

## 안정처리된 하상토의 공학적 특성

### Engineering Characteristics of Stabilized Bed Sediment

김진만 <sup>1</sup>	Kim, Jin-Man	이대영 <sup>2</sup>	Lee, Dae-Young
김경민 <sup>3</sup>	Kim, Kyung-Min	최봉혁 <sup>4</sup>	Choi, Bong-Hyuck
김학삼 <sup>5</sup>	Kim, Hak-Sam	한상현 <sup>6</sup>	Han, Sang-Hyun

#### Abstract

This paper presents the results of an investigation on the ways of utilizing bed sediment as levee materials by laboratory tests. A series of laboratory tests were performed to assess the improved engineering characteristics of bed sediment using admixture cement and weathered granite soils. In this study, several tests such as the grain size analysis test, direct shear test, permeability test, unconfined compression test were performed. The results of the analyses indicated that the treated bed sediment with cement and weathered granite soils can have the adaptability to the fill material for levee.

#### 요지

본 논문은 국내발생 하상재료의 하천제방 축제 재료로의 활용성 평가를 위한 실내시험결과를 나타내고 있다. 본 연구에서는 시멘트와 화강풍화토를 혼합한 하상토의 공학적 특성을 평가하기 위해 일련의 실내시험을 수행하였다. 이를 위해 입도분석, 직접전단시험, 투수시험, 일축압축시험을 수행하였다. 시험결과를 통해 시멘트와 화강풍화토를 혼합하여 처리된 하상토의 제방 축조제 및 성토재료의 활용가능성을 확인할 수 있었다.

**Keywords :** Levee, Bed sediment, Engineering characteristics, Fill material

#### 1. 서론

최근 들어 이상홍수 및 제방의 노후화, 제체재료의 영향 등으로 인한 제방 붕괴로 인명 및 재산피해가 급증하고 있다. 제방의 안정성에 영향을 미치는 요인으로는 균열과 파이프, 지반침하, 제방축제 재료의 불량 등 여러 요인이 존재한다. 하천제방의 축제 재료와 관련하여 1990년대까지는 하상토를 이용하여 제방공사를 시

행하였으나, 최근들어 다짐 및 재료관리가 어려운 하상토의 축제 재료로의 사용을 원칙적으로 금지하고 있으며 2002년 개정된 하천설계기준에 따라 하천제방의 축조재료로서 전단강도 및 투수특성이 양호한 양질토를 사용하여 시공토록 지침이 시달되고 있는 실정이다.

하천제방의 안정성 향상을 위해서는 양질의 성토재료 사용, 철저한 다짐관리, 적절한 수리구조물 및 차수벽 설치 등이 필요하다. 특히 하천제방 축조를 위한 양

1 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 수석연구원 (Member, Research Fellow, Department of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Construction Technology)

2 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Department of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Construction Technology, dylee@kict.re.kr, 교신저자)

3 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 Post-Doc. (Member, Post-Doc., Department of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Construction Technology)

4 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Department of Geotechnical Engrg., Korea Institute of Construction Technology)

5 정회원, 영남대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept of Civil & Environmental Eng., Yeungnam College of Science & Technology)

6 정회원, 서울대학교 토목과 교수 (Member, Prof., Dept. Civil Eng., Seoul College)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

질의 성토재료는 하천제방의 안정성에 있어서 가장 중요한 요인이며 제방의 경제적인 축조를 위해서는 하천 제방 축조 현장에서 쉽게 구할 수 있는 성토재료를 사용하는 것이 유리하다. 그러나 양질의 성토재료는 하천제방 시공현장에서 쉽게 구할 수 없는 단점이 존재한다. 따라서 경제적이고 안정적인 하천제방 축조를 위해서는 현장에서 쉽게 구할 수 있는 하상재료를 이용한 제방 축조기술의 연구가 필요하다.

미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 이미 안정적이고 경제적인 하천제방 축조기술을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근 국내에서도 친환경적인 최적설계 기법의 확립을 위한 하상토 활용 하천제방 축조기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 하상토의 제방 성토재료로서 적합성 평가를 위한 기초연구로 낙동강 유역 하상토의 입도분석을 통한 발생특성을 분석하였다. 또한 국내 발생 하상토의 제방재료로서 활용가능성을 평가하기 위해 기본물성실험과 하상토 안정처리방안으로 화강풍화토와 시멘트 혼합토에 대한 물리·역학적 실험을 수행 및 분석 하였다.

## 2. 낙동강 유역 하상토의 발생특성 분석

본 연구에서는 낙동강 유역 하상토의 발생특성 분석을 위해 낙동강 수계의 안동댐 하류~낙동강하구언 구간 중 총 22개소를 대상으로 하상토를 채취하여 입도분

포시험 및 통일분류법에 의한 흙 분류 등을 수행하였다. 그림 1은 본 실험에 사용된 낙동강 수계 하상토 채취 위치를 나타내고 있다. 하상토 발생특성 분석을 위한 실내시험 및 시험방법으로는 채취된 하상토 재료 등에 대한 체분석 및 비중계분석 시험을 수행하여 통일분류법에 의한 흙 분류, 입도분포 특성을 파악하였다.

표 1과 그림 2는 낙동강 수계 20개소에서 채취한 하

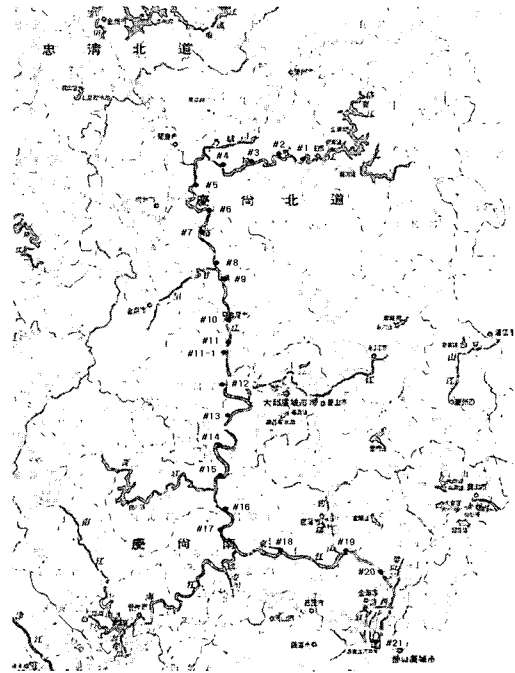


그림 1. 낙동강유역 하상토 채취 위치도

표 1. 낙동강 수계 입도분석결과 요약

시료채취위치	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	C <sub>u</sub>	C <sub>g</sub>	USCS (통일분류)	비 고
1-1(계평리)	0.34	0.5	0.68	2.0	1.1	SP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 통일분류법-모래질 흙에 대한 분류</li> <li>SP : No.200체 통과량이 5%미만</li> <li>① <math>C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \geq 6,</math></li> <li>② <math>C_g = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = 1 \sim 3</math></li> </ul>
2-1(하리)	0.20	0.31	1.13	5.6	0.4	SP	
3-1(구담리)	0.31	1.10	1.40	4.5	2.8	SP	
5-1(효제)	0.13	0.23	0.50	4.0	0.8	SP	
6-1(간물리)	0.21	1.12	1.38	6.6	4.3	SP	
7-1(가산리)	0.38	0.55	0.92	2.4	0.9	SP	
8-1(월곡리)	0.35	0.65	1.20	3.4	1.0	SP	
9-1(낙성리)	0.41	0.63	1.07	2.6	0.9	SP	
10-1(오평리)	0.27	0.43	0.83	3.1	0.8	SP	
11-1(왜관교)	0.23	0.37	0.62	2.7	1.0	SP	
13-1(고령교)	0.20	0.29	0.37	1.8	1.1	SP	
14-1(정리)	0.23	0.42	0.6	2.6	1.3	SP	
15-1(덕곡면)	0.27	0.40	0.60	2.2	1.0	SP	
16-1(미구리)	0.21	0.43	0.62	3.0	1.4	SP	
17-1(박진교)	0.23	0.31	0.43	1.9	0.9	SP	
18-1(임해진)	0.18	0.30	0.53	2.9	0.9	SP	
19-1(삼량진)	0.33	0.51	0.69	2.1	1.2	SP	
20-1(울금)	0.21	0.38	0.80	3.7	0.8	SP	

상토 및 제체재료에 대한 입도분포곡선을 보여주고 있다. 낙동강 수계 하상토 발생 특성은 전체적으로 하천 본류를 따라 발생하며 발생 하상토는 강사의 입경이 균등한 모래(SP)가 발생되며, 하천 본류와 지천의 합류부, 자연습지, 하구언 등과 같이 물의 저류로 인한 퇴적특성이 우세한 지역에서 불연속적으로 하상토로서 점토나 실트가 발생하는 경향을 보였다. 이러한 결과분석을 통해 본 연구에서 대상으로 한 낙동강 수계 20개 지점의 발생 하상토는 모래(SP)인 것을 알 수 있다.

낙동강 유역 하상토는 입경 0.074mm~25.4mm, 균등계수(Cu) 1.8~6.6, 곡률계수(Cg) 0.4~4.3 인 것으로 평가 되었다. 하천설계기준(2005)에서는 제체재료의 경우 최대입경 100mm 이하, Cg값 1~3, 자갈인 경우  $Cu \geq 4$ , 모래인 경우  $Cu \geq 6$  로 통일분류법상 GM, GC, SM, SC, ML, CL 등인 세립분 함유 흙 사용을 원칙으로 하고 있다. 따라서 본 연구 대상인 낙동강 유역의 하상토는 성토재나 제체재료로 사용하기에는 설계기준에 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

한편 그림 2는 낙동강 수계 20개소에서 채취한 하상

토에 대한 입도분포곡선을 NAVFAC(1986) 메뉴얼에서 제안된 제방 재료별 제체누수에 대한 저항성 특성 기준으로 나타내고 있다. 그림 2에서 보듯이 낙동강 수계 하상토는 NAVFAC 메뉴얼상 제안된 입도분포특성에서 SP로서 누수저항성이 가장 작은 III 구간 재료에 해당되는 것으로 평가되었다. 따라서 낙동강 유역 조사대상 하상토는 하천설계기준 및 NAVFAC 메뉴얼상 제체재료로 사용하기에는 기준에 미치지 못하므로 하상토 활용을 위해서는 안정대책을 반드시 수립하여야 한다.

### 3. 실내시험

#### 3.1 실험대상 시료

실내시험에 사용된 하상재료는 국내에서 발생하는 하상토를 대상으로 하였으며, 표 2는 본 실험에 사용된 실험대상 시료의 채취 위치를 보여준다. 표 2에서 보듯이 실험대상 하상토는 왜관 부근 낙동강 본류에서 채취한 하상토 모래(왜관하상토-1, SP) 및 실트질 흙(왜관하

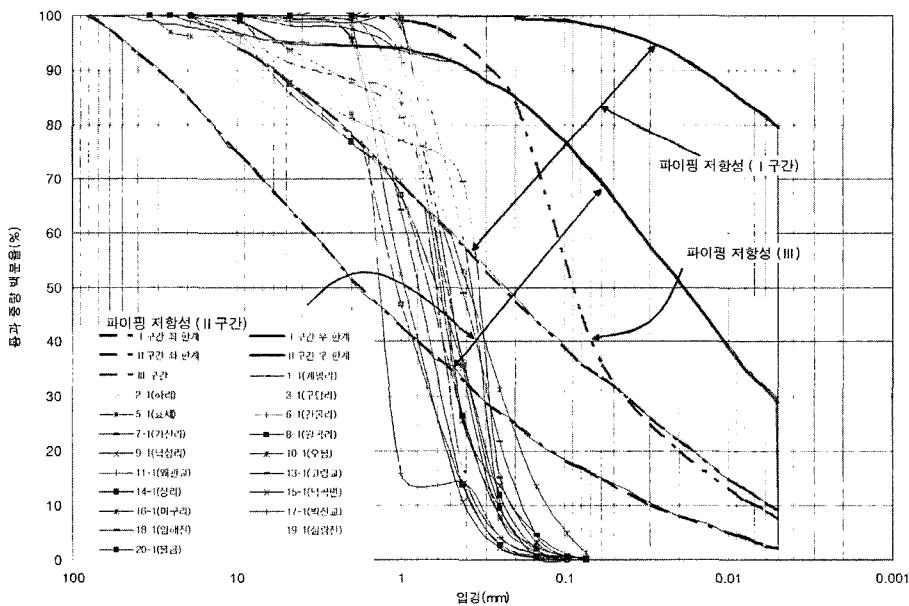


그림 2. 낙동강 유역 하상토 입도분포 곡선(김진만 등, 2006)

표 2. 기본특성시험에 사용된 흙 종류별 채취 위치

시료 종류	흙 분류	범례	채취 위치
왜관 하상토-1	SP (모래)	SP	경북 칠곡군 가산면 낙동 제2대교 근처
왜관 하상토-2	ML (실트질 흙)	ML	경북 칠곡군 가산면 낙동 제2대교 근처
안산하구언 하상토	CL (점토질 흙)	CL	경기 안산시 상록구 사동
승지천 오니토	MH (오니토)	ONI	인천 연수구 승지천 일대
화강풍화토	SM (실트질 모래)	SM	경북 칠곡군 동명면 도로공사 현장

상토-2, ML), 안산 하구언의 점토질 흙(CL), 인천 승지천의 오토니토(MH) 등이다. 본 연구에서 실험대상으로 선정한 실트질 흙과 점토질 흙의 경우 입도분포상의 설계기준에는 부합하지만 국내발생 하상토의 특성 및 안정처리 효과 비교를 위해 실험을 수행하였다. 또한, 본 실험에서는 낙동강 발생 하상토와 비교할 양질의 제체 재료로서 국내 널리 분포하고 있는 화강풍화토(경북 칠곡군 도로공사현장 소재)를 추가로 시험에 사용하였다.

### 3.2 기본물성시험

본 연구에서 사용된 하상토의 기본특성 및 입도분포 결과는 그림 3 및 표 3과 같다. 그림 3에서 시험대상시료의 입도분포특성은 왜관 하상토-1의 경우 입경이 균등한 모래(SP)로서 균등계수(Cu) 8.0, 곡률계수(Cg) 0.5, 왜관 하상토-2의 경우 소성이 작은 실트(ML)로서 균등계수(Cu) 43.3, 곡률계수(Cg) 0.7, 안산하구언 하상토의

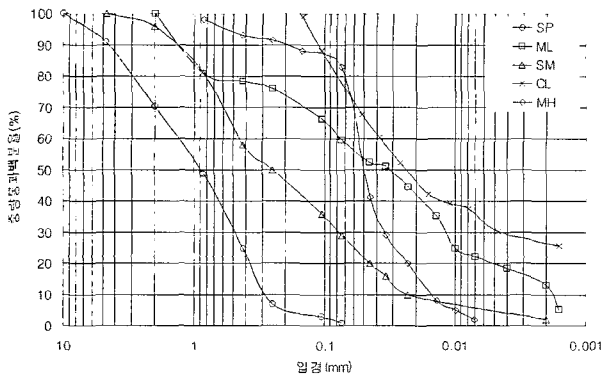


그림 3. 실험대상 시료의 입도분포 곡선

표 3. 하상토 및 화강풍화토의 입도시험 결과

특성		하상토 종류				
		왜관 하상토-1	왜관 하상토-2	안산하구언 하상토	승지천 오토니토	화강풍화토
비중		2.61	2.62	2.51	2.62	2.76
입도 분포	최대입경(mm)	6.40	4.76	0.15	0.84	4.76
	4.76mm체 통과율	91	100	100	100	100
	0.074mm체 통과율	1.0	52	73	83	29
	D <sub>10</sub> (mm)	0.25	0.003	-	0.016	0.023
	D <sub>30</sub> (mm)	0.49	0.017	0.0048	0.035	0.082
	D <sub>60</sub> (mm)	2.0	0.13	0.036	0.056	0.49
	균등계수, Cu	8.0	43.3	-	3.5	21.3
곡률계수, Cg	0.5	0.7	-	1.4	0.9	
연경도	액성한계, LL(%)	-	29.3	27.5	51.4	27.0
	소성한계, PL(%)	-	25.6	24.4	43.4	24.5
	소성지수, PI(%)	-	3.7	3.1	8.0	2.5
통일분류		SP	ML	CL	MH	SM

경우 소성이 작은 점토(MH), 승지천 오토니토의 경우 소성이 작은 점토(CL)로서 균등계수(Cu) 3.5, 곡률계수(Cg) 1.4, 화강풍화토의 경우 실트질 모래(SM)로서 균등계수(Cu) 21.3, 곡률계수(Cg) 0.9 등으로 나타났다.

표 3은 국내 발생 하상토의 비중시험 결과를 보여주고 있다. 비중은 왜관 하상토-1은 2.61, 왜관 하상토-2는 2.62, 안산하구언 하상토 2.51, 승지천 오토니토 2.62로 나타났다. 국내 발생 하상토의 비중은 화강풍화토 비중 2.76에 비해 대체적으로 다소 작은 것으로 나타났다. 액성 및 소성한계는 왜관 하상토-1(SP)의 경우 NP(소성이 없음), 왜관 하상토-2(ML)의 경우 29.3% 및 25.6%, 안산하구언 하상토(CL)의 경우 27.5% 및 24.4%, 승지천 오토니토(MH)의 경우 51.4% 및 43.4%, 화강풍화토(SM)의 경우 27.0% 및 24.5% 로 평가되었다. 국내 발생 하상토 및 화강풍화토는 소성지수의 경우 15 미만인 2.5~8.0 정도 수준 누수저항성이 작은 것으로 평가되었다.

하천설계기준(2005)상 제체재료기준과 비교한 결과 왜관 하상토-1(SP) 및 승지천 오토니토(MH) 등은 입도분포특성만을 놓고 볼 때 기준에 적합하지 않으므로 양질토 혼합 및 첨가재 등에 의한 안정처리가 요구된다. 또한, 왜관 하상토-2(ML) 및 안산하구언 하상토(CL)는 현장함수비가 적정할 경우 별도의 처리 없이 활용이 가능한 것으로 판단된다.

### 3.3 실험항목 및 범위

본 연구에서는 안정처리방법에 따른 하상토 활용방법의 효율성 및 적합성 등을 평가하고자 왜관하상토

표 4. 안정 처리된 하상토의 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위

실험항목	실험시료	변화인자	범위
기본특성시험 (비중, 입도, 액·소성)	왜관하상토-1(SP) 왜관하상토-2(ML) 안산 하구언 하상토(CL)	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%
다짐시험	왜관하상토-1(SP) 왜관하상토-2(ML) 안산 하구언 하상토(CL)	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12, 15, 18% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%
일축압축시험	왜관하상토-1(SP) 왜관하상토-2(ML) 안산 하구언 하상토(CL)	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%
		재령	0, 7, 14, 28일
		다짐도	85, 90, 95, 100%
직접전단시험	왜관하상토-1(SP) 왜관하상토-2(ML) 안산 하구언 하상토(CL)	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%
투수시험	왜관하상토-1(SP) 왜관하상토-2(ML) 안산 하구언 하상토(CL)	혼합율	시멘트: 3, 6, 9, 12% 화강풍화토: 25, 50, 75, 100%

-1(SP), 왜관하상토-2(ML), 안산 하구언 하상토(CL) 등에 화강풍화토 및 시멘트를 첨가한 혼합토에 대한 각종 물리·역학적 실험을 수행·분석하였다. 하상토 안정처리의 공학적 특성 평가를 위한 평가실험은 실험대상 하상토에 혼합토 및 안정제로서 화강풍화토 및 시멘트를 중량에 대한 혼합율 25%, 50%, 75%, 100% 및 3, 6, 9, 12% 등으로 변화시켜가면서 공학적 특성 평가를 위한 기본물성시험, 다짐시험, 일축압축시험, 직접전단시험, 투수시험 등을 재령일수 및 다짐도별 수행하였다. 다짐시험은 KS F 2322 A 다짐규정에 의하여 함수비 5~30% 범위로 실험을 수행하였다. 투수시험은 KS F 2323 규정에 의하여 시험대상시료의 흙 분류 특성을 고려하여 정수위 및 변수위 투수시험을 수행하였다. 일축압축시험은 KS F 2314 규정에 의하여 수행하였다. 시험공시체는 다짐시험에 의해서 구해진 최대건조밀도 및 최적함수비에 대한 다짐도 85%, 90%, 95%, 100% 등에 해당하는 건조밀도 및 함수비로 시료크기는 직경 50mm, 높이 100mm로 제작하였다. 표 4는 안정 처리된 하상토의 공학적 특성 평가를 위한 실험항목 및 범위를 보여준다.

#### 4. 시험 결과 및 고찰

##### 4.1 다짐시험

###### 4.1.1 화강풍화토 혼합에 따른 다짐특성

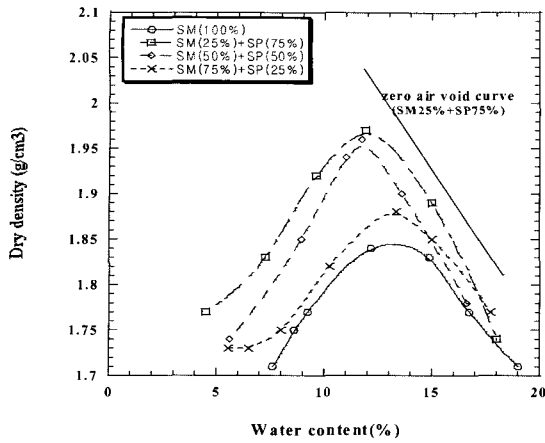
시험대상 하상토에 혼합토로서 화강풍화토를 혼합율 25%, 50%, 75%, 100% 등으로 변화시켜가면서 다짐시

험을 수행한 결과는 그림 4와 같다. 혼합토 다짐특성은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-1(SP) 혼합토의 경우 최대건조밀도 1.84~1.97g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 13.4%~12.1%, 왜관하상토-2(ML) 혼합토의 경우 최대건조밀도 1.64~1.84g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 19.8%~12.2%, 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토의 경우 최대건조밀도 1.61~1.84g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 21.6%~12.2% 등으로 최대건조밀도는 커지고, 최적함수비는 작아지는 경향을 보였다.

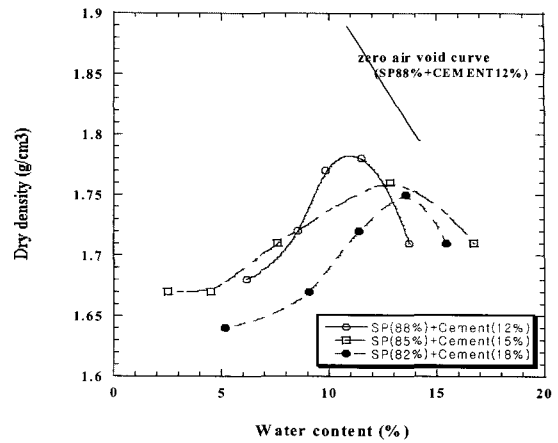
화강풍화토 혼합에 따른 하상토 다짐은 입도분포특성과 마찬가지로 제방재료로서 공학적 특성이 점진적으로 개선되는 것으로 평가되었다.

###### 4.1.2 시멘트 혼합에 따른 다짐특성

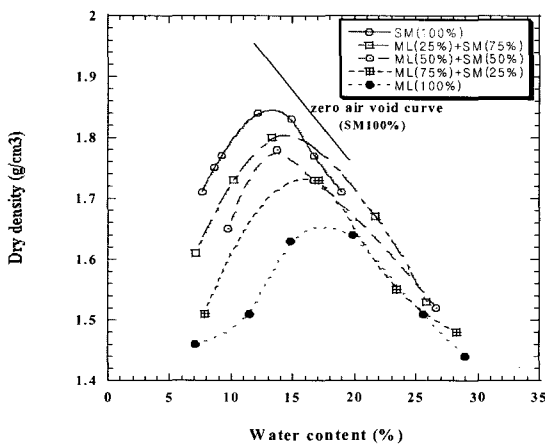
다짐시험은 왜관하상토-1(SP) 안정처리토의 경우 일반 강모래인 관계로 다짐곡선이 구해지는 시멘트 혼합율 12%, 15%, 18% 등에서 수행하였으며, 왜관하상토-2(ML) 및 안산 하구언 하상토(CL) 안정처리토는 경제성을 고려하여 시멘트를 혼합율 3%, 6%, 9%, 12% 등으로 변화시켜가면서 다짐시험을 수행한 결과를 그림 5에 나타내었다. 안정처리토의 다짐특성은 시멘트 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-1(SP) 안정처리토의 경우 최대건조밀도 1.78~1.75g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 10.8%~13.5%로, 왜관하상토-2(ML) 안정처리토의 경우 최대건조밀도 1.65~1.62g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 18.0%~17.9%로, 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토의 경우 최대건조밀도 1.59~1.61g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 20.2%~21.8% 등으로, 최대건조



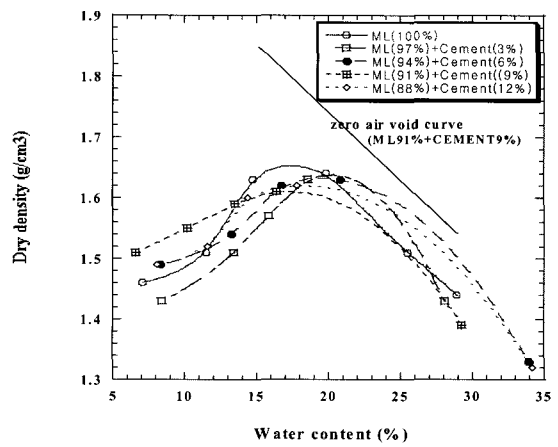
(a) 왜관하상토-1(SP) 혼합토



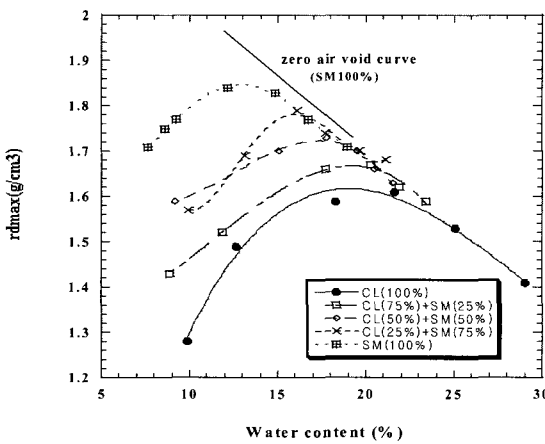
(a) 왜관하상토-1(SP) 안정처리토



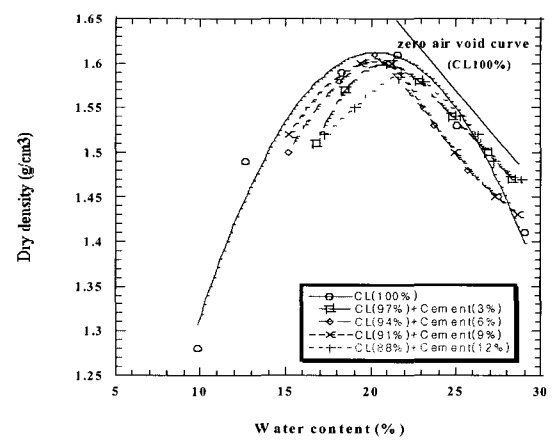
(b) 왜관하상토-2(ML)혼합토



(b) 왜관하상토-2(ML) 안정처리토



(c) 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토



(c) 안산 하구언 하상토(CL) 안정처리토

그림 4. 하상토/화강풍화토 혼합토의 다짐곡선

그림 5. 하상토/시멘트 안정처리토의 다짐곡선

밀도의 경우 변화가 없고, 최적함수비는 다소 커지는 경향을 보였다. 이러한 특성은 시멘트 혼합비율이 커질수록 하상토 종류에 상관없이 세립토화가 진행되어 발생된다. 하상토 활용을 위한 시멘트 혼합은 하상토 다짐특성 개선에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

## 4.2 일축압축 시험

### 4.2.1 화강풍화토 혼합에 따른 하상토 일축압축강도 특성

표 5는 시험대상 하상토/화강풍화토 혼합토의 일축압

표 5. 하상토(CL, ML)/화강풍화토 혼합토의 일축압축시험결과(kg/cm<sup>2</sup>)

시료	특성	다짐도	혼합비율 : (ML+SM), (CL+SM)				
			100+0	75+25	50+50	25+75	0+100
왜관하상토-2(ML) + 화강풍화토(SM)		100%	1.44	1.31	1.66	1.42	1.36
		95%	0.65	0.64	0.91	0.47	0.47
		90%	0.36	0.39	0.26	0.15	0.11
		85%	0일	0.11	0.13	0.15	-
안산하구언 하상토(CL)+ 화강풍화토(SM)		100%	0.67	0.88	0.92	0.99	1.36
		95%	0.38	0.41	0.45	0.42	0.47
		90%	0.28	0.16	0.27	0.15	0.11
		85%	0.19	-	-	-	-

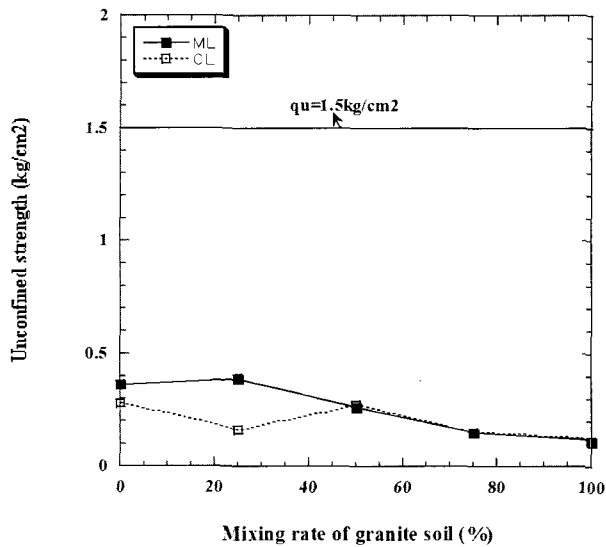


그림 6. 화강풍화토 혼합율에 따른 일축압축강도 변화(상대다짐도 90%)

축시험결과를 보여 준다. 혼합토의 일축압축강도는 상대 다짐도 90%에서 왜관하상토-2(ML) 혼합토의 경우 대체 적으로 화강풍화토 혼합율 25%를 정점으로 0.11kg/cm<sup>2</sup> 정도로, 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토의 경우 혼합율 25%를 정점으로 0.11kg/cm<sup>2</sup> 정도로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 특성은 화강풍화토가 혼합되면서 세립 토에 의한 점착력 특성이 감소되면서 발생된다.

한편, 그림 6은 하상토/화강풍화토 혼합토 강도시험 결과를 불량토대책매뉴얼(1985)에 제시된 성토고 10m 인 제방재료의 최소요구강도 1.5kg/cm<sup>2</sup>과 비교한 결과를 나타내고 있다. 그림 6에서 왜관하상토-2(ML) 혼합 토 및 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토는 상대다짐도 90%에서 모두 불량토대책매뉴얼(1985, 北海道開發局 土木試驗所)의 제방재료 최소요구강도를 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 왜관하상 토-2와 안산하구언 하상토에 화강풍화토를 혼합하였을

경우 일축압축특성을 개선시키지 못함을 알 수 있다.

#### 4.2.2 시멘트 혼합에 따른 하상토(ML) 일축압축강도 특성

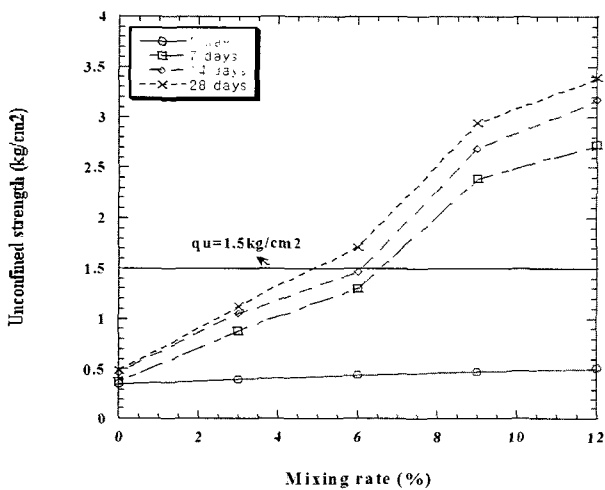
표 6 및 그림 7은 왜관하상토-2(ML) 안정처리토의 일 축압축시험결과를 보여 준다. 왜관하상토-2(ML) 안정 처리토의 재령에 따른 강도특성을 파악하기 위하여 안 정제를 혼합하지 않은 상대 다짐도 90%인 경우 왜관하 상토-2(ML)와 시멘트 혼합율 6% 안정처리토에 대하여 0일, 7일, 14일, 28일 재령에 따른 강도특성을 살펴보았 다. 장기 재령효과에 의한 왜관하상토-2(ML) 안정처리 토의 압축강도는 시간경과에 따라 0.45~1.71kg/cm<sup>2</sup>로, 3.8배의 증가를 나타냈다.

또한, 그림 7(b)에서는 왜관하상토-2(ML) 안정처리토 의 시멘트 혼합율에 따른 일축압축강도 변화를 보여준 다. 시멘트 혼합율 효과에 의한 왜관하상토-2(ML) 안정 처리토 압축강도는 상대다짐도 90%, 시간경과 28일인 경우 혼합율(0, 3, 6, 9, 12%)이 높아짐으로서 0.49~ 3.39kg/cm<sup>2</sup>로, 6.9배의 강도증가를 나타냈다.

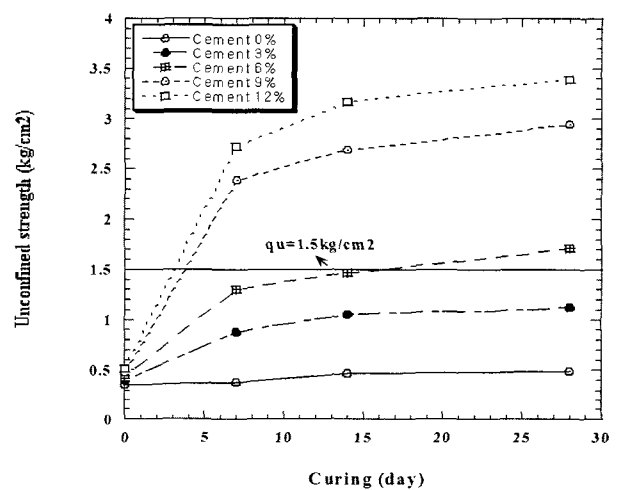
한편, 상대다짐도 변화 효과에 의한 왜관하상토-2(ML) 안정처리토 압축강도는 시멘트 혼합율 6%, 시간경과 28 일인 경우 상대다짐도(85, 90, 95, 100%)가 높아짐으로 서 1.12~4.67kg/cm<sup>2</sup>로, 4.2배의 강도증가를 나타냈다. 이러한 왜관하상토-2(ML) 안정처리토 압축강도특성은 시멘트에 경화특성에 기인하며, 시멘트 세립분의 점착 효과의 영향으로 판단된다. 이러한 경향은 김영수 등 (2006)의 시멘트 혼합토의 강도특성 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 대체적으로 Tayler 제방재료의 최 소요구강도를 만족시켰다. 따라서 왜관하상토-2(ML)와 같은 세립질의 하상토는 화강풍화토에 의한 혼합 보다 시멘트 안정처리가 더 효과적인 것으로 평가 되었다.

표 6. 왜관하상토-2(ML) 안정처리토의 일축압축시험결과(kg/cm<sup>2</sup>)

시료	특성	다짐도	재령	혼합비율(ML+시멘트)				
				100+0	97+3	94+6	91+9	88+12
실트(ML)+시멘트	100%		0일	1.44	1.21	1.27	1.41	2.08
			7일	1.48	3.09	3.43	5.05	7.23
			14일	1.55	3.12	3.95	5.85	8.15
			28일	1.57	3.34	4.67	8.52	10.15
	95%		0일	0.65	0.79	0.72	0.78	0.93
			7일	0.71	1.61	1.93	3.58	5.05
			14일	0.71	1.72	2.07	5.23	5.85
			28일	0.80	1.91	2.52	5.61	6.21
	90%		0일	0.36	0.40	0.45	0.48	0.51
			7일	0.38	0.88	1.30	2.39	2.72
			14일	0.47	1.06	1.47	2.69	3.17
			28일	0.49	1.12	1.71	2.95	3.39
	85%		0일	0.11	0.37	0.23	0.36	0.34
			7일	0.23	0.78	0.74	1.78	1.97
			14일	0.20	0.89	1.02	2.11	2.35
			28일	0.25	0.85	1.12	2.24	2.88



(a) 장기재령 효과(다짐도 90%)



(b) 시멘트 혼합율 효과(다짐도 90%)

그림 7. 왜관하상토-2(ML) 안정처리토의 일축압축강도특성

#### 4.2.3 시멘트 혼합에 따른 하상토(CL) 일축압축강도 특성

표 7 및 그림 8은 안산하구언 하상토(CL) 안정처리토의 일축압축시험결과를 보여 준다. 안산하구언 하상토(CL) 안정처리토의 재령에 따른 강도특성을 파악하기 위하여 안정제를 혼합하지 않은 상대다짐도 90%인 경우 안산하구언 하상토(CL)와 시멘트 혼합율 6% 안정처리토에 대하여 0일, 7일, 14일 재령에 따른 강도특성을 살펴보았다. 장기 재령효과에 의한 안산하구언 하상토(CL) 안정처리토의 압축강도는 시간경과에 따라 0.30~4.11kg/cm<sup>2</sup>로, 13.7배의 증가를 나타냈다. 시멘트 혼합

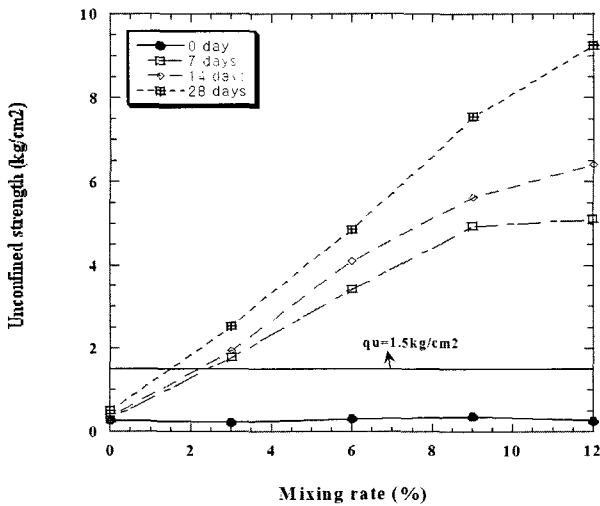
율 효과에 의한 안산하구언 하상토(CL) 안정처리토 압축강도는 상대다짐도 90%, 시간경과 14일인 경우 혼합율(0, 3, 6, 9, 12%)이 높아짐으로서 0.35~6.42kg/cm<sup>2</sup>로, 18.3배의 강도증가를 나타냈다.

한편, 상대다짐도 변화 효과에 의한 안산하구언 하상토(CL) 안정처리토 압축강도는 시멘트 혼합율 6%, 시간경과 14일인 경우 상대다짐도(90, 95, 100%)가 높아짐으로서 4.11~9.24kg/cm<sup>2</sup>로, 2.2배의 강도증가를 나타냈다. 이러한 안산하구언 하상토(CL) 안정처리토 압축강도특성은 시멘트에 경화특성에 기인하며, 대체적으로 불량토대책매뉴얼(1985) 제방재료의 최소요구강도를 만

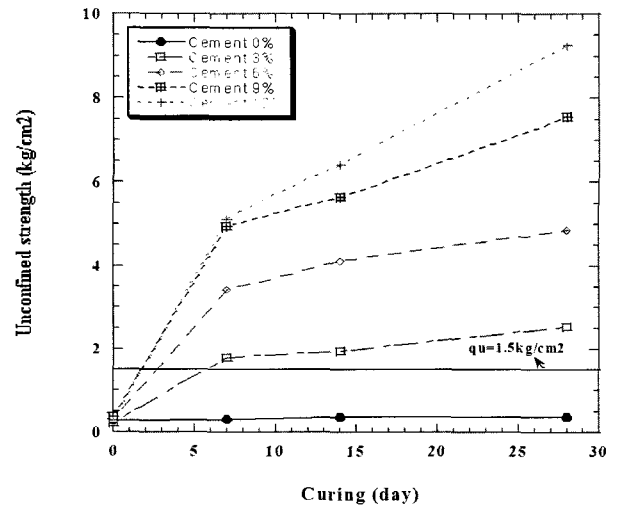


표 7. 안산하구언 하상토(CL) 안정처리토의 일축압축시험결과(kg/cm<sup>2</sup>)

시료	특성	다짐도	재령	혼합비율(CL+시멘트)				
				100+0	97+3	94+6	91+9	88+12
점토(CL)+시멘트	100%		0일	0.67	1.26	1.45	1.49	1.43
			7일	0.78	2.70	5.71	9.79	14.99
			14일	1.09	3.07	9.24	11.72	16.03
			28일	1.13	4.94	9.46	12.93	19.17
	95%		0일	0.38	0.43	0.71	0.82	0.79
			7일	0.44	1.85	4.32	4.97	7.86
			14일	0.49	2.02	7.20	8.23	10.51
			28일	0.51	2.25	7.89	8.61	12.08
	90%		0일	0.28	0.21	0.30	0.35	0.26
			7일	0.31	1.78	3.43	4.95	5.11
			14일	0.35	1.95	4.11	5.65	6.42
			28일	0.37	2.54	4.87	7.57	10.26
	85%		0일	0.19	0.16	시료성형불가	0.26	0.16
			7일	0.23	1.50	시료성형불가	4.21	4.28
			14일	0.22	1.69	시료성형불가	5.19	7.01
			28일	0.23	1.89	시료성형불가	6.41	8.48



(a) 장기재령 효과(다짐도 90%)



(b) 시멘트 혼합을 효과(다짐도 90%)

그림 8. 안산하구언 하상토(CL) 안정처리토의 일축압축강도특성

족시켰다. 따라서 안산하구언 하상토(CL)와 같은 세립 질의 하상토는 화강풍화토에 의한 혼합 보다 시멘트 안정처리가 더 효과적인 것으로 평가 되었다.

### 4.3 투수시험

#### 4.3.1 화강풍화토 혼합에 따른 하상토 투수특성

그림 9는 시험대상 하상토/화강풍화토 혼합토의 투수계수 변화 곡선 및 투수시험결과를 보여 준다. 혼합토 투수특성은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-1(SP)

혼합토의 경우  $4.85 \times 10^{-2} \sim 3.05 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로, 왜관하상토-2(ML) 혼합토의 경우  $2.29 \times 10^{-5} \sim 3.05 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로, 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토의 경우  $1.97 \times 10^{-7} \sim 3.05 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$  등으로 나타났다. 그림 9에서 보듯이 혼합토의 투수계수는 왜관하상토-1(SP) 혼합토와 같이 조립토인 경우 화강풍화토 혼합에 따른 저감이 현저하고, 세립토인 왜관하상토-2(ML) 혼합토 및 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토의 경우 화강풍화토 혼합에 따른 저감이 없거나 오히려 커지는 경향을 보였다.

일반적으로 투수계수는 입도분포곡선상 통과중량 백

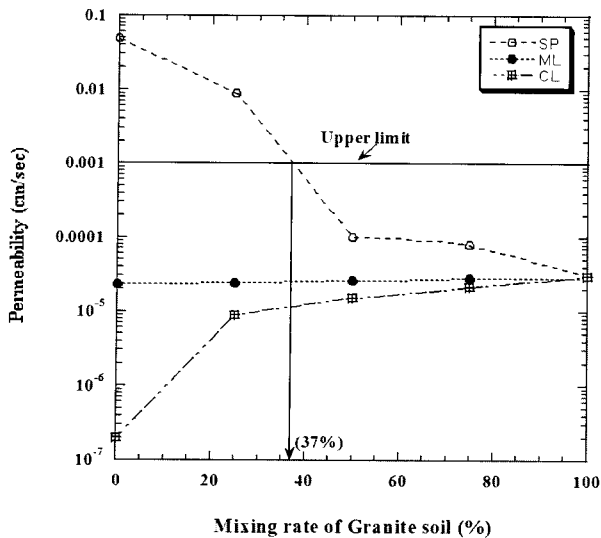


그림 9. 시험대상 하상토/화강풍화토 혼합토의 투수계수 변화 곡선

분을 10%에 해당하는 입경,  $D_{10}$ 에 직접적인 영향을 받는다. 즉 투수계수는  $D_{10}$ 이 작을수록 작아지는 경향이 있다. 예로써 실험에 사용된 혼합토로서 사용된 화강풍화토(SM)는  $D_{10}$ 이 0.023mm로서 왜관하상토-1(SP)  $D_{10}$  0.25mm 보다 10배나 작으므로 화강풍화토 혼합으로 인한 입도분포 변화가 투수계수에 영향을 미친것을 알 수 있다. 한편, 그림 9에서 보듯이 왜관하상토-1(SP) 혼합토는 화강풍화토 혼합을 38% 이상에서 하천설계기준상의 투수기준인  $1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 을 만족시키는 것으로 나타났다. 따라서 왜관하상토-1(SP)과 같은 강모래를 제방 재료로 활용할 경우 현장배합시험에 의한 투수특성 평가를 수행하고, 안정처리토 혼합을 통한 투수계수 설계 기준을 만족시킨 후 사용하여야 할 것이다.

#### 4.3.2 시멘트 혼합에 따른 하상토 투수특성

그림 10은 시험대상 하상토/시멘트 안정처리토의 투수계수 변화 곡선 및 투수시험결과를 보여 준다. 안정처리토의 투수특성은 시멘트 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-1(SP) 안정처리토의 경우  $4.85 \times 10^{-2} \sim 9.80 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ , 왜관하상토-2(ML) 안정처리토의 경우  $2.29 \times 10^{-5} \sim 1.08 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$ , 안산 하구언 하상토(CL) 안정처리토의 경우  $1.97 \times 10^{-7} \sim 2.32 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{sec}$  로 나타났다. 안정처리토의 투수계수는 왜관하상토-1(SP) 안정처리토와 같이 조립토인 경우 시멘트 혼합에 따른 저감효과가 작고, 세립토인 왜관하상토-2(ML) 안정처리토 경우 시멘트 혼합에 따른 별 차이를 보이지 않고, 안산 하구언 하상토(CL) 안정처리토의 경우, 혼합율이 증가함에 따라 증가

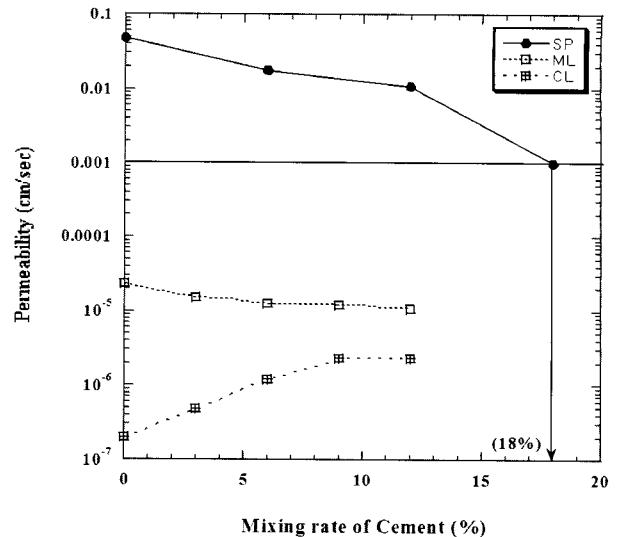


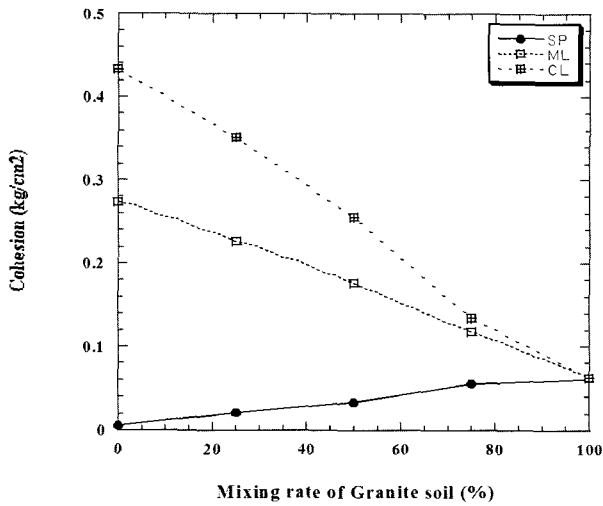
그림 10. 시험대상 하상토/시멘트 안정처리토의 투수계수 변화 곡선

하는 경향을 보였다. 이러한 특성은 앞서 언급되었듯이 입도분포곡선 상 통과중량 10%에 해당하는 입경,  $D_{10}$ 에 의한 영향인 것으로 판단된다.

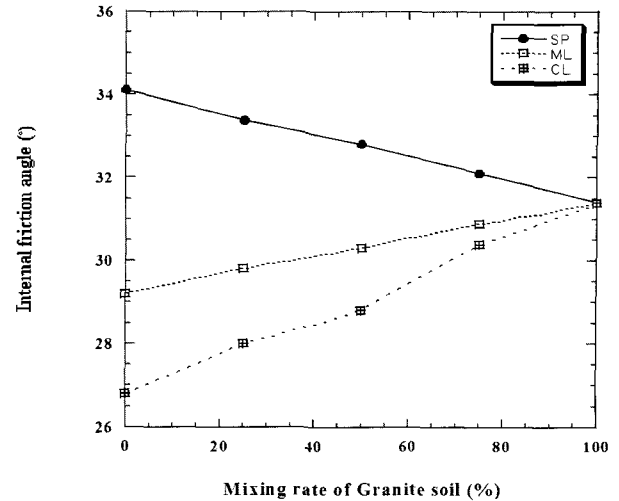
한편, 그림 10에서 보듯이 왜관하상토-1(SP) 안정처리토는 시멘트 혼합율 18% 이상에서 하천설계기준상의 투수기준인  $1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 을 만족시켜 경제성을 고려해 볼 때 시멘트 안정처리법이 적합하지 않은 것으로 평가되었다. 또한, 왜관하상토-2(ML) 및 안산 하구언 하상토(CL)와 같은 세립질의 하상토는 시멘트 혼합에 의한 투수계수 변화가 없을지라도 하천설계기준상의 투수기준인  $1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 을 만족시킴으로, 전단강도측면의 적합성을 고려하여 사용할 것을 권장한다.

#### 4.4 전단특성

그림 11은 하상토/화강풍화토 혼합토의 전단시험결과를 보여 준다. 화강풍화토 혼합토 전단강도는 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 왜관 하상토-1(SP)의 경우 점착력  $0.01 \sim 0.06 \text{kg}/\text{cm}^2$ , 내부마찰각  $34.1^\circ \sim 31.4^\circ$ , 왜관 하상토-2(ML)의 경우  $0.27 \sim 0.06 \text{kg}/\text{cm}^2$ , 내부마찰각  $29.2^\circ \sim 31.4^\circ$ , 안산하구언 하상토(CL)의 경우 점착력  $0.43 \sim 0.06 \text{kg}/\text{cm}^2$ , 내부마찰각  $29.1^\circ \sim 31.4^\circ$  등인 것으로 나타났다. 그림 11에서 알 수 있듯이 화강풍화토 혼합에 따라 왜관하상토-1(SP) 혼합토는 점착력이 증가하는 반면 내부마찰각이 감소하고 경향을 나타내고 있으며, 왜관하상토-2(ML) 혼합토 및 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토의 경우 점착력이 감소하는 반면에 내부

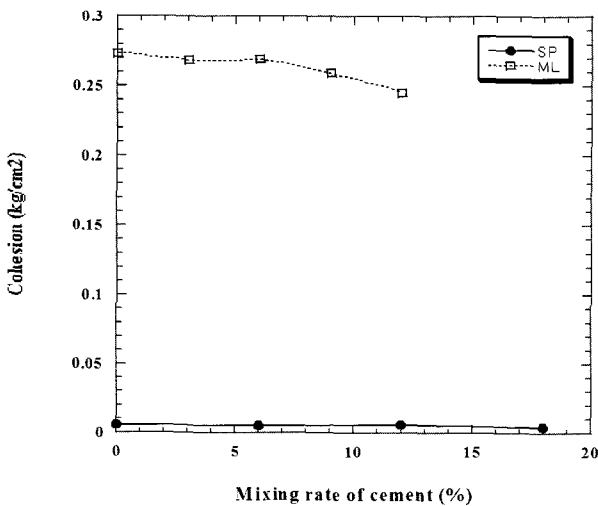


(a) 점착력 변화

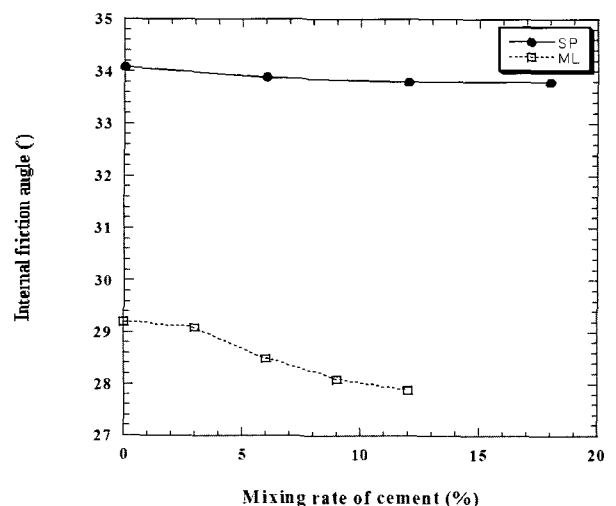


(b) 내부마찰각 변화

그림 11. 하상토/화강풍화토 혼합토의 전단강도 변화 곡선



(a) 점착력 변화



(b) 내부마찰각

그림 12. 하상토/시멘트 안정처리토의 전단강도 변화 곡선

마찰각이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과를 통해 왜관하상토와 같은 조립토의 경우 입자간의 맞물림(interlocking) 특성이 내부마찰각에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 세립토의 경우 입자간 전기·화학적 결합력 특성이 점착력에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

한편 그림 12는 하상토/시멘트 혼합토(재령 0일)의 전단시험결과를 보여주고있다. 그림 12에서 보듯이 안정처리토의 전단강도특성은 시멘트 혼합에 따라 조립토인 왜관하상토-1(SP) 안정처리토와 세립토인 왜관하상토-2(ML) 안정처리토 모두 점착력의 변화 없이 내부마찰각이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 점착력 및 내부마찰각 변화 특성은 앞서 언급되었듯이 세립토인 시멘트 혼합에 따른 하상 혼합토의 세립화 특성에 기인하는

것으로 세립분이 강도특성에 영향을 미치는 주요인자임을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 발생 하상토(SP, ML, CL)에 화강풍화토 및 시멘트를 첨가한 혼합토에 대한 각종 물리·역학적 실험을 통해 하상토 활용 기법의 효율성 및 적합성 등을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 하상토 활용 기법으로서 입도조정기법 및 안정처리 기법은 안정처리된 하상토의 비중 및 소성특성과 같은 공학적 특성 변화에 대한 영향이 작으며, 왜관

하상토-1(SP) 혼합토의 경우 50%이상에서 SP에서 SM로, 왜관하상토-2(ML) 혼합토의 경우 25%이상에서 ML에서 SM으로, 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토의 경우 50%이상에서 ML에서 SM 등으로 입도분포 변화에 영향이 큰 것으로 평가되었다.

- (2) 혼합토 다짐특성은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 최대건조밀도의 경우 왜관하상토-1(SP) 혼합토 1.84~1.97g/cm<sup>3</sup>로, 왜관하상토-2(ML) 혼합토 1.64~1.84g/cm<sup>3</sup>로, 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토 1.61~1.84g/cm<sup>3</sup> 등으로 제방재료로서 공학적 특성이 점진적으로 개선되는 것으로 평가되었다.
- (3) 혼합토의 일축압축강도는 화강풍화토가 혼합되면서 세립토에 의한 점착력 특성이 감소하면서 상대다짐도 90%에서 왜관하상토-2(ML) 혼합토의 경우 화강풍화토 혼합율 25%를 정점으로 0.11kg/cm<sup>2</sup> 정도로 감소하는 경향을 보였다. 시멘트 혼합을 효과에 의한 왜관하상토-2(ML) 안정처리토 압축강도는 상대다짐도 90%, 시간경과 28일인 경우 혼합율(0, 3, 6, 9, 12%)이 높아짐으로서 0.49~3.39kg/cm<sup>2</sup>로, 6.9배의 강도증가를 나타냈으며, 왜관하상토-2(ML)와 같은 세립질의 하상토는 화강풍화토에 의한 혼합보다 시멘트 안정처리가 더 효과적인 것으로 평가 되었다.
- (4) 혼합토 투수특성은 화강풍화토 혼합비율이 커질수록 왜관하상토-1(SP) 혼합토의 경우  $4.85 \times 10^{-2} \sim 3.05 \times 10^{-5}$  cm/sec로, 왜관하상토-2(ML) 혼합토의 경

우  $2.29 \times 10^{-5} \sim 3.05 \times 10^{-5}$  cm/sec로, 안산 하구언 하상토(CL) 혼합토의 경우  $1.97 \times 10^{-7} \sim 3.05 \times 10^{-5}$  cm/sec 등으로 나타나, 왜관하상토-1(SP) 혼합토와 같은 강모래를 제방재료로 활용할 경우 현장배합시험에 의한 투수특성 평가 및 최소 혼합률 40% 이상이 필요할 것으로 판단된다. 안정처리토의 투수특성은 왜관하상토-1(SP) 및 왜관하상토-2(ML) 안정처리토 모두에서 시멘트 혼합에 따른 별 차이를 보이지 않는 경향을 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 추진하는 2005년 건설기반구축사업(C105B1000006-05B0100-00610)의 지원으로 수행된 연구성과이며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 한국수자원학회 (1999), “하천공사표준시방서”.
2. 한국수자원학회 (2005), “하천설계기준·해설”.
3. 김진만, 최봉혁, 김경민 (2006), “하상재료를 이용한 하천제방의 공학적 특성”, 한국지반공학회 2006년 탐·제방기술위원회 학술발표회 논문집.
4. 김영수, 정우섭, 석태용, 임안식 (2006), “낙동강유역 시멘트혼합토의 강도특성”, 한국지반환경공학회 논문집, 제 7권, 제 4호, pp. 43-52.
5. NAVFAC (1986), “Foundation and Earth Structures”, *Design Manual*.
6. 北海道開發局土木試験所 第3研究部土質研究室 (1985), 北海道における不良土對策マニュアル.

(접수일자 2006. 12. 11, 심사완료일 2007. 4. 25)