

## 하부 대수층이 존재하는 연약지반상의 개착터널에 있어서 지하수 처리 사례 Ground water control in the open cut site on soft ground with aquifer

정재형<sup>1)</sup>, JaeHyeung Jeoung, 橋本正<sup>2)</sup>, Tadasu Hasimoto, 長屋淳一<sup>3)</sup>, Junichi Nagaya, 배규진<sup>4)</sup>, Gyu-Jin Bae

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup> Geo-Research Institute 소장, Manager, Geo-Research Institute, Japan

<sup>3)</sup> Geo-Research Institute 지반해석그룹 부장, Head Researcher, Geo-Analysis Group, Geo-Research Institute, Japan

<sup>4)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 연구위원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS :** In a case of an example in Korea, some areas of Yangsan near Busan which exist on soft ground with aquifer, showed us some difficulties of the preparing for housing site and earth structures. From these experiences, recently, the development and research of technology is getting increased, which minimize the influence to the environment from construction work, which is in an agreement with eco-friendly construction in terms of the reasonable processing of ground water. On this case study, one area of Japan that has many site on soft ground with aquifer, is introduced as the reasonable processing of ground water. The applications of the technology for ground water in Korea are discussed.

**Key words :** ground water, soft ground, aquifer, open cut, settlement

### 1. 서 론

연약 지반층에서의 토목구조물 설계와 시공에 있어서, 하부에 피압대수층이 존재하는 현장은 지반개량 및 현장시공에 세심한 주의를 필요로 한다. 설계의 정확성 및 시공의 편리성, 경제성만을 고려할수 없으며, 지하수의 처리 및 시공시의 안전성 또한 필연적으로 고려되어야 한다. 우리나라의 경우 부산 인근의 양산지역 일부가 연약층 하부에 모래와 자갈로 구성된 피압대수층이 존재하고, 지반개량을 통한 택지조성 및 토목구조물의 시공과 연구경험이 있으며, 어려움을 겪기도 하였다.

이러한 현장에서는 연약지반의 개량 및 침하문제를 비롯하여, 다량의 지하수 처리 및 조작에 따르는, 주변 지반의 침하피해 및 주변에의 환경피해가 광역적으로 발생될 우려가 있으며, 특히, 연약지반에서의 과도한 침하 및 변형이 발생할 경우 기초 및 지중구조물의 안전성에도 영향을 줄 수도 있다.

최근 토목공사에 있어서 주변지역에 미치는 영향을 최소화하는 공법에 대한 연구개발이 증가하고 있으며, 지하수의 합리적인 처리 및 이용에 관련된 부분들은 이러한 친환경적 건설기술에 일치하고 있다.

본 사례연구는 다수의 지역에서 하부대수층이 존재하는 연약지반이 있는 일본의 일부지역을 모델로 하여, 지하철 건설에 따른 굴착현장의 지하수 처리 사례를 소개하고 분석하였으며, 우리나라에서의 적용 가능성을 고찰하였다.

## 2. 모델지역 및 관련규제사항

일본의 경우, 하부의 대수층이 존재하는 연약지반 위에 도시가 생성된 경우가 있으며, 이러한 도시들에서는 급속한 경제발전에 기인하여, 다량의 지하수를 산업용수, 농업용수 및 생활용수로 사용한 결과로, 그림 1과 같이 평균해수면 이하 30m까지 지하수위가 저하되어, 광역적인 범위의 지반침하 현상이 발생하는등, 사회문제가 발생하였다.

각 자치단체에서 조례 및 법률의 제정을 준비하게 되고 1960년대 초반부터 지하수 이용과 관리에 행정력이 동원되었으며, 그 결과 지하수위가 조금씩 회복되었으며, 광역적인 침하현상이 제한되게 되었다. 지하수위에 영향을 미치는 우려가 있는 사업에 대하여 관리를 하고 있으며, 지하수위에 영향을 미치는 우려가 있는 사업은 ①지하수의 양수 ②공사중의 굴착등에 의한 지하수 용출 및 배수 ③지하구조물의 존재에 의한 지하수 흐름의 차단 ④지반침하가 생기기 쉬운 연약지반이 분포하여 성토등으로 인한 압밀 및 지하수위의 저하를 발생시키는 경우등이 있다.

본 사례에 있어서의 모델지역이 위치한 지역에 대하여 유사한 행정규제가 시행되고 있으며, 지하철 건설을 위한 개착터널공사에 대하여도 현장 주변지역의 지반침하관련 행정규제 및 관리가 시행되고 있다. 행정규제에 대해서는, 토목공사 관련으로 다음 2가지의 대표적 사항을 들 수 있으며, ①흙막이벽 배후 지반의 지하수위 저하에 의한 압밀침하 속도가 2 cm/년 이하(일본 환경청의 지도사항) ②지하철 구조물의 안전을 위한 잔류침하가 10 cm이하 (연약지반의 성토시공 후에 있어서의 잔류침하의 허용치는 도로가 10cm - 30 cm, 택지조성이 20 cm, 철도구조물이 10 cm임) 이다.

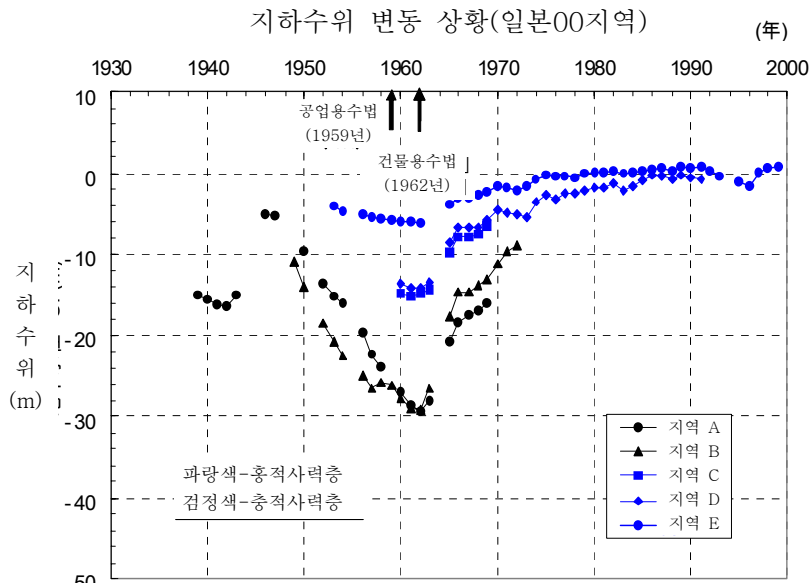


그림1. 지하수위의 장기 변동 상황

표1은 모델지역의 지층상황을 보여주고 있으며, 그림2는 현장이 시공상황을 나타내고 있다. 본 사례는 모델지역이 지반침하에 따른 규제가 엄격하게 적용되는 지역이므로, 제1 피압대수층을 관통하는 차수벽을 설치하여 공사를 진행하므로서, 개착터널을 위한 굴착을 하여도 주변지반의 지하수에는 영향을 주지 않도록 설계 및 시공을 하였다. 그리고, 깊은 심도까지 흙막이 벽을 설치하므로서 발생하는 고비용을 회피하기 위하여 32m 부근까지 강재를 삽입하여 흙막이벽의 강성을 확보하고, 그보다 깊은 곳은 약액주입 공법을 시공하여 제1 피압대수층을 관통하는 차수벽을 시공하였다. 시공중 일부 구간에서 제1 피압대수층의 두께 및 심도의 급격한 변화등으로 완전차수가 되지 않았던 곳이 발견되었으며, 이러한 일부 구간은 앞에서 기술한 행정지도사항을 만족할 수 있는 제한된 지하수 양수를 실시하여 시공을 하였다.

표1. 모델지역의 지층 상황

지층 구분	심도(m)	층두께(m)	비고
성토부(B)	0 - 2.4	2.4	
충적사질층(As1)	2.4 - 9	6.6	
충적점토층(Ac1)	9 - 24	15	지반침하 대상
충적사질층(As2)	24 - 33	9	제1 피압대수층 (모델지역 일부구간에서의 양수에 의한 지하수 조작)
홍적자갈층(Dg1)	33 - 38	5	
홍적점토층(Dc1, Ma12)	38 - 47	9	지반침하 대상
홍적사질, 자갈층(Ds2, Dg2)	47 -		제2 피압대수층 (자연상태)

주) 현지의 분류체계와 용어를 따름

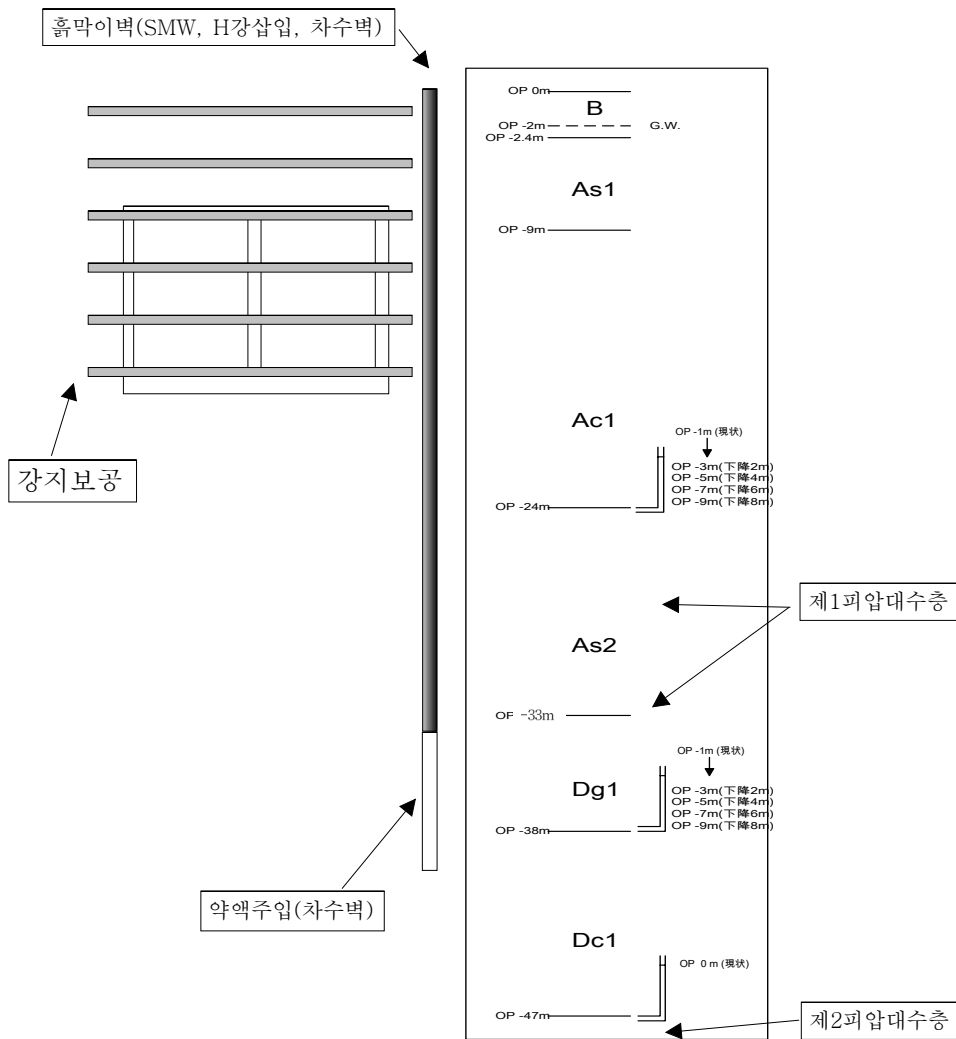


그림 2. 모델지역의 시공 개요

### 3. 제한적 지하수위 저하공법의 적용

개착공사에 있어서 지하수위 저하공법의 적용은 굴착부의 회빙, 파이핑 및 지하수 양수로 인한 굴착부 인접지반의 침하 및 변형에 주의를 필요로 한다. 흙막이벽과 지지시스템의 강성을 보강하여 측방으로 변형이 생기지 않도록 하여야하며, 일반적으로 연약지반이 두께 10m이상 존재하는 경우는 지하수 양수로 인한 지반의 침하예측 또한 실시하여야 한다.

본 모델지역에서 굴착부와 굴착부 배면의 지하수를 차단하도록 설계 및 시공하였으나, 일부구간에서 지층의 불규칙성 등으로 완전차수가 되지 않아, 현장의 시공일정을 고려하여 그림 3과 같은 지하수위 저하 공정을 계획하고 침하예측을 실시하였다.

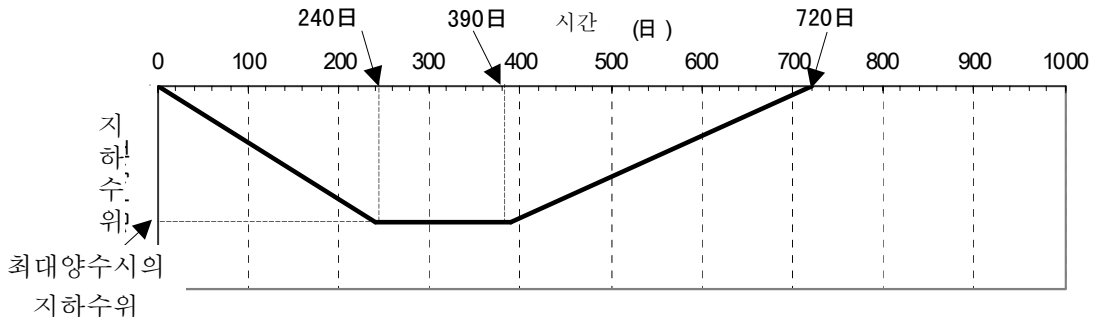


그림 3. 시공일정을 고려한 지하수위 저하공법의 공정

침하예측 방법으로는 연약지반층과 사력층이 다른 방법을 사용하고 있으며, 연약지반층(Ac1층, Dc1층)의 경우 ①e-log p곡선에 기초한 압밀침하예측 ②  $m_v$ 를 이용한 침하예측 ③ 양수량-침하량 관계곡선을 이용한 예측방법이 있으나, 본 사례에서는 ①과 ②를 이용하여 침하예측을 실시하였다.

압밀계산에 있어서는 테르자기의 압밀방정식을 차분화한 일차원 압밀침하계산을 적용하였으며, 침하계산에 있어서는 大倉등(1996), 岸尾등(1994)의 연구결과를 적용하여 충적층(Ac1층)의 경우 e-log p법을 홍적층(Dc1층)의 경우  $m_v$ 법을 적용하였다.

충적층의 경우, 지층의 두께가 두꺼워, 침하예측에 표준압밀시험과 일정 변형율속도 압밀시험(CRS ; Constant Rate of Strain Loading)에서 얻어진 결과를 비교하여 침하예측을 하였다. 표준압밀시험의 결과 및 CRS 압밀시험의 결과를 이용하여 압밀침하 계산에 필요한 지반물성치의 심도 분포도를 작성하고, 계산에 필요한 각 심도에 있어서의 지반물성치를 정하여, 표준압밀시험 자료를 이용한 계산과 CRS 압밀시험 결과를 이용한 계산의 2가지 경우에 대해서 계산을 하였다.

그림4는 충적점토층(Ac1층)의 침하계산을 위한 지반 표준물성치 선정결과를 보여주고 있으며, 표준압밀 시험의 경우(Case 1)과 CRS 압밀시험 결과(Case 2)가 차이가 있음을 알 수 있다. CRS 압밀시험 결과가 표준압밀시험의 결과보다 지반의 강도가 크게 나오는 경향을 보이고 있으며, 이것은 CRS 압밀시험시 변형율 속도가 지반의 강도정수에 영향을 준 것으로 판단된다.

지하수위 저하로 인한 제1 피압대수층(사력층, As1과 Dg1층) 자체의 침하도 예측하여 고려하였으며, 일차원 탄성론에 근거하여 유도된 식(1)을 이용하여, 프와송비와 탄성계수로서 침하량 예측을 하였다(大倉등,1996).

$$m_v = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \frac{1}{E} \quad (1)$$

$\nu$ : 지층의 프와송비, E: 지층의 탄성계수

표2는 계산 Case별 각 지층의 최대 지반침하량 예측 결과를 정리하고 있으며, 제1 피압대수층의 지하수위를 양수를 통하여 최대 2m, 4m, 6m, 8m, 10m 저하시키는 경우에 대하여 지반침하량을 예측하였다. CRS 압밀시험의 결과를 이용한 경우, 표준압밀시험의 결과를 이용한 최대침하량 보다 적음을 알 수 있

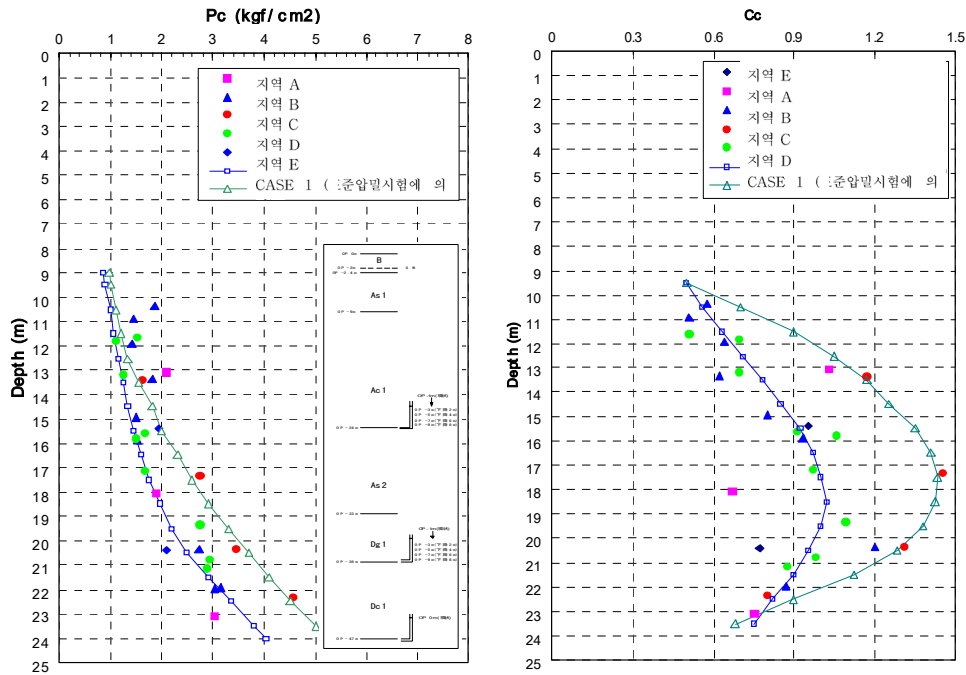


그림 4. 충전점토층(Ac1층)의 침하계산을 위한 지반 표준물성치 선정

였으며, 이것은 동일한 지반에 대하여 시험방법의 영향이 포함되어 있음을 나타낸다. 압밀시험의 종류와 무관한 제1 피압대수층의 최대 침하량이 Case 1과 Case 2에서 다른 결과를 보여주는 것은, 지하수위 저하에 따르는 대부분의 침하량이 발생하는 충전 및 홍적 점토층의 최대침하량 발생시점이 다른 것의 영향이다.

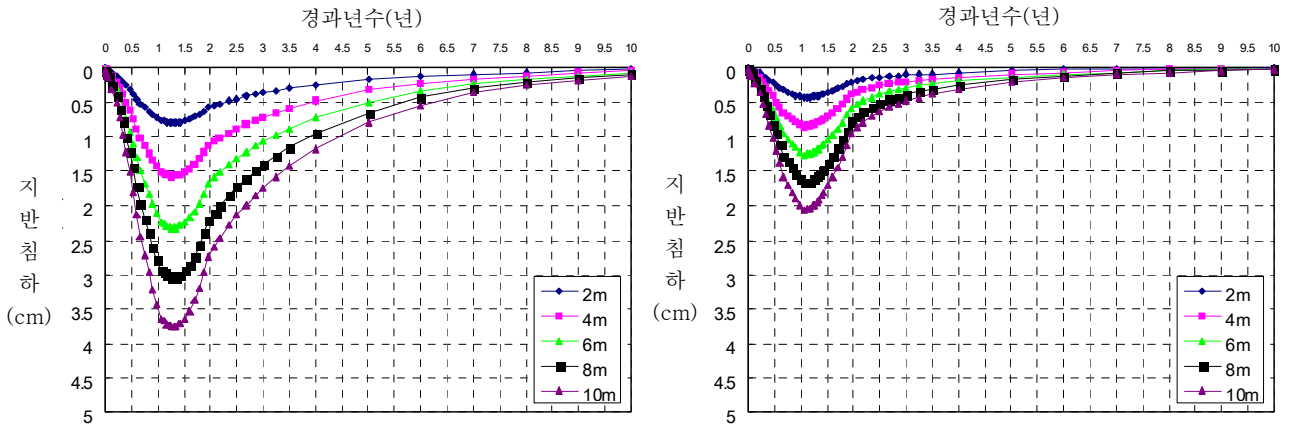
표 2. 계산 Case별 최대 침하량 예측 결과

(단위, cm)

	Case 1 표준압밀시험					Case 2 CRS 시험					
	2m	4m	6m	8m	10m	2m	4m	6m	8m	10m	
지하수위 저하량											
충전점토층 Ac1층	0.58	1.14	1.67	2.18	2.66	0.19	0.37	0.54	0.70	0.85	Case 1과 Case 2
홍적점토층 Dc1층	0.14	0.28	0.42	0.56	0.69	0.14	0.28	0.42	0.57	0.71	Dc1의 압밀시험에서 얻어진 Mv를 이용 침하계산
제1 피압 대수층 As2+ Dg1 (즉시침하)	0.08	0.16	0.24	0.32	0.41	0.10	0.20	0.30	0.40	0.51	$E = 40N(kgf/cm^2)$ $m_v = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \frac{1}{E}$ $S = m_v \cdot \Delta h \cdot H$
전체침하	0.80	1.58	2.32	3.05	3.76	0.43	0.85	1.26	1.66	2.07	

그림 5에서는 지하수위 저하에 따른 지반침하량 경시변화를 보여주고 있으며, 개착터널 시공후 지하수위를 회복시킴으로서 계산상 지반침하가 회복되는 현상을 볼 수 있다. 양수를 통해서 지하수위를 저하시킨후 지반의 침하가 최대로 발생하는 시점은 점토층의 침하계산에 표준압밀시험의 결과를 이용한 경우, 약 1년3개월 뒤, CRS 압밀시험의 결과를 이용한 경우, 약 1년 1개월 뒤인 것으로 나타났다. 그림 6은 지하수위 저하에 따른 지반 전체의 최대침하량을 보여주고 있다.

행정지도 사항, 침하속도 2 cm/년을 만족하는 지하수위 저하량은 표준압밀시험의 물성치를 이용한 경우 6m 정도 이었으며, CRS 압밀시험의 결과를 이용한 경우 10m 정도의 양수를 통한 지하수위 저하도 가능할 것으로 예측되었다. 본 모델지역의 경우 양수를 통하여 6m의 지하수위 저하가 적용되어 시공하였으며, 주변지반에서 지반 침하속도 2 cm/년을 만족하였다.



(a) 표준압밀시험 결과에 의한(Case 1)                      (b) CRS 압밀시험 결과에 의한(Case 2)

그림 5. 지하수위 저하에 따른 지반침하량 예측

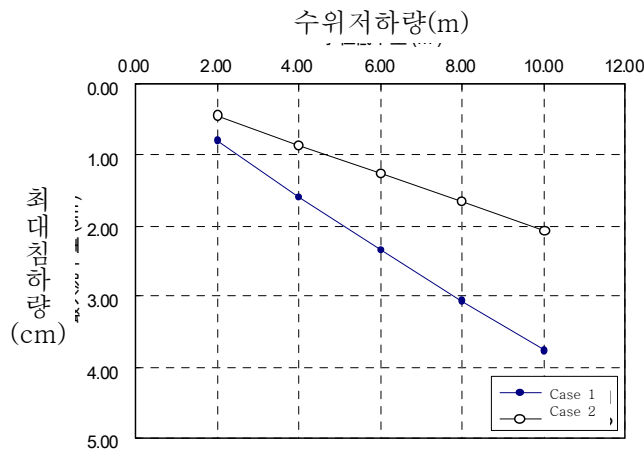


그림 6. 지하수위 저하에 따른 지반 전체의 최대침하량

#### 4. 고찰

하부에 피압대수층이 존재하는 연약지반에서의 개착터널 시공의 경우, 공사의 안전 및 시공을 위한 지하수 처리가 중요하며, 주변지반에 미치는 영향을 최소화 하는 지하수 저하 공법이 적용가능함을 보여주었다. 그리고, 일본의 경우, 지하수 조사를 합리적으로 평가하기 위한 꾸준한 시도를 과거부터 하고 있으나, 체계적인 이론의 정립에 있어서는 아직 어려움을 보이고 있으며, 이론적인 접근의 문제점을 지반정보 DB를 통하여 해결하기 위해, 대수층의 침하특성 관찰 및 지하수위 변동에 따른 연약지반층의 변화를 모니터링 하는데 주력하고 있음을 알 수 있었다.

우리나라의 경우, 최근 건설공사에 따르는 민원의 급증으로 주변에 미치는 영향을 최소화하는 기술의 적용 및 개발에 노력하고 있으며, 합리적인 지하수 처리는 주변에의 영향을 최소화 할 수 있는 방안으로 생각된다. 지하수의 합리적 처리를 위해서는 이론의 정비와 함께 대수층의 정보를 DB화하는등 기초 작업의 시행이 요구됨을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 大倉利武,土井諭,橋本正,長屋淳一(1996), “片福連絡線工事における計測結果から見た地下水位変化と地盤変形”, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'96, pp.4~13.
2. 岸尾俊茂,太田擴,山田功,橋本正,長屋淳一(1994), “地下水位低下に伴う過圧密地盤の沈下特性”, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'94, pp.65~72.