

양생방법이 고결모래의 압축강도에 미치는 영향

Influence of different curing methods on the compressive strength of cemented sand

박성식¹⁾, Sung-Sik Park, 김기영²⁾, Kim, Ki-Young, 최현석³⁾, Hyun-Seok Choi, 김창우⁴⁾, Chang-Woo Kim

¹⁾ 원광대학교 공과대학 토목환경·도시공학부 조교수, Assistant Professor, Division of Civil, Environmental & Urban Engrg., Wonkwang Univ.

²⁾ 한국수자원공사 K-water 연구원 수자원연구소 선임연구원, Member, Senior Researcher, KIWE, Korea Water Resources Corporation.

³⁾ 원광대학교 공과대학 토목환경·도시공학부 석사과정, Graduate Student, Division of Civil, Environmental & Urban Engrg., Wonkwang Univ.

⁴⁾ 원광대학교 공과대학 토목환경·도시공학부 석사과정, Graduate Student, Division of Civil, Environmental & Urban Engrg., Wonkwang Univ.

SYNOPSIS : Cemented soils or concrete are usually cured under moisture conditions and their strength increases with curing time. An insufficient supply of water to cemented soils can contribute to hydration process during curing, which results in the variation of bonding strength of cemented soils. In this study, by the consideration of in situ water supply conditions, cemented sand with cement ratio less than 20% was prepared by air dry, wrapped, and underwater conditions. A series of unconfined compression tests were carried out to evaluate the effect of curing conditions on the strength of cemented soils. The strength of air dry curing specimen was higher than those of wrapped cured specimen when cement ratio was less than 10%, whereas it was lower when cement ratio was greater than 10%. Regardless of cement ratio, air dry cured specimens were stronger than underwater cured specimens. A strength increase ratio with cement ratio was calculated based on the strength of 4% cemented specimen. The strength increase ratio of air dry cured specimen was lowest and that of wrapped and underwater cured ones increased by square. Strength of air dry cured specimen dropped to maximum 30% after wetting when cement ratio was low. However, regardless of cement ratio, strength of wrapped specimens dropped to an average 10% after wetting.

Keywords : cemented sand, curing method, unconfined compressive strength, wetting

1. 서론

시멘트와 물 사이에 일어나는 화학적, 물리적 반응에 의해 응결과 경화가 일어나며, 이렇게 만들어진 콘크리트의 강도는 주로 양생온도, 양생기간, 양생방법 등에 따라 영향을 받는다. 초기 양생온도가 너무 높으면 초기강도는 증가하지만 그 이후의 수화반응을 지연시키므로 장기강도 발휘가 불리하게 된다 (Price, 1951). 일반적으로 콘크리트의 강도는 양생기간에 따라 증가하며 28일 동안 수중 양생시킨 공시체의 강도 값을 사용하고 있다. 콘크리트의 양생방법으로, 첫째, 대기 중에 노출된 상태로 양생하는 대기중 양생이 있다. 둘째, 방수지나 양생막을 이용하여 수분 손실을 막아 주는 방법을 밀봉 양생이라 하며, 이 방법은 편리하고 일손이 많이 가지 않기 때문에 많은 경우에 전통적인 수중 양생이나 습윤 양생

대신에 자주 쓰인다(정영수 등, 2008). 셋째, 물 속에서 양생하는 수중 양생이 있다. 이와 같은 양생방법에 따른 콘크리트의 강도변화는 여러 연구자(노인철, 1997; 이영대, 1984; 유희경, 2001; Price, 1951; Safiuddin 등, 2007)에 의해 연구되었다. 콘크리트의 경우 대기중 양생한 공시체보다 수중 양생한 공시체의 강도가 더 높은 것이 일반적이다(Price, 1951).

최근 시멘트 혼합토는 현장 흙을 이용한 댐 공사(김기영 등, 2005)나 도로공사에 사용되고 있으며 이와 같이 현장 시공된 시멘트 혼합토는 콘크리트보다 수밀성이 훨씬 낮기 때문에 양생 중에 함수비 유지가 어려울 뿐만 아니라 수분이 훨씬 빨리 증발하는 경향이 있다. 따라서 혼합에 사용한 초기 함수비 유지나 수분조절이 어려운 현장에서는 타설된 깊이에 따라 그림 1과 같은 다양한 양생조건이 나타날 수 있다. 즉, 지표면 근처에서는 공기 중으로 수분이 증발하는 대기중 양생과 유사하며, 지표면 보다 다소 아래에서 양생될 경우 수분 손실이나 증발을 막기만 하는 밀봉 양생과 유사하며, 지하수위 아래에서 양생될 경우 수중 양생이 된다. 시멘트 수화반응에 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). 현장에서 활용 가능한 흙이나 강모래의 공학적 특성을 개선하기 위하여 시멘트를 소량으로 혼합할 경우 콘크리트와 마찬가지로 수화가 정상적으로 이루어져야 요구되는 강도와 내구성을 얻을 수 있다. 콘크리트보다 시멘트 함유량이 훨씬 적고 고결력이 약한 시멘트 혼합토에서 수분조건과 같은 양생 조건에 따른 강도변화에 관한 연구는 국내외적으로 아직 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 동일한 건조 밀도를 가진 공시체를 다른 조건으로 양생시키거나 수침시킨 다음 일축압축시험을 실시하여 강도특성을 평가하고자 하였다.

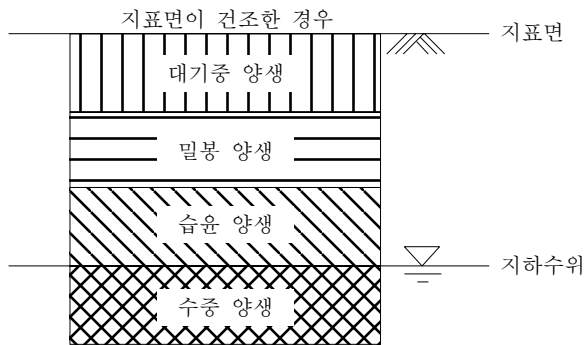


그림 1. 현장상황에 따른 양생조건

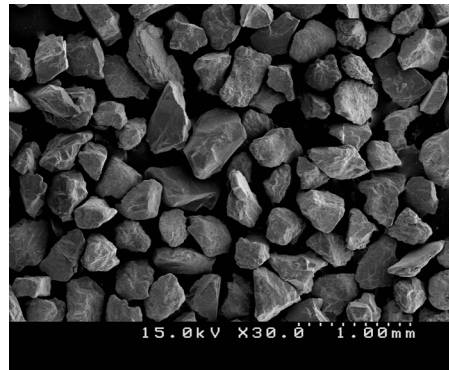


그림 2. 새만금모래의 사진

2. 시멘트 혼합토의 일축압축시험

2.1 일축압축시험 및 실험재료

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 새만금모래에 고결제로 초속경시멘트를 사용하여 일축압축시험용 공시체를 제작하였다. 새만금모래는 전라북도 새만금 지역에서 준설한 모래로 그림 2와 같이 약간 모난 모양을 하고 있다. 그림 3은 0.85mm 체를 통과한 새만금모래의 입도분포곡선이며 입도특성은 표 1과 같다. 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 25

MPa, 1일 후 30 MPa, 3일 후 35 MPa, 7일 후 40 MPa이다.

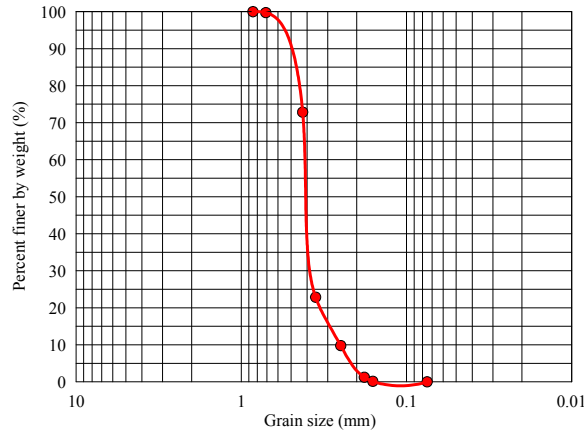


그림 3. 새만금모래의 입도분포곡선

2.2 공시체 제작 및 양생

시멘트비는 건조된 모래의 무게에 대한 시멘트의 무게로 다음과 같이 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 4, 8, 12, 16%이다. 모래에 소량의 시멘트를 혼합할 경우 최대건조밀도는 증가하더라도 최적함수비는 크게 변하지 않는다는 정우섭(2006)의 연구결과로부터 새만금모래의 최

표 1. 새만금모래의 입도특성

Maximum void ratio e_{max}	Minimum void ratio e_{min}	G_s	Effective grain size D_{10} (mm)	Mean grain size D_{50} (mm)	Uniformity coefficient C_u
1.237	0.765	2.64	0.25	0.41	1.64

적함수비 14%를 시멘트 혼합토의 최적함수비로 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, 그림 5는 다짐몰드와 램머의 사진이다. 다짐방법은 과다짐으로 입자파쇄가 발생하지 않도록 수정 D다짐방법에 의한 다짐에너지의 약 95% 정도가 되도록 공시체를 5층으로 나누고 층당 50회, 낙하높이는 20cm로 일정하게 유지하였다. 제작된 공시체의 크기는 직경 7cm, 높이 14cm이다.

다짐으로 완성된 공시체는 앞서 언급한 현장조건과 유사한 세 가지 양생조건(대기중 양생, 밀봉 양생, 수중 양생)으로 3일 동안 양생을 시켰으며, 공시체에 따라 필요한 경우 2일 양생 후 1일 수침시켰다. A시리즈는 표 2와 같이 네 종류의 시멘트비에 대하여 각각 3일 동안 계속 양생시켰다. A시리즈에서 3일 후의 함수비는 양생방법에 따라 약간씩 달랐다. 즉, 대기중 양생한 경우 1-5% 사이이며 시멘트비가 높을수록 최종 함수비가 커지는 경향을 보였다. 밀봉 양생한 경우의 최종 함수비는 9-12%사이이며, 수침 양생한 경우 함수비는 1일 수침시킨 B시리즈와 유사하였다. 대기중 양생한 공시체와 반대로 시멘트비가 높을수록 최종 함수비는 감소하는 경향을 보였다. B시리즈는 A시리즈와 동일하게 2일 동안 양생시킨

다음 나머지 1일은 수침시켰다. B시리즈는 마지막 1일 동안 수침시키기 때문에 시멘트비가 동일한 경우 최종 함수비는 표 3에 나타난 것처럼 거의 유사하였다. 하지만 공시체의 시멘트비가 증가할수록 공시체 내의 간극이 감소하거나 작아지기 때문에 수침 후의 함수비가 감소하는 경향을 보였다. 수중 양생한 공시체의 건조밀도는 시멘트비가 동일한 경우 1% 오차범위 이내에서 거의 동일하였으며, 시멘트비가 증가할수록 비중이 큰 시멘트양이 증가하여 건조밀도가 약간 증가하는 경향을 보였다. 표 2, 3과 같이 건조 밀도는 1.55-1.73g/cm³사이이다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 양생방법에 따른 일축압축강도 특성

표 2, 3과 같이 A, B 시리즈에 해당하는 각각의 공시체를 일축압축시험기를 이용하여 1%/min의 속도로 압축하였다. A시리즈는 시멘트 함유량이 20% 미만인 시멘트 혼합토가 현장에서 일어날 수 있는 양생방법에 따른 강도특성을 분석하였다. 즉 수중 양생을 포함하여 앞서 언급한 세 가지 양생조건에 따른 일축압축강도(q_u)의 차이를 비교하였다. 그림 5(a)는 A시리즈의 결과 중에서 시멘트비에 따른 일축압축강도의 변화를 나타내고 있다. 대기중 양생한 공시체의 강도는 시멘트비가 10% 미만일 경우 밀봉 양생한 공시체보다 크지만 시멘트비가 10% 이상일 경우는 더 작았다. 시멘트비에 관계없이 대기중 양생한 공시체가 수중 양생한 공시체보다 더 큰 강도를 나타냈다.

A시리즈에서 시멘트비가 10% 이상일 경우 밀봉 양생한 공시체가 대기중 양생한 공시체보다 더 높은 강도를 나타내며 이것은 시멘트비가 높아질수록 강도발현에 더 많은 수분이 요구되기 때문으로 판단된다. 하지만 시멘트비가 10% 미만인 경우 대기중 양생한 공시체의 강도가 더 높았다. 수중 양생한 공시체가 다른 공시체보다 낮은 강도를 보인 것은 대기중 및 밀봉 양생한 공시체보다 함유하고 있는 수분이 많고 시료 내의 물이 윤택작용을 한 것으로 판단된다(Schwartz, 1939). 표 2에 A시리즈에서 얻은 일축 압축강도를 비롯한 실험결과를 정리하였다.

표 2. A시리즈(3일 양생)의 실험조건 및 결과

Test	Cement ratio (%)	Curing condition	ρ_d (g/cm^3)	w (%)	Peak strength (kPa)
A-1	4	AC (3)	1.56	1.9	542
A-2		WC (3)	1.56	12.5	381
A-3		UC (3)	1.56	17.5	371
A-4	8	AC (3)	1.63	3.1	2036
A-5		WC (3)	1.64	11.1	1507
A-6		UC (3)	1.63	15.7	1567
A-7	12	AC (3)	1.68	3.8	3905
A-8		WC (3)	1.68	10.0	4374
A-9		UC (3)	1.69	13.9	3891
A-10	16	AC (3)	1.72	4.5	6493
A-11		WC (3)	1.71	10.6	6774
A-12		UC (3)	1.73	13.7	5802

* Note: AC: Air dry curing, WC: Wrapped curing, UC: Underwater curing

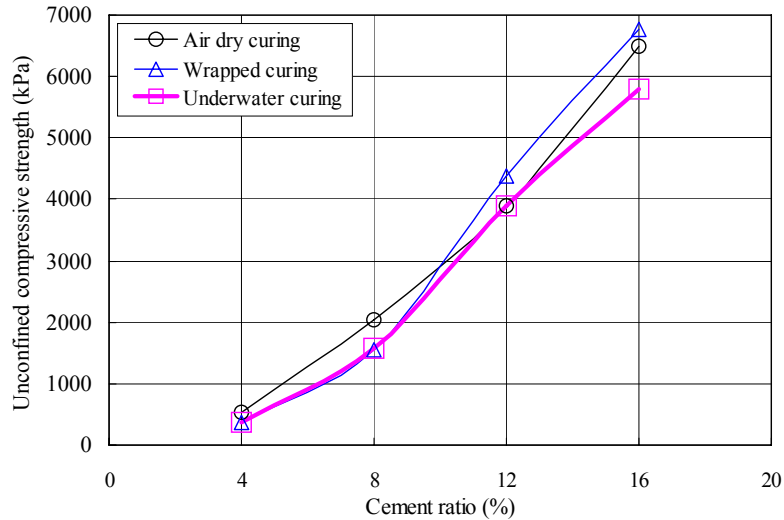


그림 5(a). A시리즈 결과

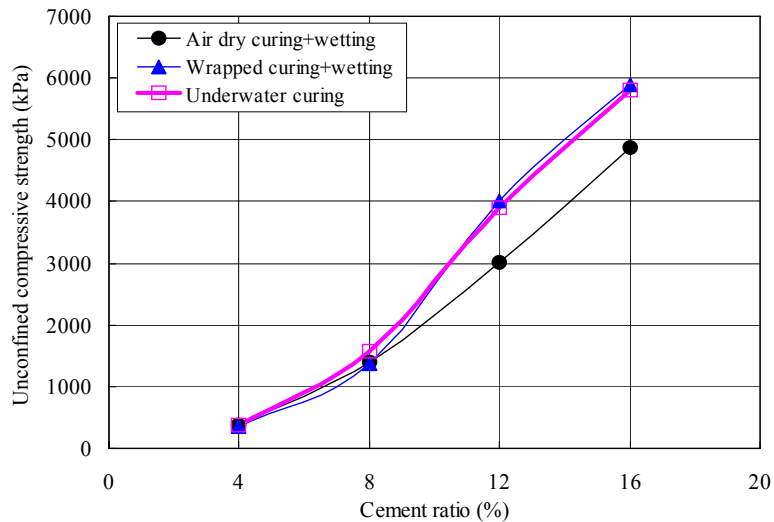


그림 5(b). B시리즈와 수중 양생 결과

3.2 수침으로 인한 일축압축강도의 특성

양생 중 또는 양생 후에 강우나 지하수 유입으로 인한 함수비 변화로 현장에서 시공되는 시멘트 혼합토의 강도 변화가 일어날 수 있다. A시리즈는 전기간(3일) 대기중, 밀봉, 수중 양생시켰으나, B시리즈는 2일 동안 대기중 및 밀봉 양생시킨 후 1일 동안 수침시켰다. 그림 5(b)는 B시리즈와 3일 동안 수침시켜 수중 양생한 공시체의 결과로 시멘트비에 따른 일축압축강도의 변화를 나타내고 있다. B시리즈에서 밀봉 양생한 공시체는 시멘트비가 10% 이상일 경우 가장 높은 값을 나타내었다. A와 B시리즈 결과를 서로 비교하여 각각의 양생방법으로 양생된 공시체에 물이 유입되었을 때 발생할 수 있는 강도 변화를 분석하였다.

투수성이 상당히 낮은 암석이나 시멘트를 수침시킬 경우 어느 정도 강도저하가 발생하는 것으로 알려져 있으나(정영수 등, 2008; Ditte and Labuz, 2002), 투수성이 비교적 높은 재료인 고결모래에 대한 연구 결과는 부족하다. A시리즈와 B시리즈에서 서로 비교 대상이 되는 공시체(예: A-1과 B-1)는 서로 동일한 건조밀도를 가지고 있으나 함수비가 다르다. 1일 수침시킨 B시리즈는 A시리즈보다 다소 낮은 강도를 나타내며, 그림 6은 각각의 양생방법에서 수침으로 인한 강도변화를 나타내고 있다. 이와 같은 수

침으로 인한 강도 저하율(strength degradation ratio, SDR)을 식(2)와 같이 정의하였을 때, 그림 7은 각각의 양생방법에 대하여 시멘트비와 SDR의 관계를 비교하였다.

$$SDR = \frac{q_u(A \text{시리즈}) - q_u(B \text{시리즈})}{q_u(A \text{시리즈})} \times 100(\%) \quad (2)$$

표 3. B시리즈(2일 양생 후 1일 수침)의 실험조건 및 결과

Test	Cement ratio (%)	Curing condition	ρ_d (g/cm^3)	w (%)	Peak strength (kPa)
B-1	4	AC (2) + UC (1)	1.56	18.6	368
B-2		WC (2) + UC (1)	1.56	18.5	354
B-3	8	AC (2) + UC (1)	1.62	15.4	1401
B-4		WC (2) + UC (1)	1.63	15.7	1374
B-5	12	AC (2) + UC (1)	1.68	12.8	3014
B-6		WC (2) + UC (1)	1.68	14.7	4007
B-7	16	AC (2) + UC (1)	1.73	13.3	4870
B-8		WC (2) + UC (1)	1.71	14.9	5902

* Note: AC: Air dry curing, WC: Wrapped curing, UC: Underwater curing

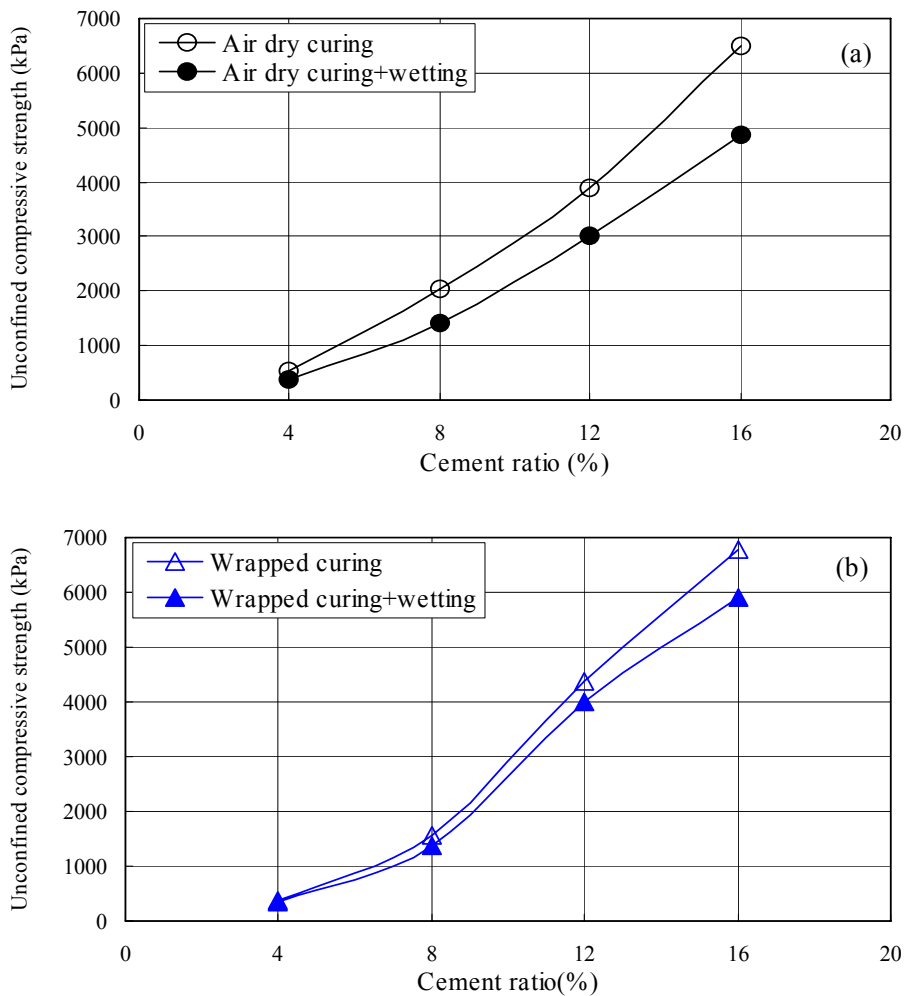


그림 6. 수침으로 인한 강도저하: (a) 대기중 양생, (b) 밀봉 양생

결과적으로 대기중 양생한 공시체는 시멘트비에 따라 25-30%, 밀봉 및 습윤 양생한 공시체는 시멘트비에 관계없이 약 10% 정도의 수침으로 인한 강도저하가 발생하였다. 대기중 양생한 공시체의 경우 시멘트비가 증가할수록 SDR은 다소 감소하는 경향을 보였다. 수침으로 인한 강도저하와 관련된 연구 사례로서 Ditte and Labuz(2002)는 건조한 사암을 수침시킨 다음 실시한 강도시험에서 수침으로 인한 뚜렷한 강도저하를 관찰하였다. 그 이유로 물이 고결을 약하게 만들거나 윤활작용을 하여 강도가 저하된다는 의견이 다수 있다(Schwartz, 1939; 일본토질공학회, 1986). 이대수 등(2009)도 대형직접전단시험기를 이용한 쇄석재료의 전단시험에서 쇄석재료의 내부마찰각이 수침으로 5% 정도 감소한다는 결과를 발표하였다.

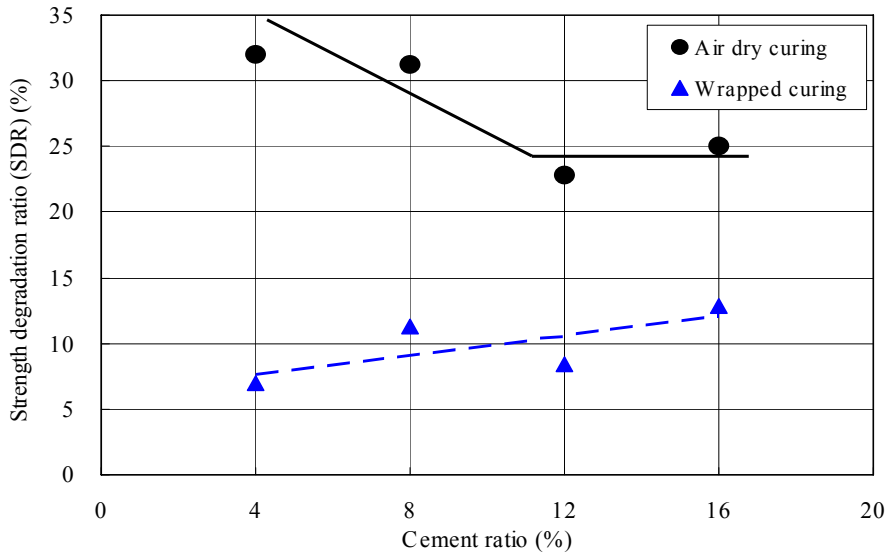


그림 7. 수침에 따른 강도저하율

3.3 시멘트비에 따른 강도 증가율

그림 8은 대기중 양생한 공시체 그리고 밀봉 및 수중 양생한 공시체에 대하여 시멘트비의 증가에 따른 일축압축강도 변화를 비교하고 있다. 동일한 양생방법에서 시멘트비가 4%일 때의 일축압축강도를 기준으로 시멘트비 증가에 따른 강도 증가율은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{q_{1,\rho_c}}{q_{1,4\%}} = k_1 \left(\frac{\rho_c}{4\%} \right)^{k_2} \quad (\text{단위는 kPa}) \quad (3)$$

여기서, ρ_c 는 %로 표기한 시멘트비

q_{1,ρ_c} : 시멘트비가 ρ_c 인 시멘트 혼합토의 일축압축강도(kPa)

$q_{1,4\%}$: 시멘트비가 4%인 시멘트 혼합토의 일축압축강도(kPa)

k_1 : 상수로서 1.0271(대기중 양생), 0.9837(밀봉 양생), 1.0263(수중 양생)

k_2 : 상수로서 1.7855(대기중 양생), 2.1269(밀봉 양생), 2.0254(수중 양생)

그림 8과 식(3)으로부터 세 가지 양생방법 중에서 밀봉 및 수중 양생한 경우 시멘트비 증가에 따른 강도 증가율이 서로 비슷하였으며, 시멘트비가 4%에서 16%로 4배 증가할 경우 강도 증가율($q_{1,\rho_c}/q_{1,4\%}$)은 시멘트 증가율($\rho_c/4\%$)의 제곱인 약 16배 정도로 증가하였다. 하지만 공기중 양생한 공시체의 경우

시멘트비가 4배로 증가할 경우 강도 증가율은 12배 정도로 상대적으로 낮았다.

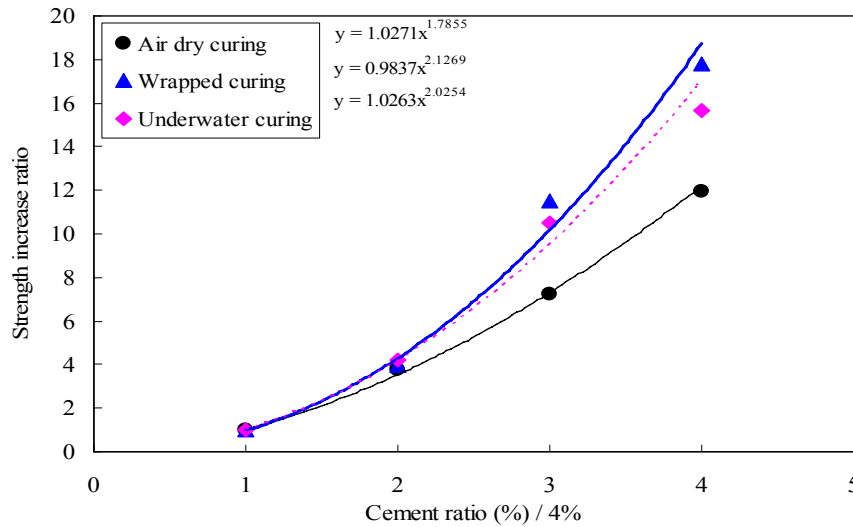


그림 8. 시멘트비 4%일 때의 강도를 기준으로 시멘트비 증가에 따른 강도 증가율

4. 결론

본 연구에서는 현장에서 활용 가능한 흙이나 강모래에 소량의 시멘트를 혼합한 시멘트 혼합토의 양생 방법에 따른 강도특성을 연구하였다. 현장에서 가능한 양생방법은 대기중 양생, 밀봉 양생, 수중 양생이 있다. 각각의 양생방법에 따른 수분공급 정도와 시멘트비 그리고 수침이 고결모래의 강도에 미치는 영향을 일축압축시험 강도를 통하여 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시멘트비가 10% 미만인 경우 대기중 양생한 공시체의 강도가 가장 크게 나타났지만, 10% 이상인 경우 수화에 필요한 수분 증가로 밀봉 양생한 공시체의 강도가 더 크게 나타났다. 한편 시멘트비에 관계없이 상대적으로 많은 물을 포함하고 있는 수중 양생한 공시체의 강도가 대기중 양생한 공시체보다 전반적으로 낮게 나타났다.
- (2) 수침으로 인한 고결모래의 강도저하는 밀봉 양생한 공시체보다 공기중 양생한 공시체의 경우가 더 크게 나타났으며, 특히 공기중 양생한 공시체에서 시멘트비가 낮은 경우 30% 정도의 강도저하가 발생하였다. 따라서 시멘트 혼합토에서 수분 유입으로 인한 강도저하를 최소화하기 위해서는 양생기간 동안 수분증발을 막거나 충분한 수분을 공급해야 한다.
- (3) 공기중 양생한 공시체의 시멘트비 증가에 따른 강도 증가율은 선형적으로 증가하지만, 밀봉 및 수중 양생한 고결모래의 경우 시멘트비 증가에 따른 강도 증가율이 지수형태로 훨씬 크게 나타났다.

참고문헌

1. 김기영, 박한규, 전제성(2005) Cemented sand and gravel 재료의 강도특성. 한국지반공학회논문집, 제21권, 제10호, pp. 61-71.
2. 노인철(1997) 양생온도 변화에 따른 고성능 콘크리트 연구. 석사학위논문, 한양대학교.
3. 이영대(1984) 양생방법이 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향. 석사학위논문, 서울대학교.
4. 유희경(2001) 양생방법에 따른 현장콘크리트의 압축강도 비교연구. 석사학위논문, 건국대학교.
5. 이대수, 김경열, 송성연, 오기대, 정상섭(2009) 대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성 (III)- 최종 종합 분석. 한국지반공학회논문집, 제25권, 제4호, pp. 39-54.
6. 정우섭(2006) 낙동강 하상모래의 시멘트 혼합율에 따른 강도특성. 박사학위논문, 경북대학교.

7. 정영수, 김진근, 최석환, 하재담, 박홍근(2008) 콘크리트. 동화기술.
8. 日本土質工學會(1986) 組立材料の 變形と強度.
9. 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.
10. Dittes, M. and Labuz, J.F. (2002) Field and Laboratory Testing of St. Peter Sandstone. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 5, pp. 372-380.
11. Price, W.H. (1951) Factors influencing concrete strength, *ACI Journal*, Proceedings Vol. 47, Feb, 417-432.
12. Safiuddin, M., Raman, S.N. and Zain, M.F.M. (2007) Effect of different curing methods on the properties of micorsilica concrete. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 1, No. 2, pp. 87-95.
13. Schwartz, G.M. (1939) Foundation conditions at the sites of the proposed St. Anthony Falls locks Minneapolis, Minnesota. Rep. to the U.S. Army Corps of Engineers, St. Paul District.