

고속철도교 기초 내진 및 수평저항성능 보강형 신개념 친환경말뚝 신공법의 실용화 기초연구

Basic study of new concept environment-friendly pile foundations with earthquake resistant foundation and lateral reinforcement on rapid-transit railway bridge

사공명† 백규호* 임해식* 조국환** 나경***
Myung Sagong Kyu-Ho Paik Hae-Sik Lim Kook-hwan Cho Kyung Na

ABSTRACT

The Grout injected precast pile is widely used in rapid-transit railway bridge recently. The existing portland cement of well used filling at injected precast method that with low strength and environmental pollution, unstable in which ground water contamination by cement flow out, ground relaxation by water down, decrease of horizontality resistance and durability and load transfer divide etc. In particular, as in rapid-transit railway bridge need to secure safety from different angle with vibration of high speed train, horizontal force when train stop and earthquake. Works of foundation construction consider to requirements of the times to coal yard green growth. Together, new green foundation method for possible economics and securing of reduce the term of works are material to developments.

Therefore, we carried out study that it is using and development new concept environment - friendly filling include durability and earthquake resistance, for secure safety and minimize environment pollution. To achieve this, we carried out difference tests that new green fillings of underwater concrete, high liquidity, high viscosity, early stiffness as compared to existing portland cement fillings. As results, new green filling have outstanding application at precast pile method and micropile construction method with vertical bearing capacity, horizontal bearing capacity and many case. From now on we will be looking forward to development of new environment-friendly foundation method from various further studies.

국문요약

고속철도교의 기초로 많이 사용되고 있는 매입말뚝에서 천공으로 이완된 지반과 말뚝 사이의 충전재로서 기존 포트랜드 시멘트계는 쏘일시멘트 강도가 낮고 시멘트 용출로 인한 지하수 오염, 회석 및 일수현상으로 인한 지표부 지반의 이완, 수평 저항성의 저하, 하중분담효과의 저하 등 안정성 확보 문제와 환경오염 문제를 내포하고 있었다. 특히, 고속철도교의 경우 열차진동, 급정거시 충격수평력 작용, 지진 등 일반 구조물 기초와는 달리 다양한 측면에서 안정성 확보가 필요하며, 기초 시공 분야도 저탄소 녹색성장이라는 친환경 기초의 시대적 요구사항을 고려해야 하는 실정이다. 더불어 경제성 및 공기 단축 등 시공성 확보까지 가능한 새로운 미래형 친환경 기초공법의 개발이 필수적이다.

따라서 기존 공법의 내구성 및 내진성, 내수평성을 개선하고, 환경오염을 최소화 할 수 있도록 새로운 충전재료의 개발과, 시공방법의 개선을 통해 구조적 안전성과 환경적 저해요소를 최소화하기 위한 다양한 시험 및 기초연구를 실시하였다. 이를 위해 수중불분리성과 고유동성, 고점성, 고침투성, 조강성 등을 동시에 가지는 신개념의 고성능 다기능의 충전재를 활용하여 기존의 시멘트계 충전재와의 적용성 비교시험을 실시하였다. 그 결과 기존 매입말뚝 공법 및 마이크로 파일 기초에 적용하였을 경우 연직지지력, 수평저항력 등 많은 측면에서 뛰어난 적용성을 보이고 있어 향후 다양한 추가 연구를 통해 새로운 친환경 기초로의 개발도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

E-mail : rockcore@krri.re.kr

TEL : (031)460-5363 FAX : (031)460-5319

* 관동대학교 토목공학과 교수

** LH 공사 토목설계처 차장

*** 정회원, 국립서울산업대학교 철도건설공학과 교수

**** 정회원, 한국철도시설공단 영남본부 시설운영사업단 단장

1. 서론

1.1 연구 배경

고속철도교 기초의 경우 구조물의 안전을 위해 연직하중에 대한 안정성 이외에 지진 및 열차진동, 반복하중, 수평하중, 충격하중 등에 대한 내진 및 내수평력 기능의 확보가 중요하다. 내진성능이나 수평저항력을 기대하기 위해서는 말뚝의 두부 또는 두부 이하 지표부 지반의 강성 및 강도 증대가 필수적이다. 현재 현장타설말뚝에 비해 시공성과 경제성이 우수한 매입말뚝공법이 철도교의 기초공법으로 많이 적용되고는 있으나, 기성말뚝 매입 후 주변지반과의 밀착을 위해 지금까지 사용되어 온 충전재는 강도가 낮고 시멘트 용출 등의 일수현상으로 인한 지표부 지반의 이완, 미충진으로 인한 수평저항성 감소, 내구성 및 하중분담효과 저하 등의 문제점을 갖고 있었다. 특히, 시멘트계 충전재의 경우에는 굳지 않은 상태에서 중금속 용출로 인한 환경오염문제 또한 최근 이슈화 되고 있다.

이러한 기존 충전재의 용출, 회석, 일수 현상으로 인한 기능적, 환경적 문제점을 개선하고 내진 및 수평저항성능을 보다 경제적이고 용이하게 확보하기 위해 본 연구에서는 친환경 다기능의 신재료를 이용한 충전재 개발과 충전 방법 및 장치의 개발 등을 통해 내진, 내수평력 성능이 향상된 신개념의 친환경 말뚝공법을 개발하였다. 이를 통해 기존의 충전재 보다 하중분담효과나 하중전이효과를 향상시켜서 말뚝의 직경 증대 효과에 따른 지지력 향상으로 말뚝의 설계 본수 및 근입 길이를 감소시킬 수 있는 효과를 기대 할 수 있다. 특히, 연직하중 외에 열차진동이나 지진에도 강한 기초공법, 친환경성 등의 측면에서 획기적인 신공법을 개발하여 안정성과 경제성 및 친환경성을 두루 갖춘 미래형 철도교 기초공법으로 실용화하는 것이 본 연구의 개발 배경이다.

1.2 연구 목적

열차진동이나 지진 및 다양한 하중조건에도 안정성을 유지하고 환경적인 측면에서도 우수한 획기적인 새로운 기초공법을 개발하여 안정성과 경제성 및 친환경성을 두루 갖춘 미래형 철도교 기초 신공법을 개발하는 것이 본 연구의 최종 목적이다.

2. 본론

2.1 재료적 특성

2.1.1 재료의 품질 규격

본 연구에서 개발된 재료(이하 Hi-FA로 칭함)는 표 1.과 같이 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도에서 무색 혹은 옅은 미황색을 띄고 있으며, pH는 2.9, 밀도는 1.0 g/cm^3 의 값을 갖는다.

표 1. Hi-FA 특징

Item	Unit	Specification	Result
Appearance		무색 또는 미황색 액체	엷은 미황색 액체
pH		3.0 ±1.0	2.9
Density	g/cm ³	1.05 ± 0.1	1.01

2.1.2 점도 특성 (물 / Hi-FA 220HVS 수용액의 점도 거동 특성)

Hi-FA 수용액의 온도와 농도에 따른 점도 특성을 파악하기 위하여 수용액의 온도를 15 ~ 40℃로 변화시켰고, Hi-FA의 농도를 물 대비 2~4% 로 변화시키면서 점도를 측정하였다. 그 결과 표 2.에서 보듯이 Hi-FA의 농도가 4%이상에서 수용액의 점도가 급격히 증가하였으며, 수용액의 온도가 25℃이상일 때 Hi-FA의 농도에 따른 수용액의 점도 특성이 일정한 것으로 나타났다.

표 2. Hi-FA 220HVS의 배합비(%)와 온도에 따른 Hi-FA의 점도 변화

온도(℃)	약제/물 중량(%)		
	2%	3%	4%
	W/C 50%	W/C 50%	W/C 50%
15	18,300	21,600	292,700
20	15,500	12,450	176,530
25	12,350	7,450	86,500
30	5,350	5,700	18,620
35	5,200	4,400	5,890

註) Brook Field DV-E VISCOMETER, 63sp, 0.6 ~100rpm

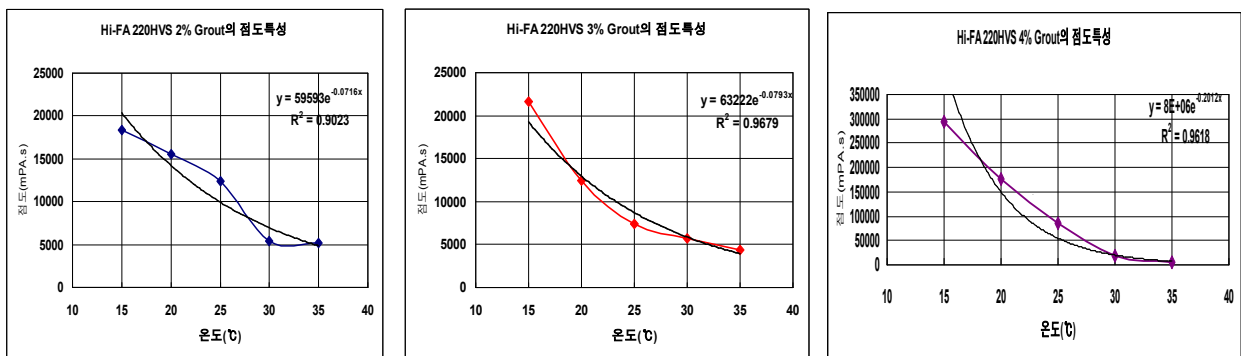


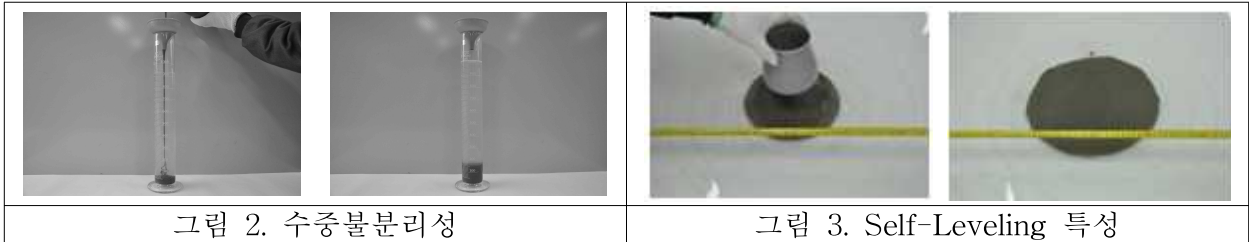
그림 1. Hi-FA 220HVS의 농도별 그라우트재의 점도 특성

표 2와 그림 1에서 보듯이 Hi-FA 220HVS 그라우트재 Grout의 점도 특성은 Hi-FA의 사용량과 수용액의 온도에 따라 그 점도가 다르게 발현되므로 물-시멘트 비와 Hi-FA의 사용 용량에 따라 점도특성을 조절하는 것이 가능하다. 또한 Hi-FA 사용량이 2%이상이고 수용액의 온도가 15℃이상일 때 수용액의 점도와 온도간에는 지수함수 관계가 성립되므로 그림 1에

표기한 지수함수식을 이용하면 Hi-FA의 배합비와 온도에 따른 그라우트재의 점도 특성을 예측할 수 있다.

2.1.3 수중불분리 특성

그림 2와 같이 물이 채워진 메스실린더에 Hi-FA 그라우트재를 투입했을 때 재료가 분리되지 않고 유지되는 특성을 통해서 Hi-FA 그라우트재는 수중불분리성을 갖는 것을 알 수 있다.

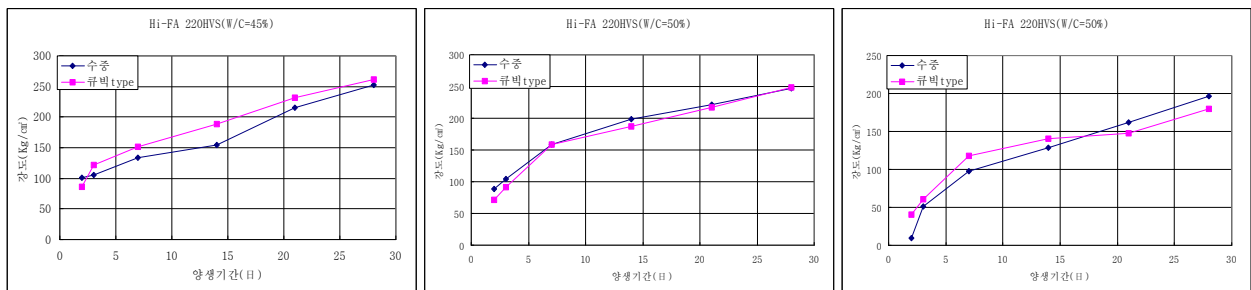


2.1.4 Self leveling 특성

본 연구에서 사용된 Hi-FA220HVS 그라우트재의 Self-Leveling 특성은 그림 3에서 보듯이 Hi-FA의 사용량과 온도에 따라 변화함을 알 수 있다. 온도에 따른 유동성은 표 4에서 보듯이 약 15 ~ 20℃에서 가장 적합한 상태를 보였고 물 온도가 20℃ 이상일 때에는 점도가 감소해서 유동성이 증가하였다.

2.1.5 강도 특성

본 연구에 사용된 Hi-FA 그라우트 재료의 강도 특성을 재령에 따라 측정하였다. Hi-FA 그라우트의 강도를 측정한 결과 Cement를 이용한 Hi-FA 그라우트재의 경우 재령 3일 이후에 100kg/cm² 이상의 강도 특성을 발휘하였다. 반면 Hi-Crete의 경우 재령 7일 이후에 100kg/cm² 이상의 강도가 발휘되었으며, Hi-FA 그라우트재에 비해 강도가 다소 저하되었다.



(a) 100% Cement (Hi-FA220HVS)

(b) Cement 70% + Hi-Crete 30%

그림 4. W/C 변화에 따른 재령의 강도 변화

註) 큐빅 타입 : 5cm×5cm×5cm의 정육면체, 실린더 타입 : 반지름 5.7cm, 높이 11.4cm인 원기둥

2.2 친환경 매입형 현장타설말뚝 시공법의 개발

투수계수가 높은 지반이나 하천, 해안가 또는 계곡 등과 같이 지하수의 흐름이 있는 지반에 매입형 현장타설말뚝을 시공하는 경우 종래 매입형 현장타설말뚝 시공법에서는 시공에 사용하는 시멘트 슬러리, 시멘트 페이스트, 콘크리트와 같은 일반적인 그라우트재가 유출되거나 지하수에 의하여 희석되어 말뚝의 주면마찰력이 감소하고 내구성 및 하중분담효과가 저하된다. 그리고 점토지반에 말뚝을 시공할 경우 종래 매입형 현장타설말뚝 시공법으로는 천공구에 그라우트재가 완전히 채워지지 않기 때문에 주면마찰력이 감소되는 문제가 발생한다. 또한 모래지반이나 충적층 지반에 매입형 현장타설말뚝을 시공하는 경우에 종래 매입형 현장타설말뚝 시공 방법은 말뚝과 천공구 사이의 공간만을 채우도록 투입된 일반 그라우트재가 천공구 주변 지반으로 서서히 침투해서 그라우트재의 충전으로 인한 말뚝 수평저항력의 감소와 내구성 및 하중분담효과 저하가 발생하여 말뚝의 침하가 커지는 문제가 있다.

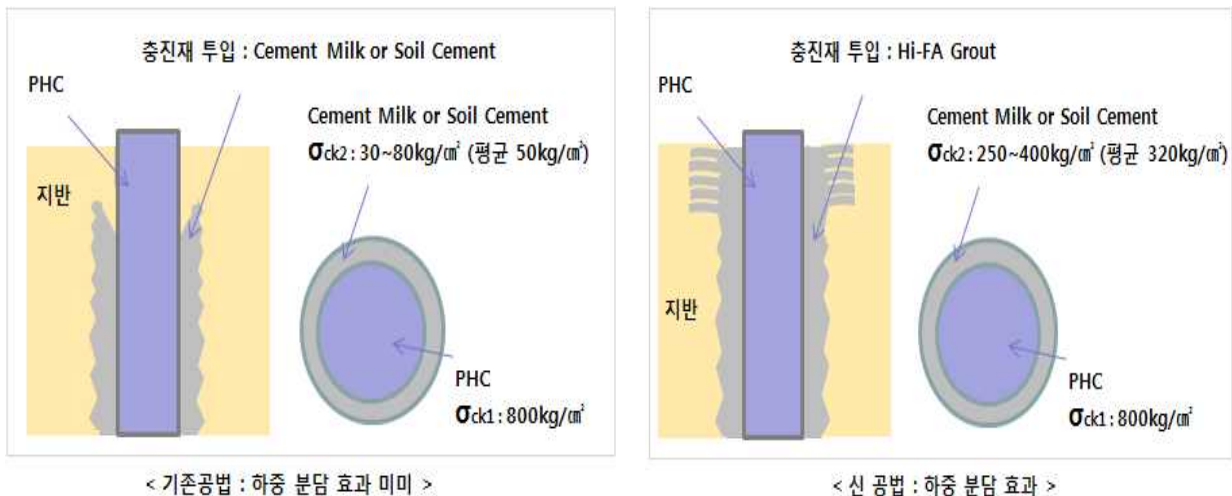


그림 5. 친환경 매입형 현장타설말뚝의 지지력 발휘 메카니즘

특히 400km/h이상의 속도로 달리는 초고속열차의 철도교는 열차진동, 지진, 반복(수평)하중 및 충격수평하중에 대한 지표부 수평저항성능이 강해야 하고, 기초 선단부 슬라임이 제거된 장기안정성이 확보된 고내구성의 기초가 요구되고 있다. 현재 고속열차용 철도교의 기초로 매입말뚝이 가장 많이 사용되고 있으며, 이때 사용되는 기존의 시멘트 충전재는 강도가 낮고 시멘트 용출 등의 일수현상으로 인해 지표부 지반의 이완 및 미충진으로 인한 수평저항력 감소와 내구성 및 하중분담효과 저하가 발생한다. 또한 시멘트계 충전재에 함유된 중금속 등의 발암물질 용출로 인해 환경오염문제가 발생할 수 있다. 따라서 고성능 다기능의 신재료(Hi-Fa)를 이용한 충전재의 개발을 통해 미래형 초고속철도교의 내진, 내수평력, 장기안정 성능이 향상된 신개념의 친환경 매입형 현장타설말뚝의 시공이 가능하다.

2.3 신공법과 기존공법의 특징 비교

본 연구에서 개발한 친환경 매입형 현장타설말뚝공법과 기존의 일반 매입형 현장타설말뚝 공법을 환경성, 시공품질, 시공성, 경제성, 고객편의성, 안정성 측면에서 비교한 결과를 표 4에 정리하였다. 표에서 보듯이 신공법은 Hi-FA 그라우트재를 충전재로 사용하기 때문에 지하수오염을 최소화할 수 있고, 굴착공내 밀실한 충전과 조강성, 우수한 지반 침투성으로 인해 말뚝의 지지력을 증대시키고 공사기간을 단축할 수 있는 특징을 갖는다.

표 3. 본 연구 개발공법과 기존공법의 비교

구분	비교 기준	일반시멘트계 충전재 공법	적용 신공법
친환경성	수질오염 (수중불분리성, 일수방지, 회석 및 용출)	지하수 회석, 용출, 일수현상 등으로 인해 지하수오염 발생가능	완벽한 수중불분리성으로 지하수 오염 최소화
시공품질	시공품질 개선	기존 동일	확저형, 확두형 구조체 형성으로 내진 및 내수평력에 강한 기초 보강 가능
	조기강도 특성	조강성 없음 (별도 혼화재 필요)	조강성이 좋아 공사기간 단축에 유리
	강도 안전성 (수중불분리성에 따른 재료손실 없음)	강도 저하(지하수 회석, 용출), 재료 손실(일수 현상)	강도, 내구성, 침투성 등으로 보강효과 최대
	지반 교란 (그라우트 주입압력 및 침투성)	주입압(중-고압)에 따른 지반 교란	무압 및 저압 주입으로 지반 교란 최소화
	일관성 (구조체 형성 범위 조절)	일관된 구조체 및 상부지반 구조체 형성 불가능	일관된 구조체 범위 조절 (확저, 확두형 구조체 가능)
시공성	주입시공성 (점성, 수중불분리성)	일수 현상으로 추가 충전재 주입 필요	수중불분리성으로 일수현상 없어 추가주입 불필요
	압력 (무압 및 저압 주입)	초저압 주입 불가능	무압 및 초저압 주입 가능
경제성	재료비용 비교	재료 분리현상으로 재료비용발생	재료손실 최소화 : 최상의 경제적 시공 가능
고객편의성	시공 시간 비교	천공시간 및 양생시간 필요	천공시간, 양생시간 단축
안정성	장기시공품질 안정성	일수현상 및 재료 분리현상으로 장기 안정성 확보 미흡	수중불분리로 장기안정성 유리

2.4 현장 적용 사례

본 연구에서 개발된 신개념 친환경 그라우트재의 성능을 평가하기 위하여 3곳의 현장에서 각각 앵커와 PHC매입말뚝, 마이크로말뚝을 시공한 후 재하시험을 수행하였다.

2.4.1 양양 도로현장 사례

양양 도로현장은 현장타설말뚝의 정재하시험을 위한 반력 Anchor 시공 시 일반적인시멘트 그라우트재 대신 Hi-FA Green 그라우트재를 사용함으로써 앵커의 인발력을 증대시켜서 설계심도를 줄인 사례이다.

1) 시공특성

본 현장은 지표면으로부터 26m 두께의 호박돌을 포함한 실트질 모래층과 풍화암층, 연암층으로 구성되어 있고 지하수위가 높아서 실트질 모래층에 일반 그라우팅 재료를 사용해서 앵커를 정착시킬 경우 지하수에 의한 그라우트재의 희석과 인근 하천수의 흐름에 의한 일수현상으로 인해 정착부로서의 역할을 수행하기 어렵다. 또한 앵커 시공에 사용된 그라우트재가 희석되어 지하수나 인근하천으로 유입됨에 따라 지하수나 하천이 오염되는 문제로 확대될 수도 있다. 따라서 본 현장에서는 실트질 모래층에서 앵커의 정착구를 확보하고 지하수에 의한 그라우트재의 희석을 방지해서 경제성과 친환경성이 우수한 앵커를 시공하기 위해서 그라우트재로 고점성과 고침투성 및 수중불분리 특성을 갖는 Hi-FA 를 사용하였다. 그 결과 일반 그라우트재를 사용할 경우에는 실트질 모래층을 앵커의 정착구간으로 활용하지 못하고 33m 깊이에 있는 풍화암층을 정착구간으로 사용하는 것으로 계획했으나 Hi-FA Green 그라우트재를 이용해서 약 10.5m 깊이의 실트질 모래층에 앵커의 정착구를 위치시키는 것으로 설계를 변경하였다. 따라서 본 현장에서는 일반 시멘트 그라우트재와 일반 시멘트와 혼합된 Hi-FA 그라우트재, 그리고 조강시멘트와 혼합된 Hi-FA Green 그라우트재를 이용해서 10.5m 깊이에 정착구를 위치시킨 3개의 앵커를 시공하였으며, 3일 동안 양생 후 각각의 앵커에 대해 인발시험을 수행하고 그 성능을 비교하였다.

2) 인발재하시험 결과

3개의 시험앵커는 자유장 없이 전 길이에 걸쳐 그라우팅을 실시하였고, 시공 2~3일후에 실시한 인발재하시험의 결과는 시험앵커를 앵커체와 그라우트재로 이루어진 복합말뚝 개념으로 가정하고 해석하였다.

시험앵커에 대한 인발재하시험 결과 표 4에서 보듯이 조강시멘트를 사용한 일반 그라우팅 (w/c 50%) 앵커체와 Hi-FA 그라우팅한 앵커체의 인발저항력은 각각 115ton과 155~170 ton 으로 나타났으며, Hi-FA를 사용함에 의해 앵커의 인발저항력이 약 34.5~47.8% 정도 증가한 것으로 나타났다. 이러한 앵커의 인발지지력 증가 요인은 신개념 친환경 그라우트재를 이용하여 일수현상 및 강도 저감요소를 최소화하여 앵커 정착부의 직경이 확대된 것과 같은 효과를 발휘했기 때문으로 판단된다.

그리고 인발재하시험에서 측정된 극한주면마찰력을 이용해서 일반 포틀랜드 시멘트계 그라우트와 Hi-FA Green 그라우트의 말뚝 직경 확대효과에 대하여 비교 분석하였다. 표 5에서 보듯이 Hi-FA Green 그라우트를 사용하면 앵커 정착구의 직경이 일반 포틀랜드 시멘트계 그라우트를 사용할 때보다 약 50% 증가하는 것으로 나타났다.

표 4. 인발재하시험 결과 하중 변위 곡선

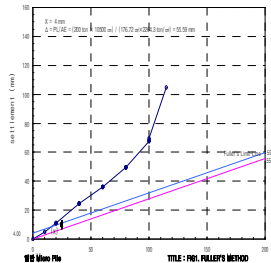
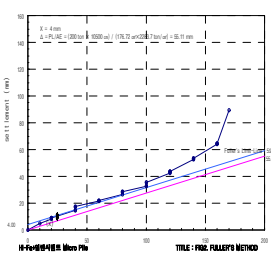
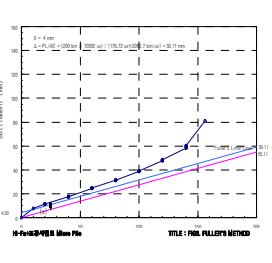
일반시멘트	Hi-FA+ 일반시멘트	Hi-FA+ 조강시멘트	해석조건
			① 일반시멘트 con'c 강도: 120kg/cm ² 탄성계수 : 2264.3ton/cm ² ② Hi-Fa 이용 con'c 강도 : 150kg/cm ² 탄성계수 : 2283.7ton/cm ²
115ton, 104.91mm	170ton, 89.35mm	156ton, 81.91mm	

표 5. 인발재하시험 결과를 이용한 그라우트 종류별 앵커 정착구의 직경 비교

구분	포틀랜드 시멘트계 그라우트 (일반 cement 70%+ 초조강 cement 30%)	Hi-FA Green 그라우트		비교
		일반 Cement 100%	일반 cement 70%+ 초조강 cement 30%	
양생기간(日)	3	3	2	
환산 직경 (mm)	150	222	203	

註) 천공경 150mm, Anchor 12.7mm X 10 ea, Hi-FA 3% 동일

2.4.2 경부고속철도현장 사례

본 현장은 신개념 친환경 그라우트재와 기존 포틀랜드 시멘트계 그라우트를 매입말뚝의 충전재로 사용했을 때 말뚝의 지지력 특성을 비교하기 위해 각기 다른 그라우트재를 사용한 2본의 시험말뚝에 대해 정적재하시험과 수평재하시험을 실시하였다.

1) 지반조건

본 현장 지반은 표 6과 같이 상부로부터 실트섞인 모래층, 자갈섞인 모래층, 풍화암층, 연암층으로 구성되어 있으며, 풍화암층의 출현심도는 14~17m였다.

표 6. 경부고속철도 00공구 지반조건

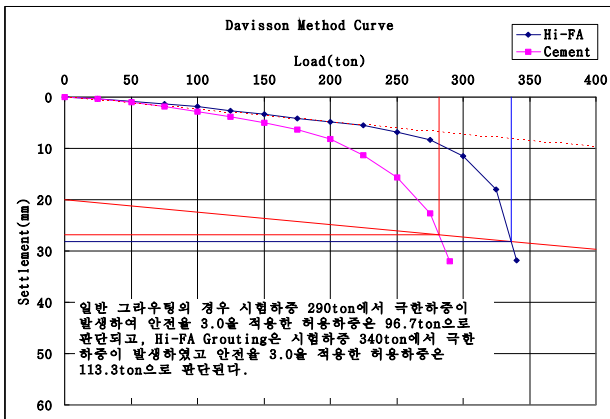
구분	Pier-9		Pier-10		Pier-11	
	심도	N (TCR/RQD)	심도	N (TCR/RQD)	심도	N (TCR/RQD)
매립토	0~1.7	11/30	0~5.7	5/30~15/30	0~5.8	4/30~16/30
퇴적층	1.7~12.5	4/30~50/7	5.7~12.8	17/30~50/6	5.8~12.6	12/30~50/7
잔류토	12.5~16.0	50/25~50/12	12.8~14.0	50/22	12.6~17.0	50/22~50/14
풍화암층	16.0~17.0	50/9	14.0~14.7	50/9	17.0~19.0	50/7~50/5
연암층	17.0~	(100/18)	14.7~	(87/6)	19.0~	(85/0)

2) 시공특성 및 정재하시험 결과

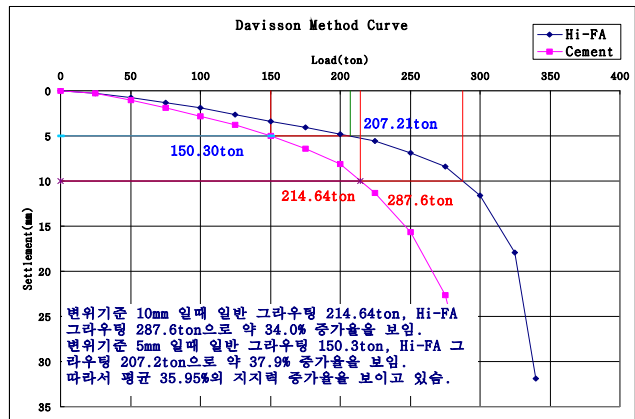
본 현장의 정재하시험은 일반 포틀랜드 시멘트계 그라우트와 Hi-FA Green 그라우트를 충전재로 사용하여 시공한 매입PHC말뚝에 대해서 주변마찰력의 파괴발현에 따른 충전재의 성능평가를 위해 그림 6과 같이 말뚝선단부에 두께 50mm의 스티로폼을 부착한 상태에서 실시하였다. 시공에는 직경 600mm의 PHC말뚝이 사용되었고, T4를 이용한 DRA공법으로 선단부가 14m 깊이에 위치하도록 시공하였다. 그리고 2본의 시험말뚝에 대해서 앵커반력을 이용한 정재하시험법으로 재하시험을 수행하였다.



그림 6. 시험말뚝 시공 전경



(a) 지지력 분석 결과



(b) 지지력 비교

그림 7. 정재하시험 결과

표 7. 시험말뚝의 정재하시험 결과

구분	극한하중 (ton)	전체침하량 (mm)	허용하중 (ton)	극한 주면마찰력 (ton/m ²)	허용 주면마찰력 (ton/m ²)
일반 시멘트 그라우트	290	37.6	96.7	10.99	3.66
Hi-FA Green 그라우트	340	31.87	113.3	12.88	4.29

본 현장의 일반 포틀랜드 시멘트계 그라우트와 Hi-FA Green 그라우트를 사용한 시험말뚝의 정재하시험 결과를 보면 그림 7과 표 7에서 보듯이 일반 그라우트의 경우 290ton의 하중에서 극한상태가 발현되었지만, Hi-FA Green 그라우트의 경우 340ton의 시험하중에서 극한상태가 발현되는 것으로 나타났다. 그리고 일반 시멘트 그라우트 대비 Hi-FA Green 그라우트 말뚝의 지지력 증가율은 약 35.95% 정도였고 주면마찰력의 증가율은 약 17% 였다. 이와 같은 지지력의 증가 원인은 신재료의 사용에 의한 말뚝 직경의 확대효과에 의한 것으로 판단되며, 그 효과를 확인하기 위하여 극한주면마찰력을 기준으로 한 환산직경과 Davisson 파괴기준 및 제안된 최대 주면마찰력에 대한 상대변위에 근거한 말뚝의 환산직경을 계산하였다.

재하시험으로부터 측정된 일반 포틀랜드 시멘트계 그라우트 주입말뚝의 극한 단위 주면마찰력을 기준으로 Hi-FA 그라우트 주입말뚝의 극한 단위 주면마찰력을 비교해서 계산한 Hi-FA 그라우트 주입말뚝의 환산직경은 705mm였으며, 시험에 사용된 PHC 말뚝과 Hi-FA 그라우트의 강도차이에 의한 관성 모멘트와 탄성계수비를 이용해서 계산한 Hi-FA 그라우트 주입말뚝의 환산직경은 약 653mm였다(표 8 참조). 또한 정재하시험 결과에 여러 연구자들이 제안한 파괴기준을 적용해서 구한 말뚝의 극한 단위 주면마찰력을 이용해서 Hi-FA 그라우트 주입말뚝의 환산직경을 구한 결과 말뚝직경은 715 ~ 978mm까지 분포함으로써 Hi-FA 그라우트에 의한 말뚝직경의 확대효과가 더욱 분명하게 나타났다. 따라서 Hi-FA Green 그라우트를 사용한 매입말뚝의 주면마찰력의 증가 원인은 말뚝과 그라우트재료의 부착력과 그라우트재의 강도 증진에 의한 말뚝 직경의 확대 효과에 따른 것으로 사료된다.

표 8. 측정된 극한 주면 마찰력을 이용한 말뚝 직경의 확대효과 분석 결과표

구분	환산 직경	극한주면 마찰력기준	Davisson Method	Van Weele (1964)	Broms, et al (1969)	Harvat & Van der Veen (1977)	Kishida & Takano (1976)
제안값 (mm)	탄성계수비와 관성모멘트 사용 계산	정재하시험 결과 이용	$\delta_e + D/30$	$\delta_e + 6$	$\delta_e + 20$	$\delta_e + 10$	$\delta_e + 2$
환산직경 (mm)	653	705	715	822	715	780	978

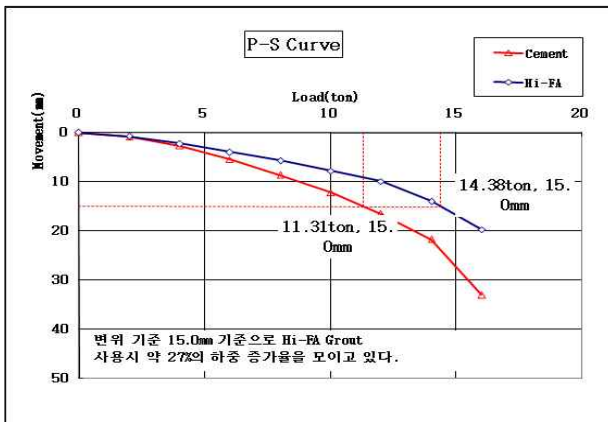
註) 매입말뚝 천공경 700mm, 다양한 파괴기준 제안값(정상섬, 1996)

3) 수평재하시험 분석결과

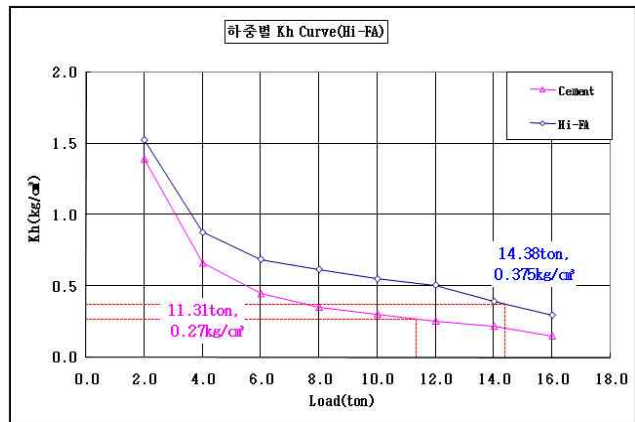
본 현장의 시험말뚝 중 일반 포틀랜드 시멘트계 그라우트와 Hi-FA Green 그라우트로 시공된 말뚝 2본에 대하여 일대일 동시재하 방식으로 수평재하시험을 실시하였으며 그 결과는 표 9와 그림 8과 같다.

표 9. 수평재하시험 결과

구분	최대 시험하중(ton)	전체 변위량(mm)	15mm 변위기준 허용하중(ton)	수평지반 반력계수(kg/cm ²)	비고
일반 Cement	16.0	32.97	11.31	0.27	일대일 동시재하 방식
Hi-FA	16.0	19.63	14.38	0.375	



(a) 수평재하시험 결과 그래프



(b) 수평지반반력계수 산정 그래프

그림 8. 수평재하시험 결과

수평재하시험 결과에서 보듯이 Hi-FA Green 그라우트를 충전재로 사용한 말뚝의 수평지지력이 일반 포틀랜드 시멘트계 그라우트를 사용한 말뚝의 수평지지력보다 약 27%정도의 큰 저항성을 갖는 것으로 나타났으며, 산정된 수평지반 반력계수도 0.375kg/cm²로 일반 포틀랜드 시멘트계 그라우트를 사용한 말뚝의 0.27kg/cm²보다 크게 나타났다. 이는 Hi-FA Green 그라우트의 수중불분리 특성에 의한 일수현상의 감소와 조기강도 발현 특성에 의한 말뚝직경 확대효과 때문으로 판단된다.

시험말뚝에 대한 수평재하시험 결과에서 계산된 수평지반반력계수(K_h) 값을 기준으로 Hi-FA Green 그라우트에 의한 말뚝직경 확대효과를 분석한 결과, 표 10과 같이 탄성 계수비와 관성모멘트를 사용해서 계산한 환산직경은 653mm였고, 재하시험 결과에서 얻어진 수평지반반력계수를 이용해서 환산한 Hi-FA Green 그라우트 매입말뚝의 직경은 650mm였다. 이는 매입말뚝에 Hi-FA Green 그라우트를 충전재로 사용함으로써 수평지지력 측면에서 실제 말뚝의 직경인 600mm 보다 약 8% 말뚝직경이 증가하는 효과가 발휘됨을 나타내는 것이다.

표 10. 수평지반반력계수를 이용한 말뚝 직경의 확대 효과 분석 결과표

구분	환산 직경	K _h 기준
제안값	탄성계수비 및 관성모멘트 사용 계산	재하시험 결과이용
환산직경(mm)	653	650

2.4.3 오창현장 사례

Hi-FA Green 그라우트를 이용하여 Micropile의 시공 시 주입재로서의 성능을 평가하기 위하여 지반조건이 풍화암층과 매립토층에 시공하였다.

그리고 Micropile 인발시험은 Micropile 시공 후 5일 경과 후 인발시험을 수행하였다.

표 11. Micro-pile 시공 재원

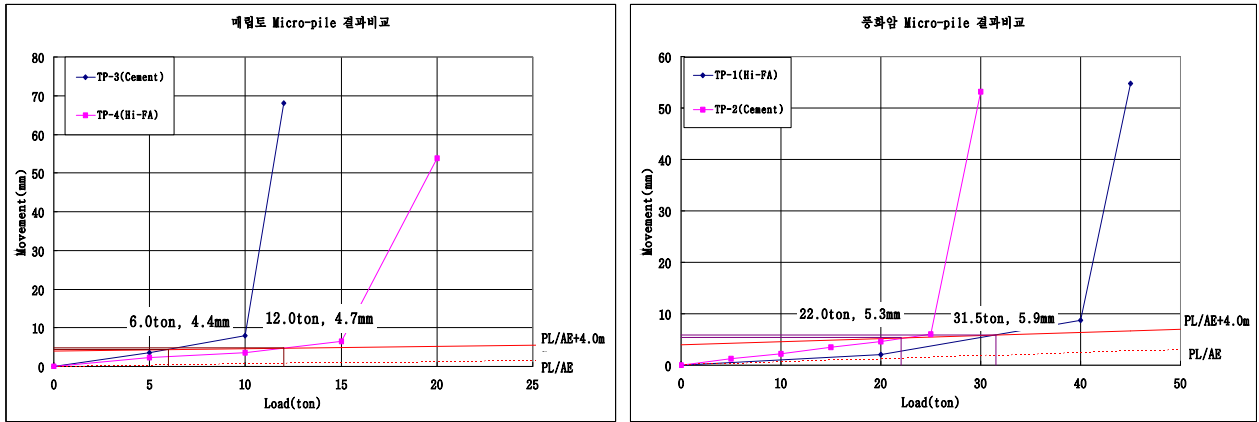
구분	Rod 직경(mm)	천공경(mm)	지반조건	관입심도(m)	주입재
Test-1	50	118	풍화암	2.5	Hi-FA
Test-2	50	118	풍화암	2.5	Cement
Test-3	50	118	매립토	2.5	Cement
Test-4	50	118	매립토	2.5	Hi-FA

표 12. Micropile 인발재하시험 결과

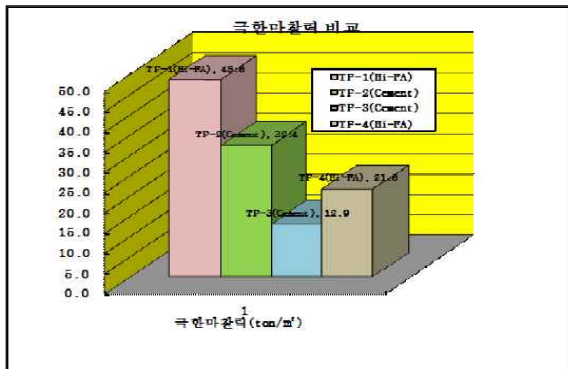
구분	최대 시험하중 (ton)	전체 인발량 (mm)	Fuller Method 항복하중 (ton)	안전율 (F.S)	허용하중 (ton)	주입재
Test-1	45	54.84	31.5	2.0	15.75	Hi-FA
Test-2	30	53.23	22.0	2.0	11.0	Cement
Test-3	12	68.01	6.0	2.0	3.0	Cement
Test-4	20	53.76	12.0	2.0	6.0	Hi-FA

註) 분석 방법은 Fuller의 제한 변위량을 기준으로 함(PL/AE + 4.0mm)

본 현장의 Micro-pile의 인발재하시험 결과 절리가 발달한 풍화암층에 시공된 Micropile의 경우 Hi-FA Green 그라우트를 사용한 말뚝의 경우는 항복하중이 31.5ton, 일반 포트랜드 시멘트계를 사용한 경우는 22.0ton으로 나타났고 매립토에 시공된 Micropile의 경우는 각각 12.0ton, 6.0ton으로 측정되었다.



(a) 매립토에 설치된 인발시험 결과 (b) 매립토에 설치된 인발시험 결과
 그림 8. Micro-pile 인발재하시험 결과



구분	극한 주면 마찰력 (ton/m ²)	주입재
Test-1	48.6	Hi-FA
Test-2	32.4	Cement
Test-3	12.9	Cement
Test-4	21.6	Hi-FA

그림 9. 극한 인발 주면 마찰력 산정

인발재하시험 결과를 Micropile의 천공 주면면적을 대비하여 극한 인발 저항력을 산정한 결과 그림 8과 같이 나타났으며, 풍화암층에서는 약 50%의 증가율을, 매립토층에서는 약 70%정도의 증가율을 보이고 있다. 측정된 재하시험 극한 주면 마찰력의 결과를 이용하여 말뚝 직경의 확대효과를 비교 분석한 결과는 표 12와 같다.

표 12. Micropile 인발재하시험 결과를 이용한 말뚝 직경 확대효과 분석 결과표

구분	풍화암에 근입된 Micropile		매립토에 근입된 Micropile		비고
	포틀랜드 시멘트계 Grout	Hi-FA Green Grout	포틀랜드 시멘트계 Grout	Hi-FA Green Grout	
Micropile 직경 (mm)	118	177	118	197	

註) Micro-pile 천공경 118mm, Micro-pile Rod 직경 50mm

측정된 극한 주면마찰력을 이용하여 Micropile의 확대효과를 비교 분석하면 풍화암에 근입된 Micropile이 약 50%, 매립토에 근입된 Micropile이 약 67%의 직경 확대효과를 발휘하는 것으로 나타났다.

2.4.4 고찰

Hi-FA Green 그라우트를 이용한 기초말뚝의 매입공법 및 Micropile, Ground Anchor의 시공 공법의 결과를 재하시험을 수행하여 지지력 증가 효과를 말뚝 직경의 증가효과로서 평가를 해보았다. 그 결과 연직력이 작용하는 말뚝의 지지력 부분에서 직경의 확대효과에 의한 증가양상이 뚜렷이 나타났으며, 수평력과 인발력이 작용하는 말뚝에서도 역시 마찰력이 크게 증가하는 양상이 분석되었다. 이는 Hi-FA Green 그라우트의 수중불분리 특성 및 고점성, 고유동성, 조기강도 발현의 특성에 의한 말뚝 본체 직경의 확대효과에 의한 것으로 나타났다.

표 13. 신개념 친환경 Grout(Hi-FA Green 그라우트)의 사용효과

적용 공법	지지력 구분	말뚝직경 (mm)	환산직경 (mm)	확대효과 (mm)	확대효과 (%)
매입공법	연직지지력	600	653	705~978	118~163
	수평 지지력	600	653	650	108
Micropile	연직 인발력	50	118	177~197	150~167
앵커식 복합말뚝	연직 인발력	127	150	203~222	135~148

3. 결론

매입형 말뚝공법에서 천공으로 이완된 지반과 말뚝 사이의 충전재로서 기존 포틀랜드 시멘트계 그라우트는 강도가 낮고 시멘트 용출로 인한 지하수 오염, 희석 및 일수현상으로 인한 지표부 지반의 이완, 수평 저항성의 감소 및 내구성의 저하, 하중분담효과의 저하 등 안정성 확보 문제와 환경오염 문제를 내포하고 있었다. 특히 고속철도교의 경우는 일시, 상시, 지진시의 구조물의 안전성을 확보하여야 하고 최근 PHC 말뚝을 이용한 매입공법의 도입에 따른 매입공법의 충전재의 역할과 성능이 중요한 요소로 작용하고 있다. 따라서 기존 공법의 내구성 및 내진성, 내수평성을 개선하고, 환경오염을 최소화 할 수 있도록 새로운 충전 재료의 개발과, 시공방법의 개선을 통해 구조적 안전성과 환경적 저해요소를 최소화 하기위하여 Hi-FA Green 그라우트를 개발, 현장에 적용하여 경제성 및 시공성을 확인하였다.

기초말뚝의 매입공법 및 Anchor, Micropile의 주입 충전재로서 활용하여 분석한 결과 지지력의 증가현상이 뚜렷이 발생하였고 그 주된 원인은 말뚝 직경의 확대효과에 의한 것으로 분석이 되었다. Hi-FA Green 그라우트를 사용하면 기존의 포틀랜드 시멘트계 그라우트의 단점으로 나타났던 부분들을 최소화하고 공기 단축 및 시공 수량의 감소에 의한 경제성 및 일수 및 희석방지에 의한 지지력 증가에 의한 구조적 안전성, 탁월한 시공성을 확보하는 것으로 분석되었다. 또한 내진에 의한 내구성 및 수평 저항성에 큰 영향요소로서 작용할 수 있을 것으로 사료된다.

한편 지지력 증가효과와 관련하여 말뚝 직경의 증대효과에 의한 평가방법에 대해서는 향후 다양한 시공조건 및 지반조건에서의 확인을 통해 보다 명확한 규명이 필요하며, 다각적인 검토를 통해 설계 및 시방조건의 반영 등이 이루어질 경우 친환경 및 경제적인 신공법으로서의 활용도 충분히 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 참고 문헌

1. 박봉근, 조국환, 나경, 윤태국, 이용준(2010.04), “고성능 다기능 특수 그라우트 신재료 개발 및 기초지반보강재로의 실용화 연구” 한국지반공학회
2. 한국지반공학회(2009), “구조물기초기준설계해설”, 구미서관
3. Logan, Utah (1997) "Ground Improvement Reinforcement Treatment", ASCE
4. Tomas Telford(1995) The practice of Soil reinforcing in Europe", TS Ingold
5. Philip B. Bedient, Hanadi S. Rifai, Charies J. Newell (1992)
"Ground Water Contamination", PTR Prentice Hall
6. 한국지반공학회(2004), “지반 환경”, 구미서관
7. Petros P. Xanthakos " Ground Anchors and Anchored Structures",
JOHN WILEY & SONS
8. National Highway Institute " Micropile Design and Construction ",
FHWA NHI-05-039 (2005)
9. 久野悟郎 "土の 流動化処理工法 (第二版) ", 技報堂出版
10. 松尾稔、本城勇介 , "地盤環境工学の新しい視点 (建設発生土類の有効活用) ",
技報堂出版
11. 実際の役立つ軟弱地盤対策工の設計 ' 計算例
12. 木暮敬二," 高有機質土の地盤工学 "
13. National Highway Institute " Design and Construction of Driven Pile
Foundations", FHWA HI-96-033 (1996)
14. Goodman, R. E., 1993, Engineering Geology, John Wiley and Sons, New York,
pp143-193.
15. Waltham, A. C., 1989, "Ground Subsidence", Champman & Hall, New York,
202p.
16. Waltham, A. C. and Smart, P., 1988. Photo-graphic feature:Civil engineering
difficultiesin the karst of China. Quarterly Journal of Engineering Geology,
London, 21, pp1~4.