

모래다짐말뚝(SCP)의 치환율과 혼합율에 따른 강도정수의 상관성에 관한 연구 Study on the Relationship of Strength Parameters with SCP Replacement and Mixture Ratio

*서주영¹⁾, Ju-Young Seo, 임종철²⁾, Jong-Chul Im, 박이근³⁾, Lee-Keun Park

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 석사과정, Master course, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

²⁾ 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

³⁾ 부산대학교 생산기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ.

개요(SYNOPSIS) : When SCP (Sand Compaction Pile) is used in the improvement of soft ground, some problems like the difficulty of vertical construction and other construction difficulties due to the use of high pressure are encountered, There is a possibility that the strength parameters used in the design may be different with those obtained from the investigation of the quality variation with depth for the irregular, then the section may be not a sand pile but a combination of sand and clay. The mixture ratio concept is used, it is defined as the quantity of sand corresponding to the replacement ratio. Using this concept, the strength parameter relationship of the replacement and mixture ratio was determined. The use of these parameters in the design of SCP is most appropriate.

주요어(Key words) : SCP, sand compaction pile, replacement ratio, mixture ratio

1. 서론

모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile; SCP) 공법은 느슨한 모래나 점성토 연약지반에 모래를 다지면서 압입하여 비교적 지름이 큰 모래말뚝을 조성하는 지반개량공법으로서, 모래지반의 경우에는 밀도 증대와 액상화 방지, 수평 저항력의 증가 등을 기대할 수 있고, 점토지반에 SCP를 시공할 경우에는 원지반과 다져진 모래말뚝으로 이루어진 복합지반이 형성됨으로써 지반의 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위 억제, 압밀침하 저감 등의 효과를 기대할 수 있다. 이 공법은 1955년 일본의 오까(岡隆一)가 개발한 이후, 1957년 충격식 말뚝시공법 도입, 1959년 진동기 개발, 1960년 진동식 모래다짐말뚝 타설기의 개발에 따라 시공능률의 향상과 해상시공법이 적용 가능하게 되어 육상과 해상의 연약지반 개량공법으로 많이 적용되고 있다. 그러나, 모래다짐말뚝은 타설시 수직시추불가, 가압의 문제점 등으로 인하여 심도에 따라, 단면형상, 연속성 등이 보장되지 않아 그 단면이 불규칙하게 시공될 수 있다. 따라서, SCP가 시공된 지반에 모래말뚝이 형성되지 않고 점토와 모래가 혼합된 지반이 될 경우에는 품질관리에 어려움이 커지게 된다. 게다가, 현재의 SCP 품질관리 평가방법인 표준관입시험(SPT), 물리탐사 등은 신뢰성 있는 평가방법이 되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 연약지반개량을 위해 점토지반에 모래다짐말뚝을 사용하는 경우, 지반개량 목적에 부합되는 치환율과, 치환율에 해당하는 모래의 투입량으로 정의되는 혼합율의 개념을 적용하여 복합지반(복합토) 및 혼합지반(혼합토)의 강도특성을 규명하는 데 그 목적이 있으며, 이를 위해 치환율 및 혼합율에 따른 직접전단시험을 실시하여 그 상관관계를 연구하고자 한다.

2. 실내 모형실험

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치인 직접전단시험기는 그림 1과 같으며, 그 제원은 1650mm(L)×300mm(W)×1060mm(H)이다. 수직하중 재하는 모멘트 재하방식이고, 수평하중 재하는 감속기가 설치된 모터(motor)를 이용하여 일정 변형률 속도로 하중을 재하한다. 이때의 재하속도는 1mm/min으로 하였다. 또한 반력의 측정은 프루빙링을 사용하였다. 전단상자는 그림 2와 같으며, 제원은 15cm(L)×15cm(W)×6cm(H)이다. 한쪽 측면에는 투명 아크릴판을 사용하여 전단시 전단면의 거동을 관찰할 수 있게 되어 있다. 전단면의 거동을 관찰하기 위해 전단상자의 안쪽 면에 격자가 그려진 멤브레인을 부착하고, 사진판독을 이용하여 변위를 관측하였다. 실측한 변위 값은 유한요소법을 이용하여 역학적 거동을 분석하였다. 또한, 전단상자의 기계적인 마찰을 줄이기 위하여 상자의 상·하면에 직선 베어링을 부착하였다.

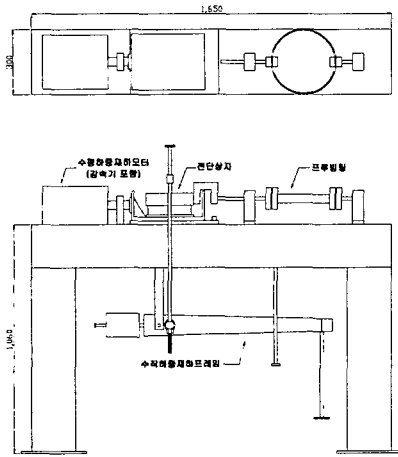


그림 1 전단시험기

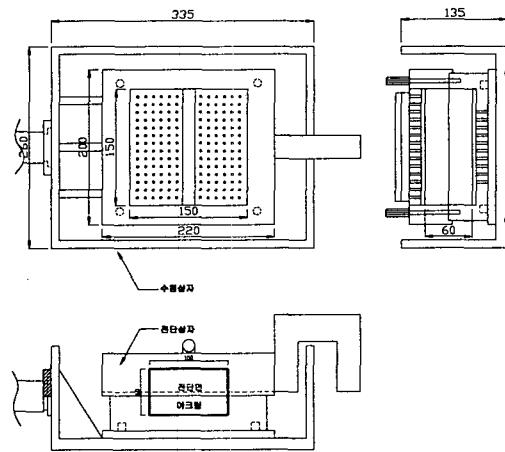


그림 2 전단상자

2.2 실험방법

2.2.1 실험재료

본 실험에서는 원지반 재료로서 부산광역시 감천항 해성점토를, 치환재료로서는 주문진 표준사를 사용하였으며, 이들의 지반공학적 성질은 표 1과 같다.

2.2.2 실험방법

모형지반은 치환율 및 혼합율에 따라 2종류로 제작하였고, 제작 순서 및 실험 방법은 다음과 같다.

(1) 치환율에 따른 강도정수 평가실험

- ① 교반기로 충분히 성형된 점토시료를 수침상자 내의 전단상자에서 0.2kgf/cm^2 의 압력으로 24시간 동안 압밀한다. 압밀 완료 후의 초기 지반강도는 표 3에서 알 수 있듯이 $c_u = 0.03\text{kgf/cm}^2$ 이다(그림 3 참조).
- ② 모래말뚝의 배치는 정사각형 배치(그림 5)로 하고, 각 치환율(20.3%, 31.8%, 45.6%, 57.3%)에 따라 제

작된 케이싱을 압입하여 치환홀을 형성한다.

- ③ 밀도가 수렴하게 되는 낙하고(1m)에서 모래를 뿌려 1.60g/cm^3 의 밀도를 갖는 모래말뚝을 조성한다 (그림 4, 6).
- ④ 각 하중(0.35kgf/cm^2 , 0.71kgf/cm^2 , 1.06kgf/cm^2)에 대해 전단시험을 실시한다.

표 1 주문진 표준사 및 감천항 해성점토의 지반공학적 성질

주문진 표준사			감천항 해성점토		
물성 종류	기호	물성치	물성 종류	기호	물성치
최대간극비	e_{max}	0.923	비중	G_s	2.67
최소간극비	e_{min}	0.604	함수비	$w(\%)$	80~85
최대건조밀도	$\gamma_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	1.652	액성한계	$w_L(\%)$	46.0
최소건조밀도	$\gamma_{dmin}(\text{g/cm}^3)$	1.378	소성지수	$PI(\%)$	18.2
비중	G_s	2.65	압축지수	C_c	0.45
함수비	$w(\%)$	0.30	압밀계수	$c_v(\text{cm}^2/\text{sec})$	2.14×10^{-4}
평균입경	$D_{50}(\text{mm})$	0.595			
유효입경	$D_{10}(\text{mm})$	0.443			
균등계수	C_u	1.402			
곡률계수	C_g	0.912			

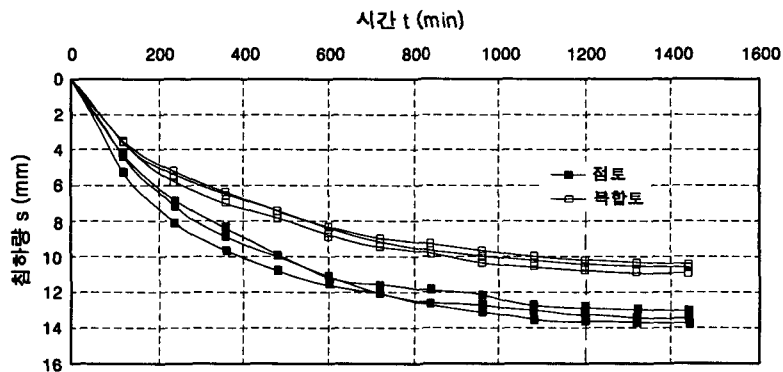


그림 3 점토 및 복합토의 시간-침하량 곡선

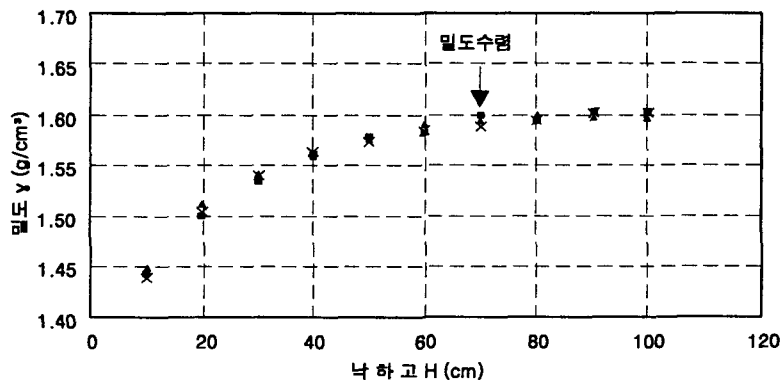


그림 4 낙하고에 따른 모래의 밀도

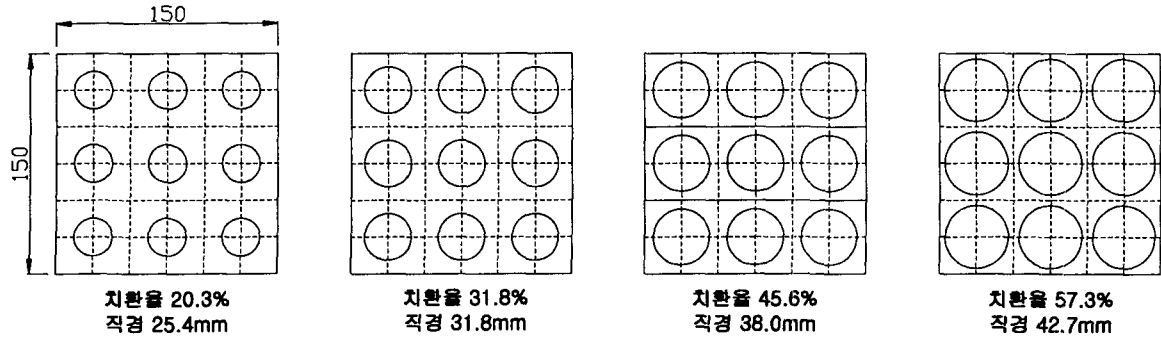


그림 5 치환율에 따른 모래말뚝의 배치

(2) 혼합율에 따른 강도정수 평가실험

- ① 치환율에 해당하는 모래의 양과 점토를 혼합하여 교반기로 충분히 성형한 다음, 수침상자 내의 전단 상자에서 $0.24kgf/cm^2$ 의 압력으로 24시간 동안 압밀한다(그림 7).
- ② 각 하중($0.35kgf/cm^2$, $0.71kgf/cm^2$, $1.06kgf/cm^2$)에 대해 전단시험을 실시한다.

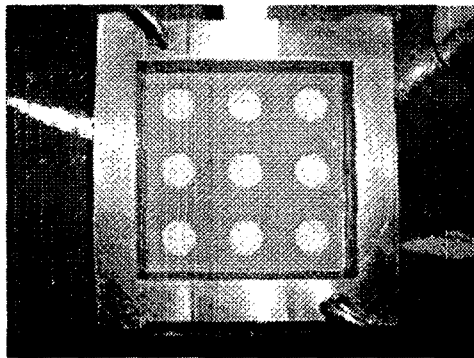


그림 6 모래말뚝의 조성 예(치환율 20.3%)



그림 7 혼합토의 교반

3. 실험결과 및 고찰

동일한 압력으로 압밀된 지반에서, 치환율 및 혼합율에 따른 직접전단시험을 실시한 결과는 표 2와 같으며, 전단강도 τ_f 는 수평변위 D_h 가 10mm일 때를 기준으로 하였다. 그림 8, 9와 같이 전단강도는 전체적으로 무치환일 때에 비해 치환율 및 혼합율이 증가함에 따라 증가하였다.

그림 10과 11은 치환율 및 혼합율에 따른 수평변위 D_h 와 수직변위 D_v 의 관계를 나타낸 것인데, 전단 중에도 압밀침하가 지속적으로 발생하고 있는 것으로 보아 점토의 강도증가가 있을 것이라 판단된다. 혼합토의 경우에도 이러한 경향이 나타나고 있다. 그러나, 복합토의 경우 치환율 45.6%와 57.3%에서 살펴보면, 초기에는 압밀침하가 나타나다가 수평변위 4mm~10mm정도까지는 추가적인 압밀침하가 발생하지 않다가 그 이후의 전단(수평변위)에서는 다시 압밀침하가 발생하는 경향을 보인다. 수평변위 4mm~10mm 사이에서 수직변위가 머무르고 있는 것은 모래기둥의 전단에 의해 발생하는 다이러턴시와 점토의 압밀침하가 상쇄되기 때문이라 판단된다. 치환율 20.3%, 31.8%에서는 이러한 경향이 나타나지 않는 것은 모래기둥에서 발생하는 다이러턴시량이 점토에서 발생하는 압밀침하량보다 훨씬 적은 양이기 때문이라고 판단된다. 반대로 치환율이 45.6%, 57.3%인 경우에는 점토가 차지하는 부분이 크게 적어진다, 모래에서 발휘되는 다이러턴시는 커졌기 때문에 이러한 경향이 나타난다고 판단된다.

표 2 직접전단시험 결과

종류	치환율 및 혼합율 (%)	점착력 c_u (kgf/cm ²)	전단저항각 ϕ (°)	전단강도 τ_f (kgf/cm ²)		
				$\sigma=0.35$ (kgf/cm ²)	$\sigma=0.71$ (kgf/cm ²)	$\sigma=1.06$ (kgf/cm ²)
점토	-	0.030	3.2	0.050	0.070	0.090
모래	-	0.000	45.3	0.354	0.718	1.071
복합토	20.3	0.058	9.5	0.116	0.176	0.235
	31.8	0.054	13.3	0.130	0.236	0.298
	45.6	0.051	19.8	0.177	0.307	0.433
	57.3	0.044	23.5	0.195	0.352	0.503
혼합토	20.3	0.062	1.9	0.073	0.085	0.096
	31.8	0.081	2.0	0.093	0.105	0.117
	45.6	0.084	5.7	0.119	0.155	0.190
	57.3	0.089	7.2	0.133	0.179	0.224

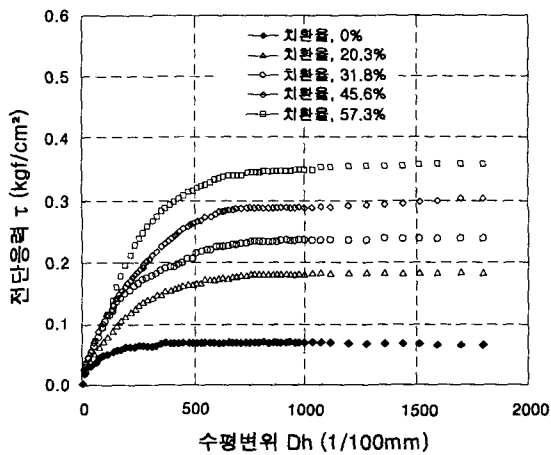


그림 8 치환율에 따른 전단응력-수평변위 관계

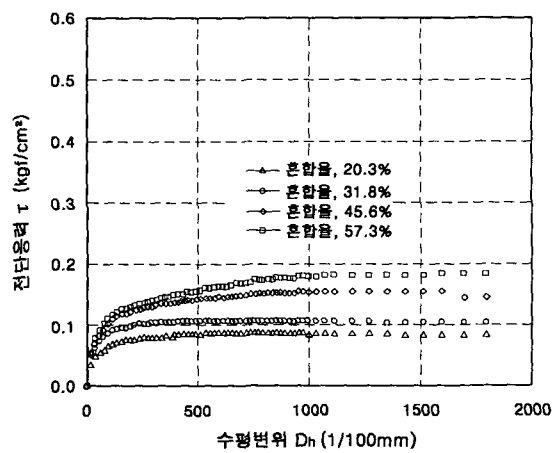


그림 9 혼합율에 따른 전단응력-수평변위 관계

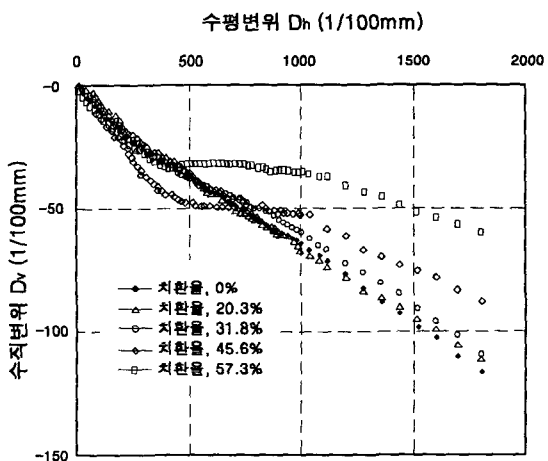


그림 10 치환율에 따른 수평변위-수직변위 관계

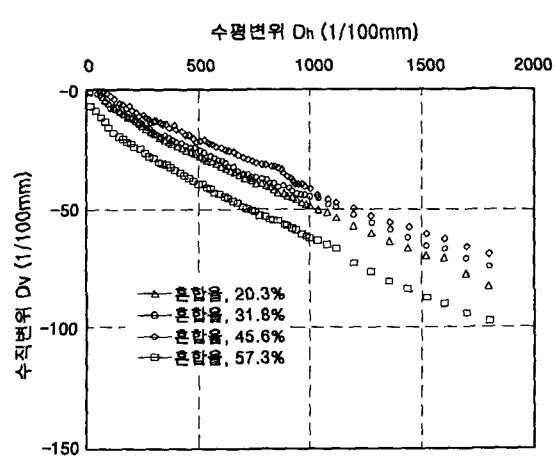


그림 11 혼합율에 따른 수평변위-수직변위 관계

그림 12와 13에서 동일 치환율 및 혼합율에서 수직응력 σ 의 증가에 따른 전단강도 τ_f 는 복합토가 혼합토에 비해 크게 증가하였다. 그림 12 및 그림 13에서 구한 각 치환율 및 혼합율에서의 c , ϕ 의 변화를 그림 14에 나타내었다. 복합토의 경우에는 치환율에 따른 전단저항각의 증가가 크게 나타나지만, 혼합토의 경우에는 전단저항각의 증가는 그리 크지 않은 것으로 나타난다. 이는 점토와 모래가 섞인 혼합토에서는 모래의 전단저항각이 발휘되지 못한 것이 그 원인으로 판단되며, 점토에 의한 점착력의 증가보다 모래에 의한 전단저항각의 증가가 전단강도에 크게 영향을 주는 것으로 판단된다.

점착력의 변화를 살펴보면, 복합토, 혼합토 모두 모래의 양이 증가할수록 원지반의 점착력 c_0 보다 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 앞서 언급하였듯이 전단이 진행되는 동안 압밀침하가 진행되어 강도의 증가가 반영된 결과라고 판단된다. 그림 15는 실험의 결과로부터 구한 전단저항각 ϕ 및 점착력 c 를 각각 모래만의 전단저항각 ϕ_0 , 점토만의 점착력 c_0 로 정규화시킨 것인데, 각각 치환율 및 혼합율에 따른 마찰강도 정수비 ϕ/ϕ_0 , 점착강도 정수비 c/c_0 를 나타내고 있다. 복합토의 경우 마찰강도 정수비 ϕ/ϕ_0 는 0.21~0.52로 치환율과 거의 유사한 값으로 증가하는 경향을 보여 치환율에 따른 전단저항각의 증가값 ϕ_R 을 식 (1)과 같이 볼 수 있다.

$$\phi_R = \frac{R}{100} \phi_0 \quad (1)$$

여기서, ϕ_R : 복합토의 전단저항각 ($^\circ$)

R : 치환부피비로 정의되는 치환율(%)

혼합토의 경우에는 전단저항각의 비가 0.04~0.16으로 크게 낮아지는 것으로 나타난다. 점착강도 정수비 c/c_0 는 2.05~2.95배로 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이러한 경향은 전단동안 발생한 압밀침하에 의한 강도증가가 원인이라고 판단되며, 향후 원지반의 초기강도에 따른 추가적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

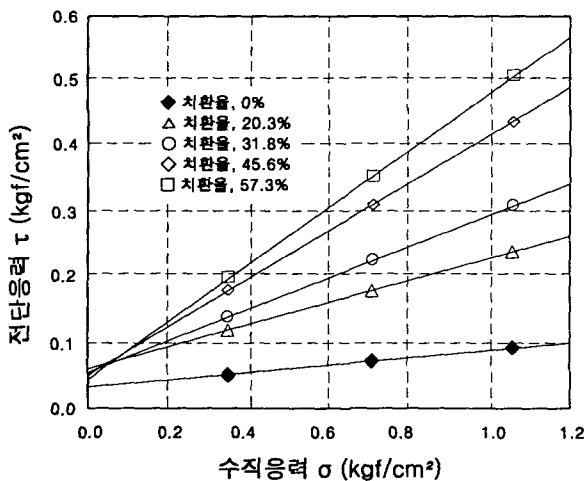


그림 12 치환율에 따른 수직응력-전단응력 관계

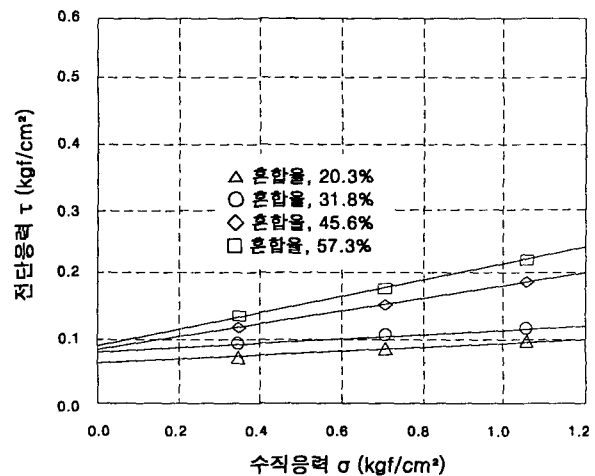


그림 13 혼합율에 따른 수직응력-전단응력 관계

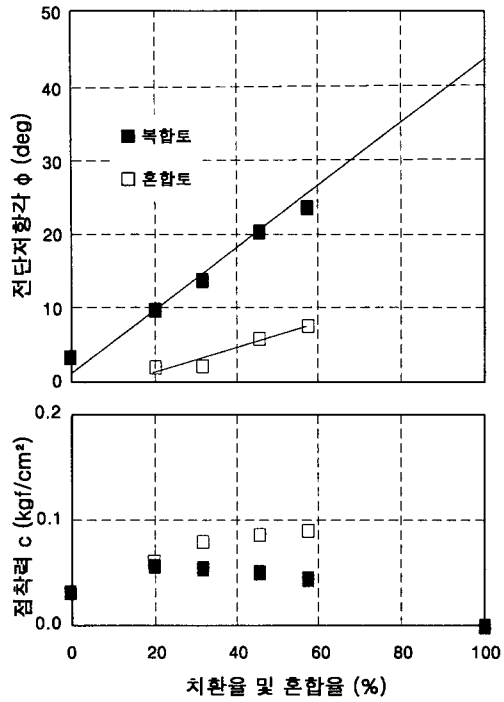


그림 14 치환율 및 혼합율-강도정수 관계

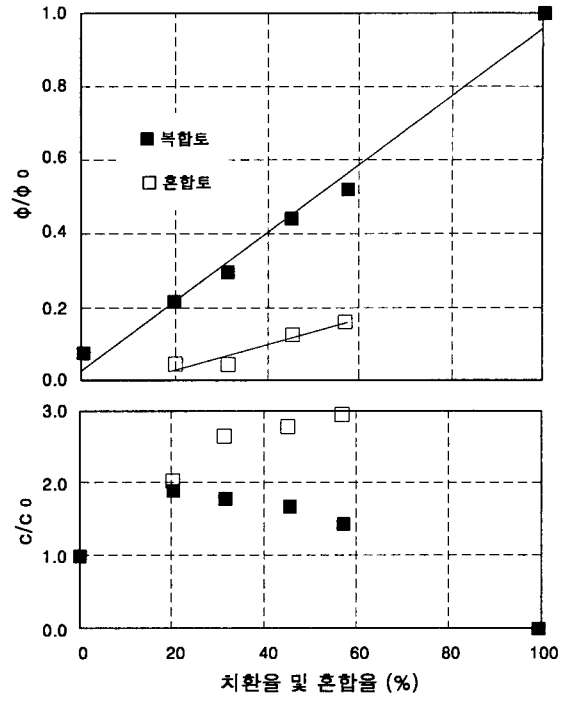


그림 15 치환율 및 혼합율-강도정수비 관계

그림 16은 복합토의 강도정수에 대한 혼합토의 강도정수의 비를 나타낸 것인데, 각각 마찰강도 정수비 $\phi(M)/\phi(R)$, 점착강도 정수비 $c(M)/c(R)$ 를 나타낸다. 여기서 마찰강도 정수비는 그 비가 0.5 이하이며, 점착강도 정수비는 1.0이상임을 알 수 있다.

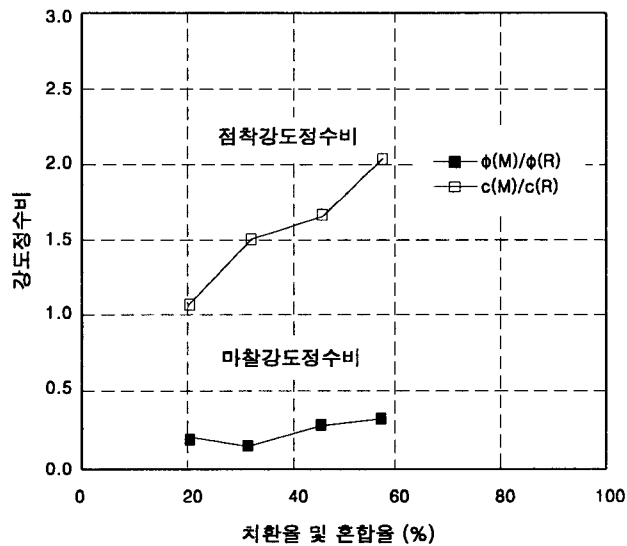


그림 16 강도정수비-치환율 및 혼합율 관계

4. 결론

본 연구에서는 SCP를 시공함에 있어서, 치환율 및 혼합율에 따른 강도정수의 변화와 그 상관 관계를

밝히고자 함이 그 목적이었다. 이를 위해 직접전단시험을 실시하였으며, 본 연구의 범위 내에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 혼합토의 전단저항각은 복합토의 그것보다 15~31% 정도로 낮게 평가되었다.
- (2) 혼합토가 복합토에 비해 전단강도가 적게 나타나는 것은 혼합토 내의 모래가 전단저항각을 발휘하지 못하였기 때문이라고 판단된다.
- (3) 복합토의 전단저항각 ϕ_R 을 치환율에 따라 결정할 수 있는 식 (1)을 제안하였다.

<참고문헌>

1. 문대중(1999), “모래다짐말뚝(SCP)의 거동특성 해석을 위한 실험적 연구”, 명지대, 석사학위논문.
2. 박용원 외 5인, “모래다짐말뚝(SCP)의 치환율 변화에 따른 거동 특성 연구”, 한국지반공학회논문집, 제16권, 제4호, pp.117~128.
3. 해양수산부(1999), 대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(Ⅱ).
4. AKIRA ASAOKA, TAKESHI KODAKA and MITSUO NOZU(1994), “UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF IMPROVED WITH SAND COMPACTION PILES”, SOILS AND FOUNDATIONS Vol.34, No.4, pp23~32.
5. D. W. Airey & D. M. Wood, “An evaluation of direct simple shear tests on clay”, Geotechnique, Vol.37, No.1, pp25~35.
6. 島田 亘, 石天 泰, 中野 建二, 締固め砂杭工法における品質管理事例, 基礎工, Vol.27, No.7, pp.78-80.
7. 茨木龍雄, 複合土の直接せん断試験による實驗的研究(第1報), 土と基礎, Vol 13, No.3, pp.19~24.
8. 片岡宏治ほか(1991), 地盤改良工法, 日本材料學會 土質安定材料委員會, pp325~342.