

심층혼합처리 공법의 도심지 공사 적용성 연구

김영석¹, 주진현^{1*}, 조용상²

¹한국건설기술연구원 지반연구실, ²삼성물산 건설부문 TA팀

Applicability Study on Deep Mixing for Urban Construction

YoungSeok Kim¹, Jinhyun Choo^{1*} and YongSang Cho²

¹Geotechnical and Tunnelling Research Division, KICT

²TA Team, Samsung E&C

요약 본 연구에서는 일반적으로 연약지반 개량 공사에 사용하는 심층혼합처리 공법을 도심지 공사에서 지반개량 공법으로 적용하는 방안을 평가하였다. 심층혼합처리 공법을 협소한 도심지 현장에서도 시공이 가능하도록 소형화시킨 시공 장비를 사용하여 서울 시내 재개발 현장에서 기초 지반개량 목적으로 적용하고 개량한 지반의 강도 특성, 지반교반 시 발생한 진동, 시공위치와 인접한 석축구조물에 발생한 변위를 측정하였다. 강도 시험 및 현장계측 결과 심층혼합처리 공법은 원지반의 강도를 효과적으로 개량시켰으며 시공 시 발생시킨 진동과 인접 구조물에 발생한 변위가 미소하여 도심지 공사에서 요구하는 기준을 만족시키는 것으로 판단되었다. 따라서 심층혼합처리 공법은 소음 및 진동 문제가 중요한 고려사항인 도심지 공사에서 기초공법으로 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract The deep mixing method, which is generally considered as a method for improving soft ground, is assessed in terms of its applicability for urban construction. Using small equipment tailored to perform deep mixing in congested urban areas, deep mixing was performed to reinforce the foundation ground of a retaining wall in a redevelopment site in Seoul. Strengths characteristics, construction vibrations and displacements induced to an adjacent old masonry wall were evaluated by laboratory tests and field monitoring. The results indicate that the strength of ground was improved appropriately whilst the vibrations and displacements induced by deep mixing were slight enough to satisfy the general requirements for construction works in urban environments. Therefore, it is concluded that deep mixing method can be a practical option for foundation methods in urban construction works where minimizing noise and vibrations is an important concern.

Key Words : Deep mixing method, Soil mixing, Soil-cement, Ground improvement, Urban construction

1. 서론

도심지 공사에서는 공법 선정 시 공법의 역학적인 성능과 경제적인 특성 외에도, 기존에 건설된 구조물들에 큰 피해를 주지 않아야 하고, 인근 인구에 대한 영향이 적어야 하며, 협소한 공간에서 시공 가능여부 등 다양한 사항을 추가적으로 고려해야 한다. 특히 서울과 같이 구조물들이 극히 밀접한 대도시에서의 기초공법은 시공 시 발생하는 소음 및 진동과 인접 구조물에 대한 영향이 매우 작아야 한다[1]. 대표적인 예로 도심지 공사에서는 지

지력은 우수하나 시공 시 진동 및 소음이 심한 항타말뚝 공법 대신 지지력이 부족하고 다소 불확실하다더라도 상대적으로 시공 시 주변 환경에 미치는 영향이 훨씬 적은 매입말뚝공법을 주로 사용하는 경우를 들 수 있다. 이와 같이 시공 시 주변 환경에 미치는 영향이 적은 공법은 비록 역학적·경제적인 특성은 기존 공법에 대해 다소 불리하다라도 도심지 공사에서 유용하게 적용할 수 있다.

심층혼합처리 공법은 현장에서 지반에 안정처리재를 저압으로 주입하면서 특수 제작된 교반기로 혼합하여 원지반의 강도를 증가시키는 공법으로, 우리나라에서는 그동안 주로 해상 연약지반 공사에서 지반개량 목적으로

*교신저자 : 주진현 (jinhyun@kict.re.kr)

접수일 10년 11월 02일

수정일 10년 11월 22일

계재확정일 11년 01월 13일

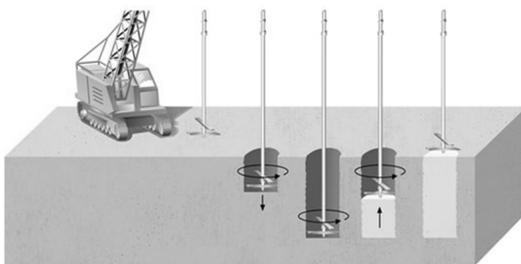
적용하여 왔다. 심층혼합처리 공법은 원지반의 강도를 간단하면서도 신뢰성 높게 증가시킬 수 있으며, 다양한 목적에 활용할 수 있고, 시공 장비가 크지 않으며 시공 시 발생하는 진동 및 소음이 적다는 장점이 있다[2]. 따라서 심층혼합처리 공법은 시공 시 주변 환경에 미치는 영향이 적어야 하는 도심지 공사에서도 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단되지만, 아직까지 이를 도심지 공사에서도 적용하기 위한 연구사례는 없는 실정이다.

본 연구에서는 심층혼합처리를 서울 시내의 재개발 현장에서 기초 지반개량 공법으로 적용하고 공법의 역학적 특성과 주변 환경에 대한 영향을 도심지 공사에서의 적용 가능성 여부 측면에서 분석하였다. 도심지 현장에서 시공하기 위하여 기존 장비를 소형화 시킨 장비를 사용하여, 중요 문화재인 석축성벽과 인접한 곳에 시공하는 옹벽의 기초 지반을 심층혼합처리 공법으로 개량하였다. 실내시험과 현장계측을 통하여 개량한 지반의 강도 특성, 시공 시 발생하는 진동, 인접 구조물에 발생시킨 변위를 측정하였고, 결과를 바탕으로 심층혼합처리 공법의 도심지 공사 적용성을 평가하였다.

2. 도심지 공사를 위한 심층혼합처리

2.1 심층혼합처리 공법

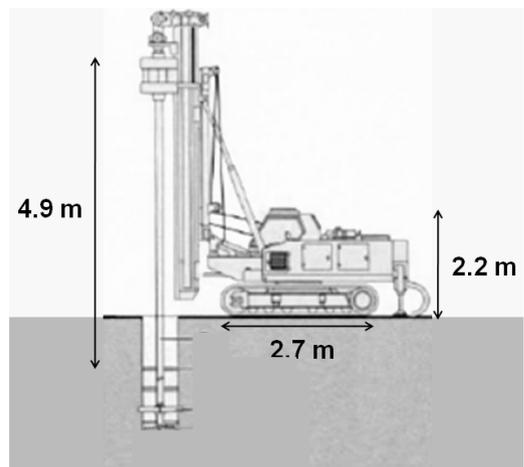
심층혼합처리(Deep Mixing or Soil Mixing)은 대상 지반에 안정재(고화재 또는 경화재)를 저압으로 주입하면서 교반기를 회전시켜 원지반의 역학적 특성을 개량하는 공법이다. 시공은 그림 1과 같이 (1) 장비 이동 및 거치 - (2) 굴진하며 안정재 주입 및 혼합교반 - (3) 인발하며 안정재 주입 및 혼합교반 - (4) 소일-시멘트 컬럼 시공 과정으로 이루어지며, 완료 후에는 인접 지반에 다시 안정재를 주입하면서 지반을 교반하는 과정을 반복하여 대상 지반 전체를 소일-시멘트 주열(Soil-cement Column)로 치환한다.



[그림 1] 심층혼합처리 공법의 시공 절차

2.2 도심지 공사용 심층혼합처리 시공 장비

도심지에서 수행하는 공사는 일반적인 토목공사에 비해 장비 진입로 및 작업 공간이 협소하기 때문에 시공 장비의 크기가 작아야 한다. 따라서 본 연구에서는 심층혼합처리 공법을 도심지 공사에서도 적용하기 위하여 기존 장비를 그림 2와 같이 소형화한 시공 장비를 사용하였다. 소형화한 심층혼합처리 장비는 바퀴 길이 2.7 m, 장비 높이 2.2 m, 시공 팔 길이 4.9 m 로 크기가 상대적으로 작아 시공 공간이 협소한 도심지 공사에서도 다른 장비들에 비해 유리하다.



[그림 2] 도심지 공사 용 심층혼합처리 시공 장비

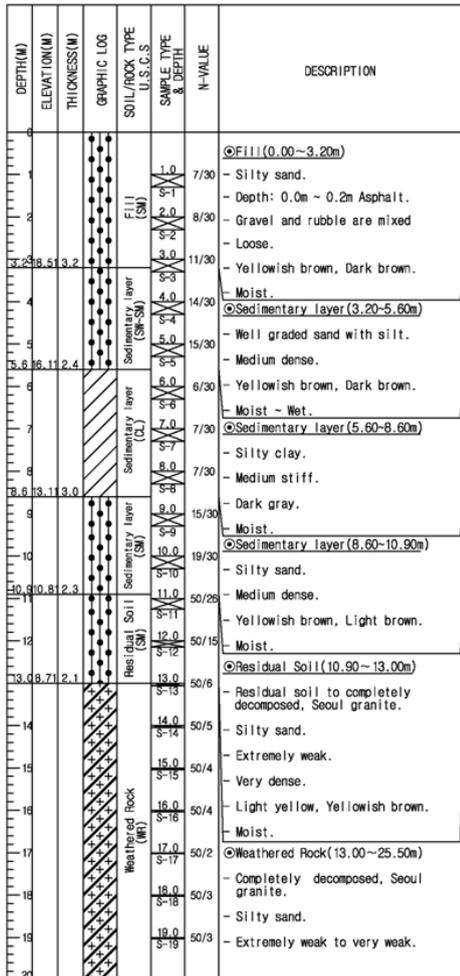
3. 심층혼합처리의 도심지 현장 적용

3.1 적용 현장 개요

본 연구에서 심층혼합처리 공법을 적용한 현장은 서울 시내에 테마 공원을 조성하는 재개발 사업 현장으로, 기존 구조물 철거 시 과거의 석축성벽이 우연히 발견되어 중요한 문화재로 선정되었다. 그 결과 시공 시 중요 문화재인 석축성벽에 발생하는 영향이 극히 미소하도록 관리하는 사항이 매우 중요한 고려사항이 되었다.

심층혼합처리 공법은 석축성벽과 인접한 위치에 시공하는 옹벽의 하부 기초 지반을 개량하는 목적으로 실시하였다. 지반조사 결과 옹벽 시공 위치의 하부 지반은 그림 3과 같이 매립층(Fill)-퇴적층(Sedimentary Layer)-잔류토(Residual Soil)-풍화암(Weathered Rock)의 층상구조를 갖고 있었다. 이 중 지표면 아래 13 m 까지 매립층-퇴적층-잔류토 순으로 두껍게 분포하는 토사층은 표준관입시험 결과 N값의 범위가 6/30 - 19/30 으로 나타나 매우 느

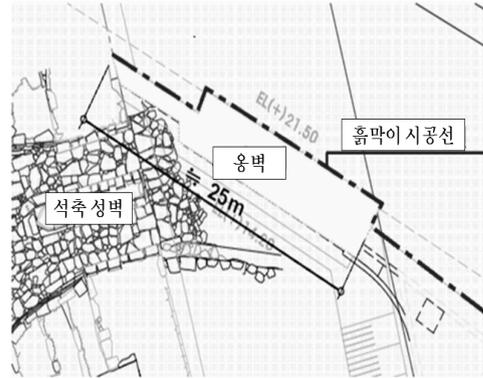
슨(Very loose)하거나 보통 조밀(Medium dense)한 지반으로 분류되는 다소 연약한 지반이었다.



[그림 3] 현장 지반 시추주상도

옹벽은 상부 7.8 m를 굴착하고 시공하는 것으로 설계 되었으며, 옹벽의 하부 지반조건이 양호하지 않기 때문에 본래는 굴착 후 하부에 PHC 말뚝을 시공하는 것으로 계획되었다. 그러나 전술한 바와 같이 기존 구조물 철거 중 그림 4와 같이 옹벽과 매우 근접한 위치에서 석축성벽이 우연히 발견되었으며, 성벽은 과거에 강제 매립되었기 때문에 매우 느슨하고 불안정한 상태로 존재하였다. 따라서 옹벽의 기초공법을 잘못 선정할 경우 시공 시 발생하는 진동에 의하여 석축성벽에 과다변위 혹은 안정성 문제가 발생하여 문화재에 손상이 발생할 것으로 우려되어, 옹벽의 기초공법을 본래 계획된 PHC 말뚝 대신 시공 시 발생하는 진동이 작은 심층혼합처리 공법을 적용하여 연약한

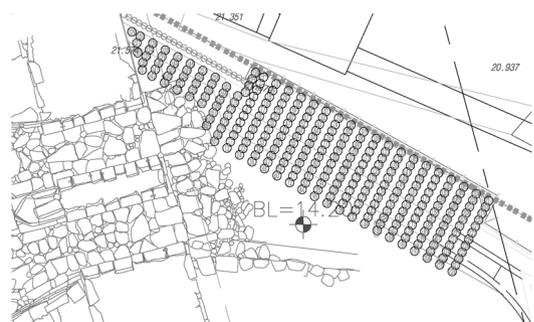
하부 지반을 개량하는 방법으로 변경하였다. 그리고 심층 혼합처리 중 발생하는 진동과 석축성벽의 변위를 지속적으로 계측하고 관리함으로써 성벽의 안정성을 확보하고자 하였다.



[그림 4] 심층혼합처리 적용 현장 평면도 (옹벽 하부 지반 개량에 심층혼합처리 적용)

3.2 심층혼합처리 공법 시공 정보

심층혼합처리의 시공은 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 시멘트 첨가량을 흙 1m³ 당 300 kg으로, 물/시멘트 비를 1:1로 하여 그림 5와 같이 옹벽이 건설될 위치 하부 지반에 지름 3.5 m의 소일-시멘트 주열을 총 194개 교반 하였다. 시공 시 교반 장비에서 시간 별로 깊이와 토크를 측정하였으며, 측정 데이터 분석한 결과 시공한 소일-시멘트 주열의 평균 길이는 2.81 m, 최대 길이는 3.5 m, 최소 길이는 1.0 m로 나타났다. 그림 6은 대상 현장에서 심층혼합처리를 수행하는 모습으로, 옹벽 하부지반(시공 장비 위치), 석축성벽, 흙막이 시공선이 매우 인접하여 있어 일반적인 기초공법의 경우 장비 진입 및 시공이 어려운 구역이 존재하였으나 본 연구에서 사용한 소형 심층 혼합처리 장비는 이와 같이 협소한 공간에서도 문제가 없었다.



[그림 5] 심층혼합처리 시공 평면도



[그림 6] 현장 심층혼합처리 시공 사진

4. 심층혼합처리 공법의 지반개량 효과 평가

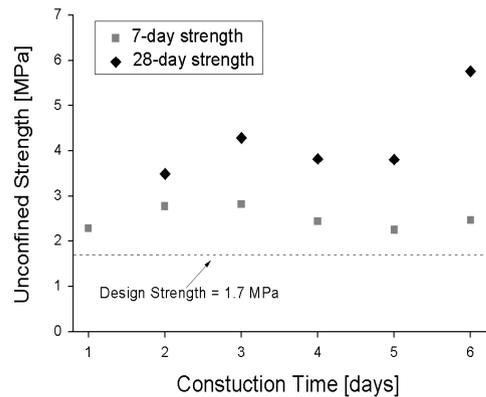
공법의 지반개량 효과를 확인하기 위하여 현장에서 심층혼합처리를 수행하면서 시멘트와 교반된 시료를 채취하고, 이를 알루미늄 캔에 밀봉하여 실내에서 양생하고 일축압축시험을 수행하였다. 시료는 시공일마다 6개씩 채취하여 3개는 7일 양생 후, 나머지 3개는 28일 양생 후 일축압축시험을 실시하여 재령 7일 및 28일 일축압축강도를 측정하였다.

일축압축시험은 한국산업규격에 제시되어있는 흙의 일축압축시험 규정[3]에 따라 공시체는 매분 1%의 압축 변형이 생기는 비율로 압축하였으며, 압축력이 최대가 되고 나서 계속해서 변형이 2% 이상 생기거나, 압축력이 최대값의 2/3 정도로 감소하거나 또는 압축변형이 15%에 도달할 때까지 압축하였다.

시험 결과 모든 시료는 압축력이 최대값에 도달한 후 급격히 감소하는 취성적 거동을 나타내었다. 일축압축강도의 재령 7일 평균은 2.50 MPa, 28일 평균은 4.23 MPa로 나타났으며, 시공 위치 및 시간에 따른 강도의 차이를 확인할 수 있도록 시료 채취일 별로 그림 7에 강도의 평균값을 옹벽 기초의 설계강도 1.7 MPa와 함께 나타내었다. 모든 재령 7일 강도가 설계강도 이상을 나타내었으며, 28일 강도는 대부분 설계 강도의 약 2배 이상을 나타내어 하부 지반이 옹벽 기초로 사용하기에 충분하도록 개량되었음을 확인하였다. 또한 시공일 별로 강도의 평균값이 비교적 균일하게 나타나 시공 위치 혹은 시간에 따른 강도 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 심층혼합처리 공법을 적용한 지반의 재령 28일 일축압축강도 범위는 조립토에 대해 0.5 - 5 MPa, 세립토에 대해 0.2 - 2 MPa로 제시된 바 있으며[4], 따라서 본 현장의 원지반(실트질 점토)의 강도 개량 효과는 상당히 우수한 것으로 판

단된다.

시멘트 안정처리를 적용한 지반을 기초지반으로 사용하기 위한 일축압축강도의 기준으로 영국에서는 구조물 종류에 따라 4.5 - 15 MPa, 네덜란드에서는 3 - 5 MPa로 제시하고 있다[4]. 이를 고려하면 대상 현장과 같이 구조물의 하중이 크지 않은 경우에는 원지반이 세립토로 구성되어 있더라도 심층혼합처리를 기초공법으로 활용할 수 있을 것이다. 그리고 조립토는 시멘트 안정처리 시 훨씬 큰 강도를 나타내기 때문에[5] 화강풍화도가 많은 서울 도심지에서는 심층혼합처리 공법을 다양한 구조물의 기초 지반개량 공법으로 적용할 수 있으리라 판단된다.



[그림 7] 일축압축시험 결과

5. 심층혼합처리 공법 시공 시 인접 환경에 발생한 영향 평가

5.1 시공 시 발생한 진동 평가

심층혼합처리 공법 시공 시 발생하는 진동 정도를 평가하기 위하여 그림 8과 같이 시공 장비 인근 성벽의 기초부에 진동측정 센서를 설치하고 진동 속도(Vibration velocity)를 측정하였다. 측정은 교반 위치로부터 이격 거리를 0.5 - 1.0 m 간격으로 달리하며 2.0 - 10.0 m 까지 측정하였으며(최소 거리 2.0 m 는 현장 여건 상 성벽구조물에서 측정할 수 있는 최단 거리), 시공을 위한 천공과는 무관하게 발생하는 장비 자체에 의한 진동(암진동)을 이격 거리 3.0 m 에서 측정하여 장비 진동과 교반에 의한 진동을 개별적으로 평가하고자 하였다. 진동 측정은 천공이 장시간 실시되는 것을 감안하여 진동 측정 장비 Blastmate III의 측정방식 중에 하나인 Strip Chart 모드로 5 - 15초 간격으로 발생하는 최대입자속도를 측정하였다.



[그림 8] 심층혼합처리 시공 중 진동측정

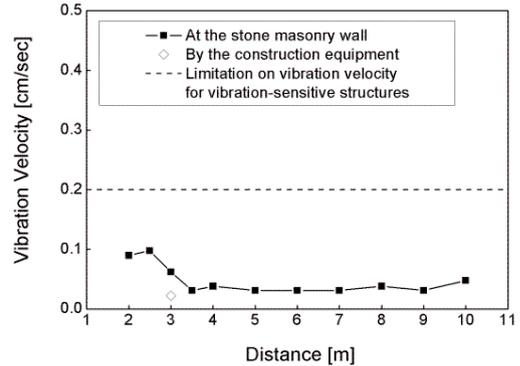
진동이 구조물에 미치는 영향에 대한 평가는 일반적으로 진동속도 값을 허용 기준치와 비교하는 방법을 적용한다. 건설공사 시 진동허용기준치는 본 현장과 같이 문화재, 진동 예민 구조물 인근 공사에 대해 가장 엄격한 기준이 적용되며 국내의 시방서 조사 결과(표 1) 진동속도 0.2 cm/sec 인 경우 인근 구조물이 진동에 민감하더라도 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

[표 1] 건설공사 시 국내의 진동허용기준치

관리기준 출처	적용 대상	진동 허용 기준치 (cm/sec)
국내 지하철공사(서울, 부산) 및 주택공사 등에서의 통상 기준	문화재, 정밀기기 시설물 주변	0.20
터널표준 시방서[6]	진동 예민 구조물	0.20 - 0.30
독일[7]	문화재	0.20
영국[8]	인구 조밀 지역	0.20

그림 9에 심층혼합처리 시공 중 측정된 거리에 따른 진동속도 결과를 기준치(0.2 cm/sec)와 비교하였다. 측정 결과 2.0 - 3.0 m 근거리의 경우 시공 시 0.0622 - 0.0976

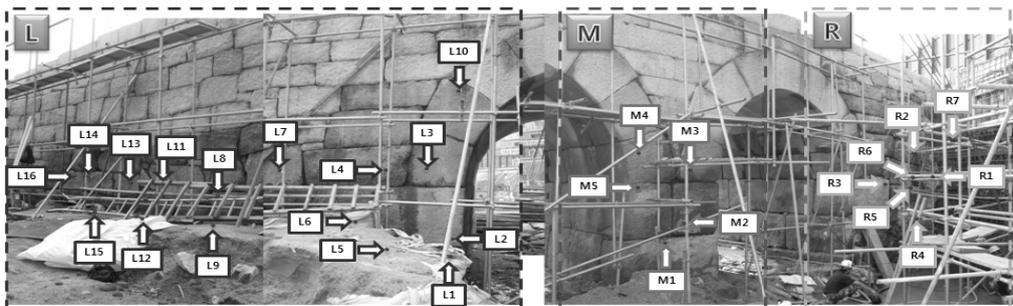
cm/sec의 미세한 진동 수준이 측정되었으며, 3.5 m 이상 이격되었을 경우 0.0311 - 0.0475 cm/sec의 극히 미세한 수준이 감지되었다. 또한 3.0 m 이격된 지점에서의 장비 가동에 의한 자체 진동은 0.0220 cm/sec으로 나타나, 3.5 m 이상 이격된 지점에서는 지반 교반에 의해 발생하는 진동은 거의 없었으며 장비 자체의 진동 또한 0.2 cm/sec 의 약 10% 수준으로 나타났다.



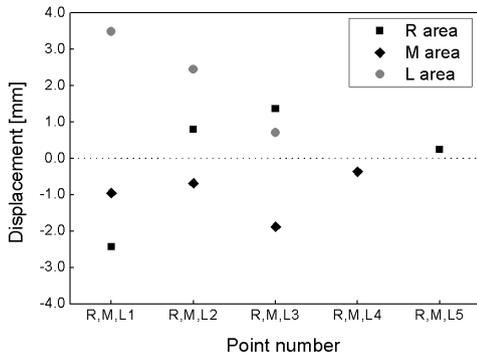
[그림 9] 진동측정결과와 문화재 기준치 비교

5.2 시공 시 인접구조물에 발생한 변위 평가

심층혼합처리로 용벽의 기초지반 개량 중 인접 석축성벽의 안정성을 관리하기 위하여, 영상처리기법을 적용해서 시공 중 성벽의 변위를 실시간으로 측정하였다. 영상처리기법은 대상 구조물에 특수 표식을 부착하고 시간에 따른 표식의 변위를 디지털이미지로 분석하여 대상 구조물의 변위를 측정하는 방법으로, 본 연구에서는 그림 10 과 같이 성벽을 3 구역으로 나누고 28개 지점에 표식을 설치하여 변위 계측을 수행하였다. 심층혼합처리 공법 시공 위치는 R구역과 가장 인접하였으며, 예상 시공 영향권 밖인 L구역에서는 문화재 복구 작업의 일환으로 석축 축조가 진행되고 있었다. 따라서 시공에 의한 영향(R구역)과 석축 축조에 의한 영향(L구역)의 비교가 가능하였다.



[그림 10] 영상처리기법을 적용한 석축성벽의 변위측정 위치



[그림 11] 영상처리방법으로 측정된 각 구역 측정점 1-5번의 상대길이 변화량 최대값

그림 11은 각 구역에서의 1 - 5번 측정점으로부터 계산한 표적 간 상대길이의 시간에 따른 초기치 대비 변화량의 최대값을 나타낸 것으로, 양수값은 길이의 증가(인장)를 나타내며 음수값은 감소(압축)를 나타낸다. 그리고 각 지점 별로 시공 시 발생한 상대길이의 변화 경향을 표 2에 요약하였다.

[표 2] 심층혼합처리 시중 석축성벽의 구역 별 상대길이 변화

R구역		M구역		L구역	
구간	상대길이	구간	상대길이	구간	상대길이
R1 → R2	감소	M1 → M2	증가	L1 → L2	증가
R1 → R3	감소	M1 → M3	감소	L1 → L3	증가
R1 → R5	감소	M1 → M4	감소	L1 → L4	증가
R1 → R6	감소	M1 → M5	감소	L1 → L7	증가
R2 → R3	증가	M2 → M3	감소	L1 → L10	증가
R2 → R5	증가	M2 → M4	감소	L2 → L3	증가
R2 → R6	감소	M2 → M5	감소	L2 → L4	증가
R3 → R5	증가	M3 → M4	감소	L2 → L7	증가
R3 → R6	증가	M3 → M5	감소	L2 → L10	증가
R5 → R6	증가	M4 → M5	증가	L3 → L4	증가
R구역: 가시설과 인접한 구역으로 급격한 변위는 아니지만 심층혼합처리 시공에 따른 영향이 나타남				L3 → L7	증가
				L3 → L10	증가
				L4 → L7	감소
M구역: 대부분 상대길이가 감소 M3→M4, M3→M5 구간 외에는 모두 1 mm 이하				L4 → L10	증가
				L7 → L10	감소
L구역: 대부분 상대길이가 증가 석축 축조에 의한 상재하중 영향으로 판단됨				L7 → L10	감소

심층혼합처리 시 성벽에 발생한 변위 절대량의 비교 결과, 시공 위치와 가장 근접한 R구역에서는 시공에 따른 영향이 나타났다. 예상 영향권이었던 M구역에서는 R 구역 보다는 작은 영향이 나타났는데 이는 시공 장비와의 거리 차이에 의한 것으로 생각된다. R구역에서 측정된 상대길이 변화량은 최대 2.5 mm로 나타났으며, 이는 예상 시공 영향권 밖에 있는 L구역에서 석축 축조에 의한 상재하중으로 발생한 변화량의 최대값인 3.5 mm 보다도 작은 값이다. 따라서 심층혼합처리 시공에 의해 발생한 2.5 mm 미만 변위는 성벽 구조물의 안정성을 저해하지 않는 미소한 수준으로 평가된다. 따라서 본 현장의 느슨한 석축성벽보다 역학적으로 훨씬 안정한 일반 구조물 인근에서 심층혼합처리를 시공할 경우 구조물에 발생하는 변위 등의 시공 영향은 본 연구의 결과보다 훨씬 적을 것으로 예상된다.

6. 결론

본 논문에서는 시공 시 주변 환경에 미치는 영향이 중요한 도심지 공사에서 심층혼합처리를 기초 공법으로 적용하는 방안을 평가하였다. 서울 시내의 재개발 공사에서 중요 문화재로 지정된 석축성벽과 인접하여 시공하는 옹벽의 하부지반을 심층혼합처리 공법으로 개량하면서 공법의 강도 특성, 시공 시 발생하는 진동 특성, 성벽에 발생한 변위를 실내시험 및 현장계측으로 평가하였으며, 각 항목에 대한 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 시멘트 첨가량을 흙 1m³ 당 300 kg으로, 물/시멘트 비를 1:1로 하여 심층혼합처리 공법으로 교반한 소일-시멘트를 현장에서 채취하고 양생한 후 일축압축시험을 실시하여 강도 특성을 평가하였다. 원지반은 N값이 7/30 정도인 실트질 점토였으나, 원지반을 교반한 후에는 일축압축 강도의 평균이 재령 7일 후 2.5 MPa, 28일 후 강도가 4.23 MPa를 나타냈다. 28일 강도는 현장에서 옹벽 구조물이 요구하는 기초 지반의 강도 1.7 MPa의 2배 이상을 나타내었으며 시멘트 안정 처리한 지반을 구조물의 기초 지반으로 사용하는 경우에 대하여 국외에서 제시한 여러 기준을 모두 만족하였다.
- (2) 심층혼합처리 시공 시 발생한 진동을 측정하고 국내의 지방서에서 제시한 허용 진동기준과 비교한 결과, 발생한 진동속도는 2 m 정도의 근접한 거리에서도 가장 엄격한 진동기준인 0.2 cm/sec의 약 절반밖에 되지 않아 심층혼합처리 시공 시 발생하는 진동은 주변 환경 및 구조물에 거의 영향을 미치지 않았다.

치지 않는다고 판단된다. 그리고 거리가 3.5 m 이상 되는 지역부터는 측정된 진동속도가 기계 자체에서 발생한 진동과 거의 동일하여 지반의 교반 과정에서 발생하는 진동은 미소하다고 판단된다.

- (3) 심층혼합처리를 수행한 위치와 인접한 석축성벽 문화재에 시공 중 발생한 변위를 측정된 결과, 시공 위치와 가장 근접한 구역에서의 상대길이 변화가 최대 2.5 mm로 나타났다. 예상 시공 영향권 밖 구역에서 석축 축조에 의한 상재하중으로 발생한 상대변위 변화의 최대값이 3.5 mm로 나타난 사실을 고려하면, 심층혼합처리 시공에 의한 2.5 mm 미만 변위는 성벽 구조물의 안정성에 영향을 미치지 않는 수준으로 간주된다. 따라서 심층혼합처리 공법은 시공 시 인접 구조물에 미치는 영향이 극히 작다고 판단된다.

결론적으로 심층혼합처리 공법은 시공 과정에서 발생하는 소음진동 및 인접 구조물에 미치는 영향이 중요 구조물이 밀집한 도심지 지역에서의 허용 기준을 만족시키면서도 연약한 원지반의 강도를 효과적으로 개량시킬 수 있는 것으로 나타나, 향후 도심지 공사에서 기초 지반개량 공법으로 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Butcher, A.P., Powell, J.J.M. and Skinner, H.D., "Reuse of Foundations for Urban Sites: A Best Practice Handbook," IHC BRE, 2006.

[2] Bruce, D.A., and M.E.C. Bruce., "The Practitioner's Guide to Deep Mixing," Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the Third International Conference, Geotechnical Special Publication No. 120, Ed. L.F.Johnsen, D.A.Bruce, and M.J.Byle, American Society of Civil Engineers, pp.475-488, 2003.

[3] 한국표준협회, 흙의 일축압축시험 방법 KS F 2314, 2001.

[4] Perera, A.S.R, Al-Tabbaa, A., Reid, J.M., and Stegemann, J.A, "State of Practice Report UK Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation Part IV: Testing & Performance Criteria," Department of Civil Engineering, University of Cambridge, 2004.

[5] 주진현, 김영석, 김학승, 조용상 "서울 도심지 내 지반에 시공한 소일-시멘트의 강도 특성", 한국지반공학회 2010년도 봄 학술발표회 논문집, pp.1206-1211, 2010

[6] 국토해양부, 터널 표준 시방서, 2009.

[7] German National Standard, DIN 4150-3 Vibration in

Buildings - Part 3: Effects on Structures, 1999.

[8] British Standard Institute, BS 6472-1: Guide To Evaluation Human Exposure to Vibration in Buildings. Vibration Sources Other than Blasting, 2008.

김 영 석(YoungSeok Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 영남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2002년 3월 : Osaka University (공학석사)
- 2005년 3월 : Kyoto University (공학박사)
- 2005년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

토목공학, 지반공학

주 진 현(Jinhyun Choo)

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학사)
- 2009년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 (공학석사)
- 2009년 6월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

토목공학, 지반공학

조 용 상(YongSang Cho)

[정회원]



- 1995년 2월 : 중앙대학교 토목공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 중앙대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 3월 : Osaka University (공학박사)
- 2004년 4월 ~ 현재 : 삼성물산 건설부문 차장

<관심분야>

토목공학, 지반공학