

現場 間隙水壓計 Plug用 Bentonite의 膨脹性에 관한 考察

Expansion Characteristics of Bentonite Plug for Piezometer

윤동덕¹⁾ Yoon, Dong Duk
송정락²⁾ Song, Chung Rak

- 1) 대우엔지니어링 지반공학부 대리, Lead Engineer of DAEWOO ENGINEERING Co.
- 2) 대우엔지니어링 지반공학부 과장, Manager of DAEWOO ENGINEERING Co.

SYNOPSIS :

Bentonite plug is one of the most economic way to seal the piezometer from pore pressure leakage. This study investigated the required properties of bentonite plug by laboratory test. From the test it was turned out that the factory made compressed bentonite has higher and faster expansion characteristics than the field made bentonite pellets. Also, both the factory made pellets and field made pellets showed higher but slower expansion characteristics in plain water than in saline water.

1. 개 요

점토광물의 일종인 Bentonite는 물에 접촉하면 약 15배까지 팽창하여, 토목현장에서 유용하게 사용되는 재료로서 Slurry Wall, Soil-Bentonite Liner, Grouting 등에 사용된다. Bentonite는 Montmorillonite 70~90%, Illite 7~10%, Quartz 5~8%로 구성되어 있으며, 물에 대하여 특별히 높은 친화력을 갖고 있어 시추공내에 현장제착용 간극수압계 매설시 간극수압계 격리용 Plug로도 매우 유용하다.

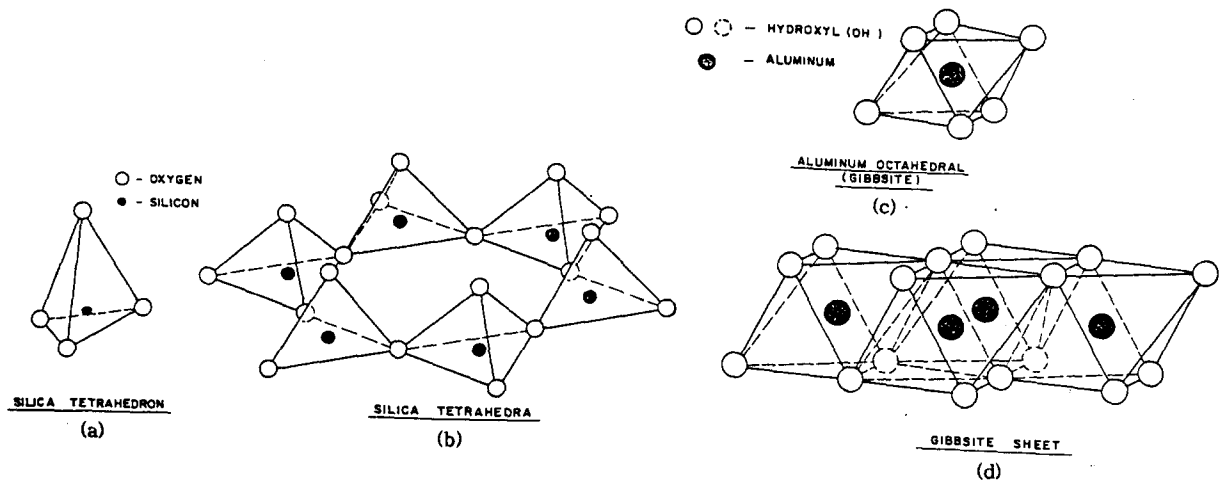
이런 간극수압계 격리용 Plug는 현장에서 국내에서 생산된 공업용 Bentonite를 직접 교반하여 사용하기도 하지만, 근래에는 품질향상을 위하여 외국의 제촉기 메이커에서 생산·공급하는 것을 사용하기도 한다. 본 고에서는 국내에서 생산된 공업용 Bentonite를 현장에서 직접 교반하여 만든 Bentonite Pellet과 캐나다 R 사의 기계제작 Bentonite Pellet제품의 팽창정도 및 현장 적응성을 실내시험을 통해 비교하고자 한다.

2. Bentonite의 광물학

점토광물은 지표면의 1차광물이 화학적으로 변화된 광물로서, 암석 또는 화산회토가 풍화, 변질된 상태 또는 퇴적 점토층의 상태로 존재하며, 주로 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , K_2O , Na_2O , TiO_2 및 H_2O 등으로 이루어진 결정질 또는 비결정질 물질이다.

점토광물의 분자구조는 <그림 1>과 같은 실리카 사면체(Silica Tetrahedron) 또는 알루미늄 팔면체(Alumina Octahedron)의 기본구조를 이루고 있으며, 점토광물은 이러한 분자구조가 층구조를 형성하고 있는 것이다. <그림 1(a)>와 같은 실리카 사면체의 층구조는 석영과 같이 사면체의 모든 頂部에 다른 사면체가 결합된 상태이며, 여기서 남은 산소이온의 자유원자는 다른 양이온과 결합하기도 하고, 사면체의 일부에서 Si^{4+} 는 Al^{3+} 와 치환되기도 한다. <그림 1(d)>와 같은 알루미늄 또는 마그네시아 팔면체의 층구조는 깁사이트(Gibbsite) 또는 브루사이트(Brucite)의 구조로서, 깁사이트의 구조는 팔면체의 2/3만 Al 원자로 점유되어 있으므로 결정격자의 1/3이 빈자리인데 반하여, 브루사이트는 Al^{3+} 가 Mg^{2+} 로 치환되어 있으므로 모든 팔면체가 Mg 원자로 점유되어 있다¹⁾.

점토광물의 결정격자는 실리카층과 깁사이트층이 1:1 또는 2:1로 결합된 단위결정체가 다시 여러 겹으로 중첩된 구조로서, 카올리나이트(Kaolinite), 몬모릴로나이트(Montmorillonite), 일라이트(Illite)군 등으로 분류된다. 카올리나이트군의 점토광물은 <그림 2(a)>와 같이 실리카층과 깁사이트층이 1:1로 겹친 2층구조의 단위결정이 수소결합과 2차원자간에 의하여 연결되어 있어 결합력이 매우 강하고 역학적 강도도 크며, 육각판상 또는 관상의 굽은 입자를 형성하고 있다. 몬모릴로나이트군의 점토광물은 <그림 2(b)>와 같이 실리카층과 깁사이트층이 2:1로 겹친 3층구조의 단위결정이 2차원자가 결합으로 연결되어 있어 결합력이 약하기 때문에 단위결정 사이에 수분자가 쉽게 침입하여 현저한 팽윤성을 나타내고, 큰 입자로 결합될 수 없으며, 입자의 형상은 무정형판상 또는 박편상을 형성하므로 벽개면을 따라 파괴되기 쉽다. 일라이트군의 점토광물은 <그림 2(c)>와 같은 3층구조의 단위결정이 K 이온결합과 2차원자가 결합으로 연결되어 있어 결합력이 강하므로 크기 및 역학적 강도는 카올리나이트와 몬모릴로나이트의 중간에 속하며 형상은 몬모릴로나이트에 가깝다.



<그림 1> 점토광물의 분자구조 (Veen, 1985)²⁾

KAOLINITE

UNIT LAYER: 7.6 × 10⁻⁸ cm

MONTMORILLONITE

UNIT LAYER: 9.6 × 10⁻⁸ cm

ILLITE

UNIT LAYER: 10 × 10⁻⁸ cm

POTASSIUM

KAOLINITE PROPERTIES:
 SPECIFIC SURFACE: 10 to 20 m²/gm
 CEC: 3 meq/100gm
 PARTICLE LENGTH: 3000 × 10⁸ to 30,000 × 10⁸ cm
 THICKNESS: 1/3 to 1/10 LENGTH
 LIQUID LIMIT: 30 to 60 %
 PLASTICITY INDEX: 10 to 20 %

MONTMORILLONITE PROPERTIES:
 SPECIFIC SURFACE: 800 m²/gm
 CEC: 100 meq/100 gm
 PARTICLE LENGTH: 1000 × 10⁸ to 10,000 × 10⁸ cm
 THICKNESS: 1/100 LENGTH
 LIQUID LIMIT: 300 to 800 %
 PLASTICITY INDEX: 250 to 750 %

ILLITE PROPERTIES:
 SPECIFIC SURFACE: 80 to 100 m²/gm
 CEC: 25 meq/100 gm
 PARTICLE LENGTH: 1000 × 10⁸ to 20,000 × 10⁸ cm
 THICKNESS: 1/10 LENGTH
 LIQUID LIMIT: 60 to 120 %
 PLASTICITY INDEX: 30 to 70 %

<그림 2> 점토광물의 격자구조 (Veen, 1985)²⁾

점토광물로 조성된 토립자는 입경이 매우 작고 형상이 판상, 박편상, 관상 등으로 형성되어 있으므로 단위질량당의 표면적인 비표면적(Specific Surface)이 매우 크고, 표면에 전하를 帶電하고 있으므로 입자에 작용하는 중력과 표면장력에 비하여 界面的 性質이 현저하여 입자간과 공극물질에 복잡한 전기적 작용이 발생한다. 토립자의 표면에는 전기적인 이온 교환에 의하여 물입자가 흡착되는데 이 흡착된 물은 토립자 표면에 약 400Å 이내의 흡착수층을 이루며 토립자의 일부분과 같이 작용하기 때문에 공극내의 흡착되지 않은 물과는 구분되며 세립토가 점성을 나타내게 하는 역할을 하게 된다. 토립자의 크기와 흡착수의 관계는 <표 1>에 나타난 바와 같으며, 점토광물중에서도 입자의 크기가 가장 작은 몬모릴로나이트는 카올리나이트보다 약 100배의 흡착수를 갖고 있으므로 훨씬 큰 점토성질을 갖게 된다. 이는 <표 2>에 나타난 대표적인 점토광물의 Atterberg 한계를 보면 보다 쉽게 이해할 수 있다.

<표 1> 토립자의 크기와 흡착수와의 관계³⁾

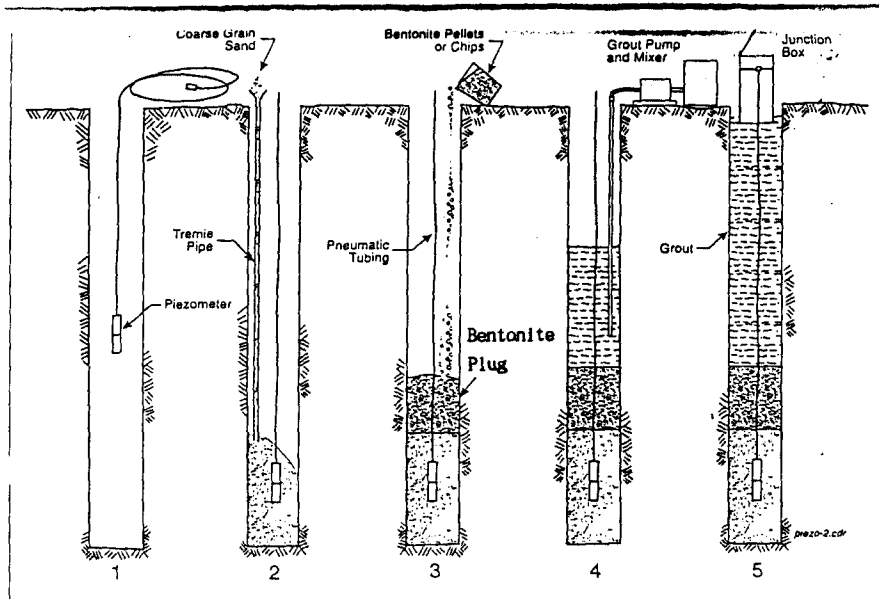
토립자	비표면적 (m ² /g)	함수량 (for 5Å Layer)(%)
0.1mm 직경의 모래	0.03	1.5×10^{-4}
카울리나이트	10	0.5
일라이트	100	5
몬모릴로나이트	1000	50

<표 2> 점토광물의 Atterberg 한계³⁾⁴⁾

광물종류	교환가능이온	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	수축한계 (%)
카울리나이트	Na	53	32	21	26.8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24.5
	Mg	54	31	23	28.7
	Fe	59	37	22	29.2
일라이트	Na	120	53	67	15.4
	K	120	60	60	17.5
	Ca	100	45	55	16.8
	Mg	95	46	49	14.7
	Fe	110	49	61	15.3
몬모릴로나이트	Na	710	54	656	9.9
	K	660	98	562	9.3
	Ca	510	81	429	10.5
	Mg	410	60	350	14.7
	Fe	290	75	215	10.3

3. 현장 계측용 간극수압계용 PLUG의 역할

지반의 거동 파악을 위하여 지중에 간극수압계를 설치할 경우, 목표지점의 간극수압을 정확히 측정하기 위하여는 목표지점 이외의 지점에서 발생하는 간극수압이 간극수압계에 전달되지 않도록 하여야 한다. 또한 목표지점에서의 간극수압이 시추공을 통하여 다른 지점으로 전달 또는 소산되지 않도록 하여야 한다. 따라서 시추공 내에 간극수압계를 설치할 때에는 간극수압계 주위에 팍커를 설치하거나, 보다 경제적인 방법으로 <그림 3>와 같은 Bentonite Plug를 설치한다.



<그림 3> 간극수압계용 Plug

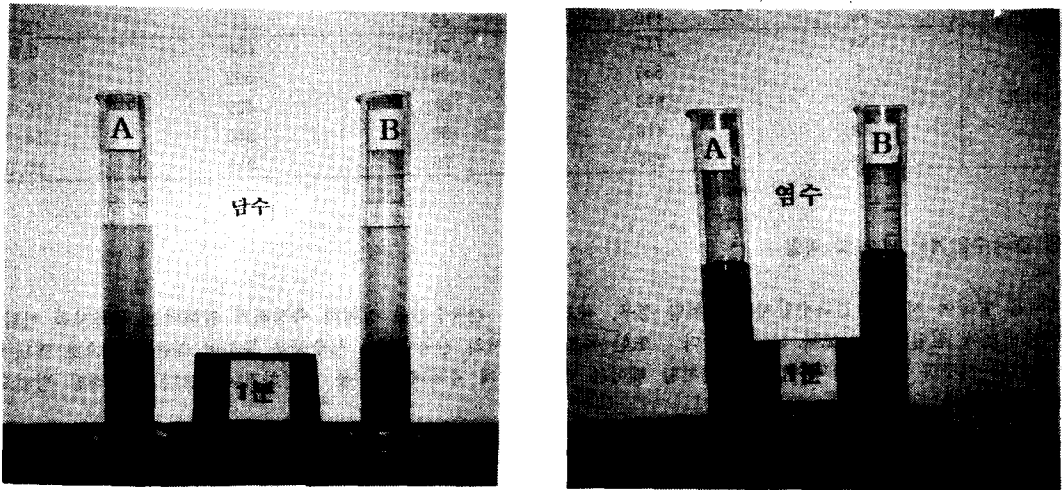
이때 Bentonite Plug는 시추공내에서 물과 작용하여 팽창하여서 불투수층을 형성하여야 한다. 따라서 이때의 Bentonite는 팽창성이 클수록 좋다. 그러나 Bentonite가 너무 빨리 풀어져 물에 용해되면 시추공내에서의 후속작업에 지장을 주게되며, 너무 늦게 풀어지면 신속한 계속시작을 곤란하게 한다. 따라서 본 고에서는 Bentonite Plug의 팽창성 및 풀어지는 시간을 시험하였다.

4. 시험

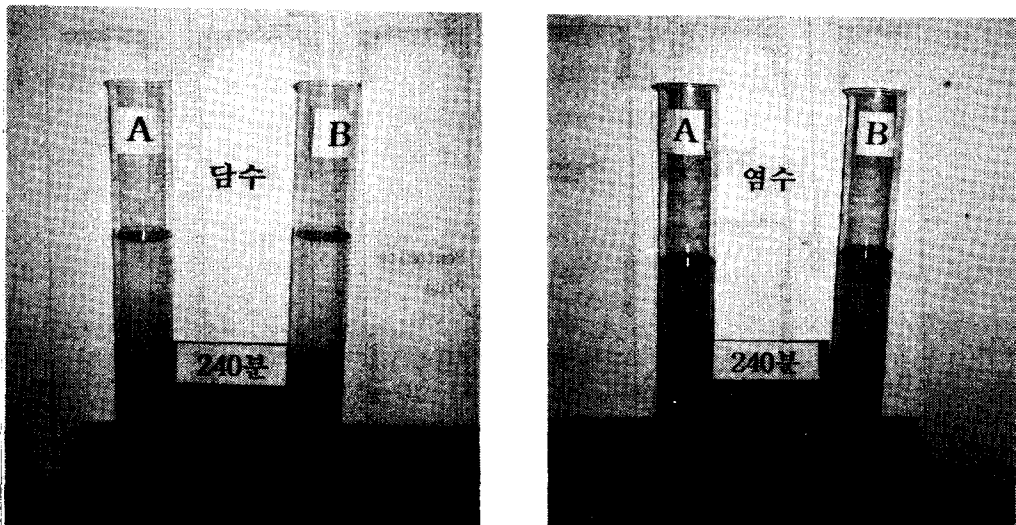
4.1 시험방법

간극수압계 격리용 Plug로 사용되는 Bentonite Pellet의 팽창정도를 확인하기 위하여 다음과 같은 실내시험을 실시하였다.

- 공업용 Bentonite를 직접 교반하여 그늘에서 말린다(직경 약 7~8mm, 길이 1.5cm).
- 완전히 마른 일정량의 Bentonite Pellet과 공장에서 제조한 Bentonite Pellet을 메스실린더에 넣는다.
- 메스실린더에 천천히 일정량의 물(담수 & 염수)을 넣는다.
- 시간에 따른 물과 Bentonite의 체적을 읽는다(측정시간은 Log Scale 사용) (그림 4 참조).
- 완전히 부풀어진 Bentonite의 함수비를 계산한다.



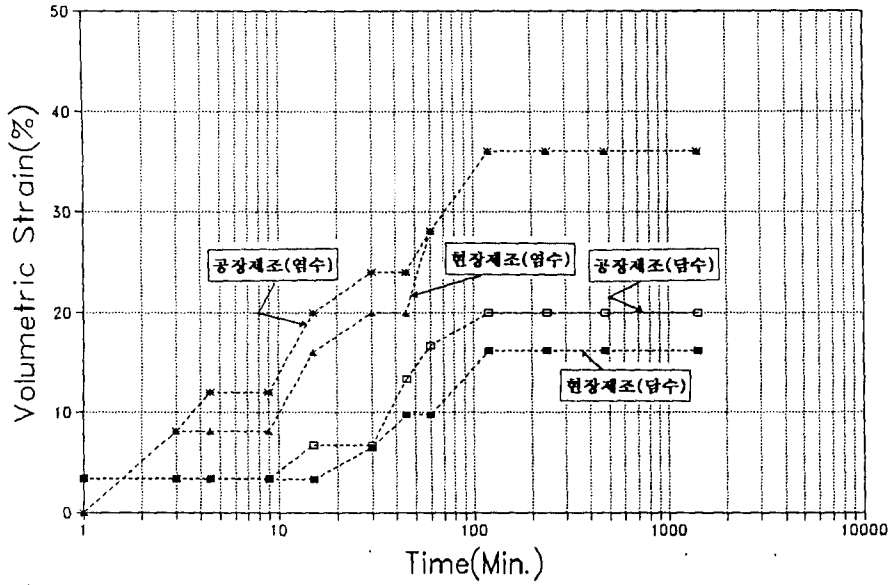
<그림 4> 1분 경과시 담수와 염수에서 Bentonite Pellet의 팽창사진



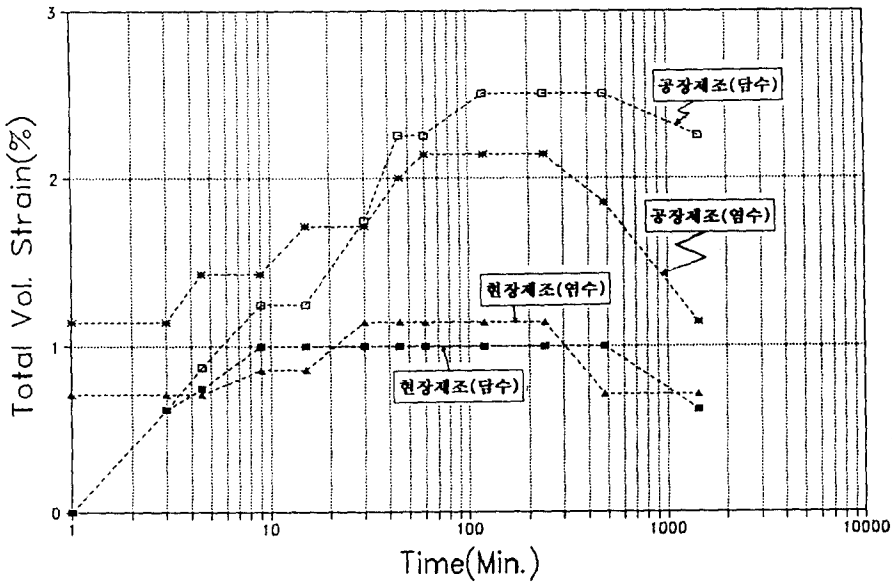
<그림 5> 240분 경과시 담수와 염수에서 Bentonite Pellet의 팽창사진

4.2 시험결과 및 고찰

담수와 염수에서 시간에 따른 Bentonite Pellet의 팽창정도는 <그림 6> 및 <그림 7>과 같으며, Bentonite Pellet이 거의 다 풀어진 후의 함수비는 <표3>과 같다.



<그림 6> 담수와 염수에서 시간에 따른 Bentonite Pellet의 체적 팽창률



<그림 7> 담수와 염수에서 시간에 따른 물과 Bentonite Pellet의 총 체적 팽창률

<표 3> 1일 후의 함수비

구분	담수		염수	
	현장제조	공장제조	현장제조	공장제조
함수비 (%)	141.4	87.8	130.4	101.5

<그림 6>에서 체적 팽창율을 식(1)에 의하여 계산되었다.

$$\text{체적 팽창율} = \frac{\text{메스실린더 내 Bentonite표면의 증가높음}}{\text{메스실린더 내 Bentonite표면의 최초높음}} \times 100(\%) \quad (1)$$

<그림 7>에서 총 체적 팽창율을 식(2)에 의하여 계산되었다.

$$\text{총체적 팽창율} = \frac{\text{메스실린더 내 물의 증가높음}}{\text{메스실린더 내 물의 최초높음}} \times 100(\%) \quad (2)$$

메스실린더 내의 Bentonite는 흡수한 물만큼 팽창되므로 메스실린더 내의 물의 높음은 변화하지 않을 것으로 예상되었으나, 시험결과 <그림 7>과 같은 총 체적 팽창이 관측되었다. <그림 7>은 전체적으로 <그림 6>과 동일한 결과를 나타낸다. 본 시험에서의 Bentonite Pellet은 물을 흡수하여 팽창하며 일부는 내부 간극을 메우고, 일부는 전체 체적 팽창으로 나타난다. 따라서 실제 팽창율은 식(2)에 나타난 것보다 크다. 그러나 본 고에서는 실질적으로 정량적 산정이 가능한 식(1)의 방법을 이용하여 결과를 분석하였다.

<그림 6>으로 부터 현장제조 Bentonite Pellet 및 공장제조 Bentonite Pellet 모두 담수보다 염수에서 팽창률이 큰 것을 알 수 있으며, 초기에는 현장 제조 Bentonite Pellet의 팽창률이 크다가 시간이 경과하여 공장제조 Bentoite Pellet의 팽창속도가 더 커지게 됨을 알 수 있다.

이때 Bentonite Pellet이 물에 퍼지는 시간은 염수일 경우가 담수의 경우보다 빠르며 현장제조 Bentonite Pellet의 경우 약 60분 정도에 거의 다 풀어 지는 것을 육안으로 관측할 수 있었다. 이러한 속도는 현장 작업시 무난한 속도인 것으로 판단된다.

<표 3>은 1일 경과후 Bentonite Pellet의 함수비를 나타내고 있다. <그림 7>로 부터 예상할 수 있는것과(공장 제조 Pellet이 많이 팽창하였으므로 함수비 클 것이라는) 달리, 공장제조 Pellet의 함수비가 작게 나타났다. 이는 공장제조 Pellet의 경우 제조 과정에서 Bentonite Pellet을 압축 성형하여, 단위 체적당의 Bentonite 밀도가 높기 때문으로 판명되었다. 따라서 공장제조 Bentonite Pellet은 함수비가 작아도 전체 팽창량은 크게 나타났다.

현장에서 최종적으로 필요한 Bentonite Pellet의 특성은 총 체적 팽창이 많은 것이 보다 좋다. 이러한 관점에서 볼 때 R사의 공장제조 Bentonite Pellet은 현장제조 Pellet 보다 양호한 특성을 나타낸다고 판단된다. 그러나 풀어지는 속도에 있어서는 현장제조 Bentonite Pellet 보다 2~3배의 빠른 현상을 나타내어 현장 작업이 다소 지연될 경우에는 보다 연속작업에 지장을 초래할 수도 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

간극수압계 격리용 Plug는 현장에서 공업용 Bentonite를 직접 교반하여 사용하기도 하지만 근래에는 품질향상을 위하여 계측기 메이커에서 생산·공급 하는 것을 사용하기도 한다. 현장에서 공업용 Bentonite를 직접 교반하여 만든 Bentonite Pellet(A)과 R사의 Bentonite Pellet(B)의 팽창정도를 실내시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 담수와 염수에서 Bentonite Pellet의 팽창량은 R사의 Bentonite Pellet(B)이 빠르게 나타났다.
- 2) Bentonite Pellet이 거의 다 풀어진 후의 함수비는 공업용 Bentonite를 직접 교반하여 만든 Bentonite Pellet(A)이 크게 나타났다.
- 3) 육안으로 관찰시 담수보다 염수에서 Bentonite Pellet이 더 잘 풀어진다.
- 4) Bentonite Pellet의 풀어지는 속도는 염수에서 현장제조인 경우 약 60분, 공장제조인 경우 약 10분으로 나타났다.
- 5) Bentonite Pellet의 팽창량 및 팽창속도에서 공장제조 Bentonite Pellet이 전반적으로 양호한 것으로 나타났다.

6. 참고문헌

1. 황정규(1993), "건설기술자를 위한 지반공학의 기초 이론", pp.5~15.
2. Veen Walter V. (1985), "Clay Mineralogy", First Canadian Engineering Technology Seminar on the Use of Bentonite for Civil Engineering Applications, pp. 6~21.
3. 대한토질공학회 (1990), "제1회 대한토질공학회 강습회 교재", pp.3-14~3-17.
4. Yong Raymond N. and Warkentin Benno P. (1975), "Soil Properties and Behavior", pp 27~48.
5. SINCO (1989), "Slope Indicator's Brochure"