 지점을 제외하면 전체적으로 측압계수는 2.0±0.5의 평균치로 평가되어 전산해석에서 K=2.0을 적용하였다.

#### 4.4 해석결과

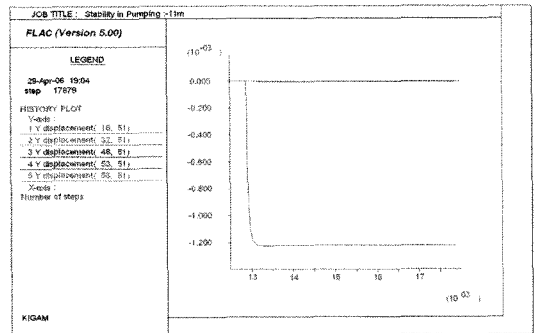
##### 가. 지하수위변화

지하수위의 강하나 상재하중의 변화는 지층에 작용하는 응력상태를 변화시키고 이에 따라 지표에서 지반침하가 발생할 수 있다. 지반침하의 발생여부 및 발생정도는 지표에서 발생된 수직변위를 분석함으로써 판단할 수 있으며, 본 해석에서는 토담집(그림 6 (1)), 양옥집(그림 6 (2)), 도서관(그림 6 (3)~(5))의 하부에서 발생하는 수직변위 양상을 알아보았다. 침하발생동안 해석대상지역에 새로운 건축물이 건설되지 않아 상재하중의 변화에 대한 해석은 수행하지 않고 지하수위의 변화에 대한 해석만 수행하였다. 지하수위는 최초 -1 m에서 양수가 진행됨에 따라 점차 -11, -16, -26 m로 감소시키면서 해석하였으며, 양수는 논밭이 위치한 남동이나 남서쪽 부근에서 발생하는 것으로 보아 해석단면에서의 지하수위는 경사를 갖도록 설정하였다.

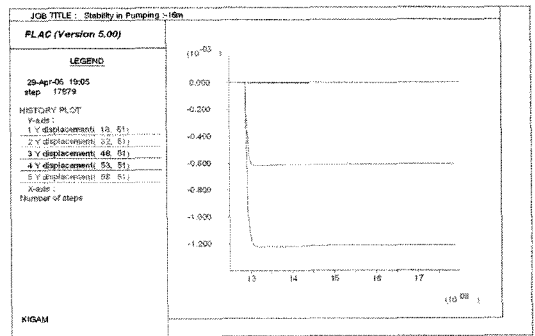
그림 7은 각 건물 하부에서 발생된 수직변위를 나타내며, 지하수위의 감소와 그에 따라 발생하는 공동의 존재여부와 위치에 따라 변화함을 볼 수 있다. (a)는 지하수위가 -11 m에 위치한 경우로서 지하수위가 그림 6의 (B)와 같이 형성됨에 따라 토담집하부의 풍화토층에 소규모 공동이 생성될 수 있으며 이때 발생한 수직변위는 약 1.2 mm 이내에서 수렴하는 것을 알 수 있다. (b)는 지하수위가 -16 m에 위치한 경우로서, 지하수위가 그림 6의 (C)와 같이 형성됨에 따라 토담집하부의 연암층과 양옥집에 추가적인 공동이 생성될 수 있으며, 이때 발생한 수직변위는 토담집의 경우 1.2 mm, 양옥집의 경우 0.6 mm 이내에서 수렴하는 것을 알 수 있다.

(c)는 지하수위가 -26 m에 위치한 경우로서, 토담집과 양옥집의 수직변위는 (b)의 결과와 같으나, 도서관의 경우 풍화토층의 상부에 위치한 그림 6.2.1의 (3)에서 약 0.18 mm 이내에서 수직변위가 수렴하고, 도서관의 다른 부분의 경우 수직변위는 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

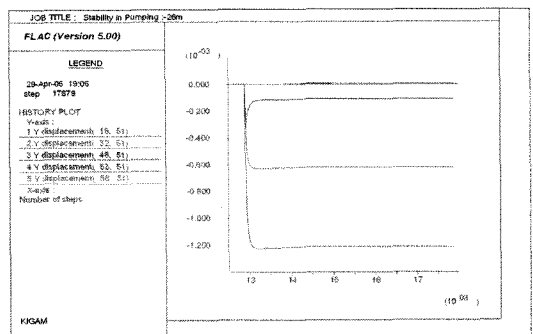
그림 8은 해석대상 전체에서 발생된 수직변위의 양상을 보여준다. 발생된 수직변위는 지하수위 하강에 의해 생성된 공동의 상부에서 집중적으로 발생하는 것을 알



(a) 지하수위가 -11 m인 경우

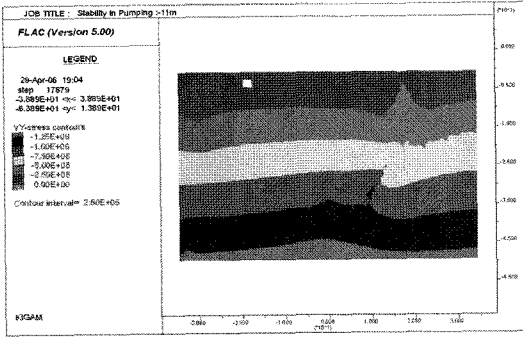


(b) 지하수위가 -16 m인 경우

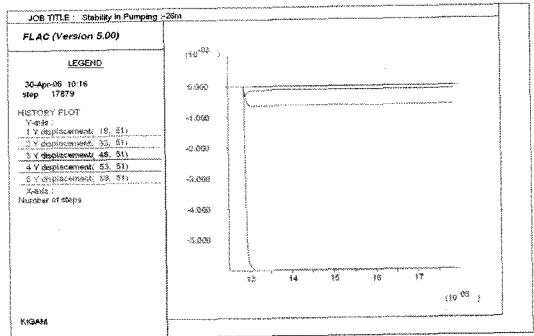


(c) 지하수위가 -26 m인 경우

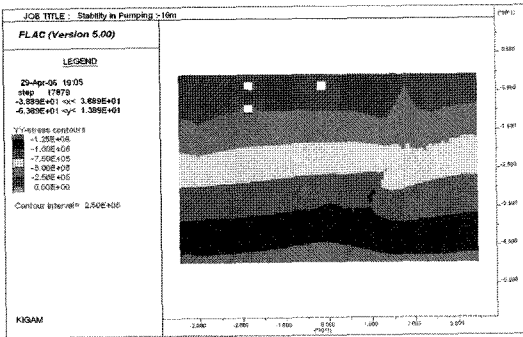
그림 7. 지하수위 강하에 따른 건물하부의 수직변위



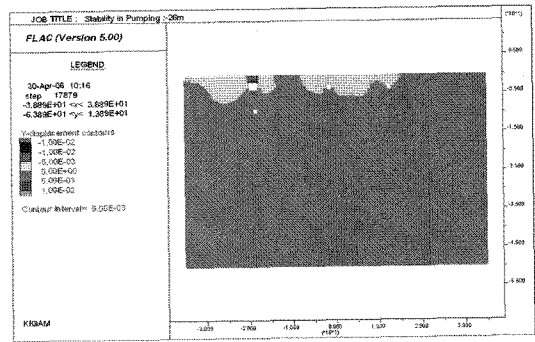
(a) 지하수위가 -11 m인 경우



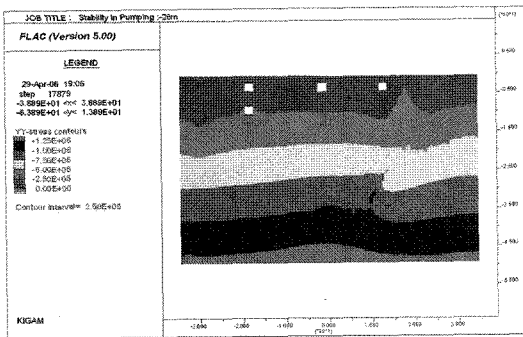
(a) 건물하부의 수직변위



(b) 지하수위가 -16 m인 경우



(b) 지층의 수직변위분포



(c) 지하수위가 -26 m인 경우

그림 8. 지하수위 강하에 따른 수직응력분포

수 있으며, 발생분포와 발생량은 풍화토층의 두께와 위치에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히 도서관의 경우 풍화토층과 연암층의 상부에 위치하여 토담집이나 양옥집의 하부에서와 같은 크기의 공동이 발생하더라도 상대적으로 작은 변위가 발생하는 것으로 나타났다.

수직변위의 발생은 생성된 공동의 심도와 관련이 있다. 토담집의 경우 지하수위가 -11 m, -16 m로 각각 하강함에 따라 -3 m와 -10 m에 공동이 생성된다. 그러나 -10 m 위치에 발생한 공동은 -3 m에 발생한 공동에 비

그림 9. 공동크기와 위치에 따른 수직변위 양상 (토담집하부 -3 m의 공동크기 2×2 m)

해 토담집의 발생변위에 거의 영향을 미치지 않았다. 또한 같은 깊이에서 공동이 발생하더라도 지층 및 상대적인 지하수위에 따라 수직변위의 발생양상이 다를 수 있다. 즉, 토담집, 양옥집, 도서관 모두 -3 m의 위치에 공동이 생성되더라도 지하수위가 가장 낮고 풍화토층이 두꺼운 토담집에서 상대적으로 많은 변위가 발생하였으며, 교촌리 지역에서 발생한 지반침하 현상과 잘 부합한다.

#### 나. 발생된 공동크기의 영향

공동의 크기에 따른 영향을 알아보기로 하자 그림 6의 공동의 크기를 변화시키면서 전산해석을 수행하였으며, 지하수위는 -26 m로 설정하였다. 그림 9는 토담집하부 -3 m 깊이의 공동의 크기가 2×2 m인 경우에서 관찰된 지표의 수직변위 및 지층의 수직분포현황을 나타낸다. 토담집하부에서 관찰된 최대수직변위는 6 mm로서 공동의 크기가 1×1 m에서 관찰된 1.2 mm보다 5배의 변위를 보이고 있다. 그러나 다른 건물하부의 변위는 큰 변화가 없었다. 지층의 수직변위분포는 공동상부에 집중적으로 발생하며, 공동의 크기가 증가하면 영향범위

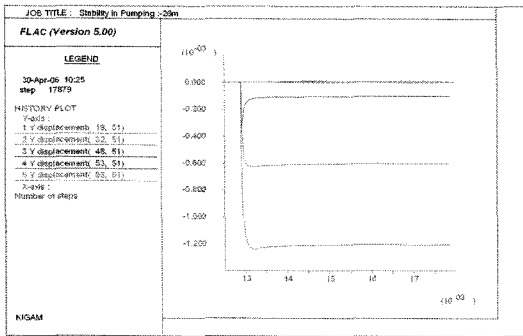


그림 10. 공동크기와 위치에 따른 수직변위양상 (토담집하부 -10 m의 공동크기 2×2 m)

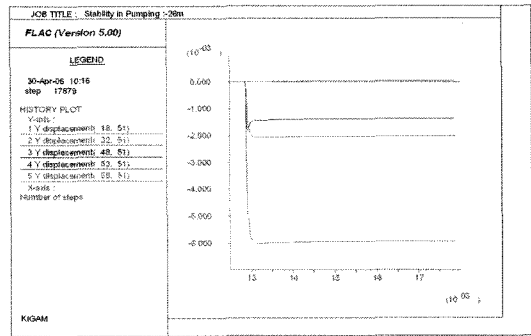


그림 11. 공동크기와 위치에 따른 수직변위 양상 (모든 공동크기 2×2 m)

역시 증가함을 보였다.

그림 10은 토담집하부의 -10 m 공동의 크기가 2×2 m인 경우에서 관찰된 지표의 수직변위를, 그림 11은 모든 공동의 크기를 2×2 m으로 변경한 후 관찰된 지표의 수직변위를 나타낸다. 그림 10에서 알 수 있듯이 토담집에서 관찰된 최대수직변위는 1.2 mm로서 공동의 크기가 1×1 m에서 관찰된 1.2 mm와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그림 11에서 토담집의 최대수직변위는 그림 9와 같이 6 mm로서 심부의 공동크기가 커지더라도 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 절대적인 공동의 크기보다 공동의 심도와 위치가 지표침하에 더 중요한 요소임을 알 수 있다.

우 새로운 공동의 발생으로 인해 지반침하의 발생가능성이 더욱 커짐을 알 수 있었다. 이는 점토질을 포함한 지하수가 이동하여 새롭게 공동을 형성할 뿐 아니라 지층의 유효수직응력이 감소하여 지하압반층의 지지력 약화가 직접 상재건물에 전달되기 때문이다. 반면 공동이 비교적 심부에 존재할 경우에는 천부에 비하여 그 영향정도가 작음을 알 수 있었다. 또한 천부에 위치한 공동의 크기의 변화는 심부에 위치한 공동크기의 변화보다 지표의 수직변위에 많은 영향을 주기 때문에 지표부근에 대한 정확한 공동분포 현황 및 조사가 매우 중요함을 알 수 있었다.

### 5. 결 론

무안읍 교촌리지역의 지반침하 안정성 분석을 위하여 기존에 수행되었던 종합적인 조사를 기반으로 무안종합고교, 무안북중학교, 공공도서관 부근을 중심으로 지반조사와 지반안정성 분석이 실시되었다. 교촌리지역에 대한 조사는 이전에 수행되었던 연구와 같이 지하구조를 밝히기 위한 물리탐사와 지반의 공학적인 특성을 밝히기 위한 암반공학 적 특성조사로 나누어 수행되었다. 시추조사 및 전기비저항 토모그래피의 결과를 바탕으로 지반침하가 발생된 지반에 대해 지층모델을 구성하고, 암반공학 적 조사로부터 얻어진 물성을 전산해석 입력자료로 이용하였다. 또한 지반침하의 주된 발생요인을 지하수개발에 따른 지하수위 강하로 판단하여 이와 관련하여 일련의 전산해석을 수행하였다.

전산해석결과로부터 공동이 천부에 존재할 경우에 지반침하의 우려가 높으며, 특히 지하수위가 강하하는 경

### 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원이 수행한 ‘교촌주거지 지반침하지역 물리탐사 및 암반공학 적 조사’ 과제에서 지원되었습니다.

### 참고문헌

1. 농업기반공사, 2001, 무안 성남 주거지 지반침하지역 물리탐사 및 암반공학 조사, 305p.
2. 농업기반공사, 2002, 무안 성남 주거지 지반침하지역 2차 물리탐사 및 암반공학 조사, 303p.
3. 농업기반공사, 2004, 무안 성남 주거지 지반침하지역 3차 물리탐사 및 암반공학 조사, 245p.
4. Goodman, R.E., 1989, Rock mechanics, 562p.
5. Goodman, R.E., 1993, Engineering geology: Rock in Engineering Construction, John Wiley & Sons, Inc., pp. 143-194.
6. Hoek, E. and Bray J.W., 1981, Rock slope engineering, 358p.



**한 공 창**

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1989년 Ecole des mines de Paris 지질공  
학과 공학석사  
1993년 Ecole des mines de Paris 지질공  
학과 공학박사

Tel: 042-868-3241  
E-mail: hankc@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구  
부 책임연구원

**천 대 성**

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학  
과 공학사  
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과  
공학석사  
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시  
스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3248  
E-mail: cds@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구  
부 선임연구원

**류 동 우**

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공  
학석사  
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스  
템 공학부 공학박사

Tel: 042-868-3099  
E-mail: dwryu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 선임연구원

**박 삼 규**

1988년 부산대학교 자연과학대학 지질  
학과 이학사  
1990년 부경대학교 대학원 응용지질학  
과 이학석사  
1996년 오사카대학 공학연구과 토목공  
학전공 공학박사

Tel: 042-868-3096  
E-mail: samgyu@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구  
부 선임연구원