

시추 안정액 배합설계에 따른 공벽 붕괴방지 효과에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Effect of Drilling Fluid with Different Mix Designs for Bore Hole Collapse Prevention

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik
최 정 혁² Choi, Jung-Hyuk
한 윤 수³ Han, Yun-Su

Abstract

This paper presents the results of a reduced-scale physical model investigation into the effect of drilling fluid with different mix designs for bore hole collapse prevention. The bore hole collapse prevention mechanism for the bentonite based drilling fluid was first discussed together with the effect of conditioning with different additives on engineering characteristics of bentonite based drilling fluid. Reduced-scale model tests were then carried out considering field procedures for cases with a decomposed granitic soil with 20% fines and a sand with various drilling fluids with different mix designs. The results indicated that the addition of polymer to the bentonite based drilling fluid decreases the amount of drilling fluid injected, the drilling fluid infiltration thickness and increases the final depth of excavation. Also revealed is that the effect of polymer on the performance of drilling fluid is more pronounced in the decomposed granite soil with 20% fines than the sand. Practical implications of the findings from this study are discussed in great detail.

요 지

본 논문에서는 지반 시추시 공벽붕괴 방지를 위해 적용되는 시추 안정액(drilling fluid)의 다양한 배합설계에 따른 공벽붕괴 방지 효과에 대한 실험적 연구 결과를 다루었다. 이를 위해 먼저 벤토나이트 계열 안정액의 공벽 붕괴 방지 메커니즘을 검토하였으며 아울러 벤토나이트계 안정액의 배합(conditioning)에 따른 안정액의 성능지표 변화에 대한 실험결과를 간략히 기술하였다. 또한 지반시추(굴착) 및 안정액 투입을 간략히 모사하는 토조 장치를 구축하여 세립분이 20% 포함된 화강풍화토 및 모래지반을 대상으로 다양한 배합으로 조성된 벤토나이트계 안정액에 대한 실험을 수행하고 안정액 투입량, 수평 침투범위, 굴착가능 깊이 등을 측정하여 공벽붕괴 방지 효과를 고찰하였다. 그 결과 벤토나이트에 폴리머를 추가할 경우 안정액 투입량 및 수평 침투범위가 굴착가능 깊이가 증가하는 것으로 나타났으며 폴리머의 공벽유지 기능 향상 정도는 모래층보다 화강풍화토 지반에서 보다 뚜렷하게 발휘되는 것으로 검토되었다. 본 논문에서는 도출된 연구결과가 실무적 차원에서 지니는 의미에 대한 내용을 기술하였다.

Keywords : Drilling fluid, Reduced scale model test, Bentonite, RCD pile, Slurry wall

1 정회원, 성균관대학교 건축토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Architecture & Civil Sungkyunkwan Univ., Tel: +82-31-290-7537, Fax: +82-31-290-7549, csyoo@skku.edu, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

3 비회원, 현대중공업(주) 주임연구원 (Researcher, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

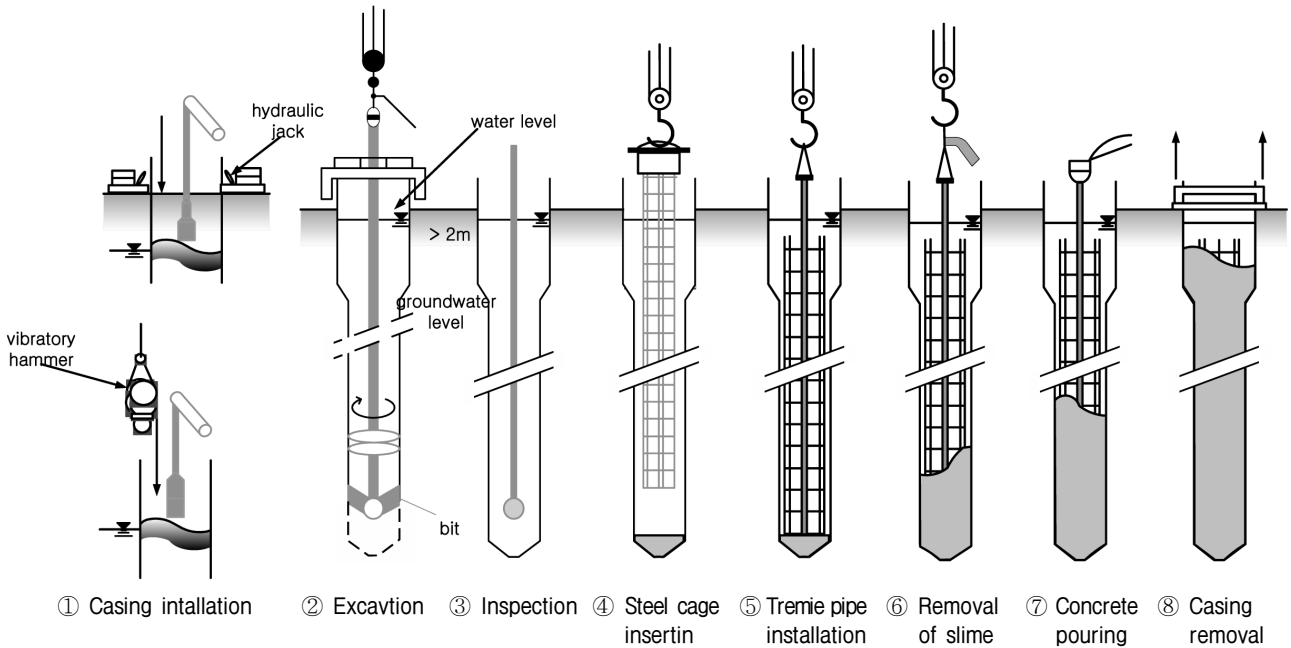


Fig. 1. Schematic view of RCD pile construction procedure

1. 서론

현장타설말뚝(reverse circulation drilling, RCD 말뚝)이나 지하연속벽(diaphragm wall) 등의 지반 굴착을 동반하는 지반구조물 설치에 필요한 가장 근본적인 기술은 시추공벽의 안정화에 관련된 기술이라고 할 수 있다. 즉, 육상 혹은 해양 자켓 구조물 시공 시 구조물 기초로 활용되는 RCD 말뚝 설치시 공벽 붕괴가 발생할 위험성을 경우 일반적으로 그라우팅을 이용한 지반보강이 수행되는데 이 경우 지반보강에 따른 공사지연이 발생하고 공사비 증가로 이어지며 전체 공정에 문제가 발생된다. 따라서 시추공벽의 안정화는 공기 단축 및 공사비 절감을 위한 매우 주요한 공정이라고 할 수 있다.

Fig. 1은 RCD 공법의 시공 순서를 도식화 한 것으로 일반적으로 RCD 설치시 특수 비트로 굴착하면서 공벽을 유지를 위해 천공부에 안정액을 투입하여 정수압으로 공벽 붕괴를 방지하게 되는데 이때 안정액으로는 벤토나이트를 주로 사용하며 안정액의 수위는 주변 지하수위보다 약 2m 높게 유지하여 드릴 파이프를 물을 흡상하면서 선단의 슬라임을 제거한다. 또한 흡상된 물은 침전시켜 청수로 만든 후 다시 굴착공 내로 투입하여 안정액과 혼합하여 재사용하며 이때 지표 부근은 공벽 붕괴방지를 위해 케이싱을 설치한다. 한편, Fig. 2는 지중연속벽체의 시공 순서를 도식한 것으로 먼저 굴착 후 인터로킹 파이프를 설치하고 안정액을 투입하여 시추

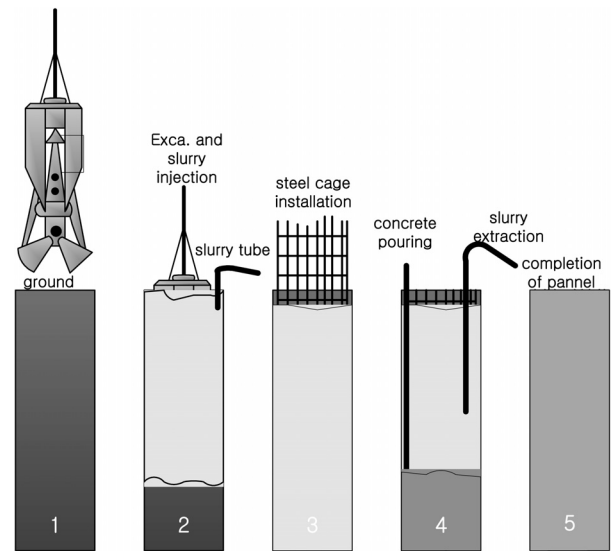


Fig. 2. Schematic view of diaphragm wall construction procedure

공벽을 유지하면서 기 조립된 철근망 삽입 후 트레미 파이프 이용하여 콘크리트를 타설한다. 타설 완료 후 인터로킹 파이프를 제거하여 시공을 완료한다. 지중연속벽 시공중 공벽 붕괴 위험 저감을 위한 안정액으로는 벤토나이트나 증점제(CMC) 계열의 안정액을 사용한다.

벤토나이트는 몬트모릴로나이트 광물이 85%이상 포함된 매우 미립자의 점토이며 나트륨(Sodium)계 및 칼슘(Calcium)계 두 종류가 있다. 일반적으로 칼슘계 벤토나이트가 풍부하나 나트륨계 벤토나이트가 팽창성이 강하므로 지반 굴착공 안정화용으로 활용하기 위해서

는 칼슘계 벤토나이트를 나트륨계로 개조하여 사용해야 한다. 또한 나트륨계 벤토나이트는 칼슘계 벤토나이트 보다 액성한계가 높다. 벤토나이트의 이러한 팽창 특성과 간극수에 의해 발생하는 흡습성(hygroscopic) 압력, 그리고 이온화 및 양이온 교환 등의 현상 때문에 나트륨계 벤토나이트 용액은 겔(gel) 상태로 변하게 되며 삼투현상으로 인해 겔형태는 다시 케이크 형태로 변하게 된다.

나트륨계 벤토나이트에는 나트륨 양이온(Na^+)이 존재하며 물에 존재하는 양이온간의 이온교환이 발생하며 이러한 이온교환된 양이온과 흙입자 표면의 음이온이 전기 이중층을 형성하여 굴착공벽의 안정화에 기여하게 된다. 아울러 벤토나이트의 고화특성은 벤토나이트 용액을 이온화로 인한 전기적 결합력에 의해 용액의 상태를 일정하게 유지하도록 한다. 즉, 벤토나이트 용액은 가만히 있는 상태에서 겔 상태로 유지되나 교란시킬 경우 전기적 결합력이 깨져버려 겔 상태가 용액상태로 변하게 된다.

투수가 원활한 흙의 수직 굴착공 내부를 벤토나이트 용액으로 채울 경우 벤토나이트 용액의 틱소트로피(thixotropy) 특성으로 인해 압력상태로 용액이 흙입자 사이의 간극으로 침투하게 된다. 흙입자 사이의 간극으로 침투한 벤토나이트 용액은 젤리 형태로 바뀌게 되어 흙 표면을 불투수층으로 만들게 된다. 이때 벤토나이트 용액의 비중이 물의 비중보다 높기 때문에 흙 입자의 겉보기 점착력(apparent cohesion)이 증가하게 되며 따

라서 굴착공벽 흙입자들 간의 표면장력 또한 증가하게 된다. 입자사이에 침투한 벤토나이트 용액의 겔화로 인한 표면장력의 증가는 결국 흙의 자립력을 증가시키고 따라서 굴착공벽의 안정화를 가져오게 된다(Fig. 3(a)). 반면 투수성이 낮은 흙의 굴착공을 벤토나이트 용액으로 채울 경우 벤토나이트 용액이 지반 내로 침투하지 못하기 때문에 굴착공벽 표면에 얇은 필름층이 형성된다. 이러한 경우 공 내에 채워진 현탁액의 수두가 굴착공벽의 안정화에 기여하게 된다(Fig. 3(b)).

이와 같이 지반굴착을 포함하는 다양한 공법에서 시추공벽의 붕괴를 방지하기 위해 안정액이 사용되는데 안정액의 주재료는 벤토나이트를 대부분 활용하며 물과의 배합비는 지반 조건 및 시공 조건에 따라서 달라지나 지중연속벽의 경우 4~8%의 배합비를 사용할 것을 제안하고 있다.

본 연구와 관련된 국내 연구로는 벤토나이트 안정액의 최적 배합비에 대한 연구를 수행한 Kwon et al.(1999)의 연구를 들 수 있는데 이들은 LNG 현장의 지중연속벽체에 적용되는 안정액의 최적 배합비 산정을 위한 연구결과를 제시한 바 있다. 한편, Hong et al.(2006)은 지중연속벽 시공을 위한 트렌치 굴착시 지반변형에 관한 모형실험을 수행하여 트렌치 굴착면 내 안정액의 수위저하에 따른 굴착면 및 굴착 배면 지반의 변형 거동을 고찰하였다. 아울러서 Nguyen et al.(2011)은 수정 Fluid Loss 실험을 수행하여 다양한 작용압력 하에서 안정액 필터케이크의 투수성에 관한 연구를 수행하고 그 결과

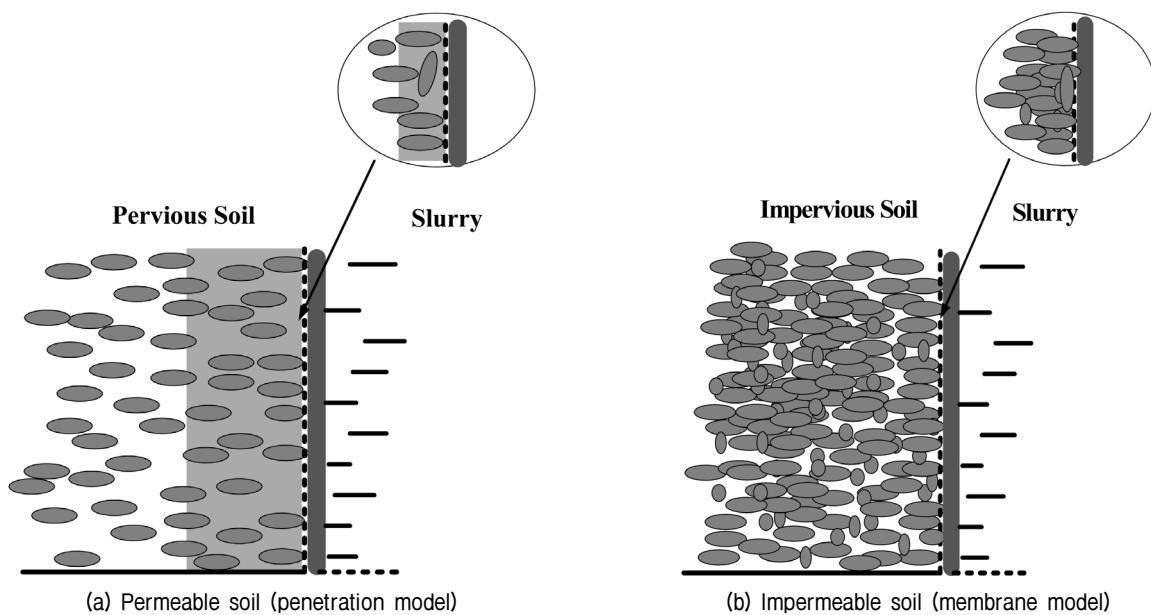


Fig. 3. Soil stabilization mechanism of bentonite for different types of soil (after Maidl et al., 2012)

를 보고하였다. 국외 관련 연구로서 Lal (1999)의 연구를 들 수 있는데 여기서는 세일로 이루어진 지반에서 시추시 이루어질 경우 발생하는 안정액과 세일의 전단강도의 상호작용에 관한 연구내용을 다루었으며 연구 결과를 토대로 세일 지반에 시공되는 시추공의 안정성 확보 방안에 대한 내용을 제시하였다. 또한 Fritz(2002)의 연구에서는 투수성이 매우 높은 지반에서의 슬러리 쉴드 TBM 터널 시공시 사용되는 벤토나이트 안정액의 배합에 관한 연구를 수행하고 최적 배합비에 대한 결과를 제시한바 있다. 최근 들어 Wang and Sterling(2007)은 수평 시추시 시추공 안정성에 관한 연구를 수행한바 있는데 여기서는 수치해석을 통해 필터케이프를 모델링하여 다양한 조건에서의 시추공 안정성 평가에 관한 연구를 수행하였다.

위에 제시된 대부분의 연구는 나름대로의 중요한 의미를 가지고는 있으나 안정액 배합에 따른 시추공의 안정성 확보 성능에 관한 구체적인 실험적 연구는 매우 미진한 실정이며 따라서 본 연구에서는 벤토나이트 기반의 안정액을 대상으로 배합조건에 따른 공벽 붕괴방지 성능에 대한 실험적 연구를 수행하고 그 결과를 종합적으로 분석하였다.

3. 모형 실험

본 연구에서는 안정액 배합에 따른 공벽 붕괴 방지 성능평가를 위해 모형 토조를 이용한 축소 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 제한적이기는 하나 실제 시공 조건과 유사한 환경에서의 공벽 붕괴 방지 효과에 대한 정량적인 검토가 가능하도록 수행하였다.

3.1 모형토조 및 사용재료

1) 모형토조

모형실험에서는 길이 0.4m 깊이 0.24m 폭 0.14m의 두께 20mm의 아크릴로 제작된 토조를 사용하였다(Fig. 4). 실제 시공과정은 3차원 조건이나 본 실험에서 사용

한 토조는 2차원 평면변형을 상태를 구현하는 것으로서 실제 시공조건을 단순화 하였으므로 실험 결과 또한 이에 따른 제한사항이 있다고 할 수 있다.

2) 사용재료

모형지반으로는 화강풍화토 및 모래 두 가지를 고려하였는데 화강풍화토는 세립분 함유량에 따른 결과 분석을 위해 #200체 통과 세립분 함유량을 인위적으로 20%로 증가시켜 사용하였다. Table 1은 입도분포 특성지수와 지반 조성상태의 투수계수를 나열하고 있다(Fig. 5 참조). 입도분포 특성을 이용하여 통일분류법(USCS)에 준하여 분류한 결과 화강풍화토와 모래 지반은 각각 SM과 SP로 분류되었다. 아울러 모형지반의 함수비는 자연상태의 함수비로서 약 1% 정도의 값을 보이는 것으로 검토되었다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 모래와 화강풍화토에 대한 x-ray 회절분석 결과를 보여주고 있다. 모래의 경우 석영(quartz), 규산염(attapulgite), 장석(felds), 녹니석(chlorite) 등의 광물이 주를 이루는 것으로 검토되었으며 화강풍화토의 경우 석영, 장석과 운모(mica)로 구성되어 있다.

본 연구에서는 벤토나이트에 폴리머, 유동제 및 CMC 등을 첨가하여 안정액을 제조하였다. Table 2는 본 연구에서 사용한 벤토나이트, 폴리머, 유동제 및 CMC의 특성을 정리·요약하고 있다.

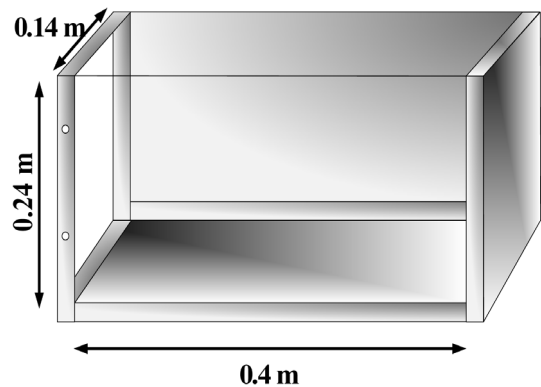
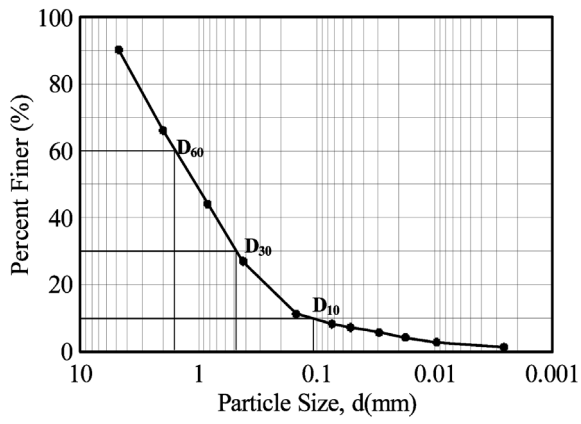


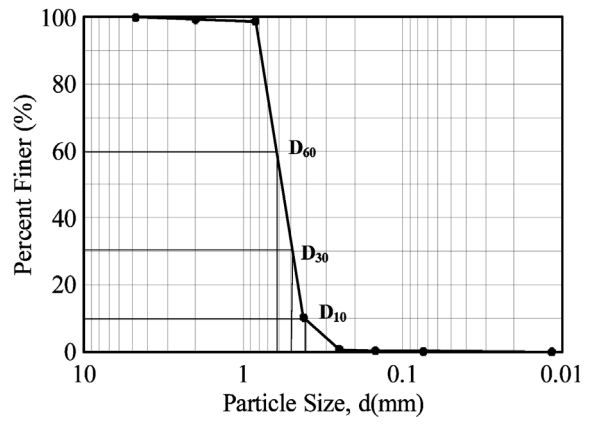
Fig. 4. Schematic view of test box

Table 1. Grain size characteristics and permeability

Type	Effective size, D_{10} (mm)	Uniformity coefficient, C_u	Coefficient of curvature, C_g	Hydraulic conductivity, k (cm/sec)
Decomposed granatic soil (WS)	0.11	12.72	2.33	0.0097
Sand (S)	0.41	1.68	1.06	0.041



(a) Weathered granite soil



(b) Sand

Fig. 5. Particle size distribution curves for soils used

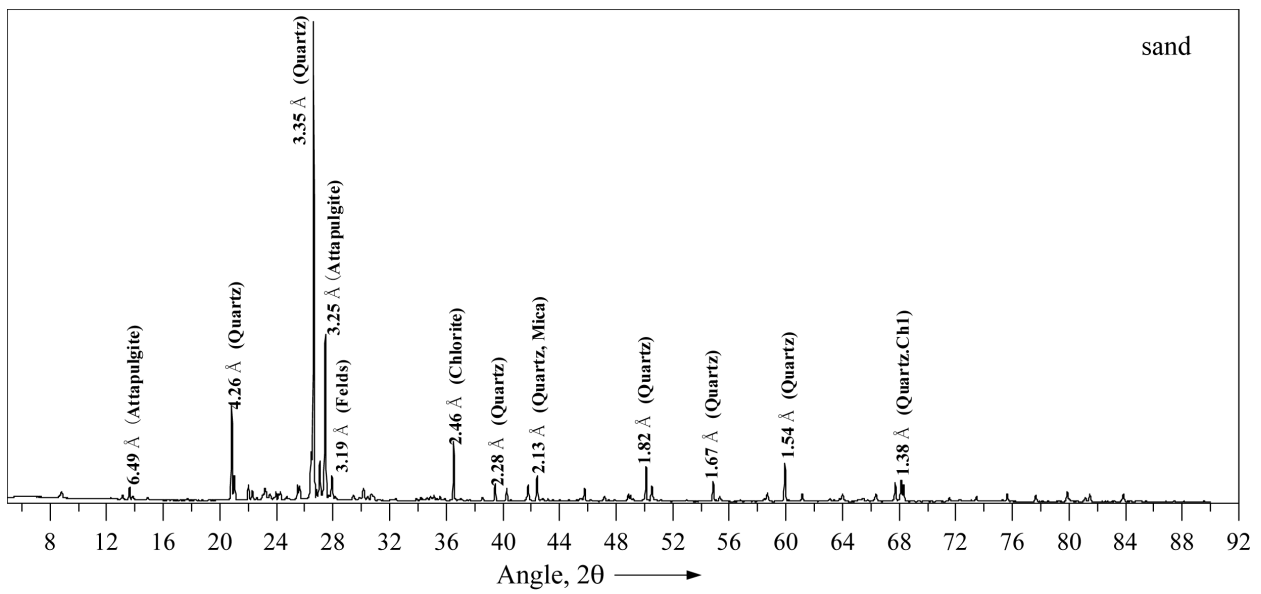


Fig. 6. Results of x-ray diffraction analysis - sand

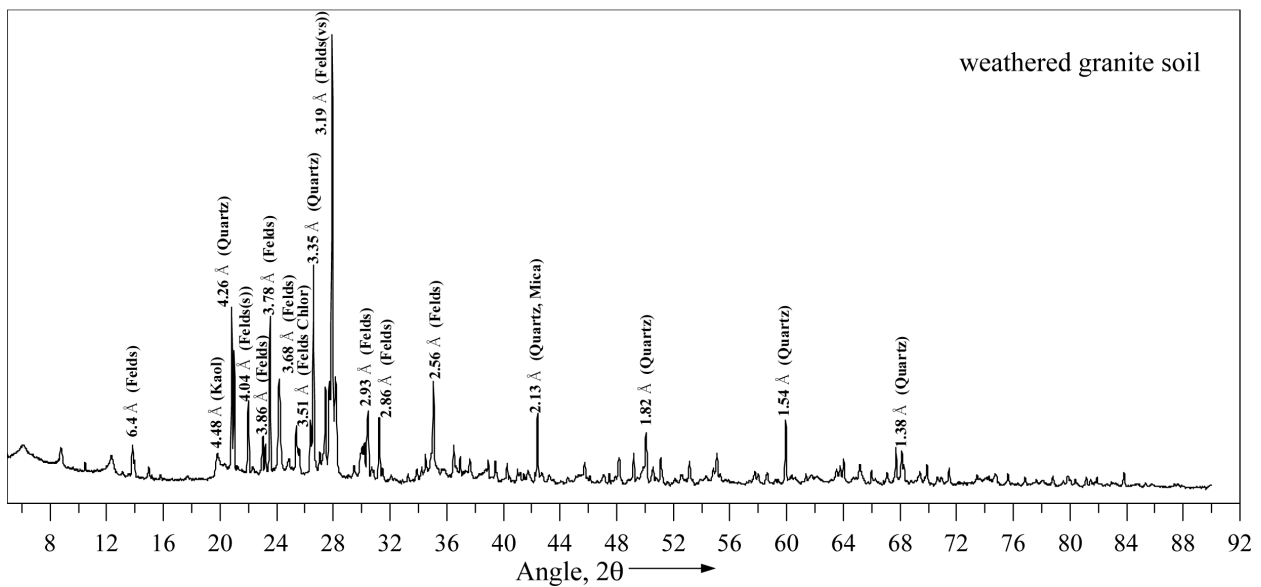


Fig. 7. Results of x-ray diffraction analysis - weathered granite soil

3.2 실험 방법

지반 굴착 및 안정액 투입의 공정은 매우 복잡하나 본 모형실험에서는 실제 지반 시추(굴착) 및 안정액 주입 과정을 단순화하였다. 이때 굴착과정은 앞서 기술한 모형토조에 원 지반을 조성한 후 굴착부를 목재(폭 14cm × 길이 6cm 높이 3cm)로 조성하고 목재 블록을 제거하는 방법으로 모사하였다(Fig. 8 참조). 이때 초기 굴착부의 함몰

을 방지하기 위해 가이드 블록을 설치하여 케이싱을 모사하였으며 아울러 일정량의 안정액을 굴착과 동시에 주입하여 시추 공벽의 안정성을 확보하도록 하였다.

3.3 안정액 배합비 선정

모형실험에서는 화강풍화토 및 모래지반을 대상으로 안정액 배합을 고려하였다. 즉, 각 지반종류별로 (1) 벤토

Table 2. Material characteristics

Bentonite (DH MUD-150)		Polymer (Super Mud Dry)	Dispersing Agent (Sodium Tripoly Phosphate)
General	Physical		
<ul style="list-style-type: none"> Water content : 12% PH : 11 #200 sieve retained : 20 	<ul style="list-style-type: none"> Marsh viscosity : > 40 filtered water : 20 ml 	<ul style="list-style-type: none"> White powder Viscosity : > 80 PH : 7.5 	<ul style="list-style-type: none"> Specific gravity : 0.7 Disintegration at boiling PH : 11.5

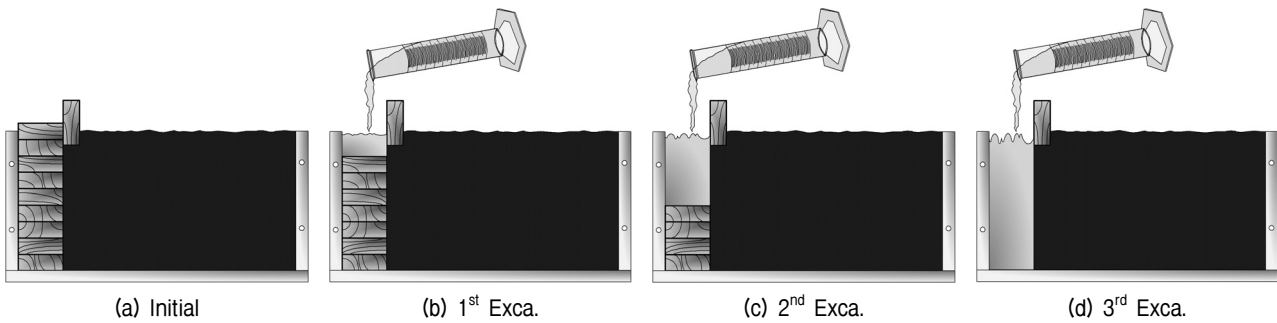
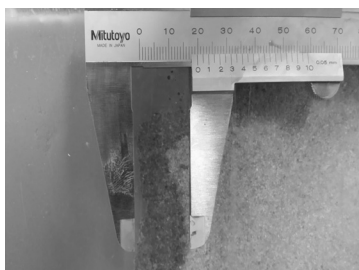


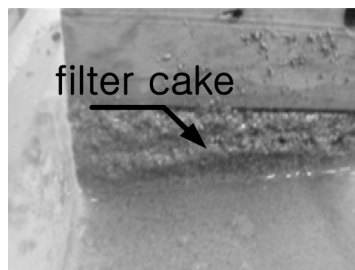
Fig. 8. Schematic diagram of excavation and drilling fluid injection process

Table 3. Cases tested

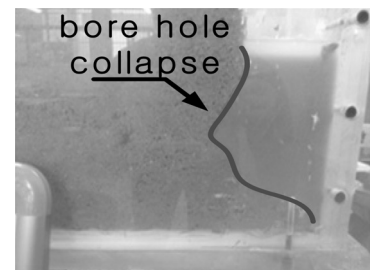
Ground	Drilling fluid	% by weight	Case symbol
Decomposed granitic soil (WS)	Bentonite	2.0%	WS-B
	Bentonite + Polymer	2.0% : (0.05~0.2)%	WS-B-P
	Bentonite + Polymer + Dispersing agent	2.0% : 0.1% : (0.05~0.1)%	WS-B-P-D
	Bentonite + CMC	2.0% : 0.1%	WS-B_CMC
Sand (S)	Bentonite	2.0%	S-B
	Bentonite + Polymer	2.0% : (0.05~0.2)%	S-B-P
	Bentonite + Polymer + Dispersing agent	2.0% : 1.0% : (0.05~0.1)%	S-B-P-D
	Bentonite + CMC	2.0% : 1.0%	S-B-CMC



(a) Permeated layer thickness measurement



(b) Formation of filter cake



(c) Bore hole collapse

Fig. 9. Photos taken during test

나이트 안정액, (2) 벤토나이트+폴리머 안정액, (3) 벤토나이트+폴리머+유동제 안정액, (4) 벤토나이트+CMC(중점제) 안정액 등 네 가지 배합의 안정액에 대한 실험을 수행하였다(Table 3 참조). 이러한 배합비는 일본품질기준(JBAS 1977)과 미국 API(American Petroleum Institute) 기준(API 2010)을 참조하여 산정된 최적 배합비 관련 연구결과(Kwon et al., 1999, Yoo and Choi, 2014)를 고려하여 설정하였다.

한편, 안정액의 성능은 안정액 투입량, 수평침투 범위, 붕괴단계 등 세 가지를 종합적으로 분석하여 평가하였으며 이때 수평 침투범위는 안정액 투입 후 수위가 안정화된 후 측정하였다. Fig. 9는 공벽 붕괴 확인 및 수평 침투 범위 확인 과정 등에 대한 사진 자료를 보여주고 있다.

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 폴리머의 공벽 유지효과

앞에서 제시한 안정액 배합비에 따른 공학적 특성 평가에서는 벤토나이트 안정액에 폴리머를 첨가할 경우 안정액으로서의 공학적 특성이 향상되는 것으로 검토된 바 있다. 본 연구에서는 벤토나이트(2%) 단일 안정액과 폴리머가 0.1%가 추가된 벤토나이트(2%)+폴리머(0.1%)

혼합 안정액에 대한 공벽 유지 효과를 검토하였다.

Table 4는 화강풍화토 및 모래지반에서 수행된 실험 결과를 보여주고 있다. 먼저 화강풍화토에 대해 벤토나이트(2%) 조건(WS-B2%)과 벤토나이트(2%)+폴리머(0.1%) 조건(WS-B2%-P0.1%)에 대한 공벽유지 효과를 살펴보면 WS-B2%의 경우 안정액 투입량이 0.58L 및 수평 침투범위가 3.8cm에 달하고 5단계 굴착에서 공벽이 붕괴된 반면 폴리머가 첨가된 WS-B2%-P0.1%의 경우 안정액 투입량이 0.31L로 감소하였으며 수평 침투범위 또한 2.0cm로 감소됨과 아울러 공벽 붕괴 없이 최종 굴착단계까지 도달한 것으로 검토되었다. 한편, 모래지반의 결과를 살펴보면 벤토나이트(2%) 안정액(S-B2%)의 경우 수평 침투범위가 4.5cm에 달하고 4단계에서 공벽이 붕괴 되었으나 벤토나이트(2%)+폴리머(0.1%) 안정액(S-B2%-P0.1%)의 경우 수평 침투범위가 2.5cm로 감소함과 아울러 최종굴착 이전 단계(7단계)까지 붕괴 없이 굴착이 가능한 것으로 검토되었다. 이러한 결과는 폴리머가 안정액의 공벽유지 효과를 상승시키는 매우 중요한 첨가제라는 점을 의미하며 결국 폴리머 첨가시 굴착벽면의 필터 케이크 형성을 용이하게 하여 안정액의 침투를 억제하여 공벽 붕괴를 방지할 수 있는 것으로 검토되었다.

Table 5와 Table 6은 각각 벤토나이트+폴리머 혼합

Table 4. Effect of polymer on performance of bentonite based drilling fluid

	Decomposed granatic soil		Sand	
	WS-B2%	WS-B2%-P0.1%	S-B2%	S-B2%-P0.1%
Drilling fluid injected per each excavation step (L)	0.58	0.31	0.65	0.40
Thickness of infiltrated zone (cm)	3.8	1.7	4.5	2.5
Collapse step	5	8 (final)	4	7

Table 5. Effect of polymer content on performance of bentonite+polymer drilling fluid - decomposed granatic soil

	WS-B2%-P0.05%	WS-B2%-P0.1%	WS-B2%-P0.2%
Drilling fluid injected per each excavation step (L)	0.37	0.31	0.29
Thickness of infiltrated zone (cm)	2.2	1.7	1.5
Collapse step	7	8 (final)	8 (final)

Table 6. Effect of polymer content on performance of bentonite+polymer drilling fluid - sand

	S-B2%=P0.05%	S-B2%-P0.1%	S-B2%-P0.2%
Drilling fluid injected per each excavation step (L)	0.49	0.40	0.34
Thickness of infiltrated zone (cm)	3.1	2.5	1.9
Collapse step	6	7	8 (final)

안정액의 폴리머 혼입율에 따른 공벽유지효과를 화강 풍화토와 모래지반에 대한 결과를 제시하고 있다. 화강 풍화토에 대한 결과를 보여주고 있는 Table 5에서 제시된 결과에서 관찰할 수 있는 바와 같이 폴리머 혼입률이 0.05%에서 0.2%로 높아짐에 따라 안정액 투입량과 투수층 두께가 각각 0.47L에서 0.29L로 그리고 2.2cm에서 1.5cm로 감소함과 아울러 굴착가능 깊이 또한 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 모래지반 또한 유사한 경향을 보이는 것으로 나타나(Table 6) 결국 폴리머의 혼입률이 증가함에 따라 필터 케이크의 형성이 용이하게 되어 공벽유지 효과가 상승하는 것으로 검토되었다. 한편, 화강풍화토 지반 보다는 모래 지반에서 공벽 유지 성능 지표들이 보다 뚜렷하게 증가되는 경향이 관찰되어 세립분 함유량이 증가할수록 폴리머의 공벽유지 기능이 보다 뚜렷하게 발휘되는 것으로 검토되었다.

4.2 유동제의 공벽 유지 효과

벤토나이트+폴리머 혼합 안정액의 점성이 클 경우 안정액 투입 장비에서의 원활한 순환에 장애가 되므로 유동액을 첨가하여 점성을 감소시킨다. 따라서 본 연구에서는 유동액 첨가에 따른 벤토나이트+폴리머 안정액의 공벽유지 효과 변화여부 대한 검토를 수행하였다. 현장에서 적용되는 혼입률을 감안하여 유동액 혼입률 0.05%

및 0.1%에 국한하여 검토하였다.

Table 7과 Table 8은 각각 화강풍화토와 모래지반에 대한 결과를 제시하고 있는데 실험조건의 지반에서는 유동제 혼입률이 증가할 경우 붕괴단계(굴착깊이)에는 별다른 차이는 없으나 굴착단계별 안정액 투입량과 수평 침투범위가 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 유동제가 혼합됨에 따라 안정액의 점성이 낮아져 지반 내 침투가 용이하게 됨에 따른 것으로서 본 실험에서는 굴착 깊이의 제한성 때문에 붕괴 단계에서는 큰 차이가 없었으나 실제 현장 조건에서는 차이가 있을 수 있을 것으로 판단되어 과다한 유동제 첨가는 안정액의 성능을 저하시킬 수 있는 것으로 검토 되었다.

4.3 CMC의 공벽 유지효과

벤토나이트만으로 안정액을 제조할 경우 점성이 낮아짐에 따른 문제점 보완하기 위해 중점제(CMC)를 혼입하여 사용한다. 본 연구에서는 CMC 혼입에 따른 벤토나이트 안정액의 공벽 유지 성능 변화를 고찰하였다. CMC 혼입률은 현장에서 적용되는 혼입률을 감안하여 0.05% 및 0.1%에 국한하여 검토하였다.

Table 9와 Table 10은 각각 화강풍화토와 모래지반에 대해 CMC 혼입률에 따른 실험 결과를 제시하고 있다. 이 표에 제시되어 있는 정량적인 실험결과에 근거할 때

Table 7. Effect of dispersing agent content on performance of bentonite+polymer drilling fluid - decomposed granatic soil

	WS-B2%-P0.1%	WS-B2%-P0.1%-D0.05%	WS-B2%-P0.1%-D0.1%
Drilling fluid injected per each excavation step (L)	0.31	0.36	0.43
Thickness of infiltrated zone (cm)	1.7	1.8	2.3
Collapse step	8 (final)	8 (final)	8 (final)

Table 8. Effect of dispersing agent content on performance of bentonite+polymer drilling fluid - sand

	S-B2%-P0.1%	S-B2%-P0.1%-D0.05%	S-B2%-P0.1%-D0.1%
Drilling fluid injected per each excavation step (L)	0.40	0.41	0.43
Thickness of infiltrated zone (cm)	2.5	2.6	2.9
Collapse step	7	7	7

Table 9. Effect of CMC content on performance of bentonite+polymer drilling fluid - decomposed granatic soil

	WS-B2%	WS-B2%-CMC0.05%	WS-B2%-CMC0.1%
Drilling fluid injected per each excavation step (L)	0.58	0.56	0.53L
Thickness of infiltrated zone (cm)	3.8	3.5	3.1
Collapse step	5	5	6

Table 10. Effect of CMC content on performance of bentonite+polymer drilling fluid - sand

	S-B2%	S-B2%-CMC0.05%	S-B2%-MC0.1%
Drilling fluid injected per each excavation step (L)	0.65	0.63	0.59
Thickness of infiltrated zone (cm)	4.5	4.4	3.9
Collapse step	4	4	6

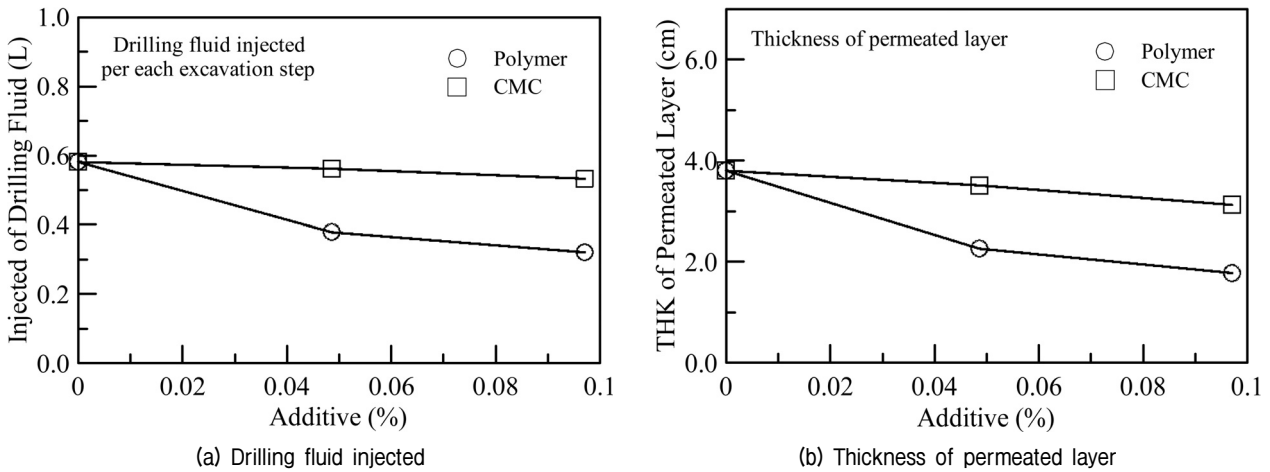


Fig. 10. Variation of performance indices with % additive (weathered granite soil)

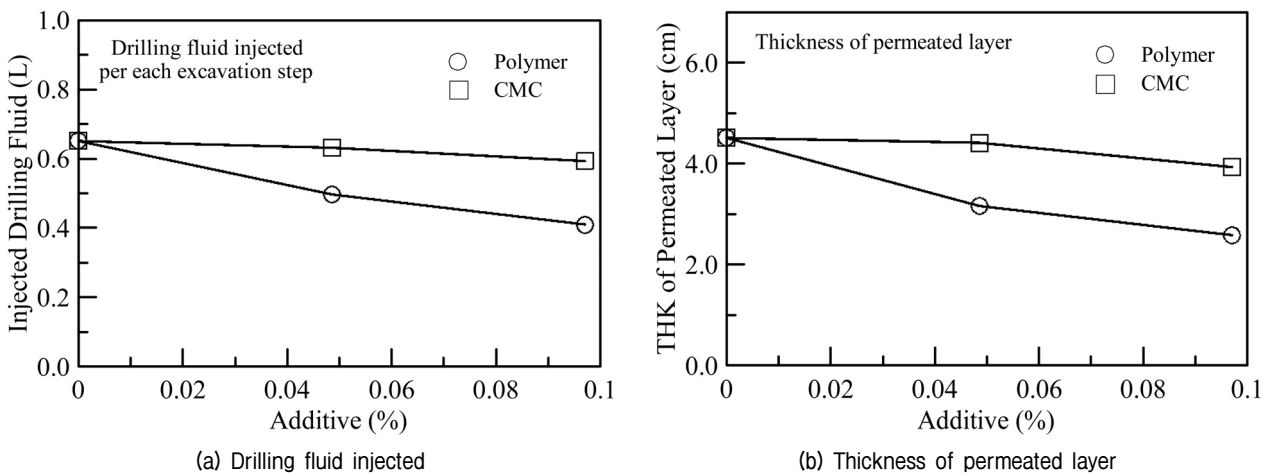


Fig. 11. Variation of performance indices with % additive (sand)

실험조건외 지반에서는 CMC 혼입률이 증가함에 따라 굴착단계별 안정액 투입량이 감소하고 수평 침투범위가 감소하여 결국 굴착 가능 깊이가 증가하는 결과를 보이고 있다. 이러한 경향은 증점제 CMC가 혼합됨에 따라 안정액의 점성이 높아져 굴착면에 필터 케이크 형성이 용이하게 되어 지반 내 침투를 억제하게 됨에 따른 것으로서 결국 벤토나이트에 CMC를 첨가함으로써 안정액의 성능을 향상시킬 수 있는 것으로 검토되었다.

4.4 폴리머와 CMC의 공벽 유지 효과 비교

Fig. 10과 Fig. 11에서는 4.2절 및 4.3절의 결과를 종합하여 각 성능지표 별로 벤토나이트 안정액의 첨가제로 사용되는 폴리머와 CMC의 공벽 유지 효과를 대상 지반별로 상대적으로 비교하였다. 이 그림에서 보이는 바와 같이 안정액 투입량 및 수평 침투범위 두께를 검토할 때 임의 혼입률에서 폴리머가 첨가된 안정액이 CMC가 첨가된 안정액에 비해 안정액 투입량 및 수평 침투범위가 작게 나타나는 경향을 관찰할 수 있다. 따라서 폴

리머가 CMC에 비해 고가인 점을 감안하여야 하나 절대적인 성능비교에서는 폴리머가 다소 우수한 성능을 발휘할 수 있는 것으로 검토되었다.

5. 결론

본 논문에서는 지반 시추시 공벽붕괴 방지를 위해 적용되는 안정액(Drilling Fluid)의 다양한 배합설계에 따른 공벽붕괴 방지 효과를 비교하였다. 이를 위해 지반굴착과 안정액 투입을 간략히 모사하는 토조 장치를 구축한 후 다양한 배합으로 조성된 벤토나이트계 안정액에 대한 실험을 수행하고 안정액 투입량, 수평 침투범위, 굴착가능 깊이 등을 측정하여 공벽붕괴 방지 효과를 고찰하였다. 본 연구 결과는 지하수위를 고려하지 않은 상태에서의 결과이며 실험에 적용한 모형지반 및 함수비 등 제한된 조건에 적용 가능하다는 제한조건이 있다. 따라서 본 연구결과를 일반화하기 위해서는 보다 다양한 조건에 대한 추가 고려가 필요할 것으로 판단된다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 벤토나이트+폴리머 혼합 안정액의 폴리머 혼입율을 증가시키에 따라 안정액 투입량 및 투수층 두께가 감소하고 굴착 가능 깊이가 또한 증가하는 것으로 나타나 공벽유지 효과가 상승하는 것으로 확인되었다. 한편, 화강풍화토 지반 보다는 모래 지반에서 공벽 유지 성능 지표들이 보다 뚜렷하게 증가되는 경향이 관찰되어 조립분 함유량이 증가할수록 폴리머의 공벽유지 기능이 보다 뚜렷하게 발휘되는 것으로 나타났다.
- (2) 유동제 혼입량이 증가할 경우 붕괴단계(굴착깊이)에는 별다른 차이는 없으나 굴착단계별 안정액 투입량과 수평 침투범위가 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타나 과도한 유동제 첨가는 안정액의 성능을 저하시킬 수 있는 것으로 확인되었다.
- (3) CMC 혼입률이 증가함에 따라 굴착단계별 안정액 투입량이 감소하고 수평 침투범위가 감소하여 결국 굴착 가능 깊이가 증가하는 결과를 보이는 것으로 나타나 벤토나이트에 CMC를 첨가함으로써 안정액의 성능을 향상시킬 수 있는 것으로 확인되었다.
- (4) 안정액 투입량 및 수평 침투범위 두께를 검토할 때

임의 혼입률에서 폴리머가 첨가된 안정액이 CMC가 첨가된 안정액에 비해 안정액 투입량 및 수평 침투범위가 적게 나타나 절대적인 성능비교에서는 폴리머가 다소 우수한 성능을 발휘할 수 있는 것으로 확인되었다.

감사의 글

This research is supported by Hyundai Heavy Industries Co. LTD. and by Grant No. 2014004636 from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation. The financial supports are gratefully acknowledged.

참고문헌 (References)

1. Kwon, Y. H., Jun, S. K., Baek, S. J., and Ariyama, M. (1999), "A Study on the Mix Design for Stabilizing Liquid of Slurry Wall", *Korean Concrete Institute Spring Conference*, pp.457-462.
2. Nguyen, T. B., Park, M., Lim, J., Choi, H., and Han, S.I. (2011), "Characteristic of Bentonite Filter Cake Vertical Cutoff Walls Evaluated by Modified Fluid Loss Test", *Journal of KGS, Korean Geotechnical Society*, February, 2011, Volume 27, No.2, pp.53-62.
3. Hong, W. P., Lee, M. K., and Lee, J. H. (2006), "Model Tests on Ground Deformation during Trench Excavation for Diaphragm Walls", *Journal of KGS, Korean Geotechnical Society*, December, 2006, Volume 22, No.12, pp.77-88.
4. American Petroleum institute RP 13B-1 (1990), "Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water - based Drilling Fluids".
5. American Petroleum Institute 13A (2010), "Specification for Drilling Fluids Materials".
6. Fritz, P., Hermanns, S., and Heinz, R. (2002), "Modified Bentonite Slurries for slurry Shields in High Permeable Soils", *4th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp.33-39.
7. JBAS (1977), "Japan Bentonite Manufacturers Association Standard".
8. Lal, M. (1999), "Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength", *Proceedings of SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference*, Society of Petroleum Engineers, pp.1-10.
9. Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., and Wehrmeyer, G. (2012), *Mechanized Shield Tunnelling 2nd Edition*, Wiley-Blackwell.
10. Wang, X. and Sterling, R. L. (2007), "Stability Analysis of a Borehole Wall during Horizontal Directional Drilling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.22, pp.620-632.
11. Yoo, C. and Choi, J. H. (2014), "Development of Bore Hole Collapse Prevention Methodology using Drilling Fluid", Report to Hyundai Heavy Industries.

Received : October 14th, 2014
 Revised : December 2nd, 2014
 Accepted : January 8th, 2015