

수침이 고결모래의 강도에 미치는 영향

Strength variation of cemented sand due to wetting

박성식¹⁾, Park, Sung-Sik, 김기영²⁾, Kim, Ki-Young, 김창우³⁾, Kim, Chang-Woo, 최현석³⁾, Choi, Hyun-Seok

¹⁾ 원광대학교 공과대학 토목환경도시공학부 조교수

²⁾ 한국수자원공사 K-water 연구원 수자원연구소 선임연구원

³⁾ 원광대학교 공과대학 토목환경도시공학부 석사과정

SYNOPSIS : In this study, by the consideration of in situ curing conditions, cemented sand with cement ratio less than 20% is prepared by air dry condition and then wetted. A series of unconfined compression tests are carried out to evaluate the effect of wetting on the strength of cemented soils. Strength of air dry cured specimen drops to maximum 30% after wetting at the end of curing period when cement ratio is low. However, regardless of cement ratio, strength of repetitively wetted specimens during curing increases as the number of wetting increases. The results of this study can predict the strength variation of cemented sand depending on wetting conditions in the field, which can guarantee the safety of geotechnical structures such as dam.

Keywords : Cemented sand, Strength, Wetting

1. 서론

최근 도로, 댐, 항만 건설 등과 같은 대형 토목 공사에 필요한 대량의 골재 채취나 양호한 암질의 축조재를 확보하기 위한 무분별한 석산 개발로 인하여 환경파괴와 자연훼손이 크게 우려되고 있다. 따라서 최근에는 석산을 개발하거나 토취장을 마련하지 않고 현장에 있는 강 자갈이나 모래, 주변 전답에 있는 흙을 축조재료로 활용하는 콘크리트 표면차수벽형 석피댐(Concrete Faced Rockfill Dam)의 건설 사례가 늘고 있다. 대표적인 사례로 화북댐, 부항댐이 있다. 화북댐은 양호한 암층이 아닌 충적층(alluvium) 위에 건설되는 댐으로 현장에서 엄선한 골재에 소량의 시멘트를 혼합하여 제체재료로 사용하고 있다. 부항댐 시공의 경우 댐 축조를 위하여 상류 쪽 페이스 슬래브를 지지하는 층인 curb element 시공에 2mm이하의 강모래에 약 10% 내외의 시멘트로 빈배합하여 만든 시멘트 혼합토를 사용하고 있다. 이와 같이 흙이나 모래에 시멘트를 섞은 혼합토는 흙 입자간의 고결작용으로 건조 시 흙의 체적변화를 감소시키거나 강도를 증가시켜 기초지반 및 연약지반의 보강, 옹벽 뒤채움재, 도로 및 철도의 성토노반, 기층재료 등으로 사용될 수 있다.

최근 국내에서 시멘트를 혼합한 모래의 강도 및 변형에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(김기영 등, 2005; 박성식 등, 2009; 정우섭, 2006). 박성식 등(2009)은 현장에서 시공되는 시멘트 혼합토의 양생 기간 중에 강우나 지하수 유입으로 인한 수분 증가가 강도에 어떤 영향을 미치는지 연구하였다. 특히 시멘트비가 낮은 경우(예: 4%) 대기 중에서 양생되던 시멘트 혼합토가 침수될 경우 30%정도의 강도 저하가 발생할 수 있다는 결과를 발표하였다. 국내에서 최근 폭우로 시멘트 혼합토로 시공 중인 00댐이 월류되면서 댐 제체가 완전히 포화된 경우도 있다. 이와 같이 맑은 날씨 가운데 양생 중이던 댐 제체가 갑작스런 호우로 포화될 경우 강도가 어떻게 변하는 지 예측할 필요가 있다. 또한 하루 이틀 비가 온 뒤 다

시 맑은 날씨를 보이다가 다시 비가 오는 경우도 있으며, 이와 같은 경우에 수침과 공기 중 양생을 반복하게 되며 이로 인한 시멘트 혼합토의 강도가 어떻게 변하는지 분석할 필요가 있다. 만약 시멘트 혼합토로 된 댐이 시공 중에 수침으로 인하여 강도가 저하되거나 균열 또는 파손이 생긴다면 댐과 같은 토목구조물의 안전이 위협받을 수 있다. 따라서 현장에서 발생할 수 있는 다양한 양생조건을 고려하여 그에 따른 강도변화를 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 시멘트 혼합토가 대기 중에서 28일 동안 양생되는 가운데 수침 횟수를 달리하여 수침횟수 증가에 따른 공시체의 함수비 및 강도 변화를 평가하고자 하였다.

2. 수침이 강도에 미치는 영향

시멘트와 물 사이에 일어나는 화학적, 물리적 반응에 의해 응결과 경화가 일어나며, 이렇게 만들어진 콘크리트의 강도는 주로 양생온도, 양생기간, 양생방법 등에 따라 영향을 받는다. 양생온도가 너무 높으면 초기강도는 증가하지만 그 이후의 수화반응을 지연시키므로 장기강도 발휘가 불리하게 된다(Price, 1951). 콘크리트의 양생방법에는 일반적으로 대기 중, 밀봉, 습윤, 수중 양생과 같은 4가지 방법이 있으며 양생방법에 따라 강도는 상당한 차이를 나타낸다(Price, 1951). 일반적으로 콘크리트의 강도는 양생기간에 따라 증가하며 28일 동안 수중 양생시킨 공시체의 강도 값을 사용하고 있다. 하지만 현장에서 시공되고 있는 구조물의 양생조건이 수중양생과 다른 경우도 많이 있을 뿐 아니라 양생과정 중에 양생조건이 바뀔 수도 있으므로 현장 양생조건과 동일한 방법으로 공시체를 양생한 다음 강도를 평가할 필요가 있다. 양생과정 중에 일어나는 수침은 모래와 시멘트를 혼합하여 제작한 공시체의 강도를 감소시킬 수도 있다(박성식 등, 2009). 즉 물을 지속적으로 공급하는 수침은 시멘트 혼합토의 강도측면에서 경우에 따라 강도 증가라는 유리한 측면과 때론 강도 감소라는 불리한 측면을 동시에 가지고 있다. 양생기간 중에 양생에 필요한 수분이 충분히 지속적으로 공급될 경우 강도는 장기적으로 증가하겠으나, 대기 중에서 양생되고 있거나 건조 상태에 있는 공시체에 수분이 공급된 직 후의 강도는 감소하게 된다(박성식 등, 2009). 따라서 수침이 시멘트 혼합토의 강도에 미치는 영향은 양생과정이나 수분상태에 따라 달라지게 된다.

시멘트 수화 반응에 필요한 이론수량은 시멘트 페이스트량의 약 40% 정도이며 이 가운데 25%는 시멘트 중의 각성분과 화학적으로 결합하는데 사용되고 15% 정도는 수화물에 고착되는 수량이다(유희경, 2001). 물시멘트비를 40% 이상으로 하더라도 수화반응 시에 시료 내에 공극이 생기면서 공극 주위에 있는 시멘트에 추가적으로 수분을 공급해야만 완전한 수화가 일어난다(유희경, 2001). 하지만 수화작용에 필요한 수분보다 더 많은 수분이 공급된다면 어떻게 될까. 정영수 등(2008)은 건조한 콘크리트와 물로 포화된 콘크리트를 비교하면서 다음과 같은 이유로 오히려 강도가 감소할 수도 있다고 하였다. (i) 흡착된 수분이 제거되면 C-S-H 입자가 서로 더 가까워져서 반데르발스 결합력이 증가함으로 인해서 더 강한 시스템을 구성한다. (ii) 응력이 가해지면 수분이 Si-O-Si 결합을 약하게 한다. (iii) 수분이 윤활제 역할을 해서 기계적인 맞물림을 약하게 한다. 그러나 콘크리트의 경우 대기 중 양생한 공시체보다 어떻게 보면 과도하게 수분이 공급되는 수중 양생한 공시체의 강도가 더 높은 것이 일반적이다(Price, 1951). 본 연구에서는 28일이란 양생기간 동안 급작스런 강우가 내릴 경우와 반복해서 강우가 올 경우를 고려하여 수침이 시멘트가 비교적 적게 포함된 시멘트 혼합토의 강도에 어떤 영향을 미치는지 연구하였다.

3. 시멘트 혼합토의 일축압축시험

3.1 일축압축시험 및 시험재료

콘크리트와 같이 서로 다른 재료를 혼합한 복합재료의 품질을 평가하는 가장 일반적인 방법은 복합재료의 일축압축강도를 평가하는 것이다. 일축압축시험은 간단하고 빠를 뿐만 아니라 저렴하고 신뢰할만한 실험방법으로 시멘트 혼합토에 대한 많은 결과가 축적되어 있다(Consoli 등, 2007). 본 연구에서는 새

만금모래에 고결제로 초속경시멘트를 사용하여 일축압축시험용 공시체를 제작하였다. 새만금모래는 전라북도 새만금 지역에서 준설했던 실리카질 모래이다. 새만금모래의 최대건조밀도와 최적함수비는 1.61g/cm³과 14%이다. 고결제는 3시간에 7일 강도 발현이 가능하고 도로 교량 긴급보수에 사용되는 비중이 3.14인 국내 S사의 초속경시멘트를 사용하였으며, 몰탈의 압축강도는 3시간 후 25MPa, 1일 후 30MPa, 3일 후 35MPa, 7일 후 40MPa이다.

3.2 공시체 제작 및 양생

시멘트비는 건조된 모래의 무게에 대한 시멘트의 무게로 다음과 계산하였다.

$$\rho_c = \frac{W_c}{W_s} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 W_c 는 시멘트의 무게, W_s 는 건조된 모래의 무게이다. 본 실험에 사용한 시멘트비는 표 1과 같이 4, 8, 12, 16%이다. 모래에 소량의 시멘트를 혼합할 경우 최대건조밀도는 증가하더라도 최적 함수비는 크게 변하지 않는다는 정우섭(2006)의 연구결과를 참고하여 새만금모래로 제작한 시멘트 혼합토의 최적 함수비는 모두 14%로 가정하였다. 시멘트 혼합토는 건조된 모래 1000g에 정해진 양의 시멘트를 잘 혼합한 다음 최적함수비로 다시 잘 비빈다. 잘 비빈 시멘트 혼합토를 약 200g씩 5등분한 다음 각 등분을 다짐몰드에 넣고 다졌다. 다짐에 사용한 램머(rammer)의 직경은 65mm이고 무게는 2.6kg이며, 다짐방법은 과다짐으로 입자파쇄가 발생하지 않도록 수정 D다짐방법에 의한 다짐에너지의 약 95% 정도가 되도록 공시체를 5층으로 나누고 층당 50회, 낙하높이는 20cm로 일정하게 유지하였다. 동일한 방법으로 반복해서 제작되는 공시체의 크기는 직경 7cm, 높이 14cm이며, 건조밀도는 표 1에 나타난 것처럼 시멘트비가 동일한 경우 거의 동일하며 시멘트비가 증가할수록 비중이 큰 시멘트양이 증가하여 건조밀도가 약간 증가하는 경향을 보였다. 동일한 시멘트비를 가진 공시체에서 계산되는 건조밀도의 오차는 1-2% 정도로 이는 무시할 수 있는 수준으로 동일한 공시체의 반복적인 제작이 가능하다.

일축압축시험의 양생기간은 28일로 수침횟수에 따라 그림 1에 표시된 날짜에 1일 동안 수침시켰다. 일축압축시험 전의 최종 함수비는 수침횟수에 따라 증가하였다. 한편 수침횟수가 비교적 적은 1회와 2회일 경우 최종 함수비는 시멘트비가 증가할수록 함수비도 증가하지만 수침횟수가 3회일 경우는 특별한 경향을 보이지 않다가 4, 5회로 더 늘어날 경우 최종 함수비는 시멘트비가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

No wetting(done)																												
Curing day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Wetting the last day(done)																												
Day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Wetting times: one																												
Curing day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Wetting times: two																												
Curing day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Date																												
Wetting																												
Wetting times: three																												
Curing day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Date																												
Wetting																												
Wetting times: four																												
Curing day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Date																												
Wetting																												
Wetting times: five																												
Curing day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Date																												
Wetting																												

그림 1. 28일 양생기간 동안 수침 일정

표 1. WT(wetting, 수침) 시리즈 실험 조건 및 결과

Test	Cement ratio (%)	AC+(UC) curing condition	r_a (g/cm ³)	w (%)	Peak strength (kPa)	Axial strain at peak strength (%)
WT-1(F-2)	4	27+(1)	1.57	17.7	252	0.90
WT-2(F-3)		13+(1)+14	1.57	0.7	406	0.94
WT-3(G-1)		9+(1)+8+(1)+9	1.58	3.5	325	1.63
WT-4(G-2)		6+(1)+6+(1)+6+(1)+7	1.58	6.1	459	1.20
WT-5(G-3)		5+(1)+5+(1)+5+(1)+4+(1)+5	1.57	9.3	496	1.23
WT-6(G-4)		4+(1)+4+(1)+4+(1)+4+(1)+3+(1)+4	1.57	10.1	524	0.75
WT-7(F-5)	8	27+(1)	1.63	15.7	1099	0.93
WT-8(F-6)		13+(1)+14	1.62	1.5	1666	1.17
WT-9(G-5)		9+(1)+8+(1)+9	1.64	3.1	2252	1.38
WT-10(G-6)		6+(1)+6+(1)+6+(1)+7	1.65	4.6	2519	1.25
WT-11(G-7)		5+(1)+5+(1)+5+(1)+4+(1)+5	1.65	7.3	2530	1.55
WT-12(G-8)		4+(1)+4+(1)+4+(1)+4+(1)+3+(1)+4	1.64	8.1	2672	1.61
WT-13(F-8)	12	27+(1)	1.69	12.9	2866	1.17
WT-14(F-9)		13+(1)+14	1.69	2.5	4591	1.48
WT-15(G-9)		9+(1)+8+(1)+9	1.70	3.9	4960	1.36
WT-16(G-10)		6+(1)+6+(1)+6+(1)+7	1.71	4.9	5407	1.42
WT-17(G-11)		5+(1)+5+(1)+5+(1)+4+(1)+5	1.71	6.5	5204	1.36
WT-18(G-12)		4+(1)+4+(1)+4+(1)+4+(1)+3+(1)+4	1.70	7.7	4789	1.33
WT-19(F-11)	16	27+(1)	1.75	11.7	4633	1.31
WT-20(F-12)		13+(1)+14	1.75	2.3	7735	1.74
WT-21(G-13)		9+(1)+8+(1)+9	1.75	4.7	9025	2.15
WT-22(G-14)		6+(1)+6+(1)+6+(1)+7	1.75	5.3	9344	2.22
WT-23(G-15)		5+(1)+5+(1)+5+(1)+4+(1)+5	1.75	6.2	8947	1.94
WT-24(G-16)		4+(1)+4+(1)+4+(1)+4+(1)+3+(1)+4	1.76	6.8	9061	2.14

*Note: AC: air dry curing, UC: underwater curing

총 양생기간은 28일로 동일

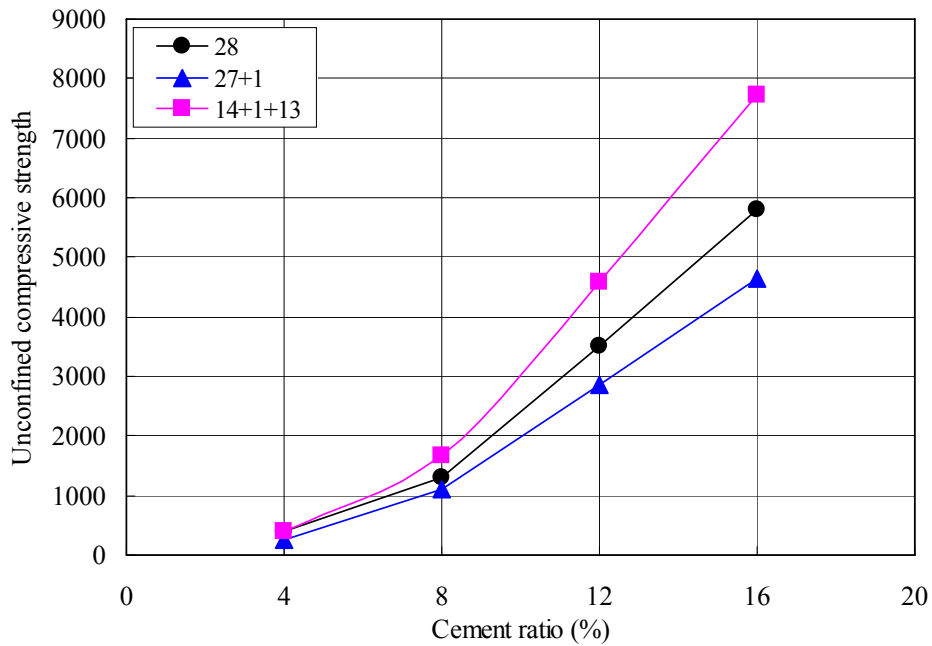
4. 시험 결과 및 분석

4.1 1회 수침에 따른 영향

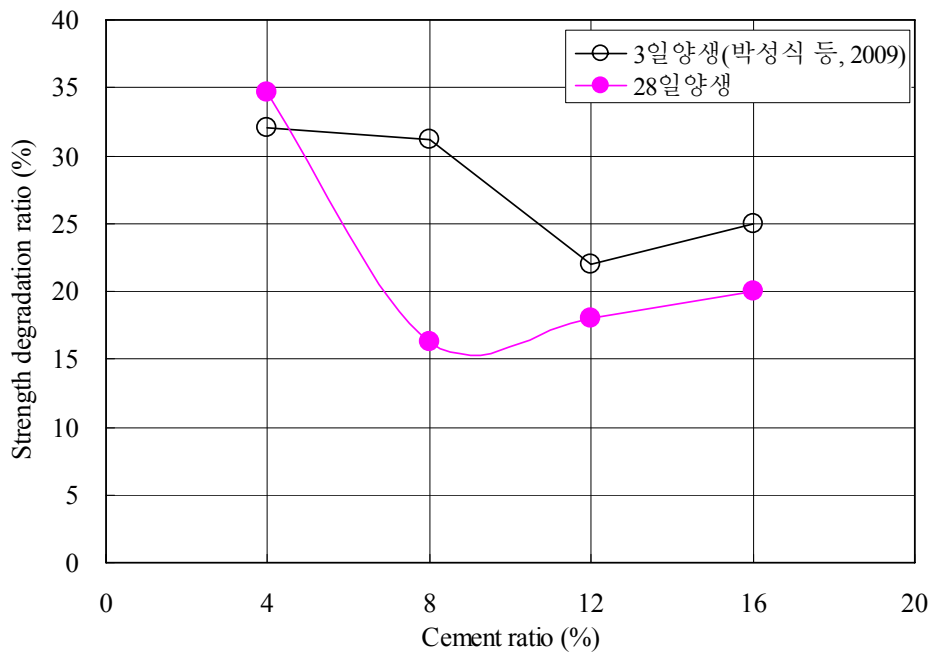
박성식 등(2009)은 3일 동안 대기 중 양생시킨 공시체와 2일 양생 후 마지막 1일 수침시킨 공시체의 강도를 비교하였으며 시멘트비가 4% 정도로 낮은 경우 수침으로 인한 강도 저하가 최대 30% 정도에 이를 수 있다고 발표하였다. 본 연구에서는 콘크리트의 강도에 사용되는 28일 강도와 동일하게 고결모래를 28일 동안 양생시켰다. 그리고 다른 공시체는 27일 동안 대기 중에서 양생시킨 다음 마지막 1일을 수침시켜 일축압축시험을 실시하였다. 두 공시체에 대한 실험 결과는 그림 2(a)에 각각의 시멘트비에 대하여 비교하였다. 두 공시체의 강도 차이는 수침으로 인한 강도 감소를 나타내며, 아래 식 (2)와 같이 SDR(Strength Degradation Ratio)로 표시하였다. 그림 2(b)에 SDR을 비교하였으며 이것은 마지막 1일 동안 수침시켰을 때 함수비가 증가되고 이로 인하여 강도가 감소하는 정도를 나타낸다.

$$SDR = \frac{q_u(28일양생) - q_u(27일양생+1일수침)}{q_u(28일양생)} \times 100(\%) \quad (2)$$

그림 2(b)는 박성식 등(2009)이 양생기간 3일을 기준으로 실험한 결과도 같이 비교하였다. 양생기간이 3일이거나 28일이거나 관계없이 시멘트비가 가장 낮은 4%에서 가장 큰 강도감소가 발생하였다. 그리고 수침으로 인한 강도 감소가 4%에서 8%로 시멘트비가 증가할 때 강도 감소가 줄어들지만, 시멘트비가 12, 16%로 증가하면서 오히려 수침으로 인한 강도 감소가 더 증가하거나 일정하게 되는 것으로 보인다. 하지만 시멘트비가 증가함에 따라 수침으로 인한 강도 감소는 일정하게 되는 것으로 보는 것이 더 합리적인 것으로 판단된다. 이러한 경향은 양생기간에 관계없이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 본 연구 결과는 양생 중인 시멘트 혼합토에 급작스런 호우가 왔을 경우 예상되는 강도변화 예측에 활용될 수 있다.



(a) 양생 중간 시점 및 마지막 날 수침으로 인한 강도저하



(b) 양생 마지막 날 수침으로 인한 강도저하율

그림 2. 수침으로 인한 강도변화

4.2 반복되는 수침에 따른 영향

4.1절에서는 1회 수침으로 인한 강도저하 즉 양생이 완료되기 하루 전에 수침을 시켰을 때의 강도변화가 어떻게 되는지를 분석하였다. 하지만 양생 기간의 마지막 날이 아닌 총 양생기간 28일의 중간이 되는 시점 즉 그림 1에 표시한 것처럼 13일 동안 대기 중 양생한 다음 14일째 하루 동안만 수침시켰다. 그리고 15일째부터는 다시 대기 중 양생을 시켰다. 이것을 표 1의 양생조건에는 13+(1)+14로 표시하였으며 괄호 안의 숫자는 수침을 표시한다. 이런 방식으로 1회에서 최대 5회까지 반복적으로 수침을 시켰을 때 강도변화는 어떻게 되는지를 분석하였다. 먼저 1회 수침인 경우 동일하게 1회 수침을 시켰지만 양생기간의 중간이나 마지막이나에 따라 강도가 달라지게 된다. 그림 2(a)는 수침 시점이 다르지만 1회 수침시킨 두 종류의 공시체와 대기 중에서 28일 동안 양생시킨 공시체와의 강도를 비교하고 있다. 양생기간 중간에 1회 수침시킨 경우 수침시키지 않은 공시체보다 강도가 30% 이상 증가하였으며 이러한 현상은 시멘트비가 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 그 이유는 시멘트비가 더 증가할수록 필요로 하는 물의 양이 증가하게 되는데 이를 수침과정을 통하여 공급되기 때문으로 판단된다. 수침시키는 않은 공시체와 중간에 1회 수침시킨 공시체의 함수비는 시멘트비가 4%로 낮은 경우에는 서로 차이가 없었으나 시멘트비가 증가함에 따라 중간에 1회 수침시킨 공시체가 0.3%에서 0.6%정도 큰 것을 알 수 있다.

4.2.1 강도 특성

반복되는 수침으로 인한 강도변화는 그림 3에 비교하였다. 수침 0회는 28일 동안 한 번도 수침시키지 않은 것으로 그림 2(a)에 있는 결과와 동일한 데이터이다. 시멘트비가 4, 8%로 비교적 낮은 경우 반복횟수가 1회에서 5회로 증가함에 따라 점차적으로 강도도 증가하는 경향을 보였다. 하지만 시멘트비가 12, 16%로 상대적으로 높은 경우 3회 수침에서 가장 높은 강도를 보이다가 4, 5회 수침에서 다소 감소하거나 일정하게 수렴하는 경향을 보이고 있다.

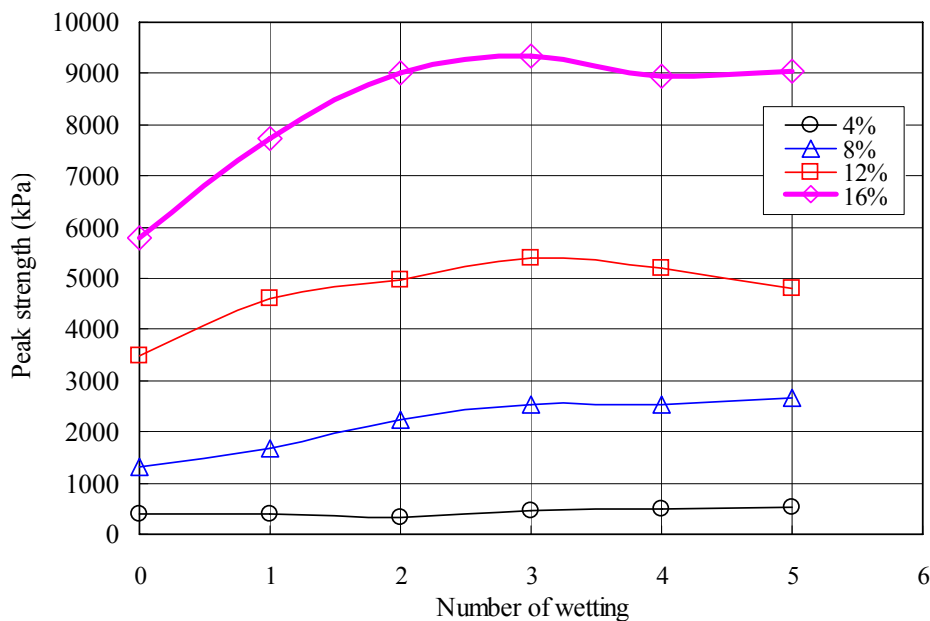


그림 3. 반복되는 수침으로 인한 강도 변화

4.2.2 함수비 및 무게 변화

그림 4는 수침횟수에 따른 함수비의 변화를 나타내고 있다. 시멘트비가 12, 16%인 경우 공시체의 수

밀성이 좋기 때문에 수침횟수 증가에 따라 함수비는 2%에서 8%까지 크게 증가하지는 않았다. 하지만 시멘트비가 4%로 가장 낮은 경우 투수성과 통기성이 좋기 때문에 1, 2회 반복 수침에서는 통풍이 잘 되어 쉽게 건조되기 때문에 함수비가 1% 정도로 낮았으나 수침횟수가 4, 5회로 증가함에 공시체 내로 들어가는 물의 양이 증가하여 함수비는 최대 10% 정도까지 증가하였다. 시멘트비가 높은 경우 앞서 언급한 함수비 변화와 같이 무게의 변화도 작게 나타났다. 5회 반복하여 수침시키면서 양생할 경우 공시체의 최종 무게는 시멘트비에 관계없이 최초 시료 제작 직후의 무게와 1% 정도 가볍지만 거의 동일하였다.

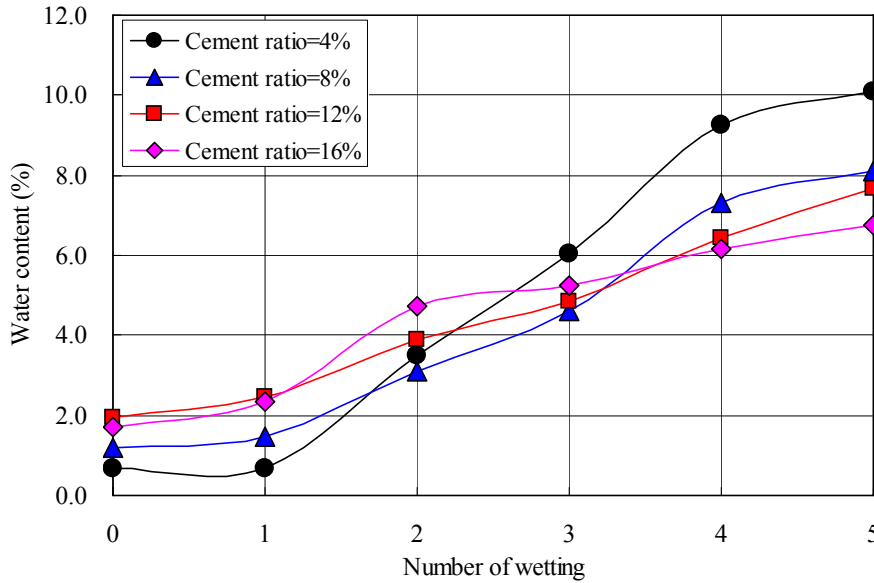


그림 4. 수침횟수에 다른 공시체의 함수비 변화

5. 결론

현장에서 양생 중인 시멘트 혼합토에서 가능한 수침조건은 집중 호우로 인하여 일시적으로 수침되거나, 아니면 비와 맑은 날씨의 반복으로 수침이 반복하여 일어나는 경우가 있다. 본 연구에서는 현장에서 활용 가능한 흩이나 강모래에 소량의 시멘트를 혼합한 시멘트 혼합토가 양생기간 동안에 일시적으로 수침되거나 반복해서 수침이 발생할 경우에 강도 특성을 연구하였다. 각각의 수침조건에 따른 시멘트비가 고결모래의 강도에 미치는 영향을 일축압축시험 강도를 통하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시멘트 혼합토가 수침될 경우 수침되는 시기에 따라 강도가 변한다. 수침 직후의 강도는 감소하지만 수침 직후에 공기 중에서 양생이 되면 다시 강도가 증가하게 된다. 28일 양생 기간동안 중간에 1회 수침할 경우 시멘트비에 관계없이 대기 중 양생한 공시체보다 더 큰 강도를 발휘하였다.
- (2) 시멘트비가 높을수록 공시체의 수밀성이 증가하기 때문에 반복되는 수침에 따른 함수비 변화가 적다.
- (3) 현장에서 시공되는 시멘트 혼합토에 급작스런 호우로 수침될 경우 예상되는 강도저하를 충분히 고려하여 설계에 반영하여야 한다. 그리고 시멘트비가 낮은 혼합토는 공기 중에서 장기간 방치되면 될수록 강도가 더 떨어지게 되므로 맑은 날씨가 지속될 경우에는 물을 반복해서 뿌려서 강도저하를 막아야 한다.

참고문헌

1. 김기영, 박한규, 전제성(2005) Cemented sand and gravel 재료의 강도특성. 한국지반공학회논문집, 제21권, 제10호, pp. 61-71.
2. 유희경(2001) 양생방법에 따른 현장콘크리트의 압축강도 비교연구. 석사학위논문, 건국대학교.
3. 박성식, 김기영, 최현석, 김창우(2009) 양생방법에 따른 시멘트 혼합토의 일축압축강도의 특성. 대한토목학회.(게재 예정)
4. 정우섭(2006) 낙동강 하상모래의 시멘트 혼합율에 따른 강도특성. 박사학위논문, 경북대학교.
5. 정영수, 김진근, 최석환, 하재담, 박홍근(2008) 콘크리트. 동화기술.
6. Consoli, N.C., Foppa, D., Festugato, L, and Heineck, K.S. (2007) **Key parameters for strength control of artificially cemented soils.** *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 2, pp. 197-205.
7. Price, W.H. (1951) **Factors influencing concrete strength,** *ACI Journal* ,Proceedings Vol.47, Feb, 417-432.