

공내재하시험을 이용한 부산지역 해저지반의 평가 Evaluation for Marine Ground in Pusan Area using PMT

김동철¹⁾, Kim, Dong-chul, 최용규²⁾, Choi, Yongkyu

- 1) 경성대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept of Civil Engineering, Kyungsoong University.
- 2) 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept of Civil Environmental Engineering, Kyungsoong University

SYNOPSIS : In this study, applicability of PMT in domestic area and test procedure were studied. At six test holes of three construction sites in Pusan, PMT using Elastometer-200 type was done. The problems during test were investigated and the test results were analysed. Limit pressure, p_l could be determined by $p-\Delta v/v$ method.

Using PMT results, marine soil in Pusan could be classified approximately. Net limit pressure value was in the range of 6.4 ~ 22.5 kg/cm² in clay, 2.2 ~ 30.0 kg/cm² in sand, 13.0 ~ 58.0 kg/cm² in weathered soil and 47.0 ~ 190.0 kg/cm² in weathered rock. Also, E_m/p_l value was in the range of 2.4 ~ 7.0 in clay, 2.6 ~ 12.1 in sand, 6.8 ~ 17.1 in weathered soil and 7.2 ~ 29.6 in weathered rock.

Key word : PMT (pressuremeter test), PMT procedure, in-situ total horizontal stress, limit pressure, ground type

1. 서 론

지반공학적인 문제를 해결하기 위해서는 지반조사가 필수적이고, 지반의 정확한 역학적 특성치를 알아냄으로써 토질구조물의 더욱 최적화된 설계를 가능하게 할 수 있다. PBP (pre-bored pressuremeter) 시험의 경우, 쉽지는 않지만 시험공만 제대로 형성할 수 있다면 토사층에서 기반암층까지 모든 종류의 지층에서 아주 효과적으로 지반의 역학적 특성치를 알아낼 수 있는 시험이다. 그리고 현장의 응력상태를 가장 유사하게 모델링하여 응력-변형거동관계, 강도 등에 관한 지반의 특성치를 구할 수 있다. PMT의 결과로 추정할 수 있는 지반특성치는 대략적인 지층확인, 정지토압 (σ_{H0}), 수평지반변형계수 (k_s), 지반의 탄성계수 (E), 비배수점착력 (c_u), 유효마찰각 (ϕ'), 횡방향압밀계수 등이며, 이들 지반특성치들은 설계에 이용될 수 있다.

본 연구에서는 말뚝재하시험을 실시하였거나 실시할 현장에서 시추조사와 Elastometer-200을 사용한 PMT를 실시하였다. 이 과정에서 시험절차를 고찰하고, PMT결과에서 얻을 수 있는 지반의 특성치를 추정하였다. 여기서, 추정된 p_l 과 E 값을 이용하여 부산의 해저 지반을 개략적으로 분류하였다.

2. PMT장비와 시험절차

2.1 Elastometer-200

본 연구에서 사용한 장비 Elastometer-200 (일본 OYO사 제작)은 선형천공형 프레스미터 (PBP; pre-bored pressuremeter)의 일종이었으며, 멤브레인의 외경은 70 mm이었고, 재하용량 30 kg/cm², 80 kg/cm² 그리고 200 kg/cm²의 세 종류를 지반의 강도에 따라 선택적으로 사용할 수 있었다. 시험공의 변위는 압력에 의해서 생기는 멤브레인의 안쪽반경변위를 고무두께변화로 보정하여 시험공 공벽의 변위를 측정하게 되어있었다.

2.2 시험절차

표준화된 국제적인 시험규격은 없는 실정이며, 여러 나라에서 사용되고 있는 시험방법은 6가지가 제안되어 있으며 표 1에 요약하였다. 본 연구에서 사용한 시험방법은 Mair와 Wood (1987)가 제안한 절차를 사용하였다.

시험과정에서 가압하는 하중단계의 크기는 연약한 점토 (soft clay)의 경우 0.15 kg/cm²이하, 굳은 점토 (stiff to very stiff)의 경우 0.5 kg/cm²이하, 약한 암반 (weak rock)의 경우 1 kg/cm² 이상으로 결정하거나, 점토의 경우 $c_u/6$ 정도의 값으로 압력을 증가시키고, 최소한 σ_{h0} 와 p_y 사이의 직선구간에서 6개이상 점이 찍히도록 시험을 실시할 것을 Mair와 Wood (1987)가 제안하였다. ASTM D4719-87 (1994)에서는 0.25, 0.5, 1, 2 kg/cm²중 지층의 종류에 따라 선택하여 재하할 것을 제안하였다. 본 연구에서는 SPT와 PMT을 병행하여 실시하였는데 PMT를 실시하기전 SPT를 먼저 실시하고, 지반의 한계압력을 개략적으로 판단한 다음 재하압력 단계의 크기를 결정하여 시험을 실시하였다.

표 1. 일반적으로 사용되는 시험절차의 요약 (Clark, 1995)

| Method | Type | Probe | Ground condition | Recording intervals | Stress rate | Strain rate |
|-------------------------|--------|-------|------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Menard (LCPC) | Stress | MPM | All | 15, 30, 60 sec. | $p/10$ | |
| ISRM (1987) | Stress | PBP | Rock | Not specified | Not specified | |
| ASTM (1988) | Stress | PBP | All | 30 sec. | 25~200 kN/m ² | |
| ASTM (1988) | Strain | PBP | All | 30 sec. | | $0.05 \sim 0.1 \times V_0$ |
| GOST (1985) | Stress | PBP | Soils | Varies | 25 kN/m ² | |
| Stress (Clarke, 1995) | Strain | All | All | 10-30 sec. | | Varies |
| Strain (Clarke, 1995) | Strain | All | All | 10-30 sec. | | 1 %/min |
| Holding* (Clarke, 1995) | Strain | All | All | 10-30 sec. | | 1 %/min during; 0 % during holding |

* 간극수압계가 부착된 프레스미터를 사용하여 간극수압소산시험에 적용.

크리프 시간 (creep time)은 시험과정에서 압밀이 발생하게 되어 지반의 전단강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Anderson et al., 1986). 표 1에 제안된 여러 시험방법들은 서로 다른 크리프 시간을 추천하고 있으며, 이것에 대해서는 표준화가 필요할 것으로 판단되었다.

Briaud (1992)는 시험과정에서 제하와 재하 (unload/reload)는 항복압력 부근에서는 실시하지 말고, 제하되는 압력의 크기는 순항복압력 (net yield pressure; $p_y - \sigma_{h0} = p_y^*$)의 절반으로 할 것을 제안하였다.

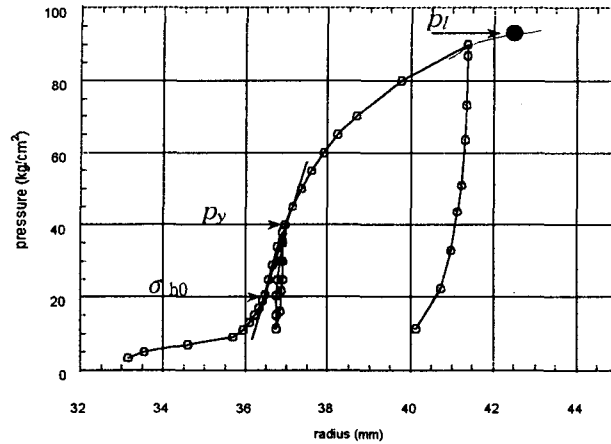


그림 1. PMT 결과 (00대교 TP1 35.2 ~ 35.7 m)

시험의 실시 간격은 1 m로 추천하고 있으나 (Clark, 1995), 시험공벽이 붕괴되기 쉬운 지반 특성상 시험공을 2 m정도 만들어 1회 시험을 실시할 수 있었고, 실제 현장에서 PMT시험은 시추작업과 병행되기 때문에 여건상 1 m간격으로 시험공을 형성하는 것은 곤란하였다. 설치될 기초구조물의 거동과 지지 특성에 따라 시험간격을 결정하는 것이 올바를 것이다. 본 연구에서는 현장타설말뚝과 항타말뚝의 해석을 위한 지반조사이었으므로 최대한 시험간격을 좁히고, 말뚝의 선단이 위치할 깊이에서 시험이 실시될 수 있도록 하였다.

3. PMT 결과 및 지반의 특성치 추정

3.1 한계압력

한계압력 p_l 은 지반의 강도와 관련된 지반의 역학적 특성치와 기초의 극한지지력을 얻는데 사용된다. 그리고 PMT장비의 종류와 크리프 시간과는 관계없이 거의 비슷한 값을 얻을 수 있으며 현장의 응력상태와 지반 강도의 함수로 결정된다 (Clark, 1995).

p_l 은 $\Delta v/v_0 = 1$ 로 정의된다. 그러나 PBP장비의 최대 공동변형을 (cavity strain, ϵ_c)은 30% 정도밖에 되지않고, 실제 한계압력까지 재하하면 공벽의 붕괴로 시험기를 회수하지 못하는 경우까지 발생할 수 있다. 이러한 이유로 한계압력을 시험에 의하여 구하는 것은 상당히 어려운 것으로 알려져 있다 (Mair et al., 1987). 현장실험으로 부터 직접 구하지 못한 한계압력 p_l 은 다음의 다섯 가지 방법으로 결정할 수 있다.

- (1) $p - 1/\epsilon_c$ 곡선을 그려서 p_l 을 결정하는 방법 (Ladd et al., 1980)
- (2) $p - \log(\Delta v/v_0)$ 곡선 (그림 2)에서 $\Delta v/v_0 = 1$ 일 때의 압력 (Ladd et al., 1980)
- (3) ASTM D 4719-87 (1994)에서 제안한 방법
- (4) Amar et al. (1991)가 제안한 방법
- (5) 암반의 경우 $1.7p_y = p_l$ 에 의하여 결정 (Walker et al., 1979)

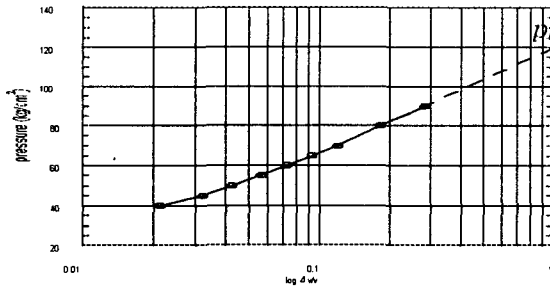


그림 2. $p - \ln(\Delta v/v_0)$ 곡선에 의한 p_l 결정
(00대교 TP1, 35.2~35.7 m)

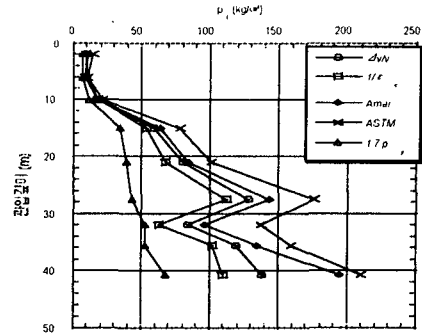


그림 3. 00대교 TP1의 추정된 p_l

그림 3은 00대교 시험말뚝 (TP1) 위치의 PMT 결과 ((주)도화지질, 1999a, b)를 이용하여 위의 p_l 을 찾는 다섯가지 방법으로 추정하여 깊이별로 나타낸 것이다. ASTM의 방법은 시험과정과 측정치의 보정방법이 본 연구에서 사용된 장비의 보정방법과 일치하지 않았으므로 사용할 수 없었고, $1.7 p_l$ 은 일반토사지반에는 사용하기가 어려운 것으로 판단되었다. 또한 $p - 1/\epsilon_c$ 의 방법은 p_l 의 정의와 일치하지 않는 방법이라 판단되었다. p_l 의 정의는 $\Delta v/v_0 = 1$ 이므로 위에 제안된 여러 가지 방법 중에서 이론적으로 가장 타당하다고 판단되는 것은 $p - \Delta v/v_0$ 와 Amar 등이 제안한 방법이며, $p - \Delta v/v_0$ 방법에 의해 안전측으로 추정된 p_l 이 합리적인 것으로 판단되었다.

그리고 p_y 값을 얻지 못한 시험의 경우는 상기의 외삽법을 이용하더라도 p_l 를 추정할 수 없었다. 견고한 풍화암과 연암이상의 지반에서는 작은 용량의 Elastmeter-200으로는 p_y 를 찾을 수 없었으므로 재하용량 200 kg/cm²의 장비로 교체하여야 할 것으로 판단되었다.

3.2 개략적인 지반분류

표 2. 지반의 종류에 따른 순한계압력 (Baguelin, 1992)

| Soil | Description | SPT Blow count | Undrained shear strength (kg/cm ²) | Net limit pressure (kPa) |
|------|-------------|----------------|--|--------------------------|
| Sand | Loose | 0-1 | | 0-0.50 |
| | Medium | 10-30 | | 0.50-1.50 |
| | Dense | 30-50 | | 1.50-2.50 |
| | Very dense | >50 | | >2.50 |
| Clay | Soft | | 0-0.25 | 0-2.00 |
| | Firm | | 0.25-0.50 | 2.00-4.00 |
| | Stiff | | 0.50-1.00 | 4.00-8.00 |
| | Very stiff | | 1.00-2.00 | 8.00-16.00 |
| | Hard | | >2.00 | >16.00 |

표 3. 지반의 종류와 PMT결과 (Clarke, 1995)

| Ground type | E_m/p_l |
|--|-----------|
| Very loose to loose sand | 4-7 |
| Medium dense to dense sand | 7-10 |
| Peat | 8-10 |
| Soft to firm clay | 8-10 |
| Stiff to very stiff clay | 10-20 |
| Loess | 12-15 |
| Weathered Rock (depends on degree of weathering) | 8-40 |

표 2와 표 3에는 PMT 결과 (p_b , E_m)를 이용한 개략적인 토질분류방법을 제시하였다. Baguelin (1992)은 순한계압력만을 이용하여 사질토에서는 N치, 그리고 점성토에서는 c_u 와의 관계를 제안하였으

며, Clarke (1995)는 한계압력과 매나드계수와의 비 (E_m/p_1)를 이용한 토질분류를 개략적으로 제안하였다.

3.3 지반의 특성치들의 활용 방안에 대한 제안

PMT결과로 추정된 지반의 역학적 특성치 (c_u , ϕ')는 다른 원위치시험이나 실내시험으로 예측된 c_u , ϕ' 등과 비교하여 큰 차이가 나고, 그 정확한 원인이 밝혀지지 않았기 때문에 기존의 지지력공식이나 다른 이론에 적용하여 사용하기는 힘든 실정이다.

그러나 외국의 경우 PMT시험에서 구해지는 p_1 , σ_{10} , 그리고 E_m 등은 고유의 독특한 경험적인 설계법에 사용되고 있다. PMT결과를 직접 이용한 경험적인 설계법은 프랑스에서 성공적으로 이루어져 왔으며 얇은 기초의 지지력과 침하량, 말뚝의 연직극한지지력, 수평말뚝의 거동, 앵커의 설계 등에까지 이용되고 있다. 그리고 PMT에서 구한 지반의 탄성계수들은 각종 해석코드와 유한요소해석의 입력치로 널리 사용되고 있다 (Gambin, 1995).

PMT시험을 국내지반에 적용하기 위해서는 PMT에 대한 이해와 시험과정의 표준화에 관한 연구가 진행되어야 하고, 추정된 지반특성치와 다른 시험결과와의 비교를 통한 검증작업이 필요할 것으로 판단되었다.

4. 사례연구

부산의 영선동과 서구 남부민동을 잇는 해상에 건설되고있는 △△대교 현장과 부산의 남구 남천동과 해운대구 수영만의 00대교현장에서 시험을 수행하였다.

본 연구에서 선정된 사례는 3개지역의 6개 시추공 (부산광역시 건설안전관리본부, 1998a, b ; (주)도화지질, 1999a, b) 이었으며, PMT를 실시한 회수는 39회였다. 이 중에서 멤브레인이 파열된 시험 1회는 사용하지 않았다. 그리고 사용된 압력튜브의 용량부족으로 p_y 를 구하지 못한 시험이 7회 발생하였다. 38회중 사질토 지반에 실시된 시험은 14회이었으며, 점성토 지반에서 5회, 풍화토 지반에서 4회, 풍화암 지반에서 13회, 그리고 연암에서 2회의 PMT를 실시하였다.

4.1 PMT결과 분석

그림 4는 00대교지역의 한 시험위치에서 수행된 PMT의 결과와 이로부터 추정된 지반의 역학적 특성치를 요약하여 나타낸 전형적인 사례이었다. 다른 2개 지역에 대한 것은 지면관계상 수록하지 않았다.

그림 4에는 PMT 결과 (σ_{10} , p_y , p_1 , E_m , E , c_u , ϕ')를 나타내었다. 여기서, σ_{10} 와 p_y 은 프레스미터 곡선으로부터 직접 판독한 값이고, p_1 은 5가지 방법으로 분석한 값중에서 가장 합리적인 것으로 판단되는 Ladd 등 (1980)이 제안한 방법에 의한 값으로 선정하였다. 또한, E_m 은 프레스미터 곡선에서 직접 계산하였으며, 탄성계수 E 는 Menard (1962)가 제안한 방법에 의해 추정하였다. c_u 의 추정에는 Gibson 등 (1977)의 방법을 사용하였으며, ϕ' 의 추정에는 Wither 등 (1989)이 제안한 방법을 사용하였으나, 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 실내 시험에 의한 값들과 큰 차이를 보이고 있었으므로 실제적으로 사용할 수 있을 지에 대하여 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단되었다.

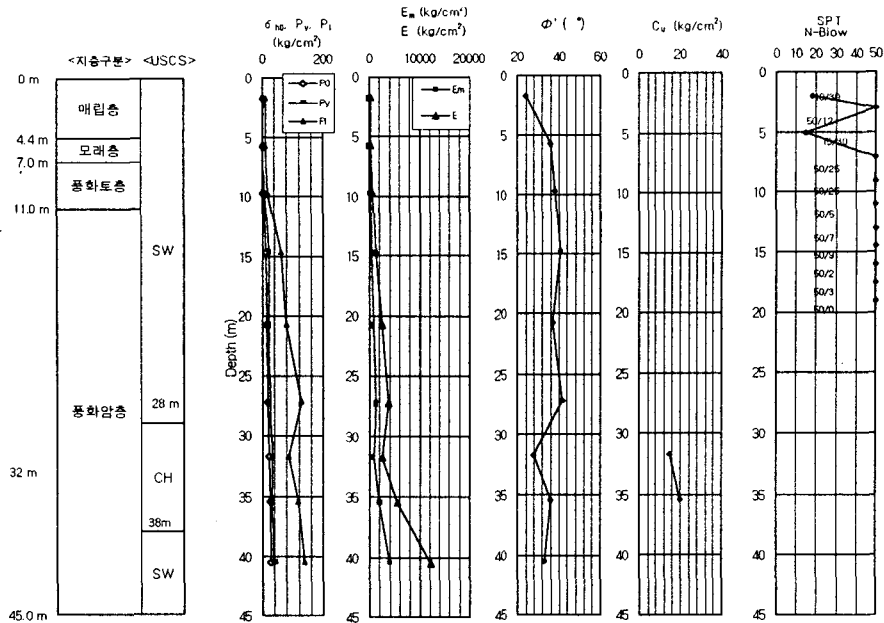


그림 4. TP1위치에서 실시된 PMT결과로 산출한 지반특성치의 요약

4.2 흙의 연경도 추정 및 지반의 종류 구분

흙에 실시된 PMT에서 구한 순한계압력을 Baguelin (1979)이 제안한 토질분류 방법에 의하여 도시하여 그림 5에 나타내었다.

Clark (1995)이 제안한 방법에 의하여 도시한 결과를 그림 6에 나타내었다. 상기의 두 방법으로 토질분류를 하였으나 다소 일관된 결과를 나타내지 못하였는데, PMT결과에 의한 토질분류방법이 너무 개략적인 것이어서 적용상 어려움이 많을 것으로 예상되었다.

풍화토에 대한 분류기준은 어느 방법에도 없었으므로 풍화토에서 구한 E_m/p_i 값을 그림 6에 도시하였다. 여기서, 풍화토는 풍화도에 따라 지반강도 및 특성이 크게 달라질 수 있으므로 E_m/p_i 의 분포범위도 매우 넓게 나타났다.

풍화암에 대한 분류기준은 Clarke (1995)의 방법에서 찾아볼 수 있는데, PMT 결과에서 구한 E_m/p_i 값은 그림 6에 도시하였다. 여기서, 풍화암도 풍화도에 따라 지반특성이 크게 달라지는 것을 알 수 있었다. 그러나, 본 지역에는 풍화가 많이 진척되어 있어 분류범위의 하한 경계에 근접한 값을 나타내었다. 그림 7와 8에는 부산지역 해저지반에 대한 PMT 결과 (p_i^* , E_m/p_i)를 각 지층종류별로 도시하였다.

그러나 PMT결과를 이용한 지반 종류의 추정은 CPT의 결과에서 지반의 종류를 평가하는 것처럼 시료를 육안으로 확인하지 않고 정량적인 결과치만으로 평가할 수 없을 것으로 판단되었다. 채취된 시료를 육안으로 확인하여 지반의 종류를 구분한 이후 지반의 연경정도를 평가해야 할 것으로 판단되었다.

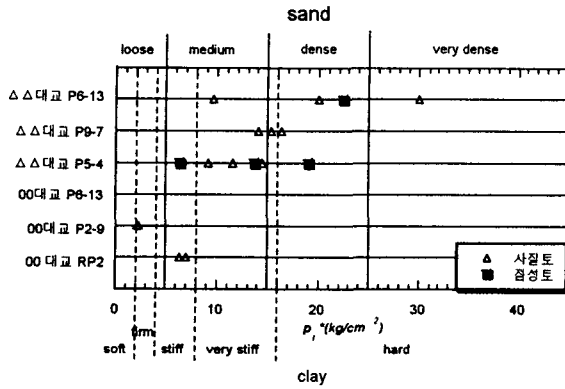


그림 5. Baguelin (1979)의 방법에 의한 지반의 분류

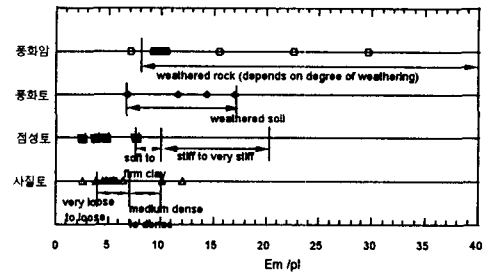


그림 6. Clarke (1995)의 방법에 의한 지반의 분류

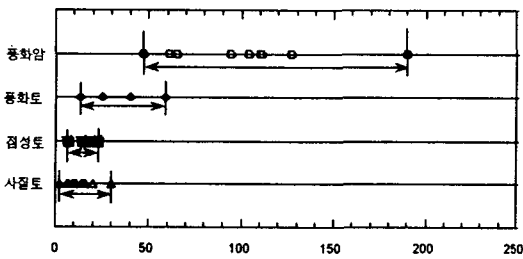


그림 7. 사례를 통해 살펴본 부산지역에서의 지반이 갖는 p_i^* 의 범위

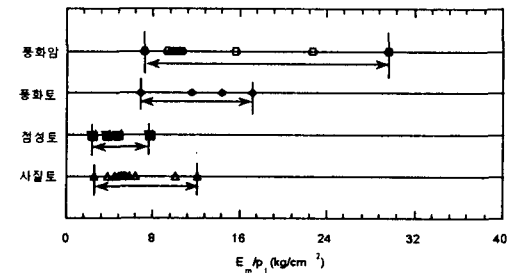


그림 8. 사례를 통해 살펴본 부산지역에서의 지반이 갖는 E_m/p_i^* 의 범위

5. 결론 및 제언

말뚝정재하시험이 실시되었거나 실시될 지반의 역학적 특성치를 알아내기 위하여 지반조사과정에서 PMT를 실시하였고, PMT 시험결과를 이용하여 지반의 역학적 특성치를 추정해 보았다. 본 연구의 결론과 제언은 다음과 같다.

1) 압력주머니의 팽창한계로 인하여 실험자료로부터 직접 구할 수 없었던 한계압력 p_l 은 실험자료를 이용하여 $p - \Delta v/v$ 방법에 의하여 외삽적인 방법으로 결정할 수 있었다.

2) PMT결과로 지반의 종류를 개략적으로 평가하는 것은 쉽지 않았다. p_i^* 과 E_m/p_i^* 값에 의한 토질 분류는 다소 일관된 결과를 나타내지 못하였으며, 풍화토, 풍화암 그리고 연암에 대한 지반분류는 할 수가 없었다. 그러나, 부산지역의 해저지반의 경우, p_i^* 의 값은 점성토의 경우 6.4~22.5 kg/cm^2 , 사질토의 경우 2.2~30.0 kg/cm^2 , 풍화토의 경우 13.0~58.0 kg/cm^2 , 풍화암의 경우 47.0~190.0 kg/cm^2 의 범위에 있었다. 또한, E_m/p_i^* 은 점성토의 경우 2.4~7.6, 사질토의 경우 2.6~12.1, 풍화토의 경우 6.8~17.1, 풍화암의 경우 7.2~29.6의 범위에 있었다.

3) PMT의 결과에 가장 큰 영향을 미치는 것은 시험공의 교란이었으며, 양질의 결과를 얻기 위해서는 숙련된 작업자와 현장 감독이 필요하였다.

4) 국내에서 PMT의 활용도를 제고하기 위하여 시험공의 형성, 시험과정의 표준화 그리고, 결과의 분석방법과 다른 시험의 결과와의 비교 등에 관한 연구가 많이 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 부산광역시 건설본부 (2000), "광안대로 건설공사 말뚝정재하시험 종합보고서 (육상부)," 2000. 1.
2. 부산광역시 건설안전관리본부 (1997a), "제2부산대교 건설공사 실시설계 종합 보고서," 1997. 6.
3. 부산광역시 건설안전관리본부 (1998b), "부산남항대교 건설공사 (1공구) 해상시공 BORING 지반조사 보고서," 1998. 5.
4. 부산광역시 건설안전관리본부 (1998), "부산남항대교 건설공사 (2공구) 해상시공 BORING 지반조사보고서," 1998. 5.
5. (주)도화지질 (1999a), "광안대로 5공구 공내재하시험 성과보고서," 1999. 6.
6. (주)도화지질 (1999b), "광안대로 1공구 공내재하시험 성과보고서" 1999. 9.
7. Amar, S., Clarke, B. G., Gambin, M. and Orr, T. L. L. (1991), "The application of pressuremeter test result to foundation design in Europe," Report to the ISSMFE.
8. Anderson, W.F. and Pyrah, I. C. (1986), "Undrained strength and deformation parameters from pressuremeter test result," Proc 2nd Int. Symp. Pressuremeter Marine Appl., Texam, ASTM STP 950, pp 149~152.
9. ASTM D 4719-87 (1994), "Standard test method for pressuremeter testing in soil,"
10. Baguelin, F., Jezeguel, J. H. and Shields, D. H. (1979), "The presuremter and foundation engineering," Trans Tech Publication.
11. Briaud, J. L. (1992), "The pressuremter," Balkema. Rotterdam, pp. 1~68.
12. Clark, B. G. (1995), "Pressuremeters in geotechnical design," Blackie Academic & Profesional, pp. 161~236.
13. Gambin, M. (1995), "Reasons for the success of menard pressuremeter," 4th International symposium on pressuremeters, Canada, pp. 1~16.
14. Gibson, R. E. And Anderson, W. F. (1961), "In-site measurement of soil properties with the pressuremeter," Public Wks. REV., 56. pp. 615~618.
15. Ladd, C. C., et al. (1980), "Evaluation of self-boring pressuremeter tests in Boston Blue Clay," US Dept. of Transp., Fed. Highway Admin., Washinton (DC), Report FHWA/RD 80/052.
16. Oyo Corporation (1991), "Model-4081, Elastometer-2 indicator operation manual," Oyo corporation instrument Divition.
17. Mair, R. J. and Wood, D. M. (1978), "Pressuremeter testing method and interpretation," CIRIA, p.p. 1~156.
18. Menard, L. and Rousseau, J. (1962), "L'évaluation des tassements, tendances nouvelles," Soil-Soils No. 1.