

고결모래의 강도정수 평가

Evaluation of Strength Parameters of Cemented Sand

이 문 주¹ Lee, Moon-Joo

최 성 근² Choi, Sung-Kun

이 우 진³ Lee, Woo-Jin

Abstract

This study proposes the equations evaluating the shear strength of cemented sand by analytical interpretation based on Mohr-Coulomb failure criteria, and verifies them using the results of triaxial and unconfined compression tests. The internal friction angle of cemented sand is identical to that of uncemented one regardless of the stress level, while the cohesion intercept of cemented sand is constant before the breakage of cementation bonds. Therefore, the shear strength of cemented sand can be represented as a summation of the shear strength of uncemented sand and the unconfined compressive strength of cemented sand. In addition, the cohesion intercept of cemented specimen can be expressed as a function of unconfined compressive strength and friction angle. In the transition zone, assuming a constant shear strength, the equations to evaluate shear strength and cohesion intercept of cemented sand are also represented. It is observed that the predicted values using these solutions agree well with the experimental results. The experimental results also show a linear relationship between the unconfined compressive strength and the breaking point of cementation bonds.

요 지

본 연구에서는 Mohr-Coulomb 파괴기준에 따라 고결모래의 전단강도를 유도하고, 삼축 및 일축압축시험으로 검증하였다. 모래의 마찰각은 고결의 영향을 받지 않으며, 일정구속압 이하에서 고결모래의 점착력은 고결정도에 따라 일정하다. 따라서 고결모래의 전단강도는 미고결 모래의 전단강도와 고결모래의 일축압축강도의 합으로 표현되며, 고결모래의 점착력은 마찰각과 일축압축강도의 함수로 표현되었다. 또한 고결결합 파괴구속압 이후인 전이구간에서 고결모래의 전단강도는 비교적 일정하게 유지된다고 가정하여 전이구간에서 고결모래의 전단강도와 점착력을 유도하였다. 추정된 고결모래의 전단강도와 점착력은 실험결과와 잘 일치하였다. 실험 결과는 또한 고결모래의 점착력 변화에 큰 영향을 미치는 고결결합 파괴구속압이 일축압축강도와 선형비례관계임을 보여준다.

Keywords : Breaking point, Cementation, Cohesion intercept, Prediction equation, Shear strength, Unconfined compressive strength

1. 서 론

시간에 따라 지반의 응력변화 없이 흙의 강도나 강성

이 증가하는 현상을 aging이라고 하며, aging의 발생원인은 크게 물리적 매커니즘과 화학적 매커니즘으로 구분된다. 물리적 매커니즘은 흙입자의 재배열로 인해 흙의

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Member, PhD Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 공학박사, 고려대학교 건축사회환경공학과 (Member, PhD, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

마찰저항이 증가하는 과정이며(Schmertmann 1991; Mesri 등 1990), 화학적 매커니즘은 입자사이에 입자간 결합을 형성시키는 물질이 침전하여 접촉 결합을 형성하는 과정으로써(Mitchell and Solymar 1984; Joshi 등 1995), 이는 고결(cementation) 현상으로 알려져 있다. 대부분의 자연지반은 어느 정도의 고결이 발생할 뿐만 아니라, 최근에는 지반 안정화 기법 등과 같이 인위적 고결공법으로 지반의 공학적 특성을 향상시키기도 한다. 이전의 연구결과(Clough 등 1981; Clough 등 1989; Ismail 등 2002a; Airey 1993)에 의하면 인위적 고결지반은 자연상태 고결지반과 매우 유사한 거동을 보인다.

다양한 매개변수 분석으로부터 고결모래의 거동은 고결정도, 상대밀도, 구속압, 그리고 입자특성 등의 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. 모래의 고결정도가 증가할수록 모래의 전단강도가 증가하고, 취성적 파괴가 발생하며(Abdulla and Kioussis 1997; Asghari 등 2003; Clough 등 1981; Huang and Airey 1993; Ismail 등 2002b; Schnaid 등 2001), 상대밀도가 높을수록 시료의 입자간 접촉점이 증가하기 때문에 입자간 고결물질의 침전이 더 효율적이다(Consoli 등 2007; Clough 등 1981; Huang and Airey 1998; Ismail 등 2002a; Rotta 등 2003). 또한 해안에 주로 분포하는 석회질모래보다 석영질 모래의 입자 강도가 더 크기 때문에 더 효율적인 응력전달이 가능하여 고결시에도 더 큰 전단강도가 나타나며(Ismail 등 2002b), 입자의 크기가 작고 입자 표면이 거칠며 입도분포가 고를수록 고결효과가 크게 나타난다(Clough 등 1981; Ismail 등 2002b).

Coop and Atkinson(1993)은 고결결합력과 초기 구속압의 상대적 크기에 따라 그림 1과 같이 고결모래의 이상적인 거동양상을 제시하였다. 거동 1은 고결결합에 비해 구속압이 작고 고결결합에 의한 점착성분이 거동을 지배하기 때문에, 전단시 미소변형에서 최대 전단강도가 나타나며 파괴강도는 미고결 상태의 한계상태보다 더 크게 나타나고, 거동 2는 등방압밀에 의해 항복은 발생하지 않지만 전단시 항복이 발생하고 항복이후에는 미고결 모래의 마찰성분에 따라 응력의 첨두값이 결정된다. 반면 거동 3은 구속압에 의해 고결결합이 파괴되어 모래의 마찰성분이 거동의 지배요인으로 작용하기 때문에, 미고결 모래와 유사한 전단거동이 나타난다. 이와 같이 고결모래의 거동에는 구속압의 영향이 크게 작용하기 때문에 고결모래의 강도는 고결결합력과 구속압을 고려하여 신중히 결정되어야 한다. 그럼에도 불

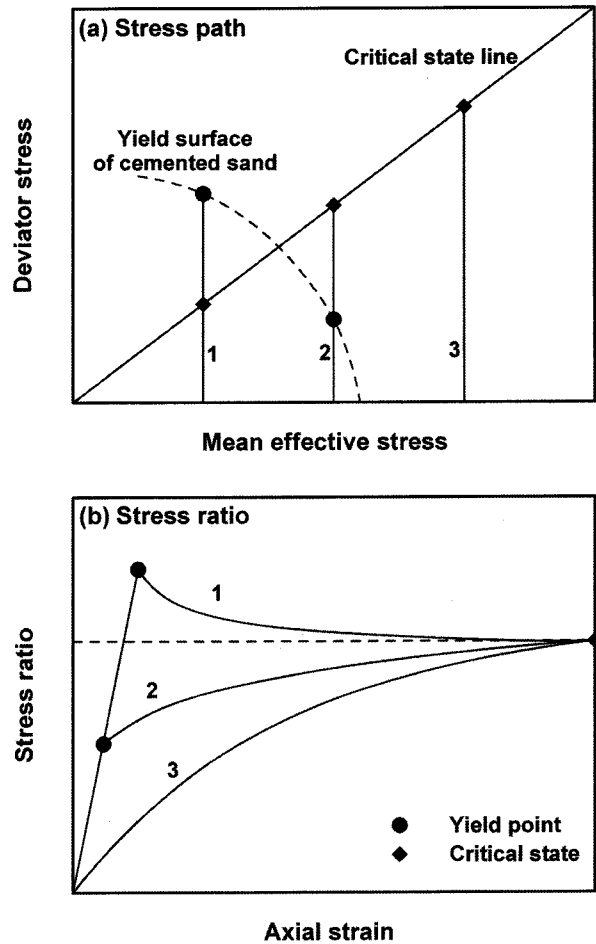


그림 1. 고결모래의 이상적 거동(Coop and Atkinson 1993)

구하고 기존의 많은 연구(Asghari 등 2003; Abdulla and Kioussis 1997; Acar and El-Tahir 1986; Clough 등 1981)에서는 구속압의 증가에 의한 고결결합의 파괴여부에 대한 검토없이 고결모래의 점착력과 마찰각을 결정하였다.

본 연구에서는 구속압에 따른 고결모래의 거동을 분석하여, 구속압에 의한 고결결합 파괴 전후의 전단강도와 점착력을 예측하고, 실험으로 검증하였다. 또한 실험 결과로부터 고결결합이 파괴되어 점착력이 감소하기 시작하는 구속압, 즉 고결결합 파괴구속압을 고결모래의 일축압축강도로 추정하였다.

2. 구속압에 따른 고결모래의 점착력 변화

이문주 등(2007a)은 고결모래의 점착력과 마찰각을 정확히 결정하기 위해 다양한 초기 구속압 조건에서 배수전단시험을 실시하였으며, 그로부터 고결결합이 파괴되는 구속압($p'_{(BP)}$)을 결정하고, $p'_{(BP)}$ 를 전후하여 점착

력이 크게 변화함을 확인하였다. 또한, 그림 2와 같이 구속압에 따른 고결모래의 점착력 변화를 이상적으로 표현하였다. 고결지배구간에서는 구속압에 관계없이 일정한 점착력이 나타나며, 고결에 의한 점착력이 고결모래의 거동을 지배하고, 전이구간에서는 구속압에 의해 고결결합의 단계적인 파괴가 발생한다. 또한 응력지배구간은 고결결합력에 비해 구속압이 큰 단계로써, 고결모래의 점착력은 사라지고 마찰성분에 의해 거동이 지배된다. 이때 모래의 마찰각은 고결여부 및 결합 파괴정도에 관계없이 항상 미고결 모래의 마찰각과 동일하게 결정된다.

3. 고결모래의 전단강도 분석

3.1 고결지배구간에서의 전단강도와 점착력

이우진 등(2006)의 연구에서와 같이 고결모래의 전단강도를 마찰각으로만 평가할 경우, 고결정도가 증가할수록 고결모래의 침투마찰각은 증가하였으나, 고결모래의 마찰각과 점착력을 동시에 고려한 기존의 연구에서 (Dupas and Pecker 1979; Clough 등 1981; Acar and El-Tahir 1986) 고결은 모래의 내부마찰각에 영향을 미치지 않으며 점착력을 증가시켰다. Schnaid 등(2001)과 이문주 등(2007a)의 시험결과에서도, 고결시료의 파괴포락선은 구속압이 고결시료의 고결결합을 파괴시키기 전까지 미고결 시료의 파괴포락선과 평행하여 고결은 모래의 마찰각에 영향을 미치지 않음이 확인되었다. 또한 이문주 등(2007a)의 결과에서 고결결합력에 비해 큰

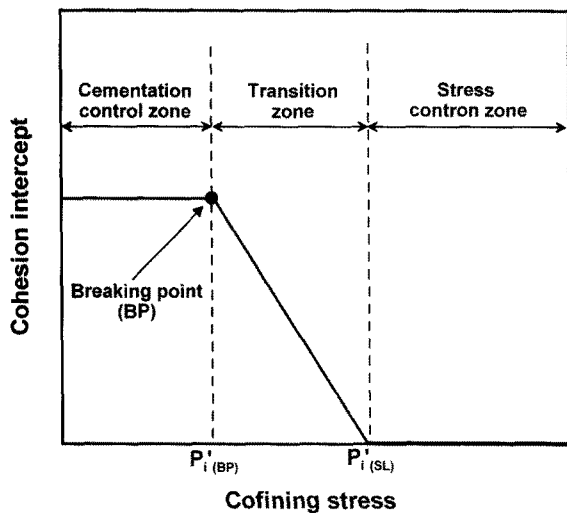


그림 2. 고결모래의 이상적 점착력 변화(이문주 등 2007a)

구속압이 작용되는 전이구간에서, 시료의 고결결합이 파괴되면서 고결모래의 전단강도는 증가경향이 완화되거나 급격히 감소하기 시작한다. 이상의 결과를 바탕으로 고결모래의 이상적인 파괴포락선을 그림 3과 같이 표현하였다. 여기서, p' , q 는 시료의 평균유효응력과 축차응력이고, q_{ucs} 는 일축압축강도이다. 또한, $c'=(\sigma_1'-\sigma_3')/2$ 는 동일 평균유효응력에서 고결모래와 미고결 모래의 전단강도의 차로 결정되는 고결모래의 점착력이다.

미고결 모래의 점착력을 0로 가정할 경우, 초기 구속압 p_i' 상태에서 미고결 모래의 전단강도 $q_{f(us)}$ 는 식 (1)과 같이 시료의 마찰각과 초기구속압의 항으로 표현된다.

$$q_{f(us)} = \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p_i' \quad (1)$$

고결은 흙의 상대밀도나 입자특성 등의 영향을 크게 받기 때문에, 모래의 고결정도에 영향을 미치는 변수 또한 다양하다. 따라서, 모래에 포함된 고결유발제 함유율은 고결정도를 적절히 표현할 수 없으며, Rad and Clough (1982)는 일축압축강도를 기준으로 고결모래의 고결정도를 구분하였다. 또한, Schnaid 등(2001), Ismail 등(2002), 그리고 Consoli 등(2007)도 일축압축강도로부터 고결정도를 평가하였다. 국내의 경우, 김기영 등(2005)은 포틀랜드 시멘트로 보강된 CGS 재료의 강도특성에 미치는 영향요인을 분석하기 위해 시료의 일축압축강도를 측정하였다. 그림 3에서 고결모래의 일축압축강도는 구속압 0인 원점에서 시작하는 고결모래의 응력경로

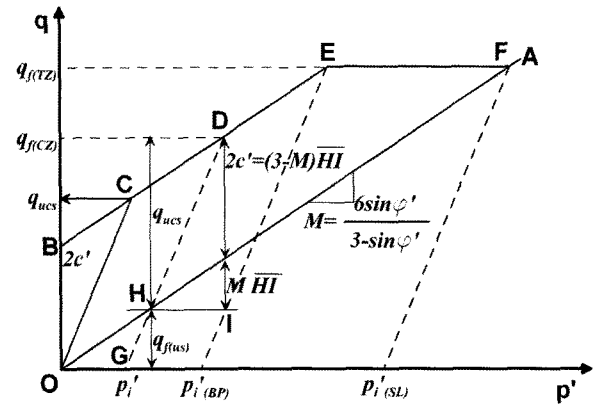


그림 3. 고결모래의 이상적 파괴포락선
 OA : Failure envelope of uncemented sand
 BEF : Failure envelope of cemented sand
 OC : Stress path of cemented sand under unconfined stress
 GH : Stress path of uncemented sand under initial confining stress p_i'
 GD : Stress path of cemented sand under initial confining stress p_i'

그림 3. 고결모래의 이상적 파괴포락선

로 나타내어진다. 또한, 고결모래와 미고결 모래의 파괴 포락선은 평행하기 때문에, 고결결합 파괴구속압인 $p'_{i(BP)}$ 보다 작은 구속압 p'_i 상태인 고결지배구간에서 고결모래의 전단강도는 미고결 모래의 전단강도와 고결모래의 일축압축강도의 합으로써 식 (2)와 같이 표현될 수 있다. 즉, 시료에 점착력과 마찰각이 동시에 존재하는 고결시료의 전단강도는 마찰각과 일축압축강도의 항으로 표현된다. 이때, 구속압은 전단강도의 마찰성분에만 영향을 미치며, 고결결합에 의한 점착성분은 구속압에 관계없이 일정하다. 또한 그림 3의 ΔDHI 의 기하학적 관계로부터 고결모래의 점착력은 일축압축강도와 선형 비례관계인 식 (3)으로 표현된다.

$$q_f = q_{f(us)} + q_{ucs} = \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p'_i + q_{ucs} \quad (2)$$

$$c'_{(cementation\ zone)} = \frac{3-M}{6} q_{ucs} = \frac{3(1-\sin\phi')}{2(3-\sin\phi')} q_{ucs} \quad (3)$$

3.2 전이구간에서의 전단강도와 점착력

구속압이 증가할수록 전단강도가 증가하는 고결지배 구간과는 달리, 전이구간에서 고결모래의 전단강도는 구속압에 따른 뚜렷한 증가경향이 없다. 본 연구에서는 그림 3의 EF구간과 같이 전이구간에서는 고결모래의 전단강도가 일정하다고 가정하고 고결모래의 전단강도와 점착력을 추정하였다. 전이구간에서 고결모래의 전단강도인 $q_{f(TZ)}$ 는 식 (4)와 같이 구속압 $p'_{i(BP)}$ 에서 고결모래의 전단강도나 구속압 $p'_{i(SL)}$ 상태에서 미고결 모래의 전단강도로부터 결정된다. 또한 식 (4)로부터 고결모

래의 전이구간과 응력지배구간의 경계구속압인 $p'_{i(SL)}$ 은 식 (5)와 같이 유도되었다. 전이구간에서 고결모래의 점착력인 $c'_{(TZ)}$ 은 구속압에 관계없이 일정한 $q_{f(TZ)}$ 와 미고결 모래의 전단강도의 차로 결정되며 식 (6)과 같이 결정되었다.

$$q_{f(TZ)} = \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p'_{i(BP)} + q_{ucs} = \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p'_{i(SL)} \quad (4)$$

$$p'_{i(SL)} = \frac{1-\sin\phi'}{2\sin\phi'} q_{ucs} + p'_{i(BP)} \quad (5)$$

$$2c'_{(TZ)} = \frac{3-M}{3} \left[q_{f(TZ)} - \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p'_i \right] \\ = \frac{3(1-\sin\phi')}{2(3-\sin\phi')} \left[q_{ucs} + \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p'_{i(BP)} - \frac{2\sin\phi'}{1-\sin\phi'} p'_i \right]$$

$$\therefore c'_{(TZ)} = c'_{(CZ)} - \frac{3\sin\phi'}{3-\sin\phi'} (p'_i - p'_{i(BP)}) : p'_{i(BP)} \leq p'_i \leq p'_{i(SL)} \quad (6)$$

4. 실험 및 검증

4.1 시료성형 및 시험

식 (2)~(6)으로 추정되는 고결모래의 전단강도와 점착력을 검증하기 위해 고결모래의 전단강도와 일축압축강도를 측정한 기존의 시험결과(Clough 등 1981; Acar and El-Tahir 1986; O'Rourke and Crespo 1988; Schnaid 등 2001)를 검토하였다. 또한 표 1과 같이 이문주 등(2007a, b)의 시험에 다양한 상대밀도와 구속압 조건을 추가하였다. 이 때, 고결결합 파괴구속압을 정확히 결정하기 위해 시료의 구속압 간격을 좀 더 세분화하였다. 시험에 사용된 모래와 시료조성 방법은 이문주 등(2007a, b)의 방법과 동일하다.

표 1. 시험조건

모래	고결여부	상대밀도 Dr (%)	석고함유율 Cg (%)	시험	삼축시 압밀구속압 p'_i (kPa)
K-7호사	미고결	40, 60, 80	0	삼축	50, 100, 200
	고결	40	5	삼축/ 일축	10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200
			7		10, 30, 50, 75, 100, 150, 200
			10		10, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 300, 400
			5		10, 30, 40, 50, 75, 100, 125
			5		10, 30, 50, 75, 90, 100, 125, 150
부산사	미고결	40, 60, 80	0	삼축	50, 100, 200
	고결	40	5	삼축/ 일축	10, 20, 30, 40, 50
			7		10, 30, 50, 75, 100, 125
			10		10, 30, 50, 75, 100, 125, 150
			5		10, 20, 30, 40, 50, 75,
			5		10, 30, 50, 75, 100

4.1.1 시료 기본특성

사용된 모래는 모암으로부터 인공적으로 파쇄된 K-7 호사와 부산근해 육지도 남단 50km에서 준설된 부산사 로써, 두 모래의 입도분포와 기본물성은 그림 4 및 표 2와 같다. 그림 5의 SEM 이미지로부터, K-7호사와 부산 사의 조도는 각각 중간모난, 모난~중간모난 정도로 분 석되었다. 또한 XRF 성분분석 결과, 두 모래 모두 SiO₂ 함유율이 높은 석영질 모래로 나타났다. 본 연구에서 모 래의 고결을 위해 사용된 석고는 도자기형재용 석고 (GM-10)이며, 물-석고비(표준혼수량) 40%로 혼합하여 습윤양생 할 경우 20MPa의 압축강도를 발현하고 양생 시 팽창율은 0.03%이다.

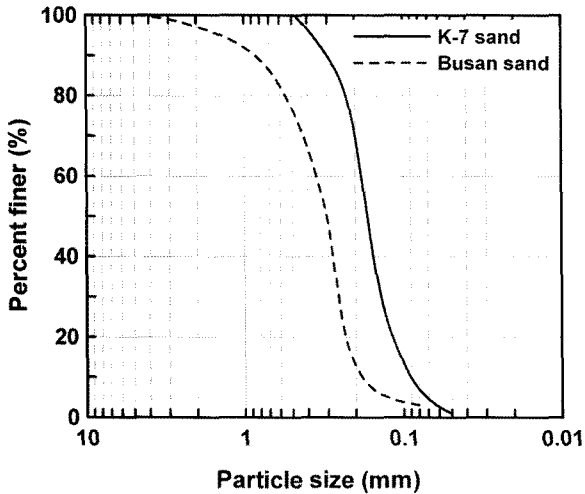
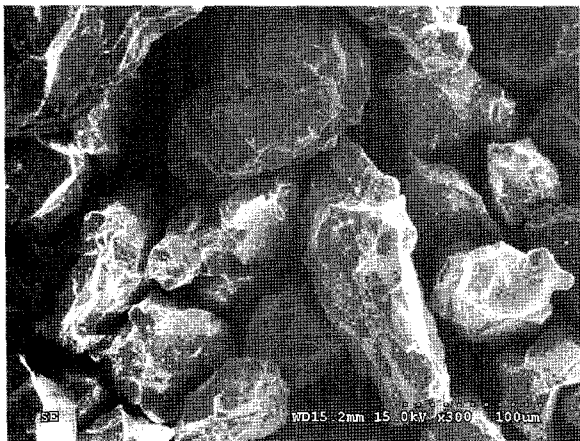


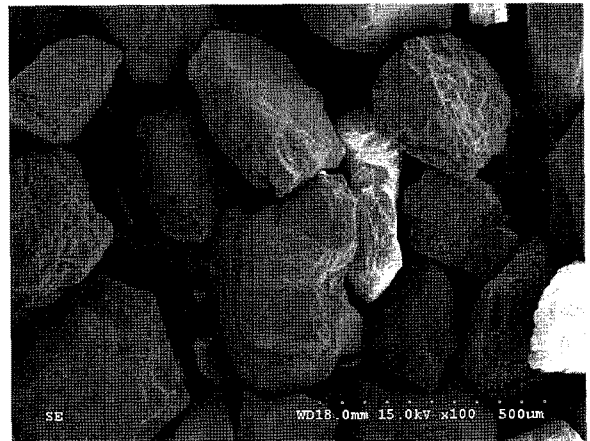
그림 4. 시험모래 입도분포

표 2. 시험모래 기본물성

모래	Gs	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _u	C _c	e _{max}	e _{min}	USCS	SiO ₂ (%)
K-7호사	2.647	0.09	0.17	2.111	0.988	1.054	0.719	SP	98
부산사	2.620	0.16	0.32	2.346	0.808	1.063	0.658	SP	76



(a) K-7호사(×300)



(b) 부산사(×100)

그림 5. 모래시료 SEM 사진

4.1.2 시료조성 및 시험

삼축압축시험기에 멤브레인과 모래시료 조성용 원통 형 몰드를 장착하고 미고결 건조모래를 낙사시켜 직경 약 70mm, 높이 약 153mm의 미고결 삼축시료를 조성하였다. 조성된 시료의 포화를 위해 10kPa의 구속압이 가해진 상태에서 탄산수와 탈기수를 500ml 통과시켰으며, 배압을 100kPa까지 증가시켜 간극수압계수(B)가 0.97 이상이 되도록 하였다. 시료 포화 후 50~200kPa의 유효 등방구속압 상태에서 0.1%/min의 변형을 속도로 배수 전단시험(CID)을 실시하였다.

고결시료는 직경 70mm의 몰드에 낙사시킨 석고-모래 혼합시료를 양생시켜 조성되었다. 낙사시 모래와 석 고의 재료분리를 방지하기 위해 함수비 0.5%에 해당하는 물을 모래와 충분히 교반시켜 석고입자를 모래표면 에 부착시킨 후 낙사시켜 높이 150mm의 시료를 조성하 였다. 시료에 200kPa의 상재구속압을 가한 뒤, 시료의 하부에서 10cm³/min의 속도로 증류수를 주입하여 24시 간 동안 석고를 양생시켜 시료의 고결을 유도하였다. 고 결시료를 삼축압축시험기에 거치하고 미고결 모래와 동일한 조건에서 시료를 1차로 포화시킨 후, 배압을 300~500kPa까지 증가시켜 0.93 이상의 간극수압계수를 확인하였다. 포화된 시료에 표 1의 시험조건과 같은 다 양한 초기 구속압을 가한 후, 배수전단시험을 실시하였 다. 또한 동일하게 조성된 시료에 대한 일축압축강도를 측정하였다.

이문주 등(2007a, b)의 결과와 추가로 수행된 시험결과로부터 석고함유율과 상대밀도에 따른 K-7호사와 부산사의 전단강도와 일축압축강도를 평가하였다. 또한 각 고결모래의 점착력을 급격히 감소시키는 구속압인 $p'_i(BP)$ 을 결정하였다.

4.2 기존연구 분석

그림 3에서 표현된 고결모래의 이상적 거동양상을 기본으로 Clough 등(1981), Acar and El-Tahir(1986), O'Rourke

and Crespo(1988), Schnaid 등(2001)의 시험결과로부터 고결모래의 점착력을 재산정한 결과는 표 3과 같다. 기존에 연구된 고결시료의 경우에도 낮은 구속압 단계에서 비교적 일정한 점착력이 나타났으며, 시료에 따라 구속압 증가에 의해 점착력이 감소하는 경향도 나타났다. 즉, 이전의 시험에서도 고결모래의 점착력은 그림 2의 거동양상과 유사하게 나타남이 확인되었으며, 상대적으로 낮은 구속압에서 비교적 정확하게 점착력을 추정할 수 있다. 그러나, 이전의 연구에서는 구속압에 의한 결합의 파괴를 고려하지 않아 전단시 가해지는 구속압의

표 3. 각종 고결모래의 전단강도 및 점착력

출처	γ_d (kN/m ³)	ϕ'_{us} (deg.)	고결유발제		q_{ucs} (kPa)	p'_i (kPa)	q_f (kPa)	c' (kPa)	비고
			종류	함유율 (%)					
Clough 등 (1981)	15.5	35	Portland cement	2	180	103	456	47.2	Artificial
						207	766	55.1	
						414	1206	24.3	
	15.5	35	Portland cement	4	545	103	838	147.9	Artificial
						207	1092	141.1	
						414	1598	127.7	
	14.6	29	Portland cement	4	405	103	611	128.2	Artificial
						207	807	128.2	
						414	1197	128.3	
	16.9	41	Portland cement	4	670	103	1060	146.8	Artificial
						207	1547	166.7	
						414	2246	146.7	
	16.7	40	-	-	110	69	356	24.5	Natural
						138	563	15.1	
						207	738	-	
						276	1081	19.9	
						414	1367	-	
	17.1	37	-	-	700	69	1049	209.3	Natural
138						1133	178.3		
207						1356	181.9		
276						1667	207.4		
414						1880	156.5		
Acar and El-Tahir (1986)	Dr=35%	34	Portland cement	1	15	35	115	7.1	Artificial
						103	288	7.2	
						345	902	7.2	
	Dr=80%	39	Portland cement	2	55	35	245	29.6	Artificial
						103	475	29.4	
						345	1297	29.4	
O'Rourke and Crespo (1988)	12.5	39	-	-	452	60	721	121.3	Natural
						120	918	119.7	
						200	1053	87.7	
	14.5	40	-	-	664	60	1092	199.1	Natural
						120	1305	198.5	
						200	1462	168.7	
Schnaid 등 (2001)	17.5	35	Portland cement	1	305	20	320	70.2	Artificial
						60	510	91.9	
						100	640	97.8	
	17.5	35	Portland cement	3	737	20	729	178.0	Artificial
						60	981	216.1	
						100	1073	211.9	
	17.5	35	Portland cement	5	1168	20	1266	319.6	Artificial
						60	1356	314.9	
						100	1536	334.0	

간격이 넓고 불규칙하기 때문에 고결결합 파괴구속압의 결정이 매우 난이하였다.

4.3 고결지배구간의 추정식 검증

그림 6은 $p'_{i(BP)}$ 이전 구속압에서 나타난 고결모래의 전단강도와 미고결 모래의 마찰각과 고결모래의 일축압축강도를 이용하여 식 (2)에 의해 추정된 전단강도를 비교한 결과이다. 식 (2)는 이전 연구에서 나타난 고결모래의 전단강도는 약 5% 과소평가하였으나(그림 6(a)), 반면 고결된 K-7호사와 부산사의 전단강도를 각각 9%, 3% 과대평가하였다(그림 6(a)).

그림 7은 식 (3)에 의해 추정된 각 고결모래의 점착력과 삼축시험으로 결정된 점착력을 비교한 결과로써, 식 (3)은 기존 연구에서 조성된 고결모래의 점착력을 8% 과소평가하고, 고결된 부산사와 K-7호사의 점착력은 다소 과대평가하였다. 식 (3) 또한 고결지배구간에서의 고

결모래 점착력을 정확히 예측할 수 있음이 검증되었다. 고결모래의 점착력은 고결유발제의 종류나 함유율, 그리고 입자특성 등의 다양한 요인에 의해 영향을 받음에도 불구하고 일축압축강도의 0.22~0.28배 정도의 범위에서 결정될 수 있으며, 기존의 다양한 모래와 본 연구의 K-7호사, 부산사의 결과를 조합한 결과, 점착력과 일축압축강도는 $c'=0.265q_{ucs}$ 의 관계로 결정되었다.

4.4 고결결합 파괴구속압 평가

고결결합의 파괴에 의해 고결모래의 거동이 크게 변하기 때문에 구속압에 의한 결합의 파괴여부를 결정하는 것이 중요하다. 고결결합의 파괴는 시료에 가해지는 구속압과 고결결합력의 상대적 크기에 따라 결정되므로, 고결모래의 고결정도를 나타내는 일축압축강도와 고결결합 파괴구속압($p'_{i(BP)}$)의 관계를 추정할 수 있다. 이전의 Clough 등(1981), Acar and El-Tahir(1986), O'Rourke

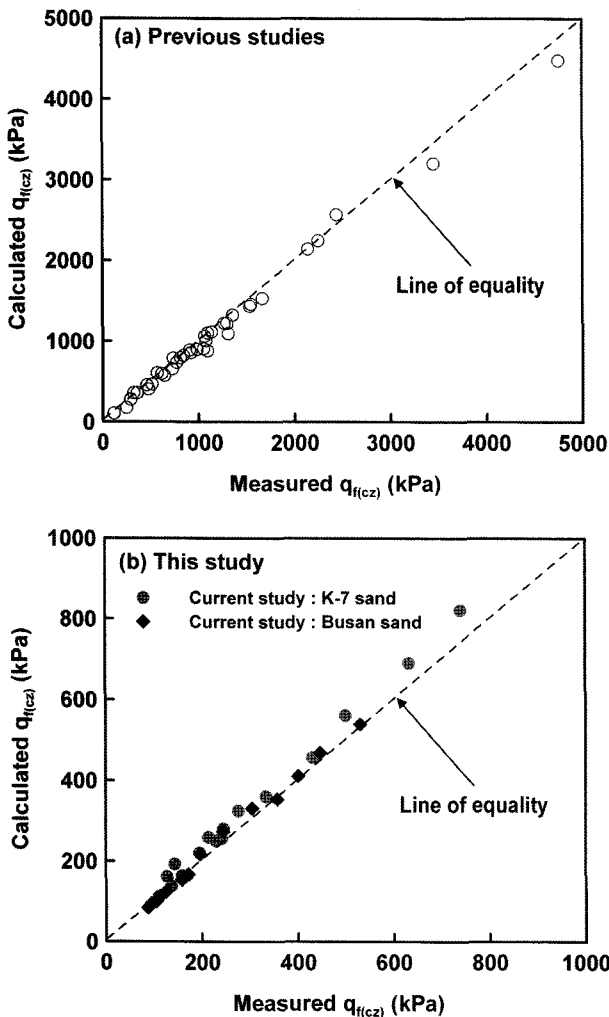


그림 6. 고결지배구간에서의 고결모래 전단강도 비교

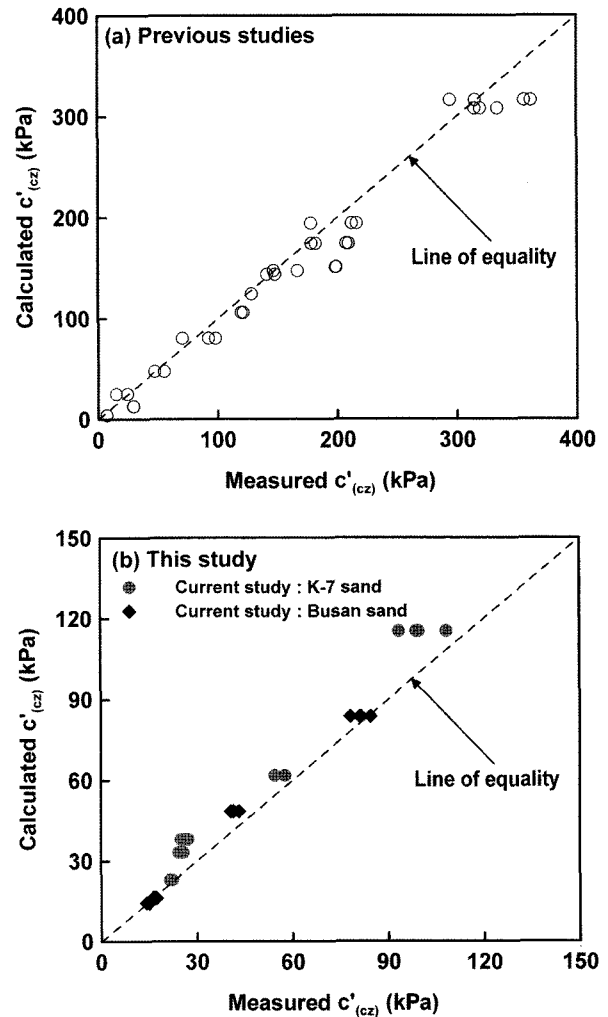


그림 7. 고결지배구간에서의 고결모래 점착력 비교

and Crespo(1988), Schnaid 등(2001)의 실험에서는 구속압에 의한 결함 파괴 정도를 고려하지 않았기 때문에 정확한 $p'_{i(BP)}$ 의 결정이 난이하다. 따라서 본 연구의 K-7 호사와 부산사의 시험결과만을 이용하여 $p'_{i(BP)}$ 를 결정하였다. 그림 8과 같이 고결모래의 $p'_{i(BP)}$ 는 일축압축강도의 관계로써, 식 (7)과 같이 선형비례 관계 표현되었으며, 이문주 등(2007a)의 결과와 매우 유사하다. 그러나 Mohr-Coulomb 파괴기준에 근거하여 유도된 식 (2), (3)과는 달리 식 (7)은 실험결과에 근거한 추정식이기 때문에, 다양한 모래시료를 이용한 좀 더 많은 연구를 통해 보완되어야 한다.

$$p'_{i(BP)} = 0.307q_{ucs} \quad (7)$$

4.5 전이구간의 추정식 검증

전술한 바와 같이, 기존의 연구에서는 $p'_{i(BP)}$ 이후 거동을 고려하지 않았기 때문에, 전이구간에서 고결모래의 전단강도와 점착력을 예측한 식 (5), (6)은 $p'_{i(BP)}$ 이후에 측정된 K-7호사와 부산사의 전단강도와 점착력을 이용하여 검증하였다.

그림 9는 식 (5)에 의해 추정된 고결된 K-7호사와 부산사의 전단강도와 삼축시험에서 측정된 전단강도를 비교한 결과로써, 전이구간에서도 고결모래의 전단강도는 식 (5)를 통해 비교적 정확하게 예측되었다. 반면, 그림 10은 식 (6)을 검증하기 위해 전이구간에서 K-7호사와 부산사의 점착력을 비교한 결과로써, 낮은 점착력 구간에서는 식 (6)에 의한 예측값이 측정값보다 다소 과소

평가되었으나, 30kPa 이상의 점착력에서는 과대평가되었다. 즉, 약한 고결결합이 형성되었거나 구속압에 의해 고결결합이 파괴되어 30kPa 이하 정도의 점착력만을 발휘하는 고결시료의 경우, 예측된 점착력보다 파괴에 의해 점착력의 감소가 작게 나타나지만, 비교적 고결결합력이 강하거나 구속압에 의한 고결결합력의 파괴정도가 적은 고결시료의 실제 점착력은 식 (6)에 의한 예측값보다 다소 작게 측정되었다. 이와 같이 전이구간에서 점착력보다 전단강도의 추정이 좀 더 정확한 이유는, 고결결합의 파괴정도에 의해 점착력 변화가 크기 때문에 전이구간에서 정확한 점착력의 추정은 난이한 반면, 전이구간에서는 고결결합력에 비해 큰 구속압이 작용되어 마찰성분이 점착력 성분보다 고결모래의 전단강도에 미치는 영향이 더 크기 때문이다.

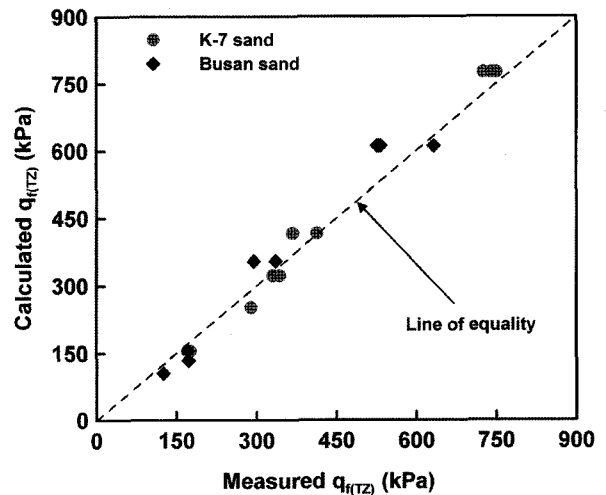


그림 9. 전이구간에서의 고결모래 전단강도 비교

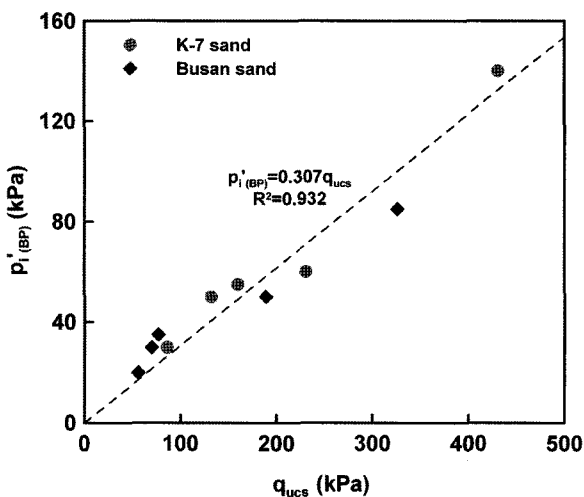


그림 8. 일축압축강도와 고결결합 파괴구속압($p'_{i(BP)}$) 관계

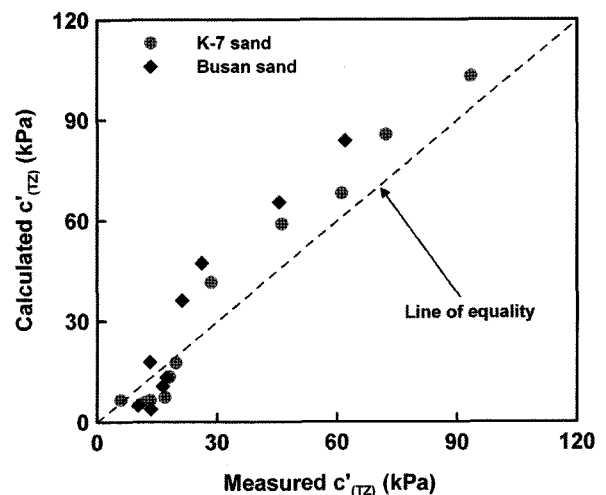


그림 10. 전이구간에서의 고결모래 점착력 비교

5. 결론

본 연구에서는 구속압에 의한 고결결합 파괴 전후를 고려하여, 고결모래의 전단강도와 점착력 추정식을 유도하고, 다양한 모래와 고결유발제를 이용한 각종 실험 결과로부터 추정식을 검증하였다. 또한 고결결합 파괴 구속압과 일축압축강도의 관계를 검토하였다. 본 연구에서 나타난 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 구속압에 의해 고결모래의 입자간 결합이 파괴되지 않은 고결지배구간에서, 고결모래의 전단강도는 일축압축강도와 미고결 모래의 전단강도의 합으로 표현되었다. 또한 고결모래의 점착력은 시료의 마찰각과 일축압축강도의 함수로 유도되었다.
- (2) 실험결과에 근거하여 고결결합이 파괴되어 점착력이 감소하기 시작하는 구속압, 즉 고결결합 파괴구속압($p'_{i(BP)}$)을 결정하였으며, 이때, $p'_{i(BP)}$ 는 시료의 일축압축강도와 선형 비례관계로 나타났다.
- (3) $p'_{i(BP)}$ 보다 큰 구속압이 시료에 가해져 고결결합이 파괴되는 전이구간에서는 고결모래의 전단강도가 비교적 일정하게 유지됨을 가정하여 고결모래의 전단강도와 점착력을 유도하였다.
- (4) 실내 삼축압축시험과 일축압축시험 결과를 이용하여 추정된 고결모래의 전단강도와 점착력을 검증한 결과, 고결지배구간에서의 이론적인 예측값은 실험결과와 매우 일치하였다. 반면, 구속압에 의한 결합 파괴정도의 예측이 난이한 전이구간에서의 점착력 추정은 다소 부정확 하였으나, 추정된 전이구간의 전단강도는 실험에서 측정된 전단강도와 비교적 잘 일치하였다.
- (5) 이상의 연구결과는 고결모래의 강도특성인 전단강도와 점착력, 그리고 고결결합이 파괴되는 구속압을 고결모래의 일축압축시험으로부터 간단하고 정확하게 결정할 수 있음을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호:C104A1000009-06A0200-00800)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김기영, 박한규, 전제성 (2005), "Cemented sand and gravel 재료의 강도특성", *한국지반공학회논문집*, Vol.21, No.10, pp.61-71.
2. 이문주, 최성근, 추현욱, 조용순, 이우진 (2007a), "응력조건에 따른 고결모래의 강도정수 평가", *한국지반공학회논문집*, Vol.23, No.5, pp.143-151.
3. 이문주, 최성근, 추현욱, 조용순, 이우진 (2007b), "고결모래의 강도특성에 대한 영향요인 분석", *한국지반공학회논문집*, Vol.23, No.12, pp.75-82.
4. 이우진, 이문주, 최성근, 홍성진 (2006), "고결(Cementation)에 따른 모래의 비배수 전단거동 변화", *한국지반공학회논문집*, Vol.22, No.4, pp.85-94.
5. Abdulla, A. A., and Kioussis, P. D. (1997), "Behavior of cemented sands - I. Testing", *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.21, pp.533-547.
6. Acar, Y. B., and El-Tahir, E. A. (1986), "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.11, pp.1001-1015.
7. Airey, D. W. (1993), "Triaxial testing on naturally cemented carbonate soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.9, pp.1379-1398.
8. Asghari, E., Toll, D. G., and Haeri, S. M. (2003), "Triaxial behaviour of a cemented gravelly sand, Tehran alluvium", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.21, pp.1-28.
9. Clough, W. G., Iwabuchi J., Rad N. S., and Kuppusamy, T. (1989), "Influence of cementation on liquefaction of sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1102-1117.
10. Clough, W. G., Sitar N., and Bachus R. (1981), "Cemented sands under static loading", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.107, No.6, pp.799-817.
11. 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*, ASCE, Vol.133, No.2, pp.197-205.
12. Coop, M. R., and Atkinson, J. H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, Vol.43, No.1, pp.53-67.
13. Dupas, J. and Pecker, A. (1979), "Static and dynamic properties of sand-cement", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, No.3, pp.419-436.
14. Huang, J. T., and Airey, D. W. (1993), "Effects of cement and density on an artificially cemented sand", *Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks*, Anagnostopoulos et al., eds., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol.1, pp.553-560.
15. Ismail, M. A., Joer, H. A., Sim, W. H., and Randolph. M. F. (2002a), "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.128, No.6, pp.520-529.
16. Ismail, M. A., Joer, H. A., and Randolph, M.F. (2002b), "Cementation of porous materials using calcite", *Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp.313-324.
17. Joshi, R. C., Achari, G., Kaniraj, S. R., and Wijeweera, H. (1995), "Effect of aging on the penetration resistance of sands", *Canadian Geotechnical Journal*, NRC, Vol.32, pp.767-782.
18. Mesri, G., Feng, T. W., and Benak, J. M. (1990), "Postdensification penetration resistance of clean sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.7, pp.1095-1115.

19. Mitchell, J. K., and Solymar, Z. V. (1984), "Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.110, No.11, pp.1559-1576.
20. O'Rourke, T. D., and Crespo, E. (1988), "Geotechnical properties of cemented volcanic soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.10, pp.1126-1147.
21. Rad, N. S., and Clough, G. W. (1982), "The influence of cementation on the static and dynamic behavior of sands", Report No. 59, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, Calif.
22. Schmertmann, J. H. (1991), "The mechanical aging of soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.9, pp.1288-1330.
23. Schnaid, F. Prietto, P. D. M., and Consoli, N. C. (2001), "Characterization of cemented sand in triaxial compression", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.10, pp.857-868.

(접수일자 2008. 7. 24, 심사완료일 2008. 10. 22)