

전도성 재료를 포함한 시멘트 그라우트의 역학적 특성

Mechanical Properties of Cement Grout Including Conductive Materials

최 효 준¹⁾ · 조 완 제²⁾ · 황 범 식³⁾ · 윤 찬 영[†]

Hyojun Choi · Wanjei Cho · Bumsik Hwang · Chanyoung Yune

Received: November 2nd, 2020; Revised: November 6th, 2020; Accepted: November 19th, 2020

ABSTRACT : Recently, underground spaces have been developed variously due to the concentration of the building structure in downtown area and reconstruction of the apartment. However, various problems such as differential settlement are occurring in the waterproof and reinforcement construction. In grouting method, which is frequently used for the ground reinforcement, quality control was performed by measuring the injection quantity of grouting materials and performing laboratory tests using boring samples, but it is difficult to determine whether the ground reinforcement has been performed properly during the construction stage. In order to solve this problem, a research is needed to carry out quality control by measuring electric resistivity after grouting is performed using grouting materials mixed with conductive materials. In this research, as a basic study of the new grouting method using conductive materials, uniaxial compression tests were performed using cement specimen with 0, 3, 5, 7% of carbon fiber to evaluate the effect of conductive material on the performance of grouting material. Based on the test results, the uniaxial compressive strength is increased with the mixed proportion of the carbon fiber increase. Furthermore, the carbon fiber can also affect on the early-strength of the grouting materials.

Keywords : Grouting, Grout material, Micro-cement, Conductive material, Carbon fiber, Unconfined compressive strength

요 지 : 도심지의 건축구조물 밀집 및 아파트 재건축 등으로 인하여 지하공간 개발이 다양하게 이루어지고 있으나, 차수 및 지반 보강작업에 있어 부등침하와 같은 다양한 문제들이 발생하고 있다. 지반 보강에 있어 빈번히 사용되고 있는 그라우팅 공법에서는 시공단계에서 투입된 그라우트 재의 주입량 측정 또는 지반 보링 후 일축압축강도시험을 통해 품질관리를 수행하고 있으나, 시공단계에서 지반 보강이 제대로 이루어졌는지는 판단하기 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전도성 재료가 혼합된 그라우트 재를 사용하여 그라우팅을 수행한 후 전기비저항 측정을 통해 품질관리를 수행하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 이에 대한 기초연구로 전도성 재료인 탄소섬유가 혼합된 그라우트 재의 성능을 평가하기 위해 탄소섬유가 0%, 3%, 5%, 7%로 혼합된 시멘트 공시체를 제작하였으며, 제작한 공시체에 대하여 7일, 14일, 28일 수중양생 시킨 후 1%/min의 변형속도로 일축압축시험을 수행하였다. 일축압축시험 결과 탄소섬유의 배합비 증가에 따라 일축압축강도가 증가하는 경향을 보였으며, 혼합된 탄소섬유가 그라우트재의 조기강도 발현에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

주요어 : 그라우팅, 그라우트 재, 마이크로시멘트, 전도성 재료, 탄소섬유, 일축압축강도

1. 서 론

약 70%가 산악지역인 우리나라의 국토는 도로나 철도 건설에 있어 터널이 차지하는 비중이 적지 않고 대도시로의 인구 유입 증가로 인해 지하철이나 지하도로 같은 지하 구조물의 수요가 늘어나고 있다(Kong et al., 2010). 도심지의 건축구조물 밀집 및 아파트 재건축 등으로 인하여 지하 공간 개발이 다양하게 이루어지며 이러한 지하공간 개발에 있어 차수 및 지반 보강작업이 이루어지고 있으나 다양한 문제가 발생하고 있다. 지하안전관리에 관한 특별법을 시행하여 제도적인 노력을 기울이고 있으나 빈번히 지반 사건

사고가 발생하고 있다. 예로 구조물 시공 시 지반침하로 인한 부등침하가 발생할 수 있으며, 2018년에는 서울 상도동과 가산동에서 흙막이 붕괴사고가 발생하였다. 이러한 문제점들이 대두되고 있는 상태에서 국내의 그라우팅 지반 보강 품질 확인 방법은 투입된 주입량을 측정하여 보강 여부를 추측하는 방법을 주로 사용한다. 또한, 국외에서는 보링 후 일축압축강도 시험을 수행하여 지반 보강 여부를 판단하지만 많은 시간과 경비가 소요되며, 보링 지점 이외의 보강 여부를 판단하기 어렵다. 이처럼 국내의 모두 시공단계에서 지반 보강이 제대로 이루어졌는지 판단하기 어려운 실정이다. 또한, 지반 보강 여부를 판단하기 위해 비파괴검

1) Graduated Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

3) Post-doctoral Research Fellow, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

† Professor, Department of Civil Engineering, Gangneung Wonju National University (Corresponding Author : yune@gwnu.ac.kr)

사를 수행하더라도 대규모의 공동부를 보강하는 경우 말고는 소규모 공동부 보강, 느슨해진 지반의 보강인 경우 실제 보강 여부를 판단하기 어려운 한계가 있다. 토양의 불균질성의 부적합한 전극의 배치는 오차가 많은 비저항 측정 자료를 초래할 수 있으며 밀집한 전극의 배치로 고해상도의 측정 자료를 얻을 수도 있지만, 불균성 정도에 따라 신뢰성이 떨어지는 자료를 얻을 수도 있다(A. Samouëlian et al., 2005).

대표적인 지반 보강 공법은 그라우팅 공법이 있으며 그라우팅 공법은 보통 시멘트 그라우트 액을 대상 지반에 주입하여 지반의 고결화, 지지력 증가, 투수성 감소 등의 목적을 이루는 공법이다. 이러한 그라우팅 공법에서 사용하는 시멘트 재료는 일반포틀랜드시멘트, 마이크로시멘트, 고로슬래그시멘트 및 플라이애시시멘트 등이 있으며, 본 연구에서는 마이크로시멘트를 사용하였다. Heo(2010)는 마이크로시멘트는 일반포틀랜드시멘트에 비교하여 분말도가 더 높고 장기 강도뿐만 아니라 초기강도도 상대적으로 우수한 특성을 보인다고 하였다. 따라서 이러한 특성은 주입성과 강도를 증가시켜 내구성을 향상시키고자 하는 주입공사에 적합한 재료라고 판단하였다. 또한, 과거 그라우팅 공법은 합성재료 또는 1종 시멘트를 사용하였으나, 최근 환경과 지하수 보호에 대한 요구 증가와 그라우트 재의 지반 내 주입성 등을 고려하여 마이크로시멘트 또는 유해성이 적은 용액형 그라우팅 공법이 보편적으로 사용되고 있다. 국내의 전도성 재료와 그라우트 재의 관련 연구는 주로 재료 연구가 수행되었으며 예로 전도성 재료인 흑연을 배합하여 발열특성 콘크리트에 대한 재료개발이나 탄소섬유, 보강섬유를 배합하여 강도 증가와 차수성 개선에 대한 재료개발 연구들이 수행되어왔다(Ahn et al., 2016; Kim, 2017; Kim & Sun, 2018; Seo & Kim, 2019). 또한, 국외에서의 연구결과도 국내와 마찬가지로 주로 재료 연구가 수행되었다. 전도성 재료와 그라우트 재의 관련 연구들은 탄소 기반 및 금속 섬유, 분말 및 입상 고체 입자와 같은 다양한 전기전도성 재료와 마이크로미터 크기의 직경과 3~15mm 길이의 시멘트질 섬유 재료에서 전자 전도 경로는 우수하며(Sassani et al., 2018) 탄소섬유는 재료의 기계적 성능 및 내구성 측면에서 이점을 준다는 연구들이 수행되었다(Cao & Chung, 2001; Chen & Liu, 2003; Peyvandi et al., 2013; Shu et al., 2015; Graham et al., 2013). 또한, 전도성 재료인 강철 섬유는 열저항에는 뛰어나지만(Wang et al., 2004) 콘크리트 혼합물에 강철 섬유를 혼합하면 부식이 발생할 수 있는 단점이 있다는 연구들이 수행되었다(Wu et al., 2014). 그라우팅 공법에서 사용하는 그라우트 재와 전도성 재료의 성능 검증 연구는 이루어지지 않았으며 전도성 재료의 전기비저항 값을 측정하여

그라우팅 공법의 시공 후 품질관리에 관한 연구는 전무한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 그라우트 재와 전도성 재료를 혼합하여 시공 후 전기비저항 측정을 통해 품질관리가 가능한 전도성 그라우팅 재료 개발의 기초 연구로 전도성 재료가 혼합된 그라우트 재의 성능평가를 위해 전도성 재료인 탄소섬유(Carbon fiber)와 마이크로시멘트를 배합하여 일축압축 시험을 수행하였다. 탄소섬유는 시멘트질 재료와 혼합되어도 전자 전도 경로가 우수하여 품질관리를 위해 만족할 만한 전기비저항 값이 측정될 것으로 판단하였으며, 시멘트 재료와 혼합되었을 때 강도 증가, 내구성 개선, 기계적 성능 개선 등의 효과가 있을 것으로 판단되어 탄소섬유를 사용하였다. 전도성 재료의 배합비와 공시체의 양생일수에 따른 강도특성을 파악하기 0%, 3%, 5%, 7%의 배합비를 가진 공시체를 제작하여 각각 7일, 14일, 28일 동안 양생을 거친 후 일축압축시험을 수행하였다.

2. 전도성 재료 고찰

2.1 전도성 그라우트 재료의 개념

전기전도도(Conductivity)란 물체에 전류가 잘 흐르는 정도를 표시하는 양으로 정의하며 물질의 고유성질이다. 전기전도도의 역수는 전기 비저항(Resistivity)으로 물체의 모양이나 크기에 무관하며 물질의 종류에 따라 다른 값을 갖는다.

$$R = \rho \frac{I}{S} \quad (1)$$

여기서 R : 전도체의 저항(S/m)

ρ : 저항도($ohm \cdot cm$)

I : 두 전극간의 거리(cm)

S : 단면적(cm^2)

전도성 재료란 열이나 전기 등을 한 부분에서 다른 부분으로 옮기는 성질을 띤 재료나 부도체 재료에 첨가하여 전기전도성을 부여하는 재료를 의미한다. 시멘트 그라우트 재료는 일반적으로 부도체이며, 본 연구에서는 전기전도성의 성질을 부여하기 위해서 그라우트 재료와 전도성 재료를 혼합 및 배합하였다.

2.2 전도성 재료

현재 일반적으로 사용하고 있는 전도성 재료는 흑연(Graphite),

카본블랙(Carbon black), 탄소나노튜브(Carbon nano tube) 그리고 탄소섬유(Carbon fiber) 등이 있다.

2.2.1 흑연(Graphite)

흑연은 크게 천연흑연과 인공 흑연으로 구분되며 세부적으로 천연흑연은 인상 흑연, 고결정질(High crystalline) 흑연, 미정질(Microcrystalline or cryptocrystalline; amorphous)으로 구분하며 인공 흑연은 흑연 섬유(Graphite fiber), 일차(Primary) 흑연, 이차(Secondary) 흑연으로 구분한다. 흑연 재료는 내열, 내식, 고온유효, 전기전도성 등의 여러 가지 특성을 가진다. 내열성이 우수하고 연화, 용융되지 않으며 증기압이 적고 일반 금속에 비해 열팽창률이 극히 낮아서 고온에서의 정밀도가 우수하다. 또한, 열팽창률이 적고 열전도율이 높아 급격한 온도변화에 견디는 내열 충격성이 우수하며, 결정구조와 원자값의 관계로 자유전자를 갖고 있어 전기전도성이 우수한 특성을 갖는다.

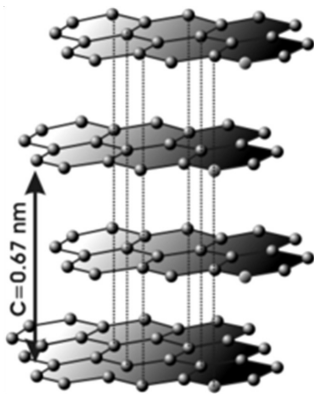


Fig. 1. Crystal structure of the graphite (Ahn et al., 2016)

Fig. 1과 같이 흑연의 구조는 감마결합(Gamma bond)으로 이루어진 구조를 나타내는데, 이는 매우 약한 결합으로 판상체가 미끄러지기 쉽다. 이 같은 성질 때문에 흑연 마찰계수가 작아 윤활작용을 하며, 코팅제 혹은 윤활제로 활용되고 있다.

2.2.2 탄소섬유(Carbon fiber)

탄소섬유는 유기 고분자 섬유를 약 1000~3000℃의 온도에서 열분해에 의해 생성되며 생성과정에서 산소, 질소, 수소 등의 분자가 빠져나가 중량은 감소되어 알루미늄에 비해 가볍고 철에 비해 탄성 및 강도가 뛰어난 특징이 있다. 탄소섬유는 원료별로 PAN계 탄소섬유와 Pitch계 탄소섬유가 대표적이며 직경 5~15μm의 매우 얇은 섬유로 강도는 10~20g/d, 비중은 1.5~2.1이다. 탄소섬유는 가볍고, 뛰어난 기계적 성질과 전도성, 내열성, 낮은 열팽창률, 화학적 안정성, 자기 윤활성 및 고열 전도성 등 많은 특징을 겸비하

기 때문에 항공, 우주, 자동차, 선박 등의 구조재료로 사용되고, 토목건축 등의 산업용도 등 전 산업 분야에서 광범위하게 활용되고 있다.

2.2.3 탄소나노튜브(Carbon nano tube)

탄소나노튜브는 탄소끼리 육각형으로 결합하여 원통형 튜브구조를 이룬 탄소 동소체의 일종이며 직경이 수 nm 정도로 작다. 탄소나노튜브의 성질은 크게 3가지로 전기적 성질, 열적성질, 기계적성질로 구분된다. 탄소나노튜브는 109A/cm² 이상의 전류를 흘려줄 수 있으며 열전도도는 다이아몬드와 같이 매우 뛰어나며, 철강의 100배의 강도를 가지는 특징이 있다. 탄소섬유(Carbon fiber)와 비교하였을 때 탄소섬유는 1%의 변형만 있더라도 결합이 끊어지지만, 탄소나노튜브는 15%의 변형이 발생하더라도 끊어지지 않는다. 이러한 특성을 이용하여 반도체, 배터리, 섬유, 센서 등과 같은 여러 분야에서 활용되고 있다.

2.2.4 카본블랙(Carbon black)

카본블랙은 천연가스, 타르, oil 등의 탄화수소를 불완전 연소시켜 생성되며 입자 크기는 흑연과 유사하다. 일반적으로 소비량의 85%는 고무용으로 사용될 정도로 대표적인 고무 첨가제이며 11% 정도가 인쇄잉크를 비롯하여 흑색안료로 사용된다. 카본블랙은 보강성, 착색성, 내후성, 내화학성 및 전기적 전도성 등의 다양한 특성을 가지고 있으나 매질과의 친화력이 낮아 이용하는데 어려움을 내포하고 있다. 카본블랙은 잉크, 코팅, 플라스틱 및 건축 등 다양한 용도로 사용되며 입자 크기, 표면적, 다공성, 구조, 표면 화학 처리, 물리적 형태 등 여러 가지 물성이나 분산 정도에 의해 성능이 좌우된다. 입자 크기 및 표면적에 따라 색도에 영향을 미치며 더 높은 점도를 갖지만 분산에 어려움을 가질 수 있다. 또한, 표면 화학 처리를 하여 표면을 산화시키면 분산성을 개선시키고 전기저항성을 향상되는 등 물성에 따라서 성능이 달라지는 특징이 있다. 다음 Table 1은 카본블랙의 물리적 특성이다.

Table 1. Physical characteristics of carbon black (Ahn et al., 2016)

Appearance	Powder / Pellet	Color	Black
Density (20℃)	1.7~2.3g/ml	pH (ASTM 1512)	4.11
Bulk density	1.25~4lb/ft ³ 20~640kg/m ³	Solubility	Insoluble
Pellet	200~680kg/m ³	Decomposition	300℃
Powder	20~380kg/m ³	Self-ignition temperature	>140℃

Table 2. Mix design

Contents of conductive material (%)	W/C (%)	Water (g)	Cement (g)	Conductive material (g)	Aggregate (g)	Note
0	300	3000	1000	0	1375.4	Relative density (50%)
3				90		
5				150		
7				210		

3. 실험조건 및 방법

3.1 실내실험 계획

본 연구에서는 전도성 재료와 마이크로시멘트의 혼합에 따른 압축강도 변화를 파악하기 위해 탄소섬유를 사용하여 각각의 조건에 따른 일축압축강도 시험을 수행하였다. 본 연구의 실험조건은 Table 2와 같다. 물-시멘트비를 300%로 고정하였고 상대밀도 50%의 조건으로 공시체를 제작하였다. 탄소섬유는 물-시멘트비에서 사용한 물 무게의 0%, 3%, 5%, 7%에 대하여 배합하였다. 물-시멘트 비가 매우 높기 때문에 공시체가 자랍할 수 있는 시간이 3일 소요되어 시료 제작 후 3일 뒤 탈형하였으며 탈형 후 7일, 14일, 28일 수중 양생을 실시하였다. 각각의 조건의 자세한 배합비는 Table 2와 같으며 각 재령일수에 맞춰 전도성 재료 배합비에 따른 일축압축강도 시험을 수행하였다.

3.2 실험재료

3.2.1 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트는 S사의 마이크로시멘트를 사용하였다. 마이크로시멘트의 물리·화학적 특성은 Table 3, 4와 같다.

Table 3. Physical characteristics of micro cement

Specific gravity	Fineness (cm^2/g)	Flow (%)	Setting time		Compressive strength (MPa/days)		
			Initial (min)	Final (hr:min)	3	7	28
2.96	6,800	109.3	240	5:30	36	52	68

Table 4. Chemical characteristics of micro cement

Composition (%)	SiO_2	$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	$CaO + MgO$	$Na_2O + K_2O$	SO_3
	28.34	11.9	57.9	0.64	3.07

3.2.2 골재

본 연구에 사용된 골재는 유효 입경이 0.33mm에서 0.87

mm의 범위에 해당하는 규사를 사용하였다. 규사에 대하여 기본 물성시험을 진행하였고 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Classification characteristics of test sand

Specific gravity	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	γ_{dmax} (g/cm^3)	γ_{dmin} (g/cm^3)
2.65	0.47	0.33	1.52	1.41	1.33

3.2.3 전도성 재료

본 연구에서 전도성 재료는 E사의 가공된 분말형 탄소섬유(Carbon fiber)를 사용하였다. 탄소섬유의 물리적 특성은 다음 Table 6과 같다.

Table 6. Physical characteristics of carbon fiber

Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Strain (%)	Density (g/cm^3)	Yield tex ($g/1,000m$)
4,900	240	2.0	1.79	800

3.3 실험방법

3.3.1 공시체 제작

직경 50mm, 높이 500mm 원형 몰드에 상대밀도 50%의 조건으로 그라우트 액에 규사를 강사하는 방식으로 제작하였다. 공시체가 굳은 후 탈형하여 직경 50mm, 높이 100mm



Fig. 2. Test specimen

크기로 각 배합비 및 재령 일수별로 3개씩 제작하였고 재령 일수에 맞춰 수증양생을 실시하였다. 다음 조건별 공시체 거치 모습은 Fig. 2와 같다.

3.3.2 압축강도 시험

조건별로 제작된 공시체에 대하여 표면이 건조 상태가 되도록 물기를 닦고, 시험기 면과 접촉하는 공시체의 면에 있는 불순물 제거 및 평평하게 만든 후 시험을 수행하였다. 압축강도 측정은 시멘트의 강도 시험방법(KS L ISO 679)에 준하여 수행하였으며, Instron FastTrack 8800D 재료 시험기를 사용하여 1%/min의 변형속도로 재하하여 압축강도를 측정하였다. 하중 측정용 로드셀 용량은 100kN이며, $\pm 0.3\%$ 의 오차율을 가지며 전체 시험 시스템 전경은 Fig. 3과 같다.

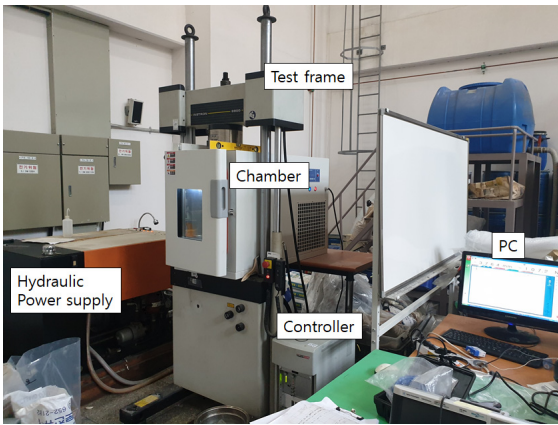


Fig. 3. View of compressive strength tester

4. 실험결과 및 분석

전도성 재료(탄소섬유)와 마이크로시멘트의 혼합에 따른 강도 변화를 파악하기 위해 각각 조건별로 공시체를 제작하였으며 압축강도 시험을 수행하여 전도성재료 배합비에 따른 일축압축강도 경향을 파악하였다.

4.1 실험결과 및 분석

물-시멘트비에서 사용한 물 무게에 대해 탄소섬유의 비율을 증가시켜 배합한 후 같은 조건 공시체 3개의 평균값을 데이터로 활용하였다. 압축강도 시험 결과는 다음 Table 7과 같다.

Fig. 4는 각각의 재령일수 별 배합비에 따른 일축압축강도(Unconfined compressive strength, UCS) 그래프이다. 전도성 재료로 탄소섬유를 혼합한 결과 양생 7일, 14일의 경우 탄소섬유 배합비가 증가할수록 일축압축강도는 증가하

Table 7. Result of unconfined compressive strength test

Curing days	Contents of conductive material (%)	1 (MPa)	2 (MPa)	3 (MPa)	Average (MPa)
7	0	0.45	0.50	0.55	0.5
	3	0.50	0.76	0.59	0.58
	5	0.69	0.58	0.62	0.62
	7	0.78	0.97	0.63	0.79
14	0	0.82	0.85	0.80	0.82
	3	0.98	0.88	1.30	1.05
	5	0.98	1.07	1.44	1.16
	7	1.34	1.34	1.41	1.36
28	0	1.69	1.79	1.85	1.78
	3	1.26	1.21	1.54	1.33
	5	1.19	1.48	1.33	1.33
	7	1.86	1.60	1.23	1.56

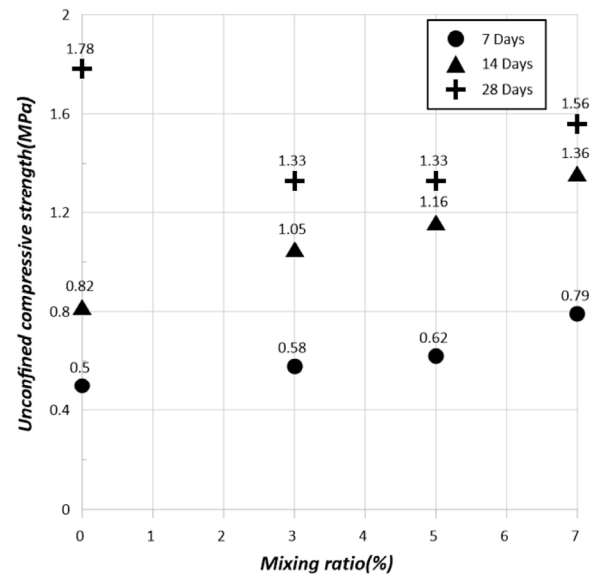


Fig. 4. Unconfined compressive strength by curing days with regard to the mixing ratio

는 것으로 확인되었다. 재령 28일의 경우 0%의 배합비에서 가장 큰 일축압축강도를 보였으며 재령 7일 14일과 같이 3%에서 7%로 배합비를 증가시킬수록 강도는 증가하는 것으로 확인되었다. 3%, 5%, 7%의 배합비에서 7일 재령일 기준 14일 재령의 강도 증가율은 약 72%~82%의 증가율을 보였고 14일 재령일 기준 28일 재령의 강도 증가율은 15%~26%의 증가율을 보였다. 하지만 탄소섬유를 혼합하지 않은 0%의 경우 7일 재령일 기준 14일 재령 강도 증가율은 64%, 14일 재령일 기준 28일 재령일의 강도 증가율은 117%로 큰 증가를 보였다. 이는 탄소섬유의 혼합으로 인해 시멘트의 조기 강도의 발현에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

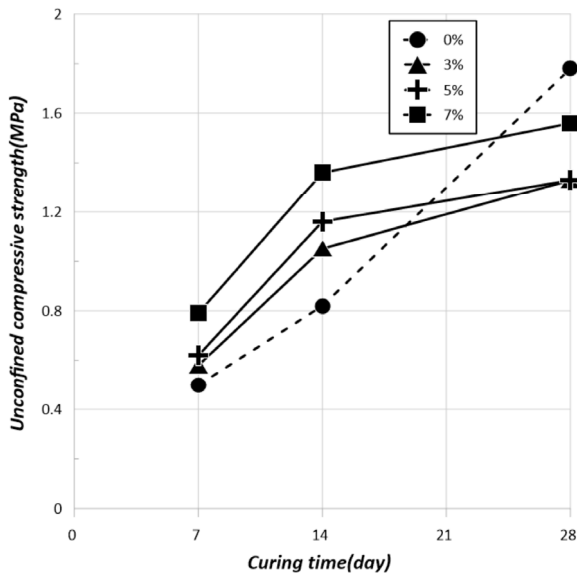


Fig. 5. Unconfined compressive strength by curing period

Fig. 5는 재령일수에 따른 일축압축강도의 변화를 나타내며, 재령일수가 증가할수록 강도는 증가하는 것을 확인하였다. 배합비가 증가할수록 강도는 증가하였으며, 재령 28일 강도는 탄소섬유를 혼합하지 않은 경우가 강도가 가장 큰 것으로 확인하였다. 배합비가 증가할수록 강도가 증가한 이유는 상대밀도 50%의 느슨한 공시체 공극에 들어간 탄소 섬유 입자들이 세립분 역할을 수행하여 공시체의 밀도 증가로 인해 압축강도가 증가한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 그라우트 재와 전도성 재료를 혼합하여 시공 후 전기비저항 측정을 통해 품질관리가 가능한 전도성 그라우팅 재료개발의 기초 연구로 그라우트재인 마이크로시멘트와 전도성 재료인 탄소섬유를 혼합하여 배합비 및 재령일수 조건이 다른 공시체를 사용하여 일축압축시험을 수행하였으며, 시험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 획득하였다.

- (1) 그라우팅 주입재료로 일반포틀랜드시멘트와 마이크로시멘트를 비교하였을 때 분말도가 더 높고 초기강도 및 장기강도에서 우수한 특성을 보이며 주입 개선 효과가 있는 마이크로시멘트를 그라우트 재료로 선정하였다.
- (2) 그라우트 재와 혼합하여 사용할 전도성 재료로는 탄소섬유를 사용하였으며 탄소섬유는 시멘트질 재료에서 전자 전도 경로가 우수하여 본 연구에서 만족할 만한 전

기비저항 값이 측정될 것으로 판단되며 시멘트 재료와 혼합하였을 때 강도 증가, 내구성 개선, 기계적 성능 개선 등의 효과가 있으므로 탄소섬유를 사용하였다.

- (3) 전도성 재료(탄소섬유)와 마이크로시멘트를 혼합하여 제작된 공시체의 압축강도 변화를 확인하기 위해 실내시험을 수행하였다. 그 결과로 전도성 재료로 탄소섬유를 혼합한 결과 재령 7일, 14일의 경우, 탄소섬유 배합비가 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 것으로 확인되었으며 재령 28일의 경우 3%에서 7%의 배합비 구간에서 강도증가를 확인하였다.
- (4) 탄소섬유를 혼합하지 않은 0%의 배합비와 3%, 5%, 7%의 배합비에서 각 재령일에 따라 강도 증가율을 확인해본 결과 탄소섬유는 시멘트의 초기강도의 발현에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.
- (5) 탄소섬유를 배합한 일축압축시험 수행결과 재령일수가 증가할수록 강도는 증가하는 것을 확인하였다. 배합비가 증가할수록 강도는 증가하였으며, 재령 28일 강도는 탄소섬유를 혼합하지 않은 경우가 강도가 가장 큰 것으로 확인하였다. 배합비가 증가할수록 강도가 증가한 이유는 상대밀도 50%의 느슨한 공시체 공극에 들어간 탄소섬유 입자들이 세립분 역할을 수행하여 공시체의 밀도 증가로 인해 압축강도가 증가한 것으로 판단된다.

향후 전기비저항 측정을 통해 품질관리가 가능한 전도성 그라우팅 재료개발을 위해서는 강도 및 전기전도도와 같은 물리적 특성을 만족하는 전도성 재료에 대한 연구가 더 필요하며, 이러한 전도성 재료가 그라우트재와 혼합되었을 때 그라우팅 재료로서 적합한 성능을 만족하는지에 대한 연구도 추가적으로 더 진행되어야 할 것이다. 추후 연구에서는 탄소섬유를 기반으로 Graphite, Carbon Black과 같은 다양한 전도성 재료에 대해 전도성 재료가 혼합된 그라우팅 재료의 전기전도도 측정 및 강도 평가를 통해 전도성 재료와 그라우팅 재료 간의 상호작용 평가 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 건설기술연구사업의 연구비지원(20SCIP-C151438-02/20SCIP-C151585-02) “지반함몰 및 액상화에 관한 지하안전 위험도 평가 고도화 기술 개발”에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ahn, H. J., Kim, S. H. and Choi, S. K. (2016), An experimental study on electric resistivity and exothermic property of electrically conductive mortar using amorphous graphite, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 16, No. 3, pp. 247~255.
2. Cao, J. and Chung, D.D.L. (2001), Carbon fiber reinforced cement mortar improved by using acrylic dispersion as an admixture, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, Issue 11, pp. 1633~1637.
3. Chen, B. and Liu, J. (2003), Effect of fibers on expansion of concrete with a large amount of high f-CaO fly ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 10, pp. 1549~1552.
4. Graham, R. K., Huang, B., Shu, X. and Burdette, E.G. (2013), Laboratory evaluation of tensile strength and energy absorbing properties of cement mortar reinforced with micro- and meso-sized carbon fibers, *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp. 751~756.
5. Heo, W. (2010), Practical Application For Eco-Grouting Materials, Master's Thesis of Dankook University, pp. 15~18.
6. Kim, C. J. and Sun, J. Y. (2018), A study on the strength properties of grout containing blast-furnace slag and carbon fiber, *Journal of Advanced Engineering and Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 69~76.
7. Kim, H. C. (2017), A Study on the development of a grouting material containing blast furnace slag and carbon fiber, Doctoral Dissertation of Chosun University, pp. 53~96.
8. Kong, J. Y., Kim, C. K., Park, J. H. and Chun, B. S. (2010), Grouting effects of microfine cement in the rock-based sites, *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol. 11, No. 12, pp. 37~45.
9. Peyvandi, A., Soroushian, P., Balachandra, A. M. and Sobolev, K. (2013), Enhancement of the durability characteristics of concrete nanocomposite pipes with modified graphite nanoplatelets, *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 111~117.
10. Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. and Richard, G. (2005), Electrical resistivity survey in soil science: a review, *Soil and Tillage Research*, Vol. 83, Issue 2, pp. 173~193.
11. Sassani, A., Arabzadeh, A., Halil, C., Kim, S. H., Sadati, S. S. M., Gopalakrishnan, K., Taylor, P. C. and Abdualla, H. (2018), Carbon fiber-based electrically conductive concrete for salt-free deicing of pavement, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 203, pp. 799~809.
12. Seo, H. and Kim, D. H. (2019), Development of reinforcement grout materials using reinforcing fiber and blast furnace slag powder, *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol. 18, No. 3, pp. 101~112.
13. Shu, X., Graham, R. K., Huang, B. and Burdette, E. G. (2015), Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar, *Materials & Design*, Vol. 65, pp. 1222~1228.
14. Wang, S., Wen, S. and Chung, D.D.L. (2004), Resistance heating using electrically conductive cement, *Advances in Cement Research*, Vol. 16, Issue 4, pp. 161~166.
15. Wu, J., Liu, J. and Yang, F. (2014), Study on three-phase composite conductive concrete for pavement deicing, *Construction and Building Materials*, Vol. 75, pp. 129~135.