

# SIP 말뚝에 적용되는 시멘트ミルク의 역학적 특성



박 영 호  
한국도로공사 수석연구원



김 낙 영  
한국도로공사 책임연구원  
(pk6317@paran.com)



육 정 훈  
GS건설 대리

## 1. 서론

굴착공내에 선단근고액과 주면고정액을 주입하여 기성 말뚝을 설치하는 SIP공법 말뚝의 지지거동은 시멘트ミルク의 강도에 영향을 받는다. 그러나 시멘트ミルク에 대한 물리적 특성 시험방법과 이에 대한 역학적 성질에 대한 연구가 많지가 않다. 일본 (사)콘크리트 말뚝 건설기술협회에서 이용하고 있는 시멘트ミルク 공시체 제작 방법을 이용하여 공시체를 제작하고 역학시험을 수행한 결과를 소개하고자 한다. 슬라임이 혼합되지 않은 순수 시멘트ミルク의 역학시험 결과, 시멘트ミルク의 일축압축강도, 점하중강도, 탄성계수는 물-시멘트비가 감소할수록 증가하였고, 재령일이 길어질수록 증가하였다. 포와송비는 물-시멘트비가 감소할수록, 재령일이 길어질수록 감소하는 경향을 나타내었다. SIP공법의 선단근고액(w/c=70%)으로 이용되는 시멘트ミルク의 평균 표준일축압축강도는 263.6kgf/cm<sup>2</sup>이었으며, 주면고정액(w/c=150%)의 평균 표준일축압축강도는 151.3kgf/cm<sup>2</sup>이었다. 또한 점하중강도 시험결과와 일축압축강도의 상관계수는 w/c=65%(18.67), 70%(17.57),

100%(14.59), 150%(11.97), 200%(8.76), 300%(6.21)으로 나타났다.

## 2. 역학적 특성 분석 방법

순수 시멘트ミルク의 배합비 변화와 재령일에 따라 형성된 공시체의 물성을 알아보기 위하여 일축압축강도, 점하중강도, 탄성계수 및 포와송비 시험을 실시하였으며 그 현황은 다음과 같다.

### 2.1 시험 공시체 제작

콘크리트 공시체는 가로×길이×세로가 5×5×5cm인 큐빅몰드와 지름×높이의 비가 1:2인 원주형 몰드를 주로 이용하고 있다. 이들의 몰드에 시멘트ミルク를 주입하면 시멘트 입자는 아래로 침강하고 위로는 물이 떠 있는 블리딩 현상이 심하게 발생한다. 이 현상으로 공시체 상부 표면의 상태는 거칠어서 공시체의 단부를 절단 및 연마하거나 캡

## SIP 말뚝에 적용되는 시멘트ミルク의 역학적 특성

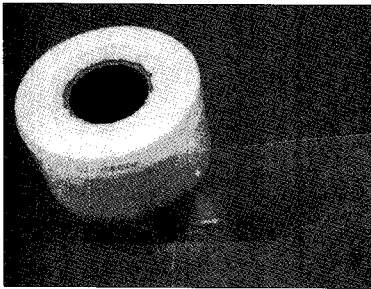
평과정을 거쳐야한다. 이 과정에서 공시체의 길이는 원 물 드의 높이보다 작아져 불확실한 결과를 얻게 된다.

따라서 본 연구에서는 일본 (사)콘크리트 말뚝 건설기술

협회(2002)에서 이용되고 있는 '대입공법에 사용하는 선 단근교액과 주변교정액의 압축강도시험 방법'을 참고하여 공시체를 제작하였다.

표 1. 시멘트ミルク 배합비 및 재령에 따른 시험 현황

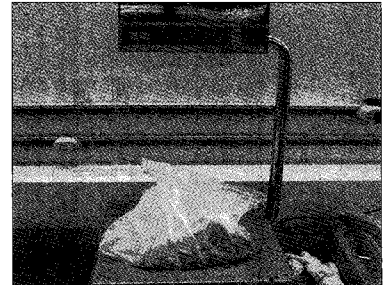
시험 종류	재령	시멘트ミルク 배합비(%), w/c						시험수량
		65	70	100	150	200	300	
일축압축강도	7일	18	18	18	18	18	18	108 ea
	28일	18	18	18	18	18	18	108 ea
점하중강도	7일	9	9	9	9	9	9	54 ea
	28일	9	9	9	9	9	9	54 ea
탄성계수 및 포아송비	7일	9	9	9	9	9	9	54 ea
	28일	9	9	9	9	9	9	54 ea
비고		선단근교액			주변교정액			432ea



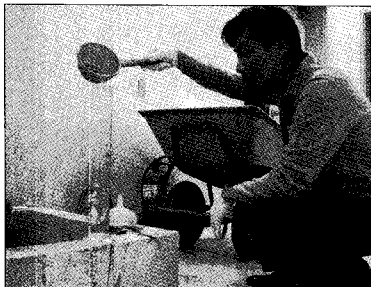
1. 비닐포대(내경 5cm)준비



2. 비닐포대 하단 봉합



3. 시멘트 개량



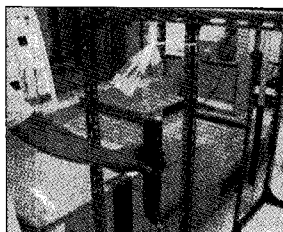
4. 물 개량



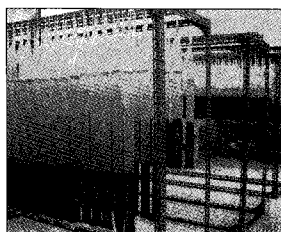
5. 시멘트, 물 배합후 믹싱



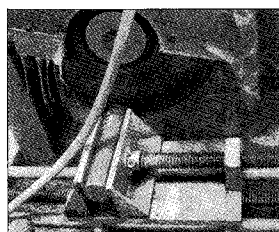
6. 시멘트ミルク 주입



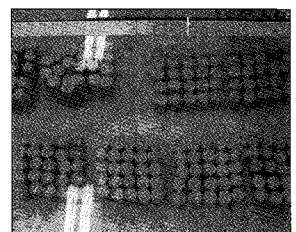
7. 비닐포대 매달기



8. 시멘트ミルク 경화(3~5일)



9. 공시체 절단



10. 수중양생

그림 1. 시험 공시체 제작 순서

시험 공시체의 제작은 일본 (사)콘크리트 말뚝 건설기술 협회에서 제안하고 있는 시험 공시체 제작방법을 참고하여 그림 1과 같이 제작하였다.

## 2.2 주입높이 결정

SIP공법에 사용하는 시멘트밀크는 이용 목적에 따라 선단근교액과 주면고정액으로 나누어지며, 이때의 w/c는 표 2와 같다. 시멘트밀크의 특성상 w/c가 높아질수록 물의 사용량이 많아지고 시멘트입자의 침강량이 증가하게 된다. 따라서 압축강도시험을 하기 위한 공시체의 길이 30cm를 만드는데, 필요한 밀크 주입높이를 결정하기 위하여 다음과 같은 내용으로 시험하였다.

### (1) 단위 시멘트량을 기준으로 물-시멘트비 변화에 따른 고결체 형성높이

시험 공시체의 제작은 일본 (사)콘크리트 말뚝 건설기술협회에서 제안하고 있는 시험 공시체 제작방법에 따라 시멘트량 1.0kgf를 기준으로 물 양을 변화시키면서 표 3과 같이 w/c비에 따라 시멘트밀크를 주입하였다.

이렇게 주입한 높이와 경화 후 형성된 고결체의 높이를 표 4와 그림 2에 나타내었다.

그림 2와 같이 w/c비가 커질수록 침강하여 형성되는 고결체의 높이는 w/c=100%까지는 증가하다가 150%부터

표 2. 선단근교액과 주면고정액의 물-시멘트비(w/c)

시멘트밀크 배합비(%), w/c					
65	70	100	150	200	300
선단근교액			주면고정액		

표 3. 시멘트량(1kg)을 고정할 경우 w/c 비에 따른 물의 량

w/c(%)	65	70	100	150	200	300
cement(kgf)	1	1	1	1	1	1
water(l)	0.65	0.7	1	1.5	2	3

표 4. w/c 비에 따른 주입높이와 형성된 고결체의 높이

w/c(%)	65	70	100	150	200	300
주입높이(cm)	48	52.5	68	93	119	165.5
고결체 형성높이(cm)	46	50	60.5	68	69	68

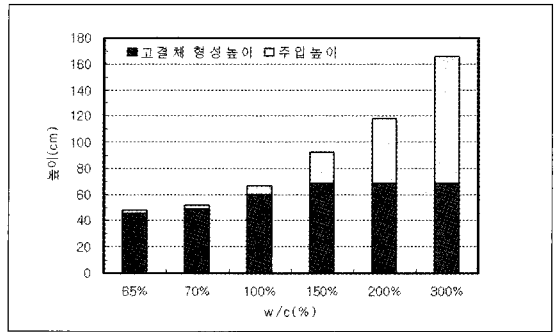


그림 2. 단위 시멘트량(1kgf)에 대해 물의 양에 따른 고결체 높이

는 일정해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 w/c=150%부터 동일량의 시멘트량에 대하여 물의 량이 증가하여도 형성되는 고결체의 높이는 일정하다는 것을 의미한다.

### (2) 시멘트밀크 주입높이별 고결체 형성높이

일본 (사)콘크리트 말뚝 건설기술협회에서 제안하고 있는 시험 공시체 제작방법에서 강도시험을 수행하기 위해 형성되는 고결체의 높이는 최소 25cm이다. 그러나 시료의 절단이나 연마 등 편의를 위해 본 시험에서는 최소 30cm의 고결체를 형성하기 위하여, 각 w/c비에 따라 밀크 주입높이를 45cm, 90cm, 135cm로 주입하였을 때, 경화 후 형성된 고결체의 높이를 측정할 결과는 표 5와 그림 3에 나타내었다.

그림 3에 의하면, 형성된 고결체의 높이는 밀크 주입높이에 각각 비례하는 경향을 보였다. 따라서 이를 토대로 각 w/c별로 30cm의 시료를 형성하기 위한 주입높이를 표 6과 같이 계산하였다. 또한 시멘트밀크의 물성시험을 위하여 제작한 공시체는 이 표에 준하여 제작하였다.

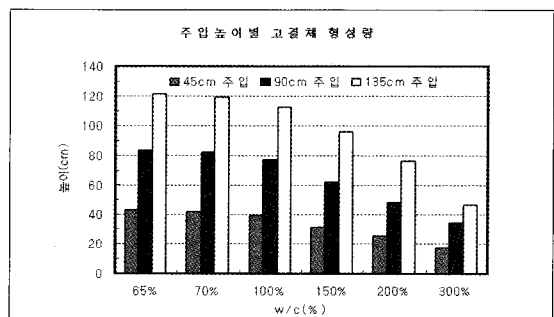


그림 3. 주입높이별 고결체 형성높이

표 5. 주입높이별 고결체 형성 높이

w/c (%)	65	70	100	150	200	300
주입높이(cm)	132	132	135	135	135	135
형성높이(cm)	118	119	112	96	76	46
주입높이(cm)	90	90	90	90	90	90
형성높이(cm)	83.5	82	77	61.5	48	34
주입높이(cm)	45	45	45	45	45	45
형성높이(cm)	43	41.5	39	31	25	17

표 6. 높이 30cm의 시료를 형성하기 위한 밀크 주입높이

w/c (%)	65	70	100	150	200	300
주입높이	32.4	32.9	35.3	43.2	54.5	82.1

### 3. 시멘트 밀크 역학적 시험결과 분석

#### 3.1 일축압축강도

w/c를 65~300%까지 변화시키며 제작한 시험 공시체에 대해 재령 7일과 재령 28일에 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축시험은 ASTM D2938 기준에 따라 시행하였으며 그 결과는 그림 4~그림 6과 같다.

시험공시체의 w/c가 65%, 100%, 300%인 재령 7일의 일축압축강도는 각각 171.52~280.86kgf/cm<sup>2</sup>, 100.49~158.23kgf/cm<sup>2</sup>, 34.04~52.32kgf/cm<sup>2</sup>이었다. 그리고 재령 28일의 일축압축강도는 각각 212.15~341.12kgf/cm<sup>2</sup>, 176.75~230.42kgf/cm<sup>2</sup>, 46.85~95.55kgf/cm<sup>2</sup>이었다. w/c의 변화와 재령에 대한 일축압축강도의 평균값은 표 7과 같다. 시멘트밀크 고결체의 일축압축강도는 w/c가 감소할수록 비례적으로 증가하고, 재령일이 늘어날수록 증가하였다.

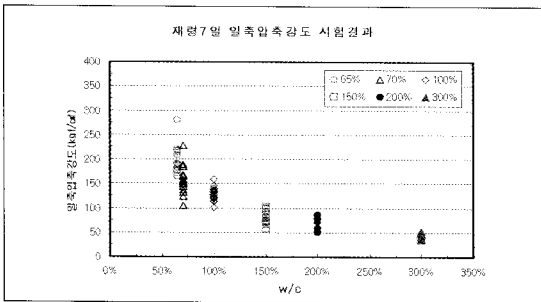


그림 4. 일축압축강도 시험결과(재령 7일)

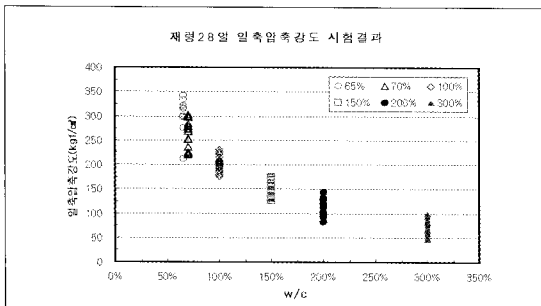


그림 5. 일축압축강도 시험결과(재령 28일)

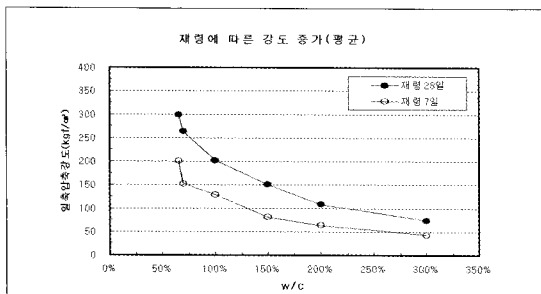


그림 6. 재령에 따른 일축압축강도 증가(평균)

#### 3.2 탄성계수 및 포아송비

일축압축시험시 변형률계(strain gage)를 이용한 탄성계수 및 포아송비 시험을 병행하여 시행하였으며, 그 결과는 그림 7~그림 14와 같다.

상기 그림에 의하면, w/c가 65%, 100%, 300%인 시험공시체의 재령 7일 탄성계수는 각각 1.11~3.75×10<sup>9</sup>kgf/cm<sup>2</sup>, 4.75~9.11×10<sup>9</sup>kgf/cm<sup>2</sup>, 1.65~3.04×10<sup>9</sup>kgf/cm<sup>2</sup>이었다. 그리고 재령 28일의 탄성계수는 각각 1.82~4.46×10<sup>9</sup>kgf/cm<sup>2</sup>, 1.49~2.52×10<sup>9</sup>kgf/cm<sup>2</sup>, 1.98~3.90×10<sup>9</sup>kgf/cm<sup>2</sup>이었다.

표 7. w/c의 변화와 재령일에 대한 일축압축강도의 평균값

w/c(%)	65	70	100	150	200	300
재령7일 강도(kg/cm <sup>2</sup> )	200.6	152.1	127.6	81.0	63.4	43.6
재령28일 강도(kg/cm <sup>2</sup> )	298.8	263.6	201.3	151.3	107.0	73.3
증가량(%)	49	73.3	57.8	86.8	68.8	68.1

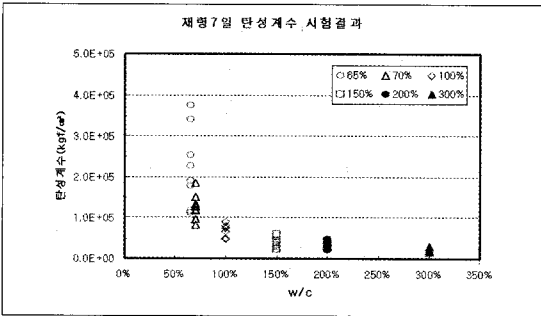


그림 7. 탄성계수 시험결과(재령 7일)

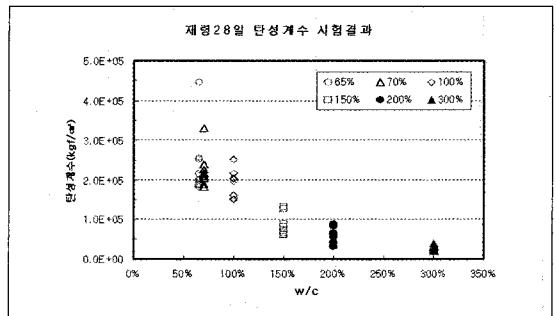


그림 8. 탄성계수 시험결과(재령 28일)

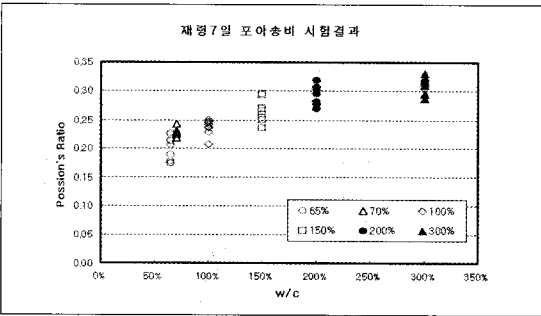


그림 9. 포와송비 시험결과(재령 7일)

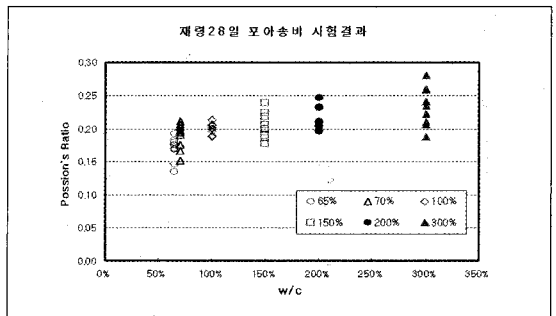


그림 10. 포와송비 시험결과(재령 28일)

그리고 재령일과 w/c비에 따른 포와송비는 그림 9~그림 10과 같다.

이 그림에 의하면, w/c가 65%, 100%, 300%인 시험공시체의 재령 7일 포와송비는 각각 0.17~0.23, 0.21~0.25, 0.29~0.33이었다. 재령 28일의 포와송비는 각각 0.14~0.19, 0.19~0.21, 0.19~0.28이었다.

그리고, w/c와 재령에 따른 탄성계수와 포와송비의 평균값은 그림 11~그림 12와 표 8과 같다.

상기 그림에 의하면, 시멘크밀크 고결체의 탄성계수는 일축압축강도와 마찬가지로 w/c가 감소할수록 비례적으로 증가하고, 재령일이 길어질수록 증가하였다. 반대로 포와송비는 w/c가 감소할수록 감소하고 재령일이 증가할수

표 8. w/c의 변화와 재령일에 대한 탄성계수 및 포와송비의 평균값

w/c(%)		65	70	100	150	200	300
탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	재령7일	2.19×10 <sup>5</sup>	1.27×10 <sup>5</sup>	7.14×10 <sup>4</sup>	3.73×10 <sup>4</sup>	3.37×10 <sup>4</sup>	2.37×10 <sup>4</sup>
	재령28일	2.36×10 <sup>5</sup>	2.23×10 <sup>5</sup>	1.92×10 <sup>5</sup>	8.41×10 <sup>4</sup>	5.72×10 <sup>4</sup>	2.89×10 <sup>4</sup>
포와송비	재령7일	0.20	0.23	0.24	0.26	0.29	0.31
	재령28일	0.17	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23

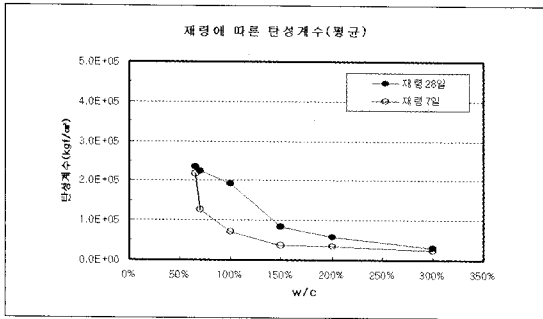


그림 11. 재령에 따른 탄성계수(평균)

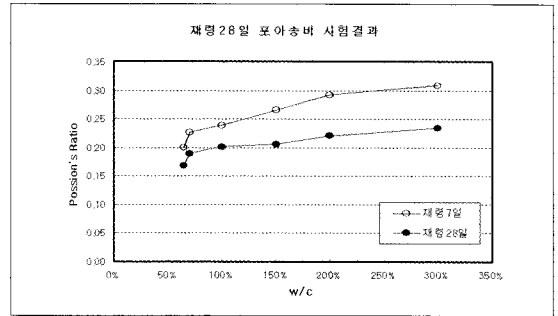


그림 12. 재령에 따른 포아송비(평균)

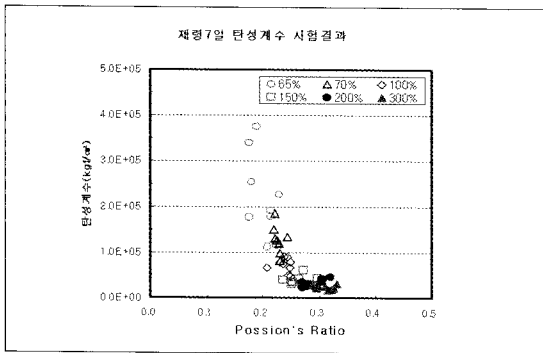


그림 13. 탄성계수 대 포아송비(재령 7일)

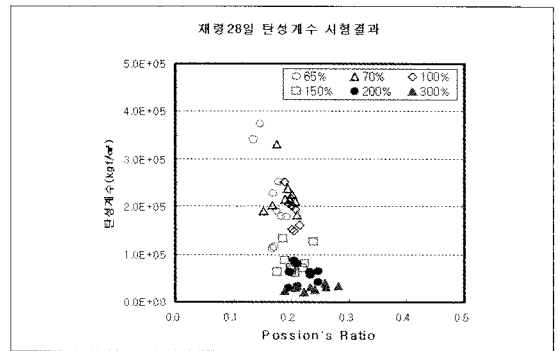


그림 14. 탄성계수 대 포아송비(재령 28일)

속 감소하였다.

탄성계수와 포아송비에 대한 관계는 그림 13과 14와 같다. 재령일이 길어질수록 탄성계수는 증가하고 포아송비는 감소하였다. 또한 w/c가 감소할수록 탄성계수는 증가하였고, 포아송비는 감소하는 반비례관계를 확인할 수 있었다.

### 3.3 점하중강도

w/c를 65~300%까지 변화시키며 제작한 시험 공시체에 대해 재령 7일과 재령 28일에 점하중시험을 실시하였다. 점하중시험은 ASTM D 5731 기준에 따라 시행하였으며 그 결과는 그림 15~그림 17과 같다.

상기 그림에 의하면, w/c가 65%, 100%, 300%인 시험공시체의 재령 7일  $I_{s(50)}$ (점하중지수 또는 점하중강도)은 각각 14.7~18.5kgf/cm<sup>2</sup>, 12.1~14.2kgf/cm<sup>2</sup>, 7.9~10.9kgf/cm<sup>2</sup>이었다. 재령 28일의  $I_{s(50)}$ 은 14.9~17.2kgf/cm<sup>2</sup>, 13.1~14.3kgf/cm<sup>2</sup>, 11.4~12.2kgf/cm<sup>2</sup>이었다.

점하중강도( $I_{s(50)}$ )로부터 일축압축강도( $\sigma_c$ )를 산정하기

위해서는 일축압축강도시험을 실시한 후 식(1)에서 상관계수 값을 결정하여 사용하여야 하나 점하중강도시험에 비해 일축압축강도시험의 난이성으로 인해, 일반적으로 ISRM에서 제안해 놓은 K=24 정도의 상관계수를 사용하기도 한다. 국내에서 실시된 일축압축강도와 점하중지수와의 상관관계에 대해 각 암종별로 분석한 결과 K=13~23의 넓은 분포를 갖는 것으로 알려져 있으나, 시멘트밀크고결체에 대한 상관계수에 고찰이 없었다. 따라서 일축압축강도시험 결과와 점하중강도 결과를 비교하여 표 9와 같이 시멘트 밀크 고결체의 상관계수(K)를 산출하였다.

$$\sigma_c = I_{s(50)} \cdot K \quad \text{식 (1)}$$

## 4. 분석결과

SIP공법 시공시, 사용하는 선단근교액과 주면고정액의 물-시멘트비와 재령에 따른 일축압축강도, 점하중강도,

표 9. 시멘트밀크 고결체의 상관계수(K)

w/c(%)		65	70	100	150	200	300
재령7일	일축압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	200.6	152.1	127.6	81.0	63.4	43.6
	점하중강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	16.16	15.35	13.41	12.31	10.08	9.44
	상관계수(K)	12.42	9.91	9.51	6.58	6.29	4.61
재령28일	일축압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	298.8	263.6	201.3	151.3	107.0	73.3
	점하중강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	16.01	15.0	13.8	12.64	12.2	11.8
	상관계수(K)	18.67	17.57	14.59	11.97	8.76	6.21

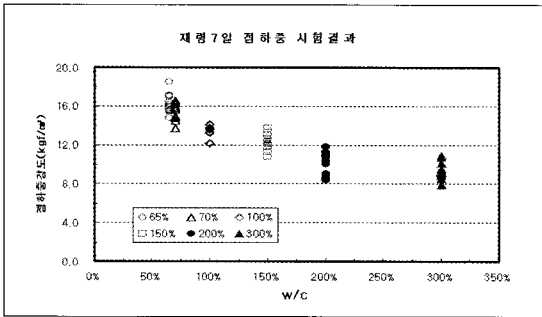


그림 15. 점하중 강도 시험결과(재령 7일)

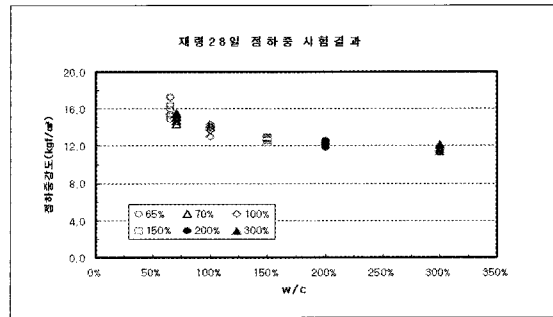


그림 16. 점하중 강도 시험결과(재령 28일)

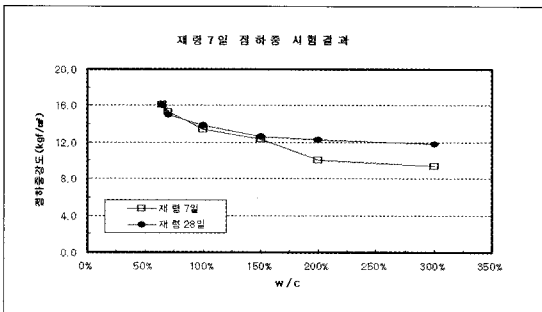


그림 17. 재령에 따른 점하중 강도(평균)

탄성계수, 포아송비 등의 역학시험결과는 다음과 같다.

1. 시험에 필요한 원주형(5×10cm) 공시체를 만들기 위해 제작여건상 필요한 고결체의 높이는 약 30cm 이었다. 본 시험에서는 30cm가량의 고결체를 만들기 위한 주입높이 결정시험을 통해 w/c=65%(32.4cm), 70%(32.9cm), 100%(35.3cm), 150%(43.2cm), 200%(54.5cm), 300%(82.1cm)의 주입높이를 결정하였다.
2. 역학시험결과, 시멘트밀크 고결체의 일축압축강도, 점하중강도, 탄성계수는 물-시멘트비가 감소할수록

증가하고 재령일이 길어질수록 증가하는 경향을 보였고, 포아송비는 물-시멘트 비가 감소할수록, 재령일이 길어질수록 감소하는 경향을 나타냈다.

3. SIP공법의 선단근교액으로 이용되는 시멘트밀크는 70%를 기준으로 하고 있으며, 이때 표준일축압축강도는 200kgf/cm<sup>2</sup>이상을 요구하고 있다. 본 시험에서 w/c=70%일 때 평균 표준일축압축강도는 263.6kgf/cm<sup>2</sup>이었으며, w/c가 65%에서 100%로 변함에 따라 298.8~201.3kgf/cm<sup>2</sup>의 강도를 나타내고 있다.
4. SIP공법의 주면고정액 기준은 5kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 일축압축강도를 요구하고 있다. w/c=300%까지 일축압축강도를 시험한 결과, 표준일축강도는 73.3kgf/cm<sup>2</sup>으로 주면고정액의 요구 강도보다 매우 높게 나타났다. 하지만 w/c=300%일 경우 주입높이에 비해 침강되는 비율이 63.5%가량 되므로 현장적용시 반복적인 재주입이 이루어져야 한다.
5. 현장에서 일축압축시험을 대신할 수 있도록 점하중강도시험과 일축압축시험 결과를 비교하여 시멘트밀크의 w/c에 따른 상관계수를 산정하였다. 그 결과 재령 28일을 기준으로 상관계수는 18.67(w/c=65%),

17.57(w/c=70%), 14.59(w/c=100%), 11.97(w/c=150%), 8.76(w/c=200%), 6.21(w/c=300%)이었으며 이는 시험 공시체에 슬라임이 섞이지 않은 상태의 계수이다.

Strength of Intact Rock Core Specimens, D 2938-95, Vol.04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania.

2. ASTM(1995), Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock, D 5731-95, Vol.04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania.

3. 콘크리트파일建設技術協會(2002), "埋み工法に用いる根固め液及びぐい周固定液の壓縮強度試験方法", pp. 1~8.

### 참고 문헌

1. ASTM(1995), Test Method for Unconfined Compressive

## 2009 기초기술위원회 Workshop 개최 안내

### - 동재하시험의 현황과 숙제 -

한국지반공학회 기초기술위원회(위원장: 조천환 박사)에서는 최근 국내외적으로 거론되고 있는 동재하시험에서 발생하는 문제의 현황과 이를 해결하기 위한 대안을 마련코자 다음과 같이 워크샵을 개최합니다. 회원여러분과 관심있는 기술자들의 많은 참여를 부탁드립니다.

- 날짜 : 2009년 2월 13일(14:00~ 17:30)
- 장소 : 고려대학교 자연계 캠퍼스 하나스퀘어
- 주관 : 한국지반공학회 기초기술위원회
- 회비 : 정회원 - 20,000원, 학생회원 - 10,000원, 비회원 - 30,000원

**개회사 및 축사 : 14:00 ~ 14:10**

**Technical Session : 14:10 ~ 16:40**

(사회: 조천환박사, 권오균교수)

이종섭 교수 (고려대)	동재하시험 해석자에 따른 결과 비교
김성희 사장 (파일테스트)	동재하시험의 부적절한 적용 및 해석 사례
박민철 부장 (백경)	연약지반에 적용된 PDA의 부적절 사례 연구
송명준 차장 (현대건설)	동재하시험을 이용한 항타관리 사례 연구
이원재 사장 (로드테스트 코리아)	동재하시험을 이용한 SIP말뚝의 지지력 산정

**Discussion Session: 16:30 ~ 17:30**

조천환 박사 (삼성물산 건설부문)	동재하시험의 문제점
전경수 박사 (도로공사)	동재하시험관련 의견
김정수 박사 (주택공사)	동재하시험 관련 의견
이우진 교수 (고려대)	동재하시험 소위원회의 계획

- 문의 : 간사 고려대 이종섭교수, 지이엔씨 정훈준 사장