

양산물금지구 피압수 특성에 관한 연구

A Study of Artesian Characteristics in Yangsan/Mulgeum Site

한영철¹⁾, Young-Chul Han, 유갑용²⁾, Gap-Yong Yu

¹⁾(주)대우엔지니어링 상무, Assistant Vice President, DAEWOO Engineering Co.

²⁾한국토지공사 양산사업단 과장, Project Manager, Korea Land Co.

SYNOPSIS : This paper presents a study of geotechnical treatment for artesian pressure after extensive investigation was performed on the distribution and characteristics of artesian condition which exists at Yangsan/Mulgeum site. The result of analysis indicates that the artesian pressure seems to be up to 2.9M above the existing ground surface, originating from the higher groundwater recharging sources in the surrounding hills and mountains. There is no harmful effect after the site development since the height of embankment is more than 4M above the existing ground surface.

Key Words : Artesian Pressure, Sea Level Fluctuation, Late Quaternary Stratigraphy, Leaching, Vertical Drain, Under Consolidation, Embankment on Soft Soil.

1. 서 론

경상남도 양산물금지구 택지개발 사업지구 2단계 조성공사 지역에 깊은 심도에 걸쳐 분포하고 있는 연약점토층 하부에 상대적으로 투수성이 큰 모래 및 자갈층이 피압대수층을 형성하고 있어 연약지반 처리공사의 수직배수재 설치시 피압수 유출로 인하여 작업의 지장을 초래하고 압밀효과를 저감시키며 향후 장기침하에 대한 우려가 있는바, 당 지역의 피압수에 대한 광범위한 조사 및 분석을 통하여 피압대수층의 특성, 분포 및 영향범위등을 정량적으로 파악하고 대책방안에 대한 연구를 수행하였다.

2. 지형 및 지질

본 지역은 낙동강 하류지역으로 표고 1.5~4.0m 정도의 낮고 평탄한 충적평야 지대로서 사업지구 중앙을 관통하는 양산천은 지질 구조상 하천의 형성이 단층곡을 따라 발달되었을 것으로 추정되며, 서측으로 오봉산 (EL. 449.8m), 동측으로는 금정산 (EL. 801.5m)이 위치하고 있다. (그림 1 참조) 주변 하천 현황은 평시에 양산천은 EL.1.5 - EL.3.0m, 다방천은 EL.2.6 - EL.7.32m이하에서 하천수위를 유지하고 있으며, 특히 다방천의 경우 하도경사가 비교적 급하고 2개소의 낙차공이 위치하고 있어 상대적으로 높은 수위를 유지하고 있다.

당 지역의 지반조건은 그림 2에서 보는 바와 같이 제 4기에 형성된 충적층이 해수면의 수위변화 혹은 하상 퇴적환경에 따라 하부로 부터 모래/자갈층, 하부호층(점토,실트,모래),점토층, 상부실트/모래층의 순으로 광범위하게 분포하고 있고 양산천을 기준으로 하여 A 지역과 B 지역이 다소 차이를 보이고 있다.

이러한 지층분포는 그림 3과같이 과거 제4기 해수면의 변동에 따라 퇴적환경이 조성되었을 것으로 판단되나 홀로세(Holocene)기간 동안(약 10,000BP이후) 해수면의 변동에 대한 자료가 서로 상이한 바 명확히 파악하기에는 무리가 있다.

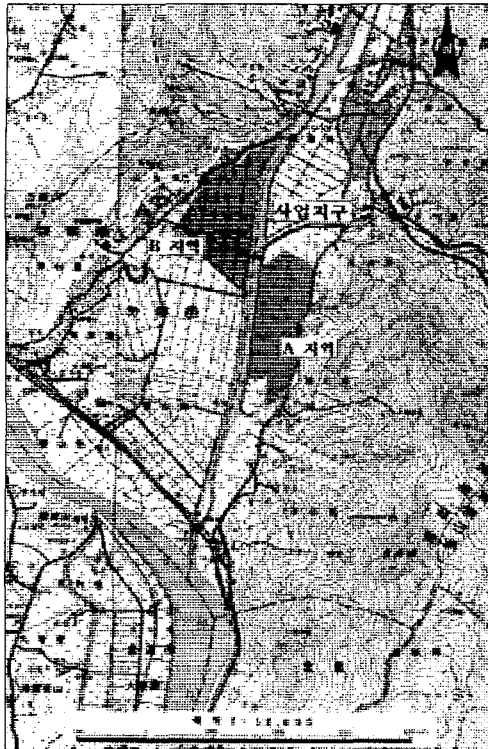


그림. 1 위치도

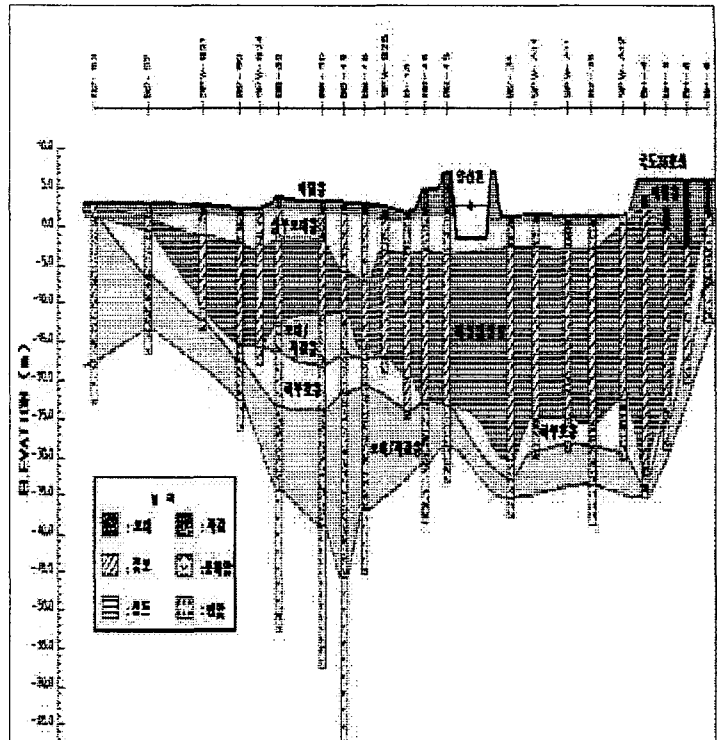


그림. 2 지층 단면도

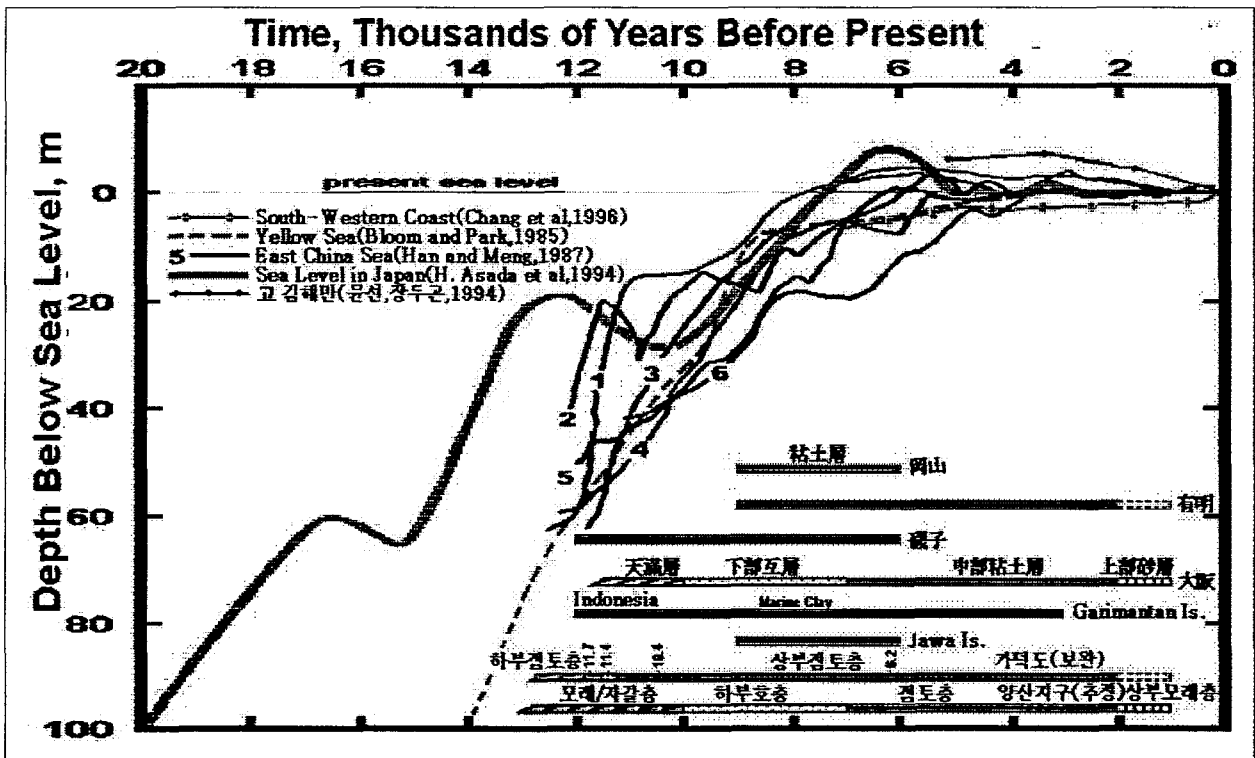
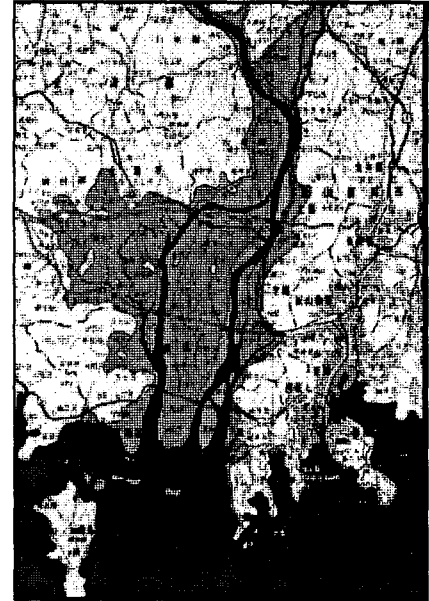


그림. 3 제4기 후반 해수면의 변동 분포 및 퇴적연대 추정

그러나 당 지역과 같이 퇴적층 최하부에 분포하고 있는 자갈층은 일반적으로 퇴적환경에 있어 하상퇴적층으로 형성되는 바 Holocene시대 이전에 해수면이 저하된 상태에서 퇴적된 것임을 추정할 수 있다.

이러한 해수면의 변동과 그림. 3에서 보는 바와 같이 일본, 인도네시아 및 가덕도(김상규) 해성층의 퇴적연대 측정결과와 상관관계로부터 당 지역의 퇴적연대를 추정하였다. 즉 당 지역과 유사한 층서를 이루고 있는 일본 오사카 분지의 지층 퇴적연대에 대한 조사연구에 따르면 홍적세(Late Pleistocene)의 대표적인 자갈층의 Tenma(天滿)층 위에 하부호층(실트, 모래 및 점토, Lower Alternation Layer), 점성토층(Umeda Formation) 및 상부사질토층(Upper Sand Bed)의 층서를 이루고 있으며 퇴적연대 측정(동위원소 ^{14}C) 결과로 부터 각각 10,000BP, 7,000BP 및 2,000BP로 추정하였다. 따라서 당 지역의 지층별 퇴적연대는 그림.3에서 나타난 바와 같이 추정 할 수 있을 것으로 판단된다.



낙동강 하구의 해수면 변동과 관련된 자료(윤선, 장두곤)에 의하면 1-3세기경 고김해지역이 그림. 3 및 그림. 4에서 보는바와 같이 해수면이 현재보다 4-5m정도 상승된 상태(혹은 지반 침강)였을 것으로 조사되었는 바 그 이후 해수면 저하로 인하여 점토층 위에 하성층인 모래층이 퇴적되었을 것으로 추정할 수 있다. 그림. 4 고김해만의 해수면(1-3세기)

3. 연약 점토지반의 공학적 특성

전반적으로 연약점토층의 층후는 양산천을 기준으로 하여 A 지역과 B 지역이 다소 차이를 보이고 있으며 A 지역의 경우 동측 일부와 남측부지를 제외하고 대부분 20m 이상으로 최대 34m심도까지 분포하고 있으며, 연약 점토층과 모래 및 자갈층 사이에는 2.8 - 13.5m의 층후로 하부호층의 점토질 혹은 모래질 실트가 불규칙하게 분포하고 있다.

연약점토층의 토질공학적 특성은 그림 5와 같으며 N치가 1-2이하, 선단저항력(q_c)이 8.0 kg/cm^2 이하로서 매우 연약한 상태이고 자연함수비(w_n)가 45-65%, 액성한계(LL) 38-57%로서 CH, CL로 분류되고 있다. 특히 액성지수(LI)가 1.0-1.8로서 예민한 (Sensitive) 특성을 나타내고 있는 바 과거 Holocene시대에 해성환경에서 퇴적된 점토가 지하수 혹은 피압수로 인한 Leaching에 의해 액성한계(LL)가 감소하여 액성지수가 증가된 것으로 추정된다(Bjerrum 1954,1967, Bjerrum and Rosenquist 1956, Simon et al 1974). 즉 Leaching이 발생하는 경우 액성한계(LL), 소성지수(PI), 선형압밀하중($P'c$) 및 전단강도(Cu, Cr)가 감소하며 예민비(Sr), 액성지수(LI) 및 압축성이 증가하는 경향이 있다.

따라서 압축비($C_c/(1+e_0)$)가 0.2-0.4로서 압축성이 크고 심도에 따라 다소 감소하며, 압밀비(OCR)는 압밀시험 결과 0.6-1.4의 범위로 심도에 따라 점차 감소하는 경향을 보이고 있는바 Clemence & Finbarr가 제안한 정규압밀점토의 기준 0.8-1.5을 준용 할 경우 다소 미압밀(Underconsolidation) 혹은 정규압밀 상태로 간주 할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 본 지역의 연약 점토층은 제 4기 퇴적환경 기간 동안에도 계속적으로 피압이 작용하였을 것으로 판단되므로 과잉간극 수압이 소산되지 않은 상태와는 별도로 피압에 의한 미압밀 상태로 간주 할 수 있을 것으로 판단된다(Ward 1967, Simon et al 1974, Roy E. Hunt 1984, Brenner et al 1981).

연약점토층 하부에 분포하고 있는 모래섞인 자갈층은 중간 자갈 내지 굵은 자갈로 구성되어 있고 매우 조밀한 상태를 보이며, 투수성이 크기 때문에 불투수층인 연약 점토층과의 경계부에서 피압이 작용하고 있는 피압대수층으로 조사되었다.

한편 B지역은 연약점토층의 두께가 상대적으로 얇고 부지의 북서측 일부지역에서 연약점토층이 분포하지 않고 있으며 연약점토층 상부의 실트질 모래층은 지역적으로 모래질 자갈, 점토질 실트, 및 실트질 점토가 협재하는등 상당히 불규칙한 층서를 나타내고 있다. 연약 점토층의 층후는 북서측에서 0 - 2 m 부터 남서측 하단방향으로 20.0m의 두께로 점차 증가하는 분포를 나타내고 있으며 대부분 A지역 보다 양호한 지반 상태를 보이고 있으나 남서측 하단부는 A지역의 지반상태와 유사한 특성을 나타내고 있다.

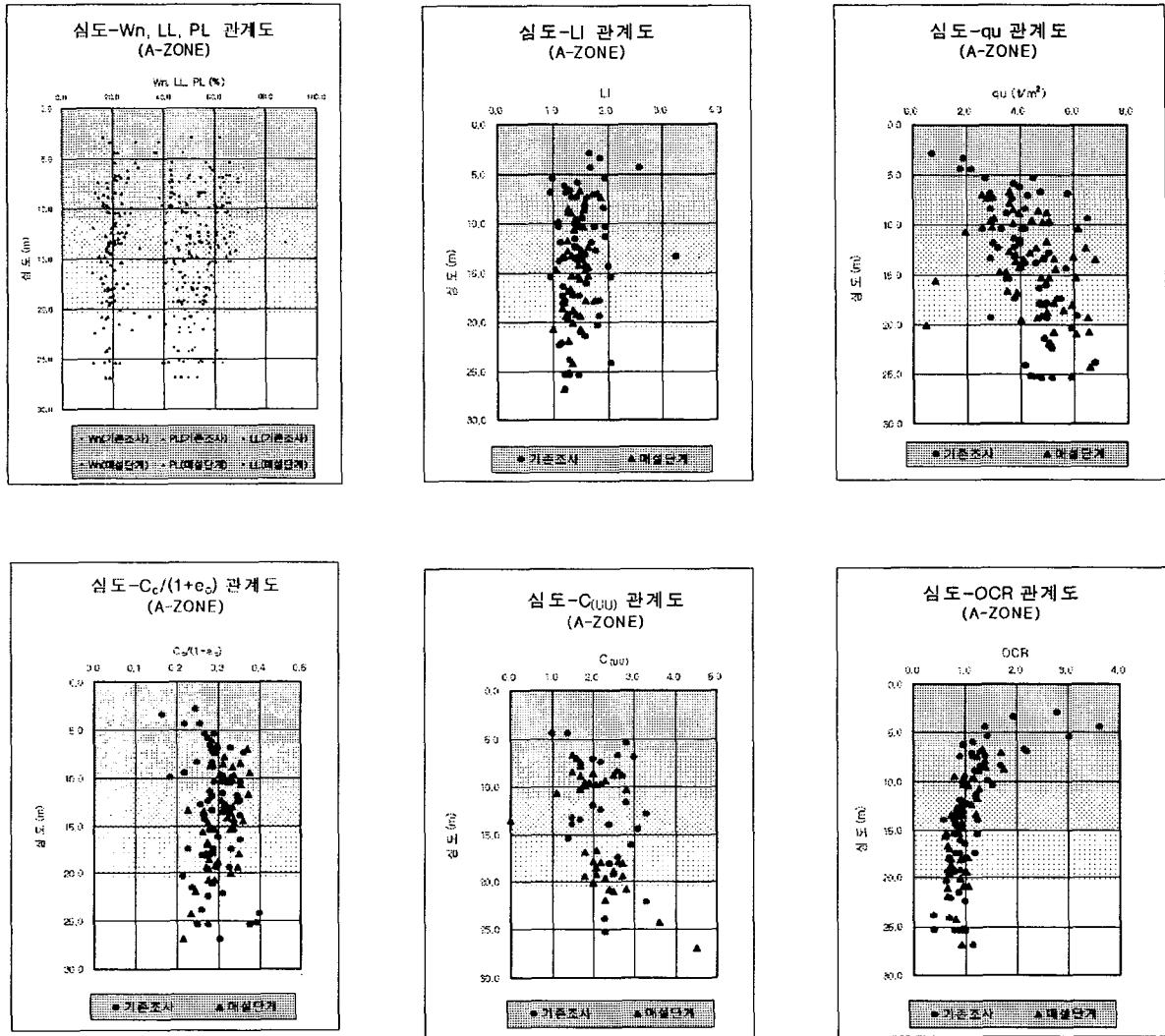


그림. 5 연약 점성토 토질공학적 특성

4. 피압대수층(Artesian, Confined Aquifer)의 정의

일반적으로 대수층은 정수압을 갖는 자유면 대수층과 정수압 보다 큰 피압을 받는 피압대수층으로 구분되며 피압대수층은 본 지역과 같이 불투수성인 점토층 하부에 상대적으로 투수성이 큰 모래/자갈층이 분포하는 지질학적 구조의 경우에 주변의 구릉 및 산지등의 높은 위치수두를 갖는 지하수가 유입수의 공급원으로 투수층을 따라 상류부의 위치수두가 하류에서 압력수두(피압수)로 전이되어 형성된다

또한 광범위한 지질구조학적으로 지질단층대를 통한 피압수 형성 혹은 조류변화에 따른 해수침투로 인한 담수의 수위 상승에 따라 피압수가 발생 할 수 있으나, 당 지역의 경우 그 가능성은 매우 적다.

따라서 피압대수층의 수두(Piezometric Head)는 그림 6과 같이 지하수위의 정수두(Hydrostatic Head) 보다 높은 압력이 작용하게 되어 Potentiometric Surface라는 가상적인 지하수위를 형성하게 되며 이 수위가 지표면보다 높을 경우 천공시 피압수가 지표로 유출되게 된다.

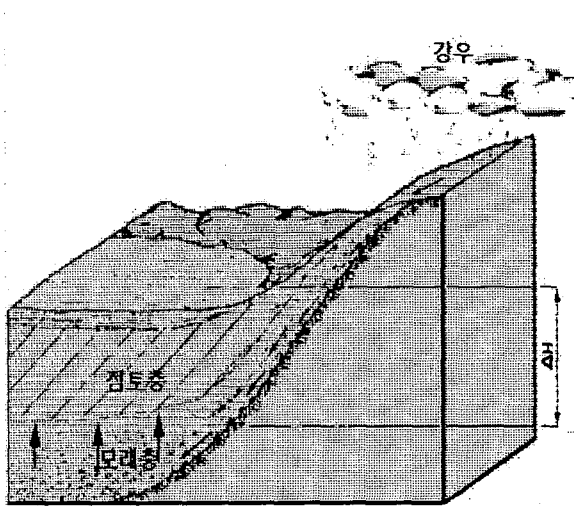


그림. 6 피압수 형성 개념도

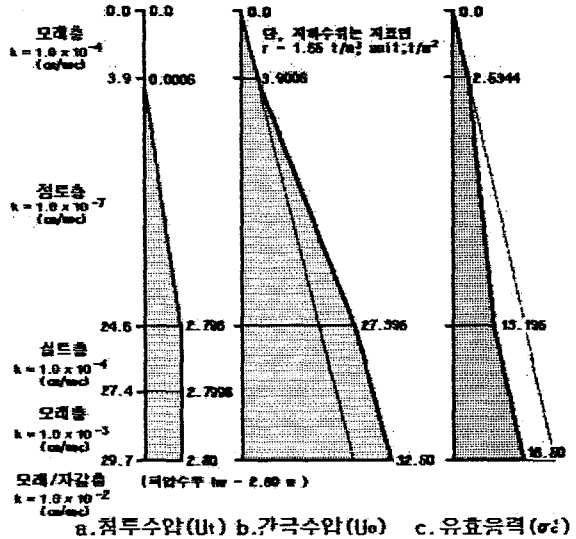


그림. 7 피압수두와 응력 분포

피압수두의 분포는 그림 7에서 보는 바와 같이 피압수가 정수압 보다 크므로 불투수층인 연약점성토층을 통과하면서 침투수압이 점차 감소하여 지하수위 심도에서 소멸된다. 특히 당 지역과 같이 지층이 불규칙하게 분포하는 경우에 토층구성에 따라 상당히 차이가 있으나 대부분 불투수성인 점성토층에서 높은 동수경사로 침투수압이 저하되며 이로부터 전응력 및 유효응력을 산정 할 수 있다. 따라서 이러한 피압수가 제거되면 상재하중과 무관하게 지중 유효응력이 증가하므로 추가 압밀침하가 발생할 수 있다.

5. 피압수 조사 결과

부지내의 전반적인 피압수두 분포를 파악하기 위하여 시추조사 및 Piezocone조사과정 중에 피압수두를 측정하였다. 측정방법은 시추조사시 모래/자갈층 심도에서 casing을 지상으로 연장하여 일정한 상승수두를 측정하였으며, Piezocone조사의 경우 모래/자갈층에서 과잉간극수압 소산시험과 유사한 방식으로 피압수두를 측정하였다. 이러한 2가지 방식으로 동일 위치에서 측정한 결과는 지역에 따라 피압수두가 다소 차이가 있었으며 그 사유로서는 연약 점토와 모래/자갈층 사이에 실트, 모래 혹은 점토가 협재되어 있어 침투수압의 동수경사가 불규칙하기 때문인 것으로 추정되며 Piezocone조사의 정밀도가 상대적으로 낮았다. 피압수두 측정시기는 대부분 홍수기(1997.7-10)에 걸쳐 측정되었으며 갈수기의 분포를 파악하기 위하여 대표지역에 대하여 장기적인 피압수두의 변화를 측정한 결과 갈수기에도 피압수두 강하가 최대 50cm 이내로 발생할 것으로 판단되었다.

한편 피압대수층의 지질 구조학적인 특성에 따라 부지 경계부에서 양수시험을 실시하였으며 그 결과 투수계수 값의 분포는 해석방법에 따라 상당히 광범위한 분포를 나타내고 있으나 일반적으로 투수계수가 $0.2 \times 10^{-3} - 8.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 의 범위로서 투수성이 비교적 큰 것을 알 수 있다. 양수정에서 지상 유출량을 측정한 결과는 위치에 따라 상당한 차이를 나타내고 있으며 갈수기에도 4 inch 공당 최대 30 - 37.5Ton/일 정도 발생하고 있고 한계 양수량에 대한 분석 결과 140Ton/일 이상 양수가 가능할 것으로 조사 되었다. 또한 영향반경을 조사한 결과 17-129 m로 지역에 따라 상당한 차이를 보이고 있다.

6. 피압수 분포 및 영향성 검토

당 지역의 피압수 분포 특성 및 유입원을 파악하기 위하여 A, B 지역별로 시추조사 및 Piezocone조사 시 측정된 피압수두에 대한 등수두선을 지반고 기준으로 각 지역별로 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 A 지역은 부지 전반적으로 피압수가 지표로부터 최대 2.90m(EL. 5.33m)까지 분포하고 있는 것으로 조사되었으나 B 지역의 경우(그림 9) 북서측 상부 지역은 점토층의 두께가 얇고 불규칙하게 분포하고 있어 피압수가 없는 것으로 조사되었으며, 남동측 하부지역은 A 지역과 같이 깊은 심도에 걸쳐 점토층이 분포하고 있기 때문에 피압수가 지표로부터 최대 2.25m(EL. 4.73m)로 분포하고 있는 것으로 조사되었다.

A 지역의 경우 피압수의 유입원은 표고(EL.)를 기준으로 피압수두 분포를 검토한 결과 동측 경계의 계곡부를 통하여 하향 동수경사로 유입되고 있는 경향을 나타내고 있으며, 그림 2의 지층 단면도에서 보는 바와 같이 동측으로부터 지하수의 유입이 용이한 지층 분포를 형성하고 있으므로 동측산지로부터 지하수가 유입된 것으로 판단된다. 특히 하천유역조사 결과로부터 부지중앙에서 양산천의 수위가 홍수 시를 제외하고는 항상 부지지반고(EL. 1.5-2.0m)보다 낮은 수위(EL.1.0m이하)를 유지하고 있으나 상류부 다방천의 경우 측정된 피압수두 보다 항상 높은 상태로 흐르고 있는 것으로 조사되었으므로 피압수의 유입원은 동측 금정산 산계 및 구릉으로 판단되었다. B 지역은 남동측 부지의 지반지층 분포가 A 지역과 유사하므로 피압수의 유입원이 주로 동측 금정산 산계로 추정되나, 남서측 방향의 3 단계 조성공사 부지를 통하여 서측 오봉산 산계도 유입원일 가능성이 있는바 향후 3단계 조성공사시 확인조사가 필요할 것으로 판단된다.

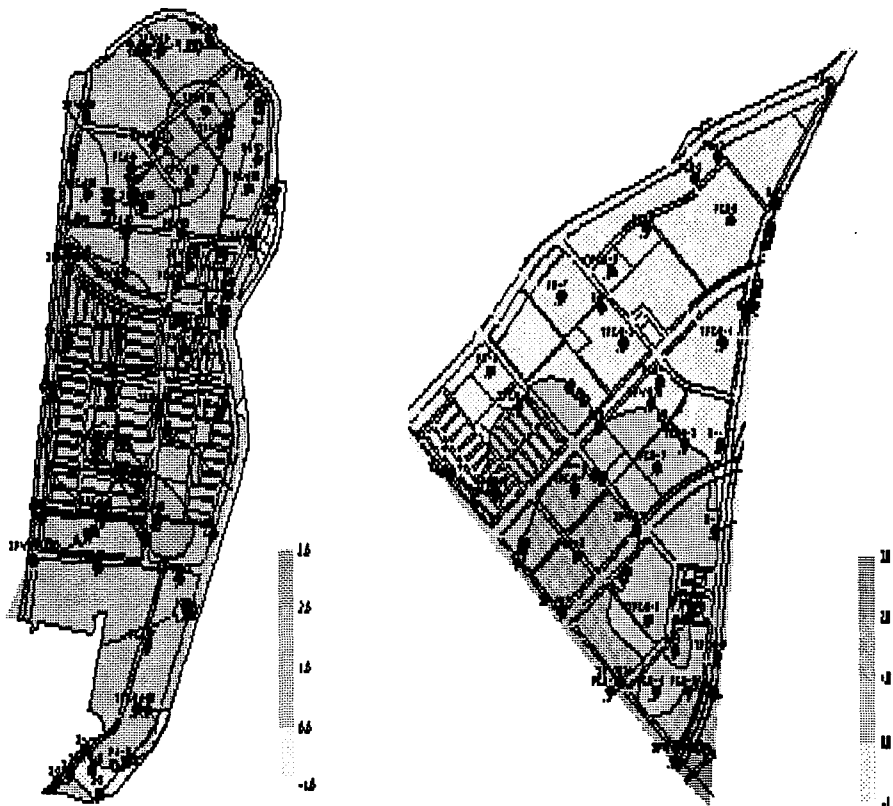


그림. 8 피압수두 분포도(A-ZONE)

그림. 9 피압수두 분포도(B-ZONE)

7. 피압수 대책방안

피압대수층에서의 피압수두는 그림. 7과 같이 대부분 불투수층인 점토층에서 높은 경사로 침투수압이 저하되어 자유 지하수위면 위치에서 소멸되는 분포를 나타내며 이러한 피압수가 제거되면 상재하중과 무관하게 유효지중응력이 증가하므로 추가 압밀침하가 발생할 우려가 있다.

따라서 장래 추가침하를 방지하기 위한 대책으로 피압대수층을 관통하여 피압수를 자연 유출시키거나 양수를 실시하여 인위적으로 낮추는 직접적인 방법과 피압수를 관통시키지 않고 장기적으로 안정시키며 압밀과정에 지장을 초래하지 않도록 하는 간접적인 방법으로 대별할 수 있다

이러한 대책방안 중에 피압 대수층을 수직배수재 타설등으로 관통시키는 경우 상당량의 피압수가 지상 유출되어(공당 측정 유출량 최대 30-37 Ton/day) 지상의 작업이 곤란하고, 성토재하시 Sand Mat내의 유공관 통수능력으로는 절대적으로 부족하므로 지하수위 상승으로 인하여 압밀 지연 우려가 있으며 유효하중이 감소함에 따라 별도의 추가성토가 필요할 것으로 판단 된다. 따라서 피압 대수층을 관통시키지 않고 수직배수재의 타설심도를 피압대수층 상부에 위치토록 하는 것이 보다 유리하며, 장기적으로는 부지계획고가 4.40 m이상 성토되므로 그림 10과 같이 지하수가 피압수두(2.8m)만큼 상승하여도 지상작업에 영향이 미치지 않으며 오히려 유효 지중응력의 감소로 추가 압밀 침하에 대한 우려는 없을 것으로 판단되었다.

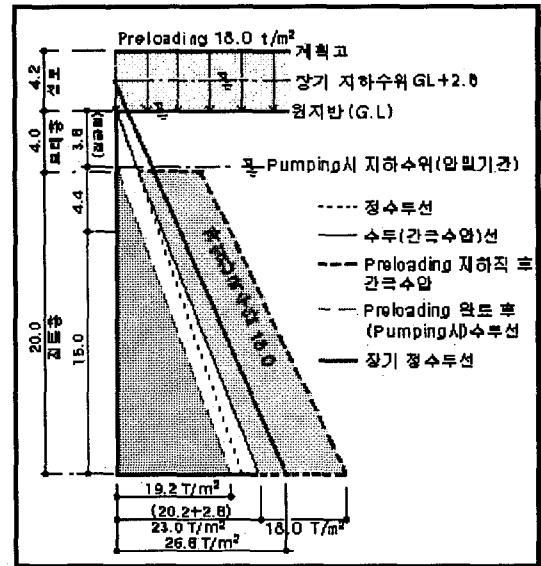


그림. 10 Preloading 전.후의 간극수압의 분포도

8. 결론 및 제언

양산 물금지역에 분포하는 피압수에 대하여 영향성 평가를 위한 조사 및 분석 결과는 다음과 같다.

가. 당 지역의 연약 점성토지반은 과거 해수면의 변동과 퇴적연대에 대한 자료분석을 통하여 개략적으로 홀로세(Holocene)기간 동안(10,000BP-2,000BP)에 주로 해성 퇴적되었을 것으로 추정되었다.

나. A 지역은 전부지에 걸쳐 깊은 심도에 두껍게 분포하고 있는 점토층 하부에 상대적으로 투수성이 큰 모래 및 자갈층이 존재하며 지표면으로부터 0.1-2.90m의 피압수를 형성하고 있는 것으로 조사되었다.

다. B 지역의 남동측 부지는 A 지역과 유사한 지층으로 구성되어 지표면으로부터 0.0-2.65m의 피압수두를 나타내고 있으나, 북서측 부지는 연약점토층이 없거나 두께가 얇고 불규칙한 지층 분포를 나타내어 피압수가 발생하지 않고 있다.

라. A 지역의 경우에 동측으로부터 지하수 유입이 용이한 지층 분포를 나타내고 있고 피압수두의 동수경사로부터 동측 금정산 산계 및 구릉으로부터 유입되고 있는 것으로 판단되었으며, B 지역의 경우 피압수의 영향을 받고 있는 남동측 부지도 동측 산계의 지하수가 유입원으로 판단되나 향후 3단계 부지 조사시 확인을 요한다.

마. 피압수처리 대책방안으로 피압대수층 상부에 수직배수재를 설치토록하여 피압수를 장기적으로 안정상태로 유지토록하여 지상작업 및 압밀과정 중에 지장을 초래하지 않도록 하는 것이 유리하다.

바. 낙동강 유역의 지층분포가 당 지역과 같이 점토층 하부에 투수층인 모래/자갈층이 분포하는 경우에 대부분 피압수가 존재할 것으로 판단되며 피압수압은 주변 지형조건에 따라 좌우될 것으로 판단된다.

사. 본 고에서 지반지층에 대한 퇴적연대를 자료분석으로만 추정하였는바 향후 동위원소 측정(¹⁴C)

등으로 확인을 요한다.

참 고 문 헌

1. 김상규(1999), "김해 점토의 공학적 특성과 기초설계와의 관련", *proceedings of Sang-Kyu Kim Symposium on Geotechnical Engineering*, Seoul, pp205~230, April.
2. 김상규, 김호일, 홍병만, 김현태(1999), "피압수압을 고려한 연직배수공법의 압밀해석", *한국지반공학회 연약지반처리위원회 '99 학술세미나*, pp62~69.
3. 윤선, 장두곤(1994), *부산의 지사와 경관*, 부산라이프 신문사, pp98~105
4. 조기영, 이남기, 정진교, 정성교(1996), "낙동강 하류지역의 미완속압밀 점토에 대한 토질 특성 및 압밀침하예측," *대한토목학회 학술발표회 논문집(III)*, pp543~546.
5. 한국지반공학회(1982), *양산 물금지구 연약지반 관련 학술연구 용역 보고서*, pp8-1~8-56.
6. 한국토지공사(1998), *양산물금지구 택지개발사업 2단계 조성공사 및 1단계 하천개수공사 연약지반 침하안정관리 지반조사 보고서*.
7. H. Asada, T. Kishida, K. Suzuki and H. Hanzawa(1994), "In-situ Shear Strength of Aged Marine Clay", *海底地盤に関するシンポジウム'94 発表論文集*, (社)土質工學會關西支部, pp93~98.
8. S. Suwa and T. Matsui, "Sedimentary Enviroment and Geotechnical Properties in Osaka Basin", *土の基礎*, 43-10(453), pp41~44, Sept.
9. E.W. Brand and R.P. Brenner et al(1981), *Soft Clay Engineering, Developments in Geotechnical Engineering 20*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, pp159~238.
10. Fletcher G. Driscoll, *Groundwater and Wells, 2nd Edition*, Published by Jonson Division, St Paul, Minnesota, pp59~66, pp150~267, 1986
11. Jacques W. Delleur(1998), *The hand book fo Groundwater Engineering*, School of Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp1-24~28, pp8-18~19.
12. NAVFAC DM-7.1(1982), *Soil Mechanics Design Manual 7.1*, Department of Navy, pp93~97.
13. Roy E. Hunt(1984), *Geotechnical Engineering Investigation Manual*, McGraw-Hill 163, pp497~519, pp601~614.
14. Simon, R.M., Christian, J.T., and Ladd, C.C.(1974), "Analysis of Undrained Behavior of Loads on Clays", *Proc. ASCE, Conf. Analysis and Design in Geotec. Engrg.*, Austin, Texas, Vol. I, pp51~84.
15. T.S. Nagaraj and N. Miura, "Induced Cementation of Soft Ground", *Proc. of ILT'96 Seminar on Soft Ground Engineering*, Saga, Japan, pp88~97, Nov. 1996.
16. W.C. Walton(1985), *Practical Aspects of Groundwater Modeling*, 2nd Edition, Chap.5, pp141~335.
17. Y.A. Park, B.K. Khim and S. Zhao, "Sea Level Fluctuation in the Yellow Sea Basin", *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol.29, No. 1. pp42~49, March.
18. Y.H. Kim, H.J. Lee, S.S. Chun,, S.J. Han and S.K. Chough(1999), "Holocene Transgressive Stratigraphy of a Macrotidal Flat in the Southwestern Yellow Sea : Comso Bay, Korea", *Journal of Sedimentary Research*, Vol.69, No.2, pp 328~337, March.