

## 준설점성토의 공학적특성

### Engineering Characteristics of Dredged Clay

김승렬, Seung-Ryul Kim

(주) 에스코 컨설턴트 사장, President, Esco Consultant Co. Ltd.

**SYNOPSIS** : Although the purpose of dredging in the past was merely as a means of lowering the water level, presently land reclamation from dredged fill is of greater interest.

From an economical standpoint, due to the difficulties in acquiring landfill for coastal projects, there is a growing trend toward simply using easily obtainable marine clay for use as fill. But because the ground formed by dredged fill has but low strength and is accompanied by large settlements, it is important that the engineering characteristics be fully investigated.

In order to use dredged Masan marine clays as fill material, the engineering characteristics have been studied in this paper.

**Key Words** : Dredged fill, Engineering characteristics

#### 1. 서론

과거의 준설매립은 부지조성 보다 수심확보에 주안점을 두어 준설시 발생하는 토사의 투기용 매립이 주목적이었다고 할 수 있다. 그러나, 근래에 와서는 그 양상이 바뀌어 부지활용측면의 준설매립이 더 강조되고 있는 실정이다. 그 이유로는 해안매립용 육상토를 구하는 것이 용이하지 않아 비교적 가격이 저렴한 해수면 아래의 토사를 매립재료로 선택하는 추세가 증가하고 있기 때문이다.

매립후의 부지이용 측면에서 보면 사질토를 준설하여 매립재료로 사용하는 것이 바람직하지만 매립지 주변에서 경제적으로 얻을 수 있는 재료를 구하다 보면 해성점토를 준설하여 매립하는 경우가 많이 발생하게 된다. 이렇게 점성토의 준설매립으로 조성된 부지는 지반강도가 적고 심한 침하를 동반하기 때문에 이에 대한 제반특성을 살펴본다는 것은 공학적으로 매우 중요하다.

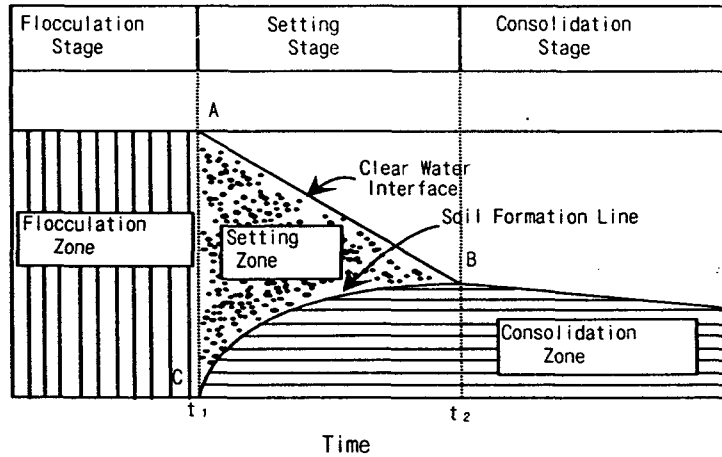
본고에서는 마산항의 해성점토를 준설하여 매립재료로 사용하고자 할 경우 이에 대한 공학적 특성에 대해서 간단히 살펴보고자 한다.

#### 2. 준설점성토의 침강특성과 체적비 변화

준설되어 투기된 점성토는 슬러리 상태로 높은 함수비를 갖게 되며, 준설 투기후 점성토 슬러리의 안정과 함께 토립자의 침강이 시작된다. 이러한 토립자의 침강속도를 추정하기 위하여 스토크스의 법칙(Stoke's Law)을 많이 사용하고 있다. 스토크스의 법칙은 토립자 형상이 구(球)이고 토립자 간의 간섭작용을 고려하지 않는 법칙이므로 토립자의 형상이 판상이고 입자간의 간섭이 큰 점토입자의 침강속도를 추정하는데 그 한계성이 있다. 실제 점성토립자의 침강속도는 스토크스 법칙에 의한 침강속도 보다

큰 것으로 알려져 있다.

준설 후 토립자의 침강현상에 대한 단계를 구분하면(<그림 1> 참조) 입자간의 영향을 받지 않고 자유롭게 침강하는 분산침강(Dispersed Free Settling) 단계, 입자들끼리 서로 응집하여 침강하는 응집침강(Flocculated Free Settling) 단계, 분산침강에서 보다 입자간 응집이 심화되어 명확한 구간(Zone)을 형성하는 구간침강(Zone Settling) 단계, 자중에 의한 압밀침강(Consolidation Settling) 단계를 거치며 서서히 안정된 상태에 이르는 것으로 알려져 있다.



<그림 1> 점토-물 혼합액의 일반적인 침강곡선(Imai, 1981)

## 2.1 준설토지반의 체적비 변화

준설매립된 슬러리상태 점성토의 방치시간에 따른 체적변화량은 준설토 투기량을 결정짓는 매우 중요한 인자이다. 슬러리 상태의 준설매립토는 일반 점성토와 달리 저응력상태에 존재하므로 저응력 영역에서의 압밀특성을 규명하기 위하여 침강압밀시험을 실시하였다.

체적비는 준설투기시의 점성토슬러리 함수비를 300%, 400%, 700% 및 1000%일 경우로 가정하고 각 경우별로 실험실 실린더시험을 실시하여 결정하였다. 준설 대상 지반에 대한 물리적 특성은 <표 1>과 같다.

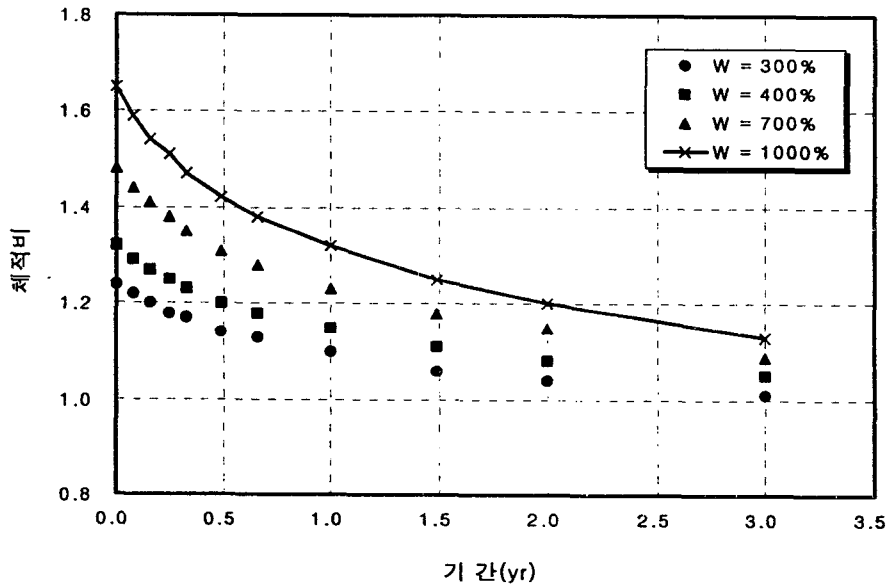
<표 1> 준설대상 지반의 물리적 특성

구분	Wn(%)	LL(%)	PL(%)	PI	Gs	#200번체 통과량(%)	USCS
특성치	80	84.8	41.5	43.3	2.52	96.7	CH

시간경과에 따른 준설토의 체적변화는 실린더 시험결과를 근거로 하였다. 현장의 준설투기기간이 4개월 일 때의 준설토 투기고 10m에 대하여 Yano(矢野)의 경험적인 방법을 적용하여 추정해 보면 투기 후 시간이 지남에 따라 준설토의 체적비가 점차 작아지고 초기 준설토 함수비가 클수록 체적비가 큰 것으로 나타났다. 그러나 이러한 경향은 시간이 경과할수록 초기함수비에 관계없이 일정한 값에 접근하는 결과를 보인다. (<표 2>와 <그림 2> 참조)

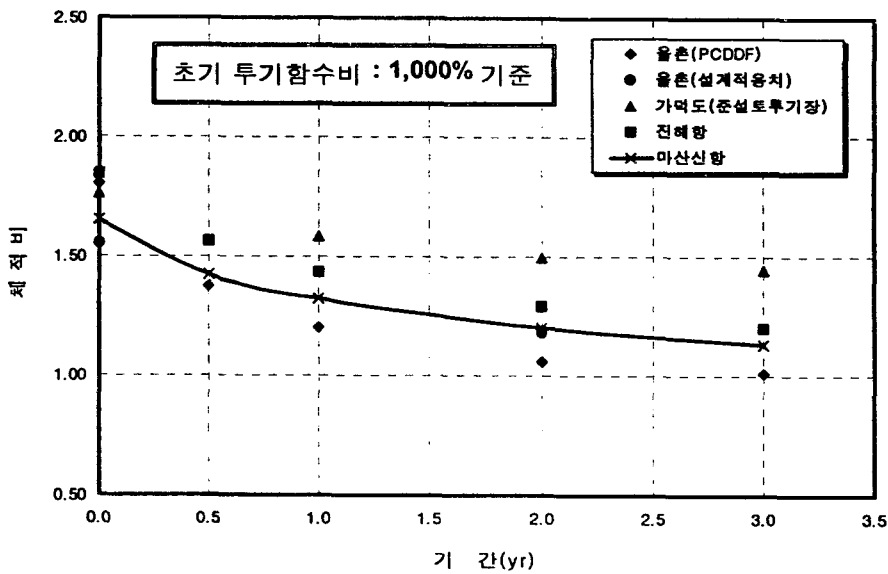
<표 2> 마산항 준설점성토의 체적비(투기기간 4개월, 펌프준설)

합수비 기간(년)	300%	400 %	700%	1000%	비 고
0.0	1.24	1.32	1.50	1.65	투기완료후
1.0	1.10	1.15	1.25	1.32	
2.0	1.04	1.08	1.16	1.20	
3.0	1.01	1.05	1.11	1.13	



<그림 2> 시간에 따른 준설점성토의 체적비 변화

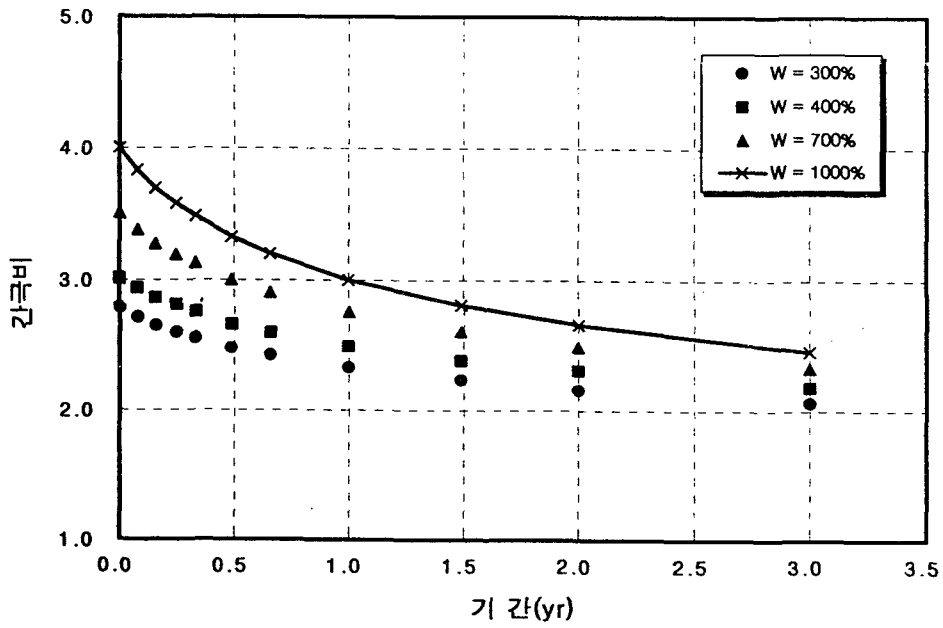
<그림 2>에 표시된 마산지역의 준설토에 대한 체적비 변화양상을 국내 타지역의 결과와 함께 <그림 3>에 나타내었다. 투기 직후의 체적비는 대체로 1.6~1.9 범위에 속하며 3년 경과 후에는 1.0 ~ 1.4 정도일 것으로 나타났다.



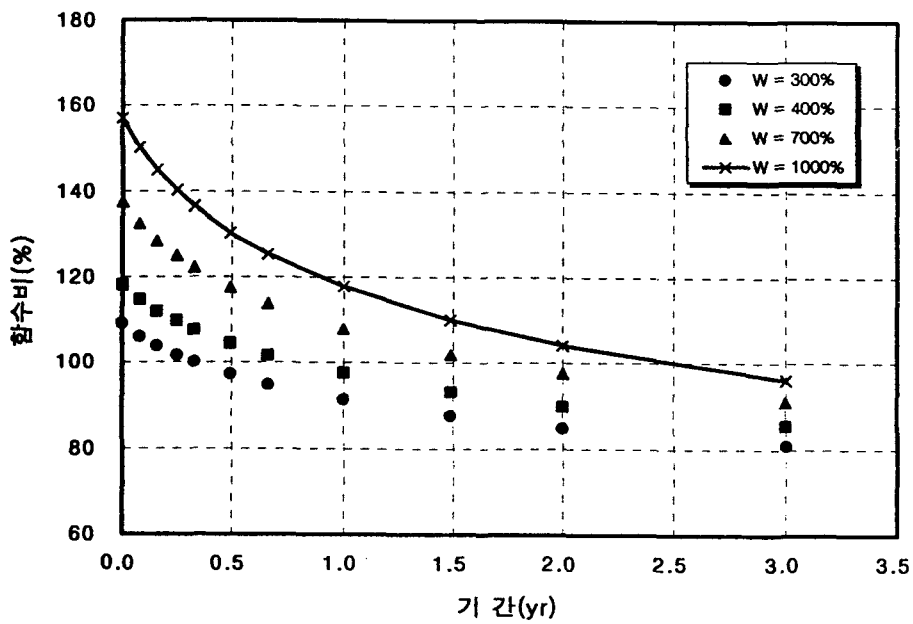
<그림 3> 준설점성토의 체적비 변화

### 3. 준설편성토의 물리적 특성

마산항 지역의 준설편성토에 대한 침강압밀 시험결과로부터 간극비와 함수비의 시간경과에 따른 변화추이를 <그림 4>와 <그림 5>에 각각 나타내었다.



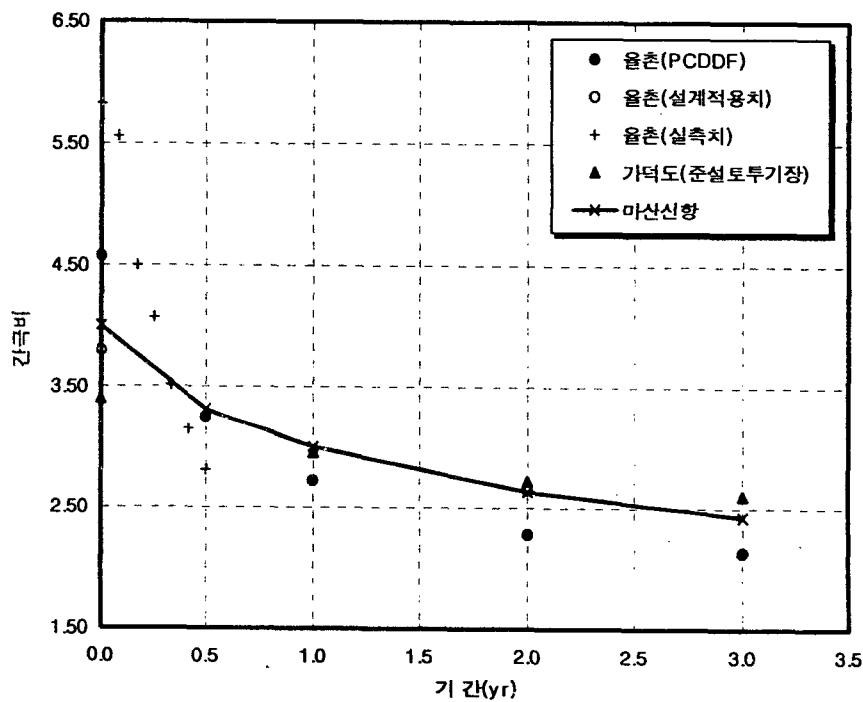
<그림 4> 시간에 따른 준설편성토의 간극비 변화



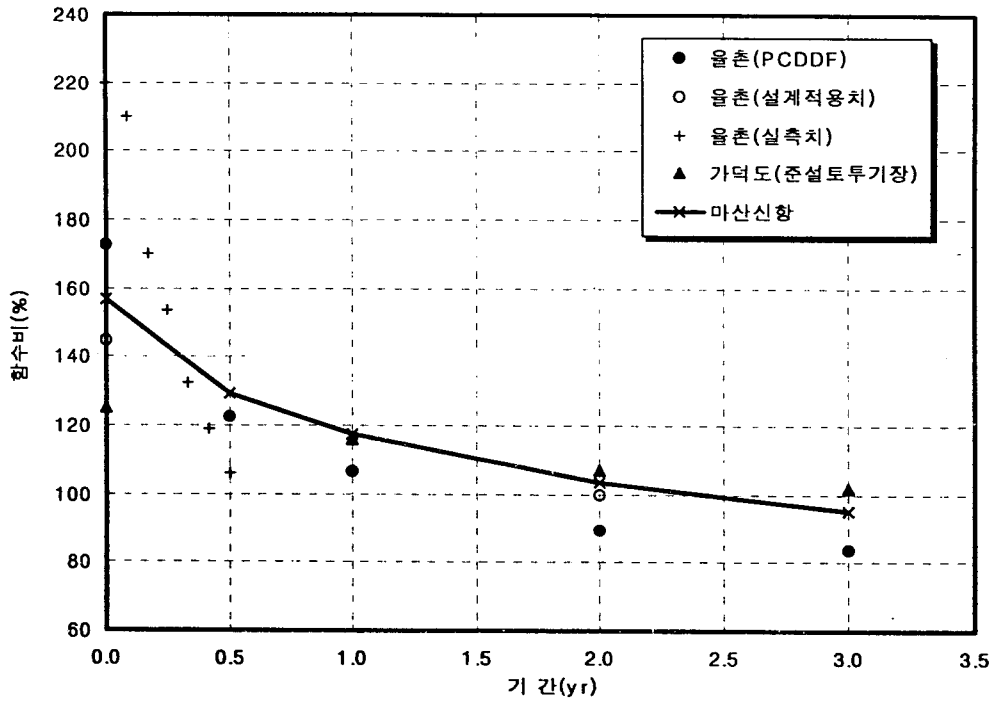
<그림 5> 시간에 따른 준설편성토의 함수비 변화

침강압밀시험 결과로부터 유추한 마산항의 준설토의 간극비, 함수비 및 건조단위중량의 변화는 타현장의 변화추세와 비교적 유사한 양상을 보이고 있다.(<그림 6> ~ <그림 8>참조)

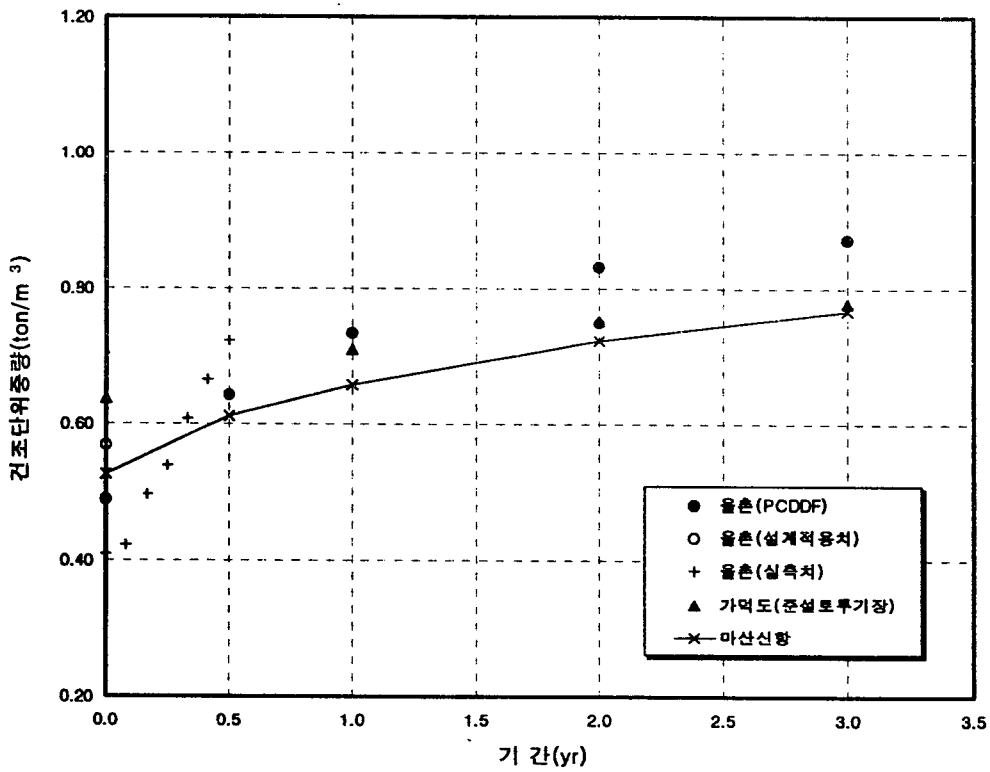
이들 그림을 살펴보면 울촌지역의 실측치는 초기부분의 체적비, 간극비 및 함수비가 PCDDF(미공병단 준설토 체적비 계산 프로그램) 해석치와 설계적용치에 비하여 크며 시간에 따른 변화곡선은 매우 기울기가 급한 경향을 보이고 있다. 실측치의 시간에 따른 변화곡선이 해석치와 설계적용치에 비하여 매우 다른 경향을 보이는 이유는 울촌현장의 표층처리공법(Progressive Trenching Method 공법)적용이 하나의 원인으로 판단된다. 그러나 초기부분의 큰 수치적 차이는 실제 현장조건을 실내시험이나 프로그램에 의한 해석으로는 적절하게 반영할 수 없는 것을 입증해 주는 실례이므로 준설패립 시공시에는 현장실험 및 계측을 통하여 현장조건을 시공 및 설계에 적절히 반영하는 것이 필요할 것으로 판단된다.



<그림 6> 준설패성토의 간극비 변화



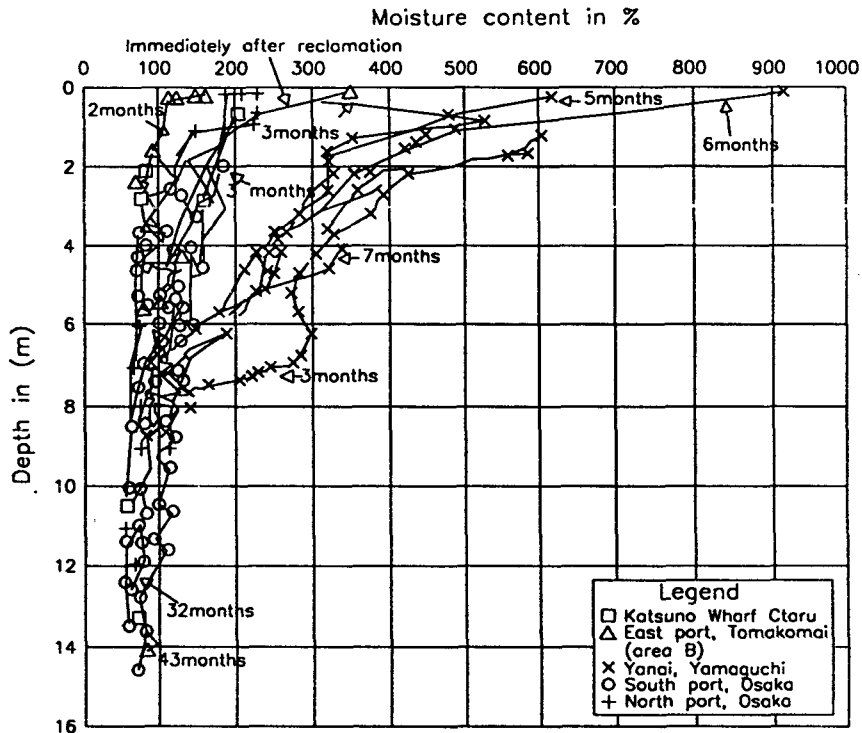
<그림 7> 준설택성토의 함수비 변화



<그림 8> 준설택성토의 건조단위중량 변화

준설택성토의 함수비 변화에 대한 일본의 실측사례에서는(<그림 9> 참조) 준설택성토 표면과 가까울수록 함수비가 크며 깊이가 증가함에 따라 함수비가 작아지는 경향을 보여주고 있다. 심부층의 함수비는 대체로 100%에 근접하게 나타나며 최장 43개월까지 측정하였을 경우에도 시간의 변화에 대하여 일정

하게 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 방치기간에 무관하게 준서매립토층은 표층에 가까울수록 함수비가 크고 매우 연약하며, 방치기간을 길게 유지하더라도 심부층의 함수비를 100% 이하로 낮추는 것은 매우 어려울 것으로 판단된다.



<그림 9> 준서점성토의 깊이별 함수비 변화 (GRI, 1998)

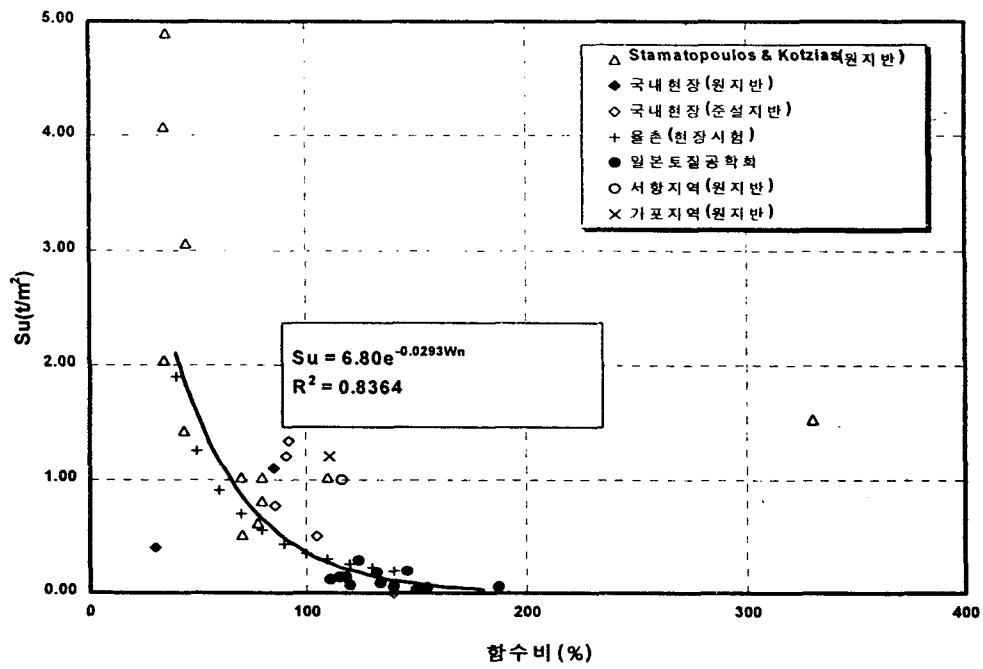
#### 4. 준서점성토 지반의 비배수 전단강도 추정

준서토는 준서시 원지반의 교란으로 인하여 함수비와 간극비가 크게 증가하고 전단강도는 크게 저하되므로 준서토는 일반적으로 유기질토 보다도 강도가 적을 수 있다.

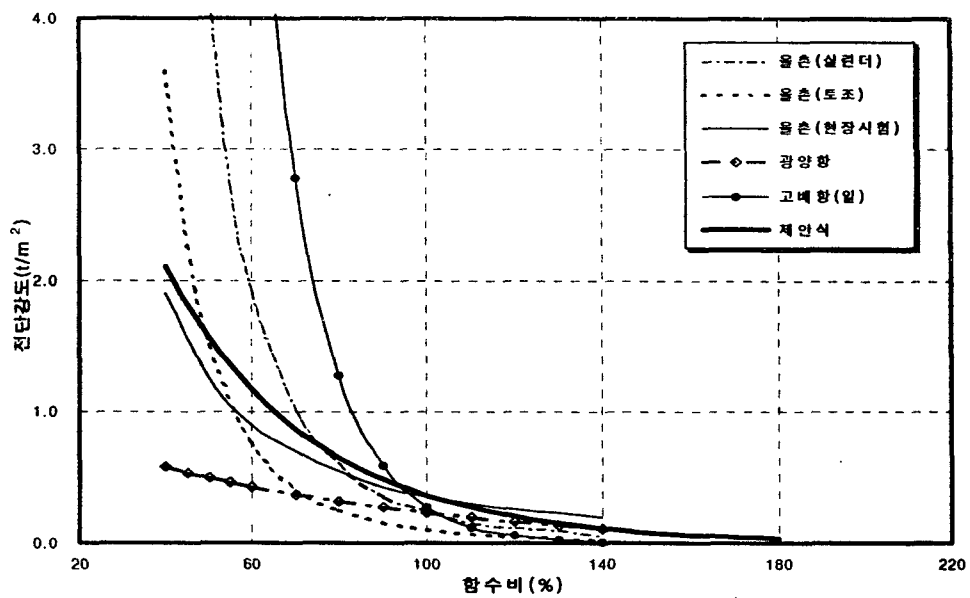
<표 3> 일반적인 준서점성토의 전단강도 특성

Material Type	$W_n(\%)$	$G_s$	LL	PI	$S_u(t/m^2)$
Dredged Material	50 ~ 400	2.4 ~ 2.8	0 ~ 270	0 ~ 185	0 ~ 5
Marsh/Organic soil	100 ~ 500	1.7 ~ 2.5	50 ~ 200	100 ~ 65	< 4

국내의 문헌의 시험자료를 토대로 준설토지반의 함수비와 전단강도의 관계를 <그림 10>과 <그림 11>에 나타내었다. 이 자료들을 회귀분석한 결과  $S_u = 6.80 \times e^{-0.0293W_n}$  와 같은 상관 관계식이 도출되었다(<그림 10> 참조).



<그림 10> 준설퇴성토의 함수비-전단강도관계

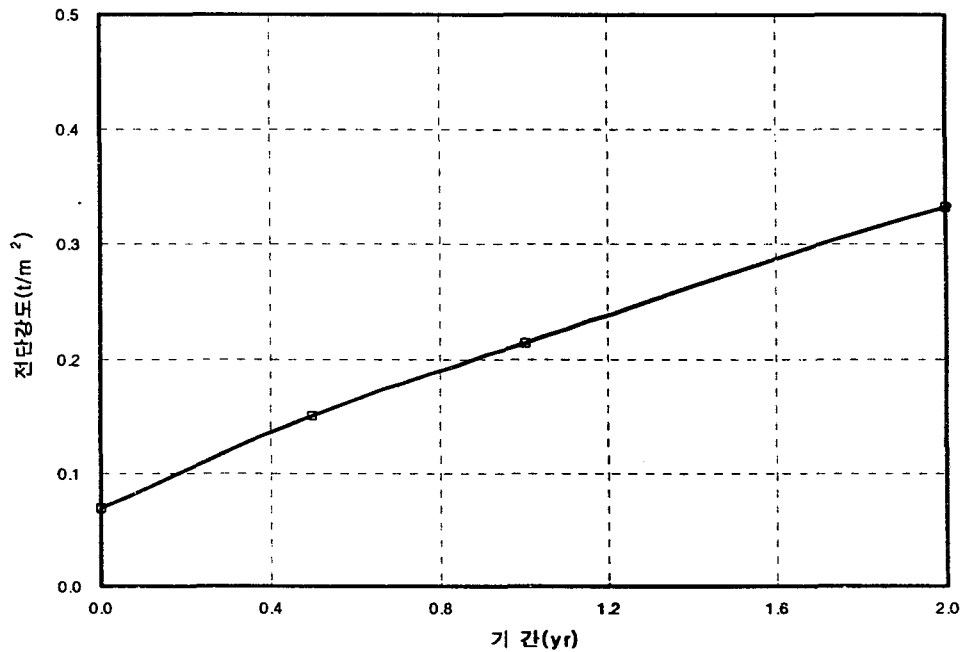


<그림 11> 제안식과 기존의 적용자료 비교



제안된 함수비-전단강도 관계식과 기존 설계적용자료 및 실내시험에 의한 자료를 비교한 결과, 제안식은 울촌의 현장시험자료와 가장 유사한 합리적인 결과를 보이고 있다.(<그림 11> 참조)

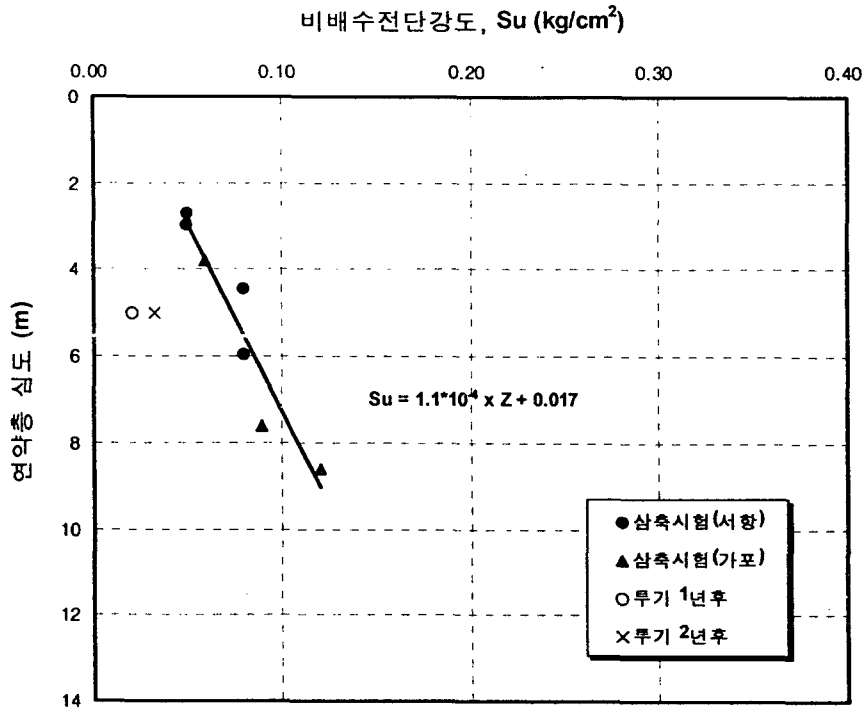
대부분의 경우에서 함수비 증가에 대한 전단강도의 변화는 함수비 60 ~ 80% 이하일 때 급격한 증가 양상을 보이고 있고, 함수비 100% 이상일 때 전단강도가 매우 작은 값을 나타낸다. 그러나 준설층 깊이에 따른 함수비 변화(<그림 9>)를 참조할 때 주어진 시간안에 준설토 내부층의 함수비를 100% 이하로 낮추는 것이 매우 어려운 일임을 알 수 있었다. 따라서 준설토지반은 준설투기후 상당기간의 방치시간 경과에도 불구하고 지반이 대단히 연약하여 매립표층에 대하여 특별한 방법을 사용할 경우에만 연약지반 처리공법의 적용이 가능함을 보여준다. 제안식에 의한 방치기간에 따른 전단강도의 변화 양상은 <그림 12>와 같고 원지반 전단강도보다 훨씬 적게 됨을 알 수 있다. (<그림 13> 참조)



<그림 12> 제안식에 의한 방치기간에 따른 전단강도 변화

<표 4> 준설점성토의 전단강도 비교

지 역		여 천	광양항	마산신항(제안식)
전단강도 (단위 : t/m <sup>2</sup> )	방치기간 1년	0.34 ~ 1.75	0.27	0.21
	방치기간 2년	-	0.36	0.33

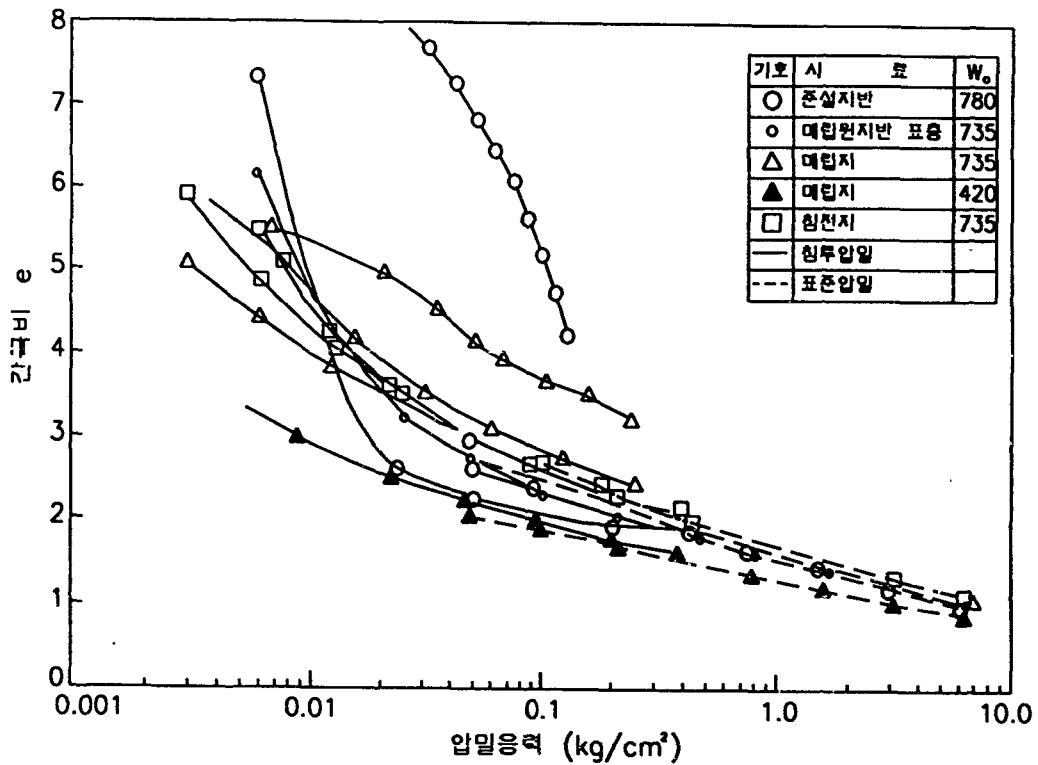


<그림 13> 준설택성토의 전단강도와 마산항 연약층의 전단강도 비교

## 5. 준설토 지반의 압축특성

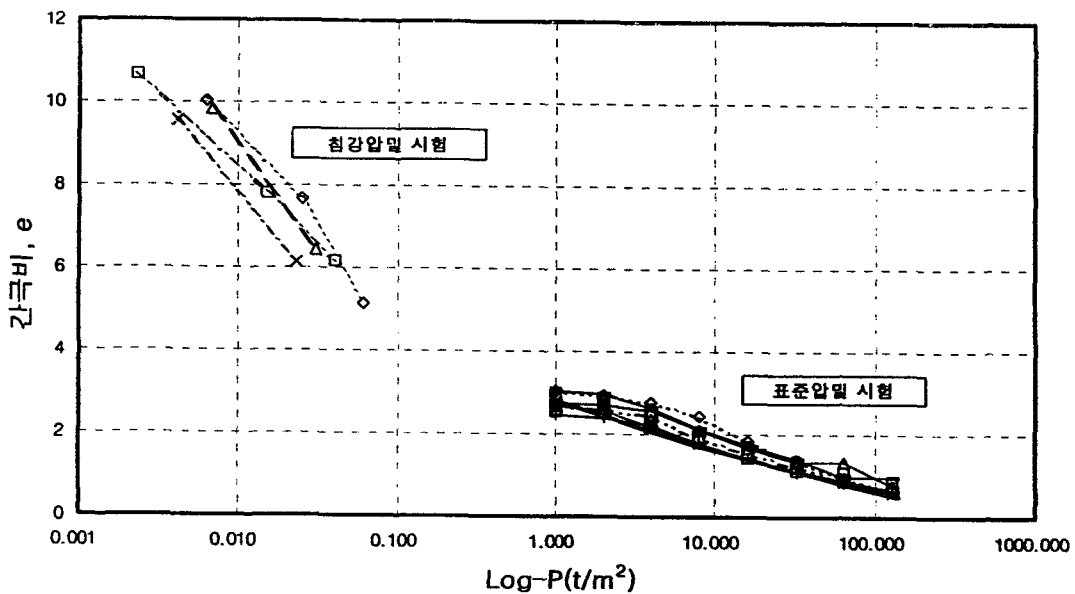
침강압밀단계를 지나 자중압밀에 이르는 기간동안의 준설토 압축특성을 규명하는 것은 매우 어려운 문제이다. 그러나 Yamonouchi 등(1983), Takada 등(1979) 및 Hiroshi 등(1989)은 준설토의 압축특성과 준설택 원지반의 압축특성이 저응력 아래에서도 일정한 상관관계를 갖고 있음을 보고하였고 준설토의 압밀정수를 원지반의 압밀정수와 동일하게 적용할수 있다고 제안하였다(Yamonouchi 등, 1983). 일본의 경우 실제 설계가 이러한 결과를 바탕으로 이루어지고 있다. 따라서 준설토의 압축지수와 압밀계수가 원지반의 압축지수와 압밀계수와 동일한 것으로 간주하여도 무방할 것으로 판단된다.

<그림 14>는 투기장에 투기된 준설택매립토를 채취하여 침투압밀시험과 표준압밀시험을 실시한 사례이다. 압밀응력의 초기부분에서는 비교적 기울기가 급하나  $0.01 \sim 0.03 \text{kg}/\text{cm}^2$  부근을 기준으로 압밀응력의 증가에 대하여 간극비의 감소가 선형적으로 이루어지고 있다.



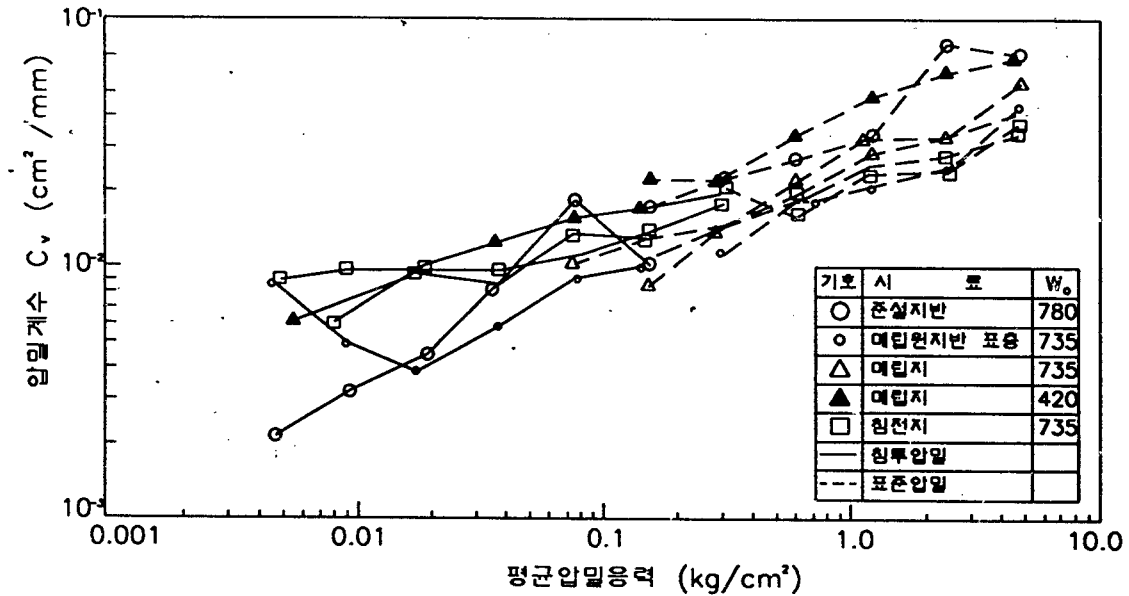
<그림 14> 준설토의 e - Log P 곡선(山内 外)

이것은 대체로 준설토의 압축지수를 준설후 원지반의 압축지수와 같게 볼 수 있으며 저응력상태(0.01 ~ 0.03kg/cm<sup>2</sup> 이하)의 압축지수는 원지반의 압축지수보다 약간 크다는 것을 의미한다. <그림 15>는 마산항 준설토의 침강압밀시험 결과와 원지반 점성토의 표준압밀시험 결과를 함께 표시한 결과이다. 이 그림은 대체로 <그림 14>와 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 침강압밀이 끝난 뒤의 마산준설토의 압축지수는 원지반의 압축지수와 동일할 것으로 판단된다. <그림 14>와 <그림 15>로부터 아주 흥미로운 경향을 발견할 수 있는데, 그것은 응력에 따른 압축성이 간극비 3 정도를 전후하여 두 개의 대표값으로 나눌 수 있다는 것이다.



<그림 15> 마산 준설토의 압축지수와 압밀응력

추가로,  $\log C_v - \log P$  곡선에서 준설편성토의 압밀계수는 표준압밀시험에서와 마찬가지로 압밀응력과 비례하게 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으므로, 침강압밀이 끝난 뒤의 압밀계수는 원지반의 압밀계수와 동일한 것으로 볼 수 있음을 알 수 있다.



<그림 16> 준설편성토의 압밀계수와 압밀응력의 관계(山内 外)

<표 5> 마산항 준설편성토의 압밀계수

지 역	압밀계수 ( $C_v, \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ )
서항지선	2.65
가포지역	2.48
설계적용	2.48

## 6. 결론

마산항 준설편성토에 대한 공학적 특성 몇 가지를 살펴보았다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- 마산항 준설편성토의 체적비는 투기초기에 1.65 투기후 1년 경과시 1.32 로 나타났으며 이는 타현장들의 체적비의 평균값에 해당되는 값이다.
- 시험결과에 의한 준설편성토의 함수비는 매립 완료후 160% 이며 1년 후의 함수비는 120% 이다. 그러나 준설편성토는 일정기간 경과 후부터는 방치기간이 경과하더라도 내부의 함수비가 100% 이하로 감소하지 않을 것으로 조사되었다.
- 사례분석을 통하여 얻어진 전단강도-함수비 상관관계로부터 유추한 준설편성토층의 평균 전단강도는 1년 방치시  $0.2t/m^2$  정도로 매우 낮은 강도를 갖게 될 것으로 예측되었다. 따라서 연약지반 개량

시 준설매립점성토층 표층부의 처리에 대한 공학적 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

- 준설점성토의 압축지수와 압밀계수는 준설대상 원지반의 압축지수, 압밀계수와 같다고 볼 수 있다.
- 준설점성토 지반의 준설토의 압축지수는 1.38 이고 압밀계수는  $2.48 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$  이다.

마산신항건설을 위하여 실시된 마산 해성점토에 대한 실내시험은 현장 토질특성과 넓은 지역에서 장기간에 걸친 준설토 투기에 대한 효과를 반영할 수 없으므로 실제 현장조건과는 차이가 있을 수 있다. 따라서 현장에서 대형토조실험을 통하여 실내시험값을 검증하는 한편 현장계측을 통하여 현장조건에 따른 준설토 침하량, 준설매립층 내의 함수비의 변화 등을 조사하여 시공에 반영할 필요가 있다.

## 7. 참고문헌

1. 현대건설(1996.7), “매립재료 변경에 따른 설계변경 매립공법 보고서”
2. 현대산업개발주식회사(1998.12), “마산신항민자사업 기본설계 침강압밀시험 보고서”
3. 현대건설(1996.7), “매립재료 변경에 따른 설계변경 매립공법 보고서”
4. 한국 컨테이너 부두공단(1998.2), “광양항 2단계 컨테이너부두 개발사업 실시설계용역 보고서, 제5부 지반개량편”
5. 失野弘一郎(1984), “浚渫粘土による軟弱地盤の性状とその豫測”, 土質工學會論文集, 第364號, pp 1-14
6. 三笠正人(1993), “軟弱粘土の壓密”, 鹿島出版會, pp 3-125
7. 山内 外 3人(1983), “Characteristics of pump dredged clayed deposit in Hakada bay”, 土と基礎, 31-6號, pp 39~44
8. Geo-Research Institute(1998. 6), “Soil properties around Katuok Island for the Preliminary designing(Final report)”, pp 6-2 ~ 6-4, 6-13 ~ 6-22
9. USAE Waterways Experiment Station(1994), “Geotechnical considerations in Dredged Material Managemant, Marian Poindexter Rollings”