

## 벤토나이트 안정액을 이용한 PMT수행사례

### Case Study on Performing PMT Using Bentonite Slurry.

최용규<sup>1)</sup>, Yongkyu Choi, 정창규<sup>2)</sup>, Chang-Kyu Jung, 정성기<sup>3)</sup>, Sung-Gi Jung,  
남문석<sup>4)</sup>, Moon S. Nam, 김동철<sup>4)</sup>, Kim Dong-Chul, 전완기<sup>4)</sup>, Wan Ki Jeon

- 1) 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept of Civil and Environmental Engineering, KyungSung University.
- 2) 부산광역시 건설안전관리본부 과장, Manager, Construction safety Management Headquarters, Pusan Metropolitan City.
- 3) 동아대학교 대학원 박사과정, Ph.D. Student, Dept of Civil Engineering, Dong-A University.
- 4) 경성대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept of Civil Engineering, Kyungsung University.

**SYNOPSIS** : In the cohesionless soils such as sandy soils, gravelly soils and weathered soils, and the cohesive soils of  $N > 10$ , it was extremely difficult to sample the undisturbed soils. To examine the strength parameters and deformation behaviors for these soils, PBP (pre-bored pressuremeter) tests were performed at offshore site. To prohibit side wall of test borehole from being collapsed, bentonite slurry was used for drilling the test borehole. PBP tests were successfully performed in various cohesionless soils. In the sandy soils and gravelly soils, though bentonite slurry would be used, it would be highly probable for test borehole size to be expanded. In the PBP tests applied to the various soils, it was very difficult to obtain directly the limiting pressure from the test results.

**Keywords** : cohesionless soils, PBP (pre-bored pressuremeter) test, bentonite slurry, collapse of test borehole side wall, limit pressure

## 1. 서론

사질층, 사력층 그리고 풍화토층과 같은 비점성지반과 N치가 대략 10 이상인 점성지반의 경우 비교란 시료를 채취하는 것이 극히 곤란할 수 있다. 이 때, 지반의 강도특성과 변형거동 등을 알아내기 위하여 현장시험의 일종인 SPT, PMT, CPT 등을 수행할 수밖에 없다. 여기서, PMT는 지반에 작용된 현장응력 상태를 이상적인 조건으로 가장 유사하게 모델링할 수 있으며, 작용된 응력상태에서 변형특성을 고찰함으로써 지반의 현장응력 - 변형거동 관계를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 현장응력, 강성, 강도 등에 대한 특성치도 구할 수 있다 (Clarke, 1995). 지반조사시 SPT는 국내에서도 일반적으로 사용하고 있는 실정이지만, PMT와 CPT 수행실적은 극히 미미한 형편이며 이들 결과를 활용한 설계는 찾아보기가 쉽지 않은 실정이다. 특히, 국내에서는 선행 천공형 (Pre-bored) 프레스미터가 도입되어 사용되고 있는데, 이 장비는 점성토와 암반에서만 사용이 가능한 것으로 주로 암반지층의 시험에 사용되어 오고 있다 (Clarke, 1995). 따라서, 일반 토사지반 (특히 모래층이나 자갈층)에서의 수행사례는 거의 없다.

이 연구의 목적은 일반 토사지층에 적용성이 극히 제한되어 있는 선행 천공형 프레스미터 (PBP, Pre-bored pressuremeter)의 범용적 적용성을 제시하는 것이다. 즉, 시험공벽의 붕괴를 방지하기 위해서

벤토나이트 안정액을 사용하여 시험공을 형성시킨 후 시험을 수행하였다. 남항대교 건설현장 (부산광역시 소재)에서 교각 기초 말뚝의 시공시추조사시에 해상에서 PMT를 수행하였으며 일반 토사층에서 성공적으로 시험을 완료하였다.

## 2. 프레스미터의 종류 및 특성

프레스미터에는 시추장비에 의해 미리 형성된 시험공에 시험기구를 삽입하여 시험을 수행하는 선행천공형 프레스미터 (PBP, Pre-bored pressuremeter), 시험기구의 선단에 굴삭기계가 장착되어 스스로 시험공을 형성하여 시험을 수행하는 자가천공형 프레스미터 (SBP, Self-boring pressuremeter), 그리고 시험기구를 시험위치에 압입한 후 시험을 수행하는 압입형 프레스미터 (PIP, Pushed-in pressuremeter)의 3종류가 있다. PBP는 사질토 지반과 자갈지반에의 적용성이 극히 불량하였으며, SBP나 PIP의 풍화암이나 연암에의 적용성도 극히 불량하였다.

PMT결과로부터 정지토압( $P_0$ ), 항복압력 (또는 크립압력,  $P_f$ ), 극한압력( $P_l$ ), 그리고 변형계수( $E_m$ )등을 알아낼 수 있으며, 이 값들을 활용하여 말뚝기초의 연직지지력과 침하량 산정, 말뚝기초의 수평지지력 산정, 말뚝기초의 하중전이 곡선 ( $t-z/q-z$ ,  $p-y$ 곡선)의 추정 그리고 확대기초의 지지력과 침하량 산정 등을 할 수 있으며, 각종 수치해석 (FEM, BEM, DEM 등)에서 모델링될 지반에 대한 입력변수 산정 등도 할 수 있다. 또한, PMT결과를 통하여 지반의 강도변수들도 추정할 수 있으며, 앵커의 지지력 산정과 옹벽의 탄성해석 등도 수행할 수 있다 (Baguelin et al., 1978).

## 3. 벤토나이트 안정액을 사용한 해상 PMT 수행사례

시험위치 상단까지는 케이싱을 삽입한 다음 시험공을 형성하였으며, 이 때, 벤토나이트 안정액을 사용하지 않았을 경우 발생할 수 있는 여러가지 문제점과 그 원인들을 아래에 열거하였다.

- (1) 시험공벽의 자립도 부족 (그림1 참조)
- (2) 시험공 크기의 확장 (그림2 참조)
- (3) 굴삭잔류물 (또는 슬라임)의 침전으로 인한 시험공의 메워짐
- (4) 시험공내에 천공으로 인해 유발된 상향침투로 인한 시험공 붕괴 또는 보일링 현상 발생
- (5) 시추작업자의 숙련도 부족 및 신중한 자세 결여 (사진1 참조)

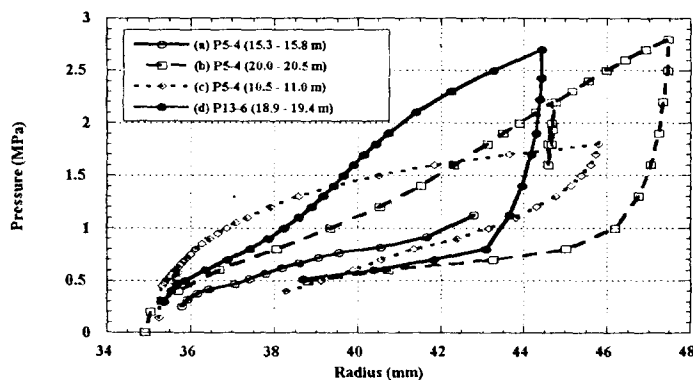


Fig. 1. PBP test results in sandy soils ; (a) collapse of test hole, (b) expansion of test hole diameter, (c) pushed into collapsed soil, (d) typical PBP test with Bentonite slurry.

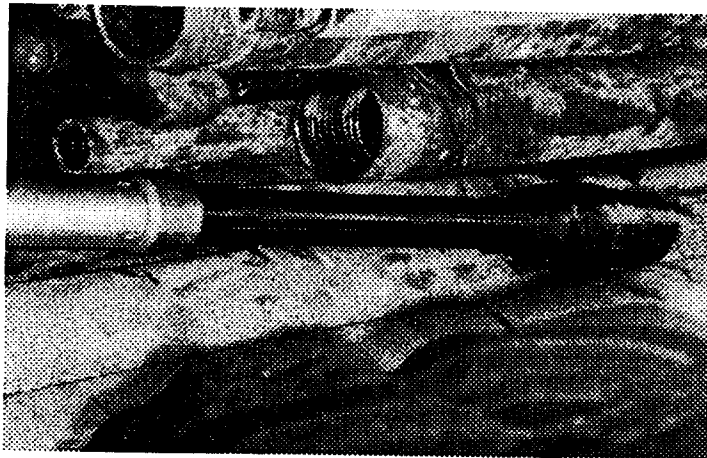


Photo 1. Photo of pressure membrane exploded inside the casing tube.

현장시험은 남항대교 (부산광역시 소재) 건설현장의 해상 교각 기초말뚝 설치위치에서 수행되었으며 ((주)도화지질, 1998), 말뚝정재하시험위치의 시추조사에서 지반특성치 산출을 위하여 수행하였다.

시험은 해상시추선 위에서 실시되었으며, 시험장치는 시추장비, 발전기, 양수기, 간단한 벤토나이트 안정액 공급설비 등으로 구성되었다 (그림 2). 벤토나이트 안정액 공급설비는 신선한 벤토나이트 안정액 공급조, 사용후 벤토나이트 용액의 회수조 (또는 1차 침전조), 2차 침전조 그리고 재생된 또는 신선한 벤토나이트 용액 보충조 등으로 구성되었으며, 해상시추선 위의 제한된 공간에서 작업가능하여야 하였으므로 크기에 있어 많은 제약을 받았다.

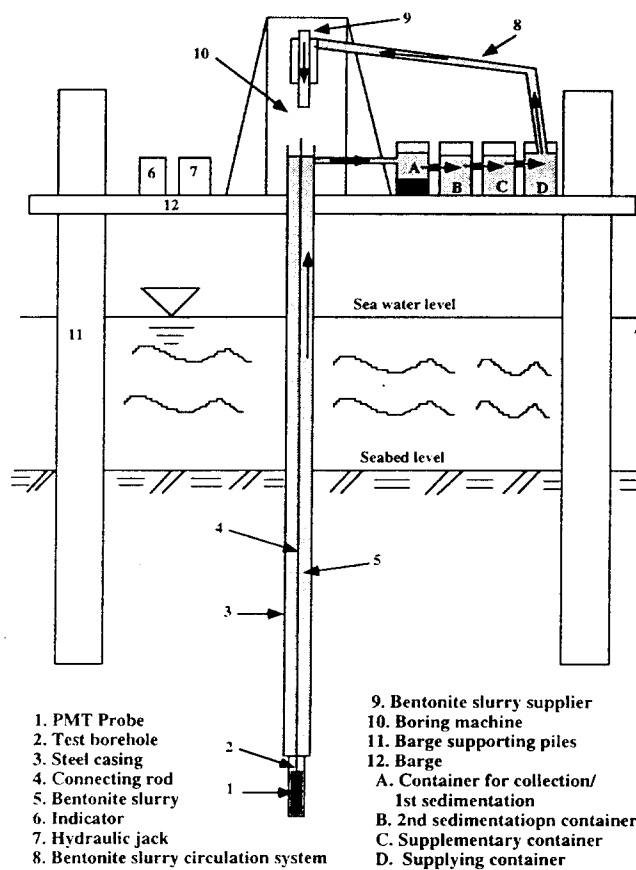


Fig. 2. Schematic diagram for PMT on the seafloor

먼저 시험할 위치까지 케이싱을 굴진한 후 시험공 천공을 위한 굴삭장비를 삽입하고 연결막대 내부를 통하여 벤토나이트 안정액을 주입하였다. 이 때, 시험공내의 벤토나이트 안정액의 농도가 공급조의 벤토나이트 안정액의 주입한 농도 (벤토나이트 : 해수 = 27 : 73 (중량비))와 같아질 때까지 계속 주입하여야 한다. 시험공 천공을 완료한 후 굴삭장비를 회수하고 PMT를 시험공에 삽입하였다. PMT가 시험공 바닥에 도달한 경우는 PMT연결용 막대를 고정시키지 않고 상단을 자유로운 상태로 두었다. 측정이 완료된 후 벤토나이트 안정액을 회수조 (또는 1차 침전조)에 회수하여 재사용할 수 있도록 하였다.

시험에 사용된 PMT장비는 Elastometer-200 (일본 OYO사 제품)이었으며, 압력튜브의 외경은 70mm였고 재하용량은 30 kg/cm<sup>2</sup>와 80 kg/cm<sup>2</sup>의 두 종류를 지반의 강도에 따라 선택적으로 사용하였다 (Oyo corporation, 1991).

PBP시험 수행시 시추공 P5-4에서는 벤토나이트 안정액을 사용하지 않았으며, 시추공 P9-7과 시추공 P13-6에서는 벤토나이트 안정액을 사용하였다. 따라서, P5-4에서 수행된 PBP시험에서는 양호한 결과를 얻지 못하였으나 P9-7과 P13-6에서 수행된 PBP시험들에서는 모든 종류의 지반에서 양호한 시험 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4. PMT수행 결과 및 분석

벤토나이트 안정액을 사용하여 시험공을 형성한 후 수행된 대표적인 PBP시험결과를 그림 3에 나타내었다 (도화지질, 1998). 시험시작과 함께 멤브레인 내부에 작용된 압력이 멤브레인의 강성과 벤토나이트 안정액의 저항압력과 합과 평형을 이루는 상태가 점 A이고, 그 이후 점 B까지는 멤브레인 강성에 의하여 압력이 증가하게 되는데 이 단계에서는 선형적인 급격한 부피증가만 수반하게 되었다. 점 B에서는 멤브레인이 벤토나이트 필터케익 (filter cake)과 접촉하게 되지만 시험공 측벽에 형성된 필터케익을 압축하고 굴착과정에서 이완된 시험공 측벽을 원상태로 복원시켜 점 C에서 정지상태에 도달하였다. 즉, 점 C에서 비로소 원지반을 압축하는 단계로 볼 수 있었으며, 여기서, 정지토압  $P_0$ 를 구할 수 있었다. 구간 CD는 탄성구간으로 볼 수 있었고 따라서 점 D에서 항복응력  $P_y$ 를 구할 수 있었다. 토사지반에서 PBP 시험을 수행할 경우 극한압력을 구하는 것은 쉽지 않을 것으로 판단되었다. 현 위치에서는 지반의 강도가 크지 않아 용량 30 kg/cm<sup>2</sup>의 유연한 멤브레인을 사용하였는데, 멤브레인의 파손 가능성으로 인하여 더 이상 압력을 증가시키지 않았으며, 최대용량까지 재하하더라도 극한압력을 구하는 것이 곤란할 것으로 예상되었다.

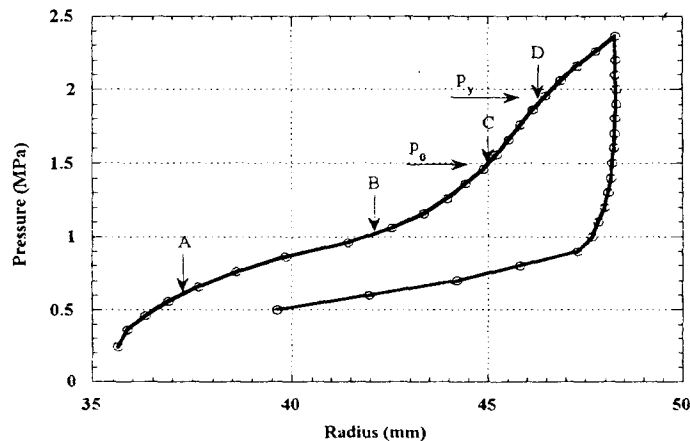


Fig. 3. Typical PBP (Pre-bored pressuremeter) test result performed with bentonite slurry (P9-7, 10.7 - 11.2 m)

그림 1에는 사질토에 대한 시험결과를 도시하였는데, 여기서 벤토나이트 안정액을 사용하지 않아 실패한 사례 (a)와 양호하지 못한 시험결과를 얻은 사례들 ((b)와 (c)), 그리고 벤토나이트 안정액을 사용하여 양호한 시험결과를 얻은 사례 (d)의 시험곡선을 함께 나타내었다. 시험 (a)의 경우에는 시험공벽이 붕괴되어 압력을 증가시켜도 멤브레인이 시험공 측벽에 접촉되지 않아 시험이 불가능하였고 시험 (b)의 경우에는 세립질이 다소 많이 분포되어 있어 시추공의 형성은 가능하였으나 시추공 크기가 너무 크게 형성되어 매우 큰 변위에서 탄성구간이 나타났다. 이러한 상황은 사질토내에 작은 입경의 자갈이나 조개껍질 등이 들어있는 경우에 발생할 수 있는데, 이런 사례들은 벤토나이트 안정액을 사용하더라도 나타날 수 있으므로 매우 주의하여야 할 것이다. 시험 (c)는 시험공 측벽이 붕괴되어 시험공에 침전된 슬라임에 수행된 사례이며, PBP시험기를 슬라임 속에 자중으로 낙하시켜 관입하거나 또는 서서히 슬라임 속에 밀어 넣어 수행된 시험결과이다. 따라서, SBP나 PIP 시험결과곡선과 유사한 경향을 나타내었으며, 원지반의 지반특성치를 전혀 나타내지 못하는 것으로 볼 수 있었다. 시험 (d)에서는 시험공 굴착시 벤토나이트 안정액을 사용하였으며, PBP시험의 전형적인 결과곡선과 유사하였으며 매우 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 4에는 자갈이 다량 함유된 지층이나 자갈층에서 수행된 PBP 시험결과를 나타내었다. 시험 (a)에서는 벤토나이트 안정액을 사용하지 않아 시험공 측벽이 붕괴되어 시험이 불가능하였다. 시험 (b)에서는 벤토나이트 안정액을 사용하였는데도 시추기능공들의 숙련도 부족과 주의력 결여로 인하여 시험공 측벽이 다소 확장되어 매우 큰 변위에서 탄성구간이 발생하였다. 시험곡선은 PBP시험의 전형적인 곡선과 유사하였으나 탄성구간이 채 끝나지도 않은 상태에서 시험을 종료할 수 밖에 없었다. 따라서, 항복압력을 구할 수 없었으므로 극한압력의 추정도 불가능하였으며, 이 실험결과로는 수치해석용 입력변수인 탄성계수의 추정은 가능하였으나 강도특성에 관한 자료의 획득은 불가능하였으므로 설계 등의 목적에 사용할 수가 없었다. 시험 (b)에서는 시험공 형성시 벤토나이트 안정액을 사용하여 매우 양호한 시험결과를 얻었다.

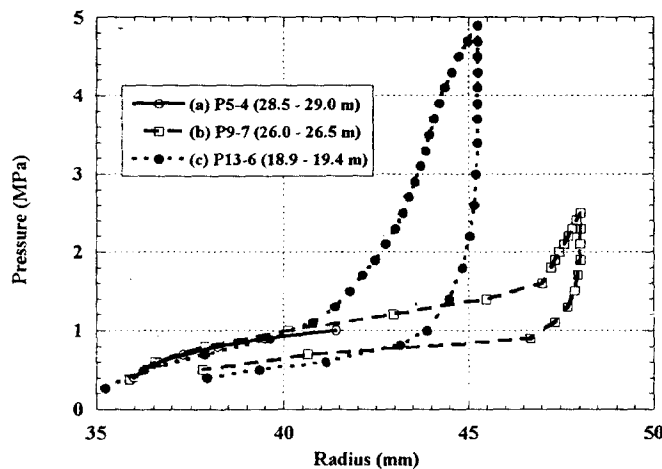


Fig. 4. PBP test results in gravelly soils ; (a) collapse of test hole, (b) expansion of test hole diameter, (c) typical PBP test with Bentonite slurry.

그림 5에는 풍화토에 대한 시험결과를 나타내었다. 시험 (a)에서는 시험공 크기가 확장된 사례이며, 시험공 형성시 조립질 풍화잔류물의 탈락으로 인한 공동형성과 시추공벽의 확장으로 인해 발생하였다. 그러나, 시험곡선의 추이는 PBP의 전형적인 결과와 유사하지만 매우 큰 변위에서 탄성구간이 나타나므로 극한압력을 구할 수 있는 가능성은 희박하였다. 시험 (b)에서는 벤토나이트 안정액을 사용하였으며 매우 양호한 결과를 얻었다.

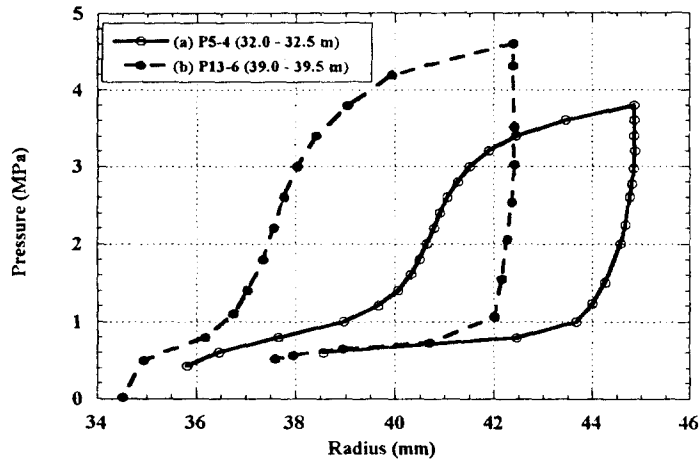


Fig. 5. PBP test results in weathered soils ; (a) expansion of test hole diameter, (b) typical PBP test with Bentonite slurry.

그림 6은 점성토에 수행된 시험결과이며, 이 경우에는 점성이 없는 지층에서 일반적으로 발생할 수 있는 시추공벽의 붕괴나 시추공 크기의 확장 등으로 인한 문제는 나타나지 않았다. 그러나, 시험 (a)에서와 같이 상부 시추공 굴착시 또는 시험공 형성시 조립질의 슬라임이 시험공에 잔류하여 굴착 장비 제거후 시험공에 침전될 수 있었다. 슬라임 속에 시험기를 압입하였으므로 PIP의 시험결과와 유사하였다. 시험공에 침전된 슬라임은 순환수를 고압분사하여 제거할 수도 있으나 시험 (b)에서는 벤토나이트 안정액을 주입한 후 시험공을 형성하였고 고압분사하여 슬라임을 제거하여 보다 더 양호한 시험 결과를 얻을 수 있었다.

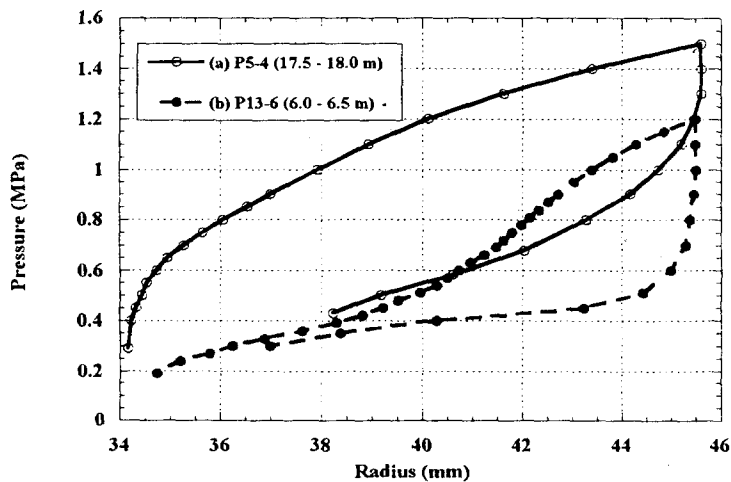


Fig. 6. PBP test results in cohesive soils ; (a) pushed into slime, (b) typical PBP test with Bentonite slurry.

시추공 P5-4, P9-7 그리고 P13-6에서 PBP 시험의 수행 심도, 지반종류, N치, 일축압축강도, 삼축시험 결과 그리고 PMT에 의한 지반특성치들을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Summary of results of several tests performed in field and laboratory.

시험공 번	시험위치 (m)	토질분류 기호	N치	PMT			
				정지토압 (Kg/cm <sup>2</sup> )	항복압력 (Kg/cm <sup>2</sup> )	극한압력 <sup>1)</sup> (Kg/cm <sup>2</sup> )	변형계수 (Kg/cm <sup>2</sup> )
P5-4	5.2-5.7	SP-SM	10	7.9	10.9	18.5	43.6
	10.5-11.0	SM	22	5.4	7.2	12.2	197.7
	15.3-15.8	SW-SM	17	시험공벽붕괴로 실패			
	17.5-18.0	CL	>50	8.5	11.0	18.7	51.3
	20.0-20.5	SM	8	18.0	24.0	40.8	139.7
	23.0-23.5	CL	50/16	8.6	10.4	17.7	35.3
	25.5-26.0	CH	>50	6.8	9.1	15.5	95.7
	28.5-29.0	자갈층	>50	시험공벽붕괴로 실패			
32.0-32.5	풍화토	50/16	20.0	26.0	44.2	768.4	
P9-7	7.2-7.7	SM	?	1.6	4.9	8.3	217.4
	8.5-9.0	SM		3.9	7.4	12.6	99.7
	10.7-11.2	S		16.6	19.6	33.3	187.1
	26.0-26.5	자갈층		18.0	미확인 <sup>2)</sup>	×	559.4
	34.5-35.0	풍화암	50/2	31.0	75.0	127.5	4,134
P13-6	6.0-6.5	CL	23	7.0	9.0	15.3	106
	8.0-8.5	SM	27	4.0	10.0	17.0	201.2
	12.5-13.0	CL	41	10.0	18.0	30.6	163.4
	15.0-15.5	자갈	50/3	27.0	41.0	69.7	802.2
	18.9-19.4	SM	47	13.0	18.0	30.6	205.0
	30.5-31.0	자갈	>50	56.0	미확인 <sup>2)</sup>	×	3,758.5
	39.0-39.5	풍화토	50/16	18.0	30.0	51.0	833.1

주 : <sup>1)</sup> 모든 시험에서 극한압력을 확인하는 것이 곤란하였으므로 Walker & Jewell (1979)가 제안한  $P_l = 1.7P_y$  ( $P_l$  : 극한압력,  $P_y$  : 항복압력)의 관계를 이용하여  $P_l$ 을 추정하였음.

<sup>2)</sup> 탄성구간을 벗어나지 않은 상태에서 시험을 종료하였음.

<sup>3)</sup> 탄성구간을 벗어나지 않은 상태에서 압력튜브가 파손되어 시험을 종료하였음.

## 5. 결론

국내에서 일반적으로 사용하고 있는 선행굴착형 프레스미터 (PBP, Pre-bored pressuremeter) 시험의 일반 토사지반에서의 적용성을 제고하기 위하여, 부산광역시 소재 남항대교 건설현장에서 해상 PBP 시험을 수행하였다. 교각기초말뚝 3개소에서 말뚝정재하시험을 수행할 예정이며, 이 위치에 대한 지반강도 및 변형특성을 알아내기 위하여 수행하였다. 본 연구의 결론들은 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 사질토층, 자갈층, 풍화토층에서는 PBP시험의 적용이 곤란한 것으로 알려져 있으나, 시험공 형성시 벤토나이트 안정액을 사용하여 PBP시험을 성공적으로 수행하였다. 또한, 점성토 지반에서도 벤토나이트 안정액을 사용하여 더욱 양호한 시험결과를 얻을 수 있었다.
- 2) 비점성지반에서 PBP의 수행이 곤란한 이유로는 시험공벽의 붕괴, 시험공 크기의 확장, 굴삭 잔류물의 침전으로 인한 시험공의 막힘현상, 시험공에서 유발된 상향의 침투로 인한 시험공 붕괴 또는 보

일링 현상, 그리고 시추작업자의 숙련도 부족 등이었다.

- 3) 사질토층이나 자갈층에서는 벤토나이트 안정액을 사용하더라도 시험공이 확장될 가능성이 높았으므로 시추작업자가 더욱 세심하게 작업을 수행해야 할 것으로 판단되었다.
- 4) 일반 토사지반에서 PMT를 수행할 경우 극한압력  $P_1$ 을 구하는 것은 극히 곤란하였다. 그러므로, 항복압력  $P_0$ 를 이용하여 극한압력을 추정해야 할 것으로 판단되었다.

## 참고문헌

1. Clarke, B. G. (1995), "Pressuremeters in geotechnical design," Blackie Academic & Professional.
2. Baguelin, F., Jezeguel, J. H., Shields, D. H. (1978), "The pressuremeter and Foundation engineering," Trans Tech Publications.
3. Oyo corporation (1991), "Model-4018, Elastometer-2 indicator operational manual," Oyo corporation Instruments Division.
4. (주)도화지질 (1998), "부산 남항대교 교각기초지점 공내재하시험 결과보고서," (주)한진종합건설, (주)현대건설, 1998. 4.
5. Walker, L. K. and Jewell, R. L.(1979), "The selection of design parameters in weathered rocks," Proc. 7th Eur. Conference SMFE, Brighton, Vol. 2, pp. 287-297