

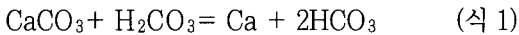


# SIG공법으로 보강된 석회암 공동부 교량 기초의 지지력

최진오<sup>\*1</sup>, 남열우<sup>\*2</sup>

## 1. 서론

우리나라 동부와 중부 내륙 산간지인 강원, 충북, 경북 지역에는 석회암이 많이 분포한다. 석회암은 통상 탄산염인 방해석이 50% 이상 함유된 암반을 일컫으며, 석회암의 균열 사이로 탄산가스(CO<sub>2</sub>)가 포함된 지하수가 침투하게 될 경우, 용해 및 침식작용이 발생하여 소규모 공동이 만들어지고 확대된다. 용해와 침식을 일으키는 화학작용은 식 1과 같으며, 석회암 공동의 확장과 붕괴는 그림 1과 같이 진행된다. 따라서, 용해 및 침식작용으로 석회암 공동이 지반에 구조물이 축조될 경우, 지지력 뿐 아니라 사용성을 저해하는 침하가 발생할 수 있으므로, 지반 보강 대책을 반드시 수립하여야 한다.



동해고속도로(동해~주문진) 4차로 확장공사 제 2

공구 구간에 지반 조사를 실시한 결과, 교량 기초 하부에 석회암 공동 및 파쇄대가 존재하여 기초의 지지력과 침하 규준을 만족시키기 위한 안정대책이 요구되었다. 이에 당사에서는 기초의 보강 대책으로 S.I.G(Super Injection Grouting)을 선택하여 현장에 적용하고, S.I.G의 사용성을 공학적으로 평가하였다.

## 2. 현장 조사

지반 조사를 실시한 결과, 도직교 및 망상 IC 1교에 석회암 공동 및 암반 파쇄대가 발달된 것을 확인하였다. 석회암 공동의 상태를 정확히 파악하여야만 지반 보강 범위가 결정되므로, 시추공에 대한 텔레뷰어(Televiewer) 탐사, 탄성과 토모그래피 탐사등과 같은 다양한 현장 조사(Sounding)를 수행하였다.

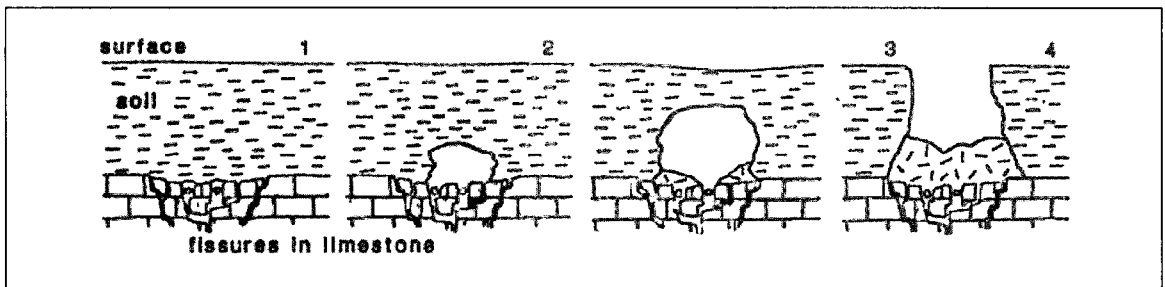
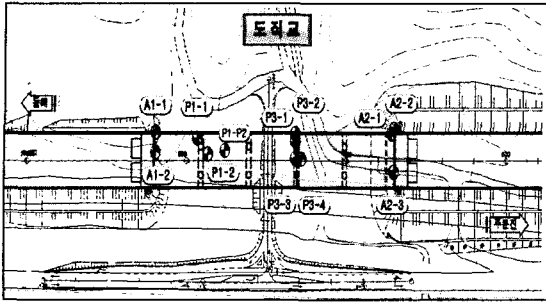


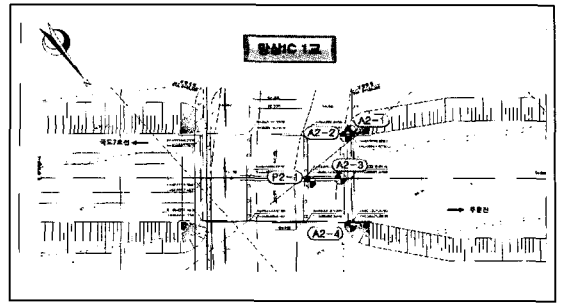
그림 1. 지하공동의 확장과 붕괴

\*1 정희원, LG건설 기술본부 과장

\*2 정희원, LG건설 기술본부 상무

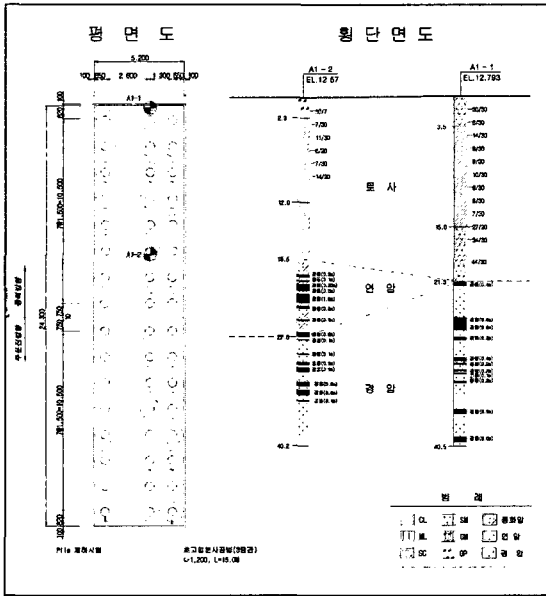


(a)도직교 시추 조사 위치

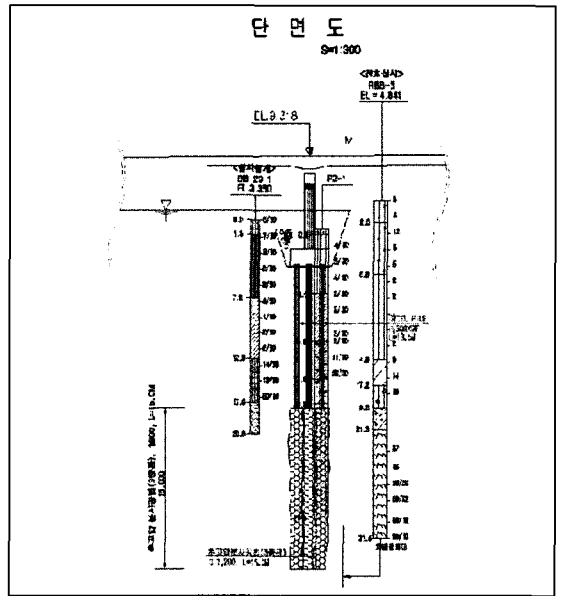


(b)망상 IC 1교 시추조사 위치

그림 2.



(a) 도직교 A1시추 조사 결과



(b) 망상 IC 1교 P2조사 결과

그림 3.

## 2.1 시추 조사 결과

도직교 및 망상 IC 1교의 시추조사 위치는 그림 2에 표시한 바와 같다.

도직교 전체에 걸쳐 석회암 공동은 연암 및 경암층에 불규칙적으로 분포하였으며 공동의 깊이는 연암층에서는 0.2~1.0m, 경암층에서는 0.1~0.6m의 두께를 보였다. 석회암 공동 및 파쇄대에는 점토가

충진되어 있었으며, 암반은 황갈색 ~암회색을 보였다. 그림 3(a)는 공동이 발달한 도직교 A1의 시추조사 결과이다. 도직교의 다른 위치의 시추 조사 역시 비슷한 석회암 공동의 분포를 보였다. 망상 IC 1교의 경우 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 석회암의 공동이 발달하지는 않았으나, 두꺼운 충적층 아래로 풍화 및 파쇄가 심하게 발달한 석회암층이 존재하였다.

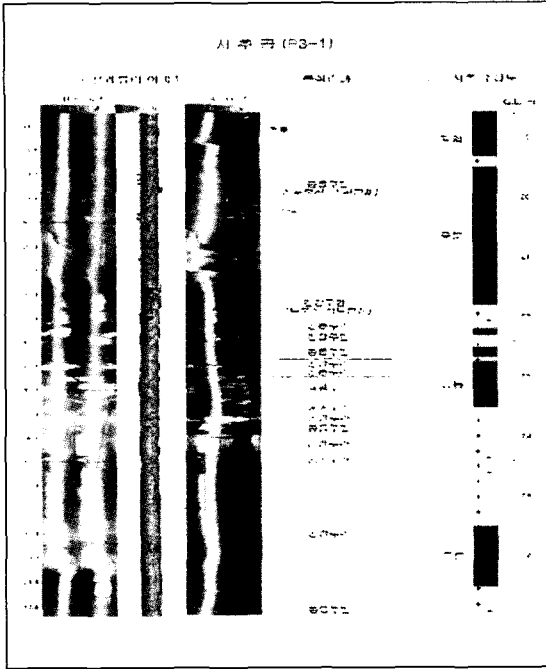


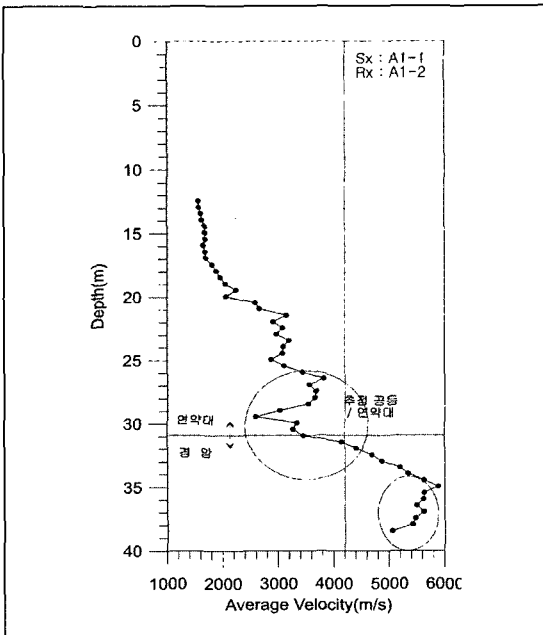
그림 4. 텔레뷰어로 확인한 도직교 P3 시추공내 석회암 공동

## 2.2 물리 탐사 결과

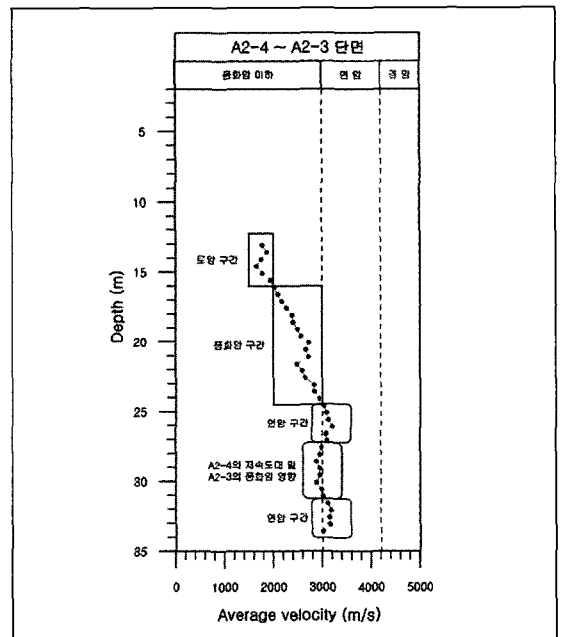
시추 조사를 통하여 확인한 석회암 공동의 형상을 텔레뷰어(Televiewer)를 통하여 확인할 수 있었다. 그림 4는 석회암 공동이 발달한 도직교 P3에서 촬영한 시추공 내부의 모습이다.

석회암 공동이 발달한 도직교와 석회암의 파쇄가 심한 망상 IC 1교에 대한 탄성과 토모그래피 탐사 결과는 그림 5와 같다.

지반 지질 조사에서 확인한 바와 같이 도직교는 연암~경암부에 걸쳐 석회암 공동이 크게 발달하였으며 공동에 점토 충전으로 인하여 탄성파의 속도가 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 크게 감소하였다. 망상 IC 1교는 석회암을 모암으로 하나, 공동보다는 파쇄 및 풍화가 크게 진전된 암반이다. 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 깊이가 깊어지더라도 탄성파의 속도가 증가하지 않아 파쇄가 매우 깊은 깊이까지 발달했음을 확인하였다.



(a) 석회암 공동이 발달한 도직교 A1 탄성파 시험 결과



(b) 석회암 파쇄가 심한 망상 IC 1교 탄성파 시험 결과

그림 5.



### 3. S.I.G (Super Injection Grouting) 를 이용한 석회암 공동 보강

#### 3.1 원리 및 시공 순서

지반 보강에 많이 활용되는 주입공법(Grouting Method)은 지중에 주입재를 강재로 침투시켜 지반 강도 증대 및 투수성을 감소시키기 위한 목적으로 주로 사용된다. 당 현장에서 지반 보강을 위하여 도입한 S.I.G공법은 삼중관식 주입공법이다. 삼중관식 주입공법을 단관, 이중관식 공법과의 비교하면 표 1 과 같이 정리된다.

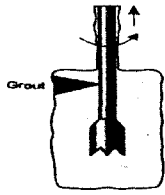
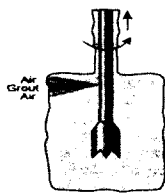
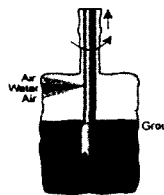
삼중관식 고압 분사 주입공법의 원리는 순수한 물을 압축공기와 함께 약 200~500 kg/cm<sup>2</sup>의 초고압

으로 분사시켜 지반을 절삭하고, 절삭토사를 지표로 배출시키면서 형성된 공간을 시멘트 주입재인 고결체로 채우는 공법을 말한다. 같은 3중관식 주입공법이라도 S.I.G(Super Injection Method)가 절삭된 지반에 시멘트 밀크를 충전하는 치환공법이라면 R.J.P(Rodin Jet Pile)은 시멘트 밀크를 절삭토와 교반하는 공법이다. 따라서, S.I.G공법이 개량유효경(1200mm정도)이 작으나 강도 및 내구성이 우수하고, R.J.P공법은 저장도이긴 하나 대구경(2000mm)의 지반 개량이 가능하다는 특징을 가지고 있다. S.I.G 공법의 시공 순서는 그림 6과 같다.

S.I.G공법의 장비 조합과 시공 현황은 그림 7과 같다.

S.I.G공법은 지반 보강과 차수가 필요한 연약지반

표 1. 주입공법의 종류

공법 종류	단관식	이중관식	삼중관식
공법 개요도			
경화재	Cement	Cement + Air	Cement + Water + Air
개량재	물유리계, 시멘트계	시멘트계	시멘트계
개량경(Diameter)	300~500mm	500~1,200mm	1,200~2,000mm
개량 강도(kg/cm <sup>2</sup> )	25~40	20~90	100~300
대표 공법	C.C.P	J.S.P	S.I.G, R.G.P

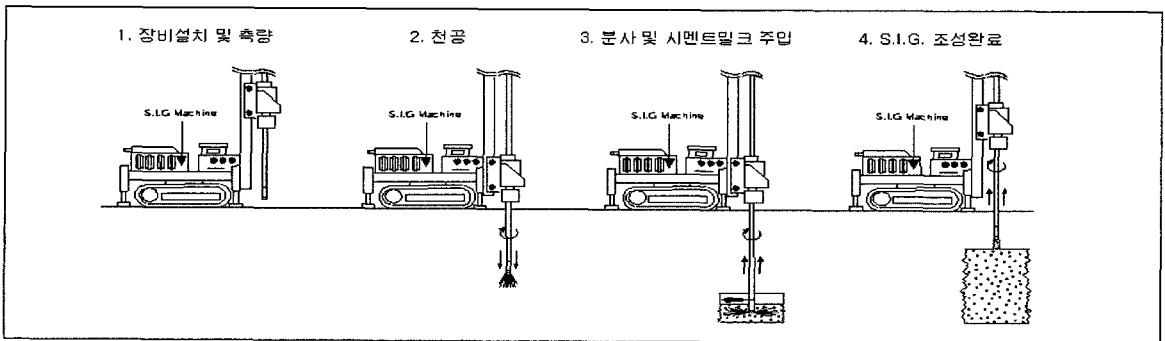


그림 6. S.I.G 공법의 시공 순서

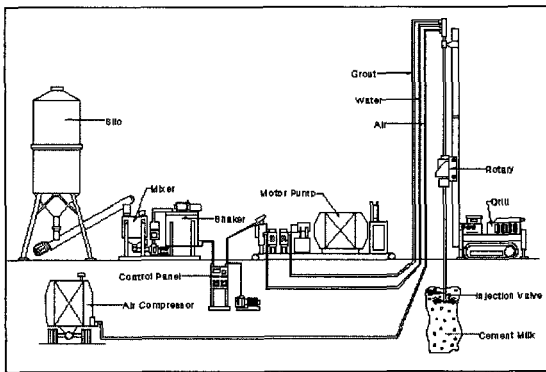
내 기초보강등에 사용되며, 당 현장에서는 지하 공동부에 충전된 점토를 제거하고 양질의 주입재로 공동부를 보강하여 기초의 지지력 및 사용성을 확보하기 위한 방안으로 도입되었다.

### 3.2 석회암 공동 보강을 위한 S.I.G의 현장 적용

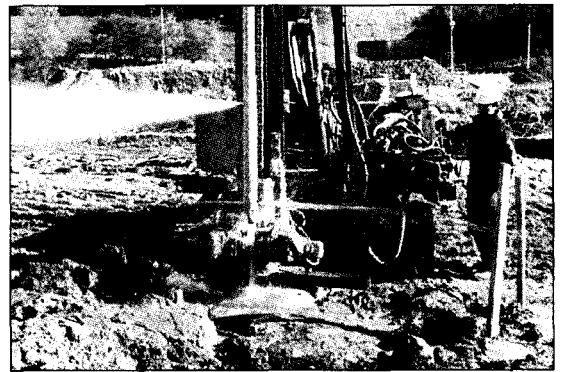
석회암 공동부가 발달한 도직교 및 석회암 파쇄대

가 발달한 망상 IC 1교에 기초가 시공되기 위해서는 지반 보강이 필요하다. 그리하여 석회암 공동부에 S.I.G 고결체를 형성하고 그 위에 말뚝을 시공하는 방안을 선택하였다.

S.I.G 보강의 효과를 확인을 위하여 도직교 P1과 P2사이에 시험시공을 실시하였다. 시추조사 결과 G.L-9.0~14.5m까지 석회암 공동이 분포해 있고 그 아래로 경암이 존재하였다. 경암에 1.5m 관입시

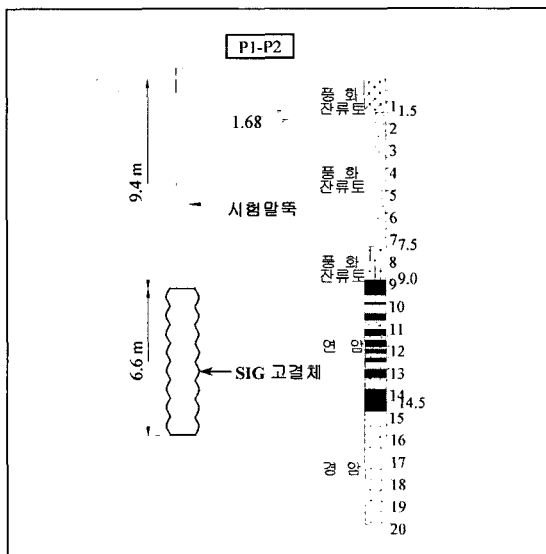


(a) S.I.G 장비조합

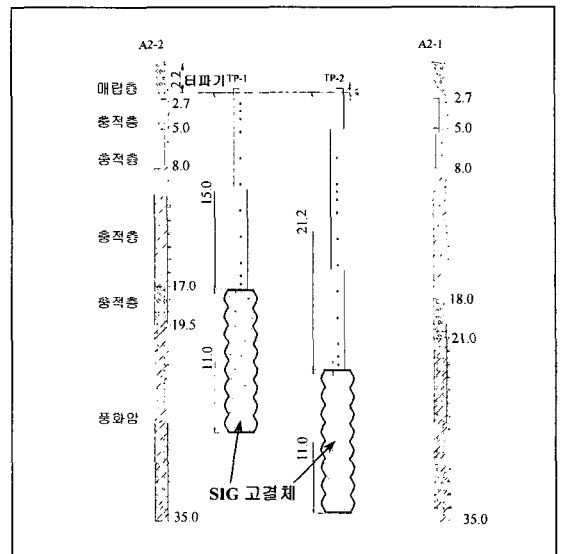


(b) S.I.G 시공

그림 7.

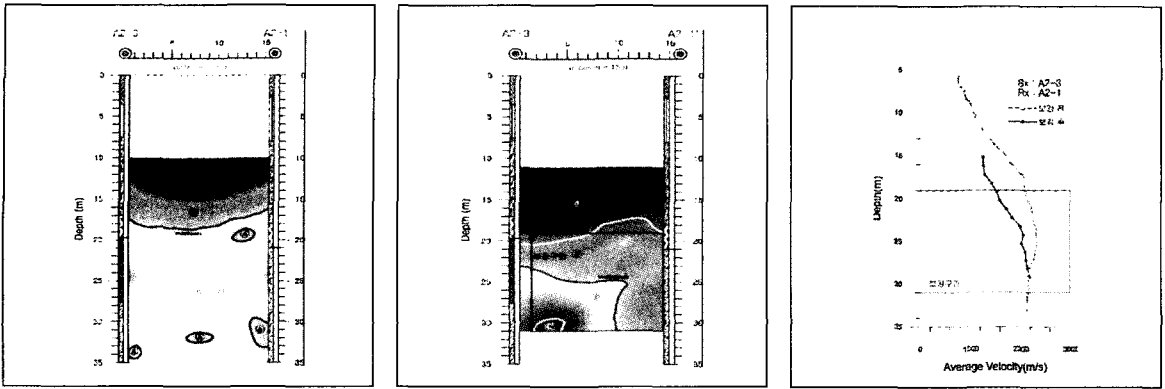


(a) 도직교에 시공된 S.I.G 보강체



(b) 망상 IC 1교 A2에 시공된 S.I.G 보강체

그림 8.

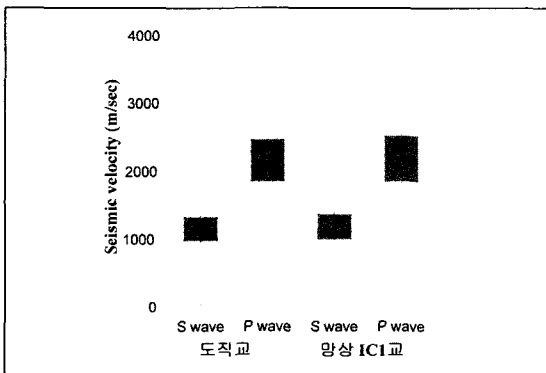


(a) 보강전

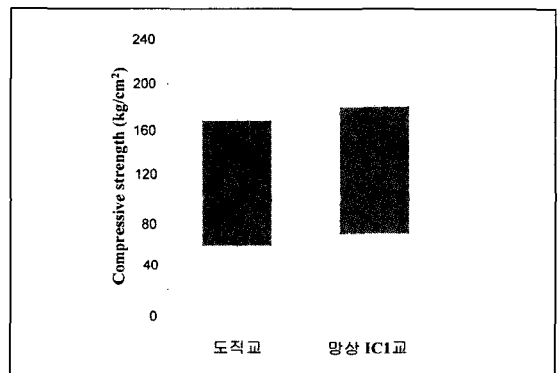
(b) S.I.G 보강 후

(c) 보강 전후 깊이별 탄성과 속도

그림 9. 망상 IC 1교 A2 탄성과 탐사 결과



(a) S.I.G 고결체에 대한 탄성과 시험 결과



(b) S.I.G 고결체에 대한 일축압축 시험 결과

그림 10.

켜 S.I.G 고결체를 만들어 지반 보강을 실시하였으며, 시험말뚝의 길이와 S.I.G 보강 깊이는 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 각각 9.4m, 6.6m이다. 또한, S.I.G 보강체 위에 시공된 말뚝의 하중 전이 특성을 파악하기 위하여 스트레인게이지를 설치하였다. 망상 IC 1교의 A2에도 그림 8(b)에 표시한 바와 같이 2개의 사용 말뚝 아래 11.0m 깊이로 S.I.G를 이용한 지반 보강을 실시하였다.

S.I.G 보강을 실시한 후 지반 보강의 효과를 확인하기 위하여 확인 탄성과 시험을 실시하여 보강 전후의 토모그래피 결과를 비교하였다.

그림 9(a), (b)에서 제시한 바와 같이 S.I.G 보강을 실시하자 암반 공동부가 고결체로 채워지면서 보

강 구간의 탄성과 속도가 높아졌으나, 그림 9(c)에서 제시한 평균 탄성과 속도는 감소하였다. 이는 석회암의 탄성계수보다 고결체의 탄성계수가 떨어지기 때문이며, 부분적으로 고압 그라우팅에 따른 지반 교란의 영향일 수도 있다. 그러나, 암반의 지지거동은 절리나 공동과 같은 불연속면에 의하여 지배되므로 평균 탄성과 속도가 감소하더라도 지반의 공동은 고결체로 잘 채워졌다고 판단된다. 또한, S.I.G 보강된 고결체에 시추를 실시하여 시료에 대하여 일축압축 시험과 시편에 대한 탄성과 시험을 실시하였다.

그림 10에서 제시한 바와 같이 도직교 S.I.G 고결체의 평균 탄성과 속도( $V_p$ )는 2132 m/sec, 평균 일축압축강도는 101 kg/cm<sup>2</sup>였으며 망상IC 1교 S.I.G

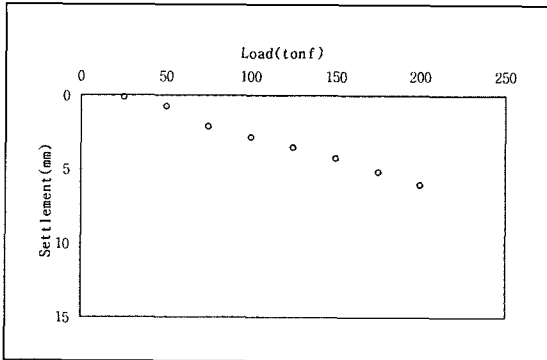


그림 11. S.I.G로 보강된 도직교의 시험말뚝의 하중-침하곡선

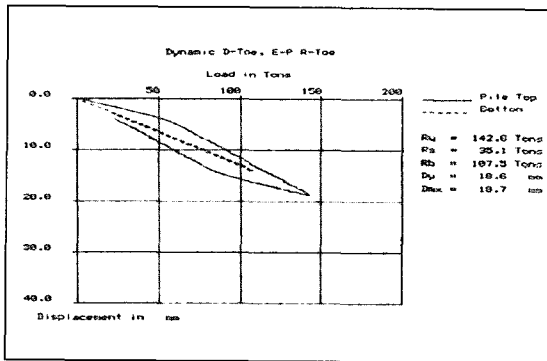


그림 12. 망상 IC 1교 A2 말뚝 동재하 시험 결과

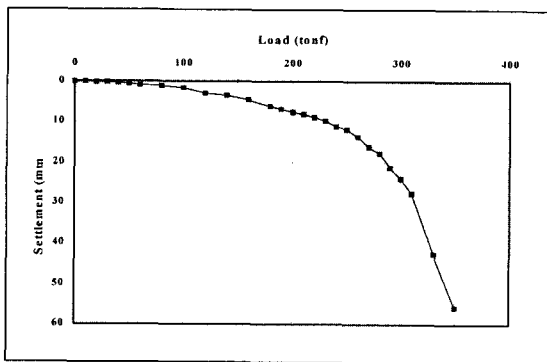


그림 13. 추가 지반 보강된 망상 IC 1교 A2 말뚝 정재하 시험 결과

고결체의 평균 탄성과 속도(Vp)는 2067m/sec, 평균 일축압축강도는 131 kg/cm<sup>2</sup>였다. 석회암 공동에 대한 S.I.G 보강 결과, 도직교와 망상 IC 1교 모두 일

축압축 강도 100 kg/cm<sup>2</sup>이상의 단단한 지지층 (bearing layer)이 형성되었음을 실내시험을 통하여 확인할 수 있었다.

### 3.3 현장 말뚝재하시험을 통한 S.I.G 적용성 평가

도직교 설치된 시험 말뚝과 망상 IC 1교의 사용 말뚝에 대하여 각각, 정재하와 동재하 시험을 실시하여, S.I.G 고결체의 지반 보강 효과를 평가하였다. 도직교의 말뚝의 설계 지지력은 89.0 tonf이며, 정재하 시험에서는 설계 하중의 2배 이상인 200.0 tonf 하중을 재하하였다. 그림 11은 재하시험으로부터 얻은 하중-침하곡선이다.

그림 11에서 보는 바와 같이 S.I.G 보강시 말뚝의 극한지지력을 구할 수는 없었으나, 200.0tonf 재하시 침하량은 6.05mm로 1 inch 보다 작은 침하량에서 지지력을 만족하는 것을 확인하였다. S.I.G로 보강된 망상 IC 1교의 사용 말뚝에 대해서 동재하 시험을 실시하였다. 동재하 시험 결과, 그림 12에서 제시한 바와 같이 말뚝의 허용 지지력은 설계하중 89.0 tonf 보다 작은 57.0 tonf으로 측정되었다. 이는 S.I.G 고결체 타설 후 남은 슬라임에 대한 처리가 제대로 되지 못하였기 때문에 밝혀져 새로이 S.I.G를 보강하여 정재하시험을 실시한 결과, 그림 13에서 보는 바와 같이 허용 지지력은 135.0 tonf로 설계 지지력을 만족하는 결과를 보였다.

재하시험을 통하여 석회암 공동 및 파쇄대 지반에 대한 S.I.G 보강 효과를 확인할 수 있었다. 앞으로 S.I.G 품질관리 및 S.I.G를 이용한 기초 보강시 설계 기준 확립을 위한 후속 연구과제를 진행하고 있다.

## 4. 결론

석회암 공동 및 파쇄대가 발달한 동해고속도로 4차로 확장공사 제 2공구 구간엔 S.I.G(Super



Injection Grouting)로 기초 보강을 수행하고 현장 적용성을 평가한 결론은 아래와 같다.

1. 석회암 공동이 발달한 도직교에 깊이 6.6m의 S.I.G 지반 보강을 실시하여, 탄성과 탐사 및 공시체 일축압축 시험을 실시한 결과, 일축압축 강도가 101kg/cm<sup>2</sup>인 지지층이 형성되었다. S.I.G 고결체 위에 말뚝을 시공하여 정재하 시험을 실시한 결과, 두부변위 6.05mm에서 설계 하중 89.0tonf을 상회하는 허용 지지력을 얻을 수 있었다.
2. 석회암 파쇄대가 발달한 망상 IC 1교에 대하여 암반에 11.0m 깊이로 S.I.G보강을 실시하고, 탄성과 탐사 및 일축압축 시험을 실시한 결과,

암반의 일축압축 강도 131kg/cm<sup>2</sup>인 단단한 지지층이 형성되었다. 말뚝 시공 후 동재하시험을 실시한 결과, 고결체와 말뚝 선단 사이의 슬라임을 제대로 처리하지 못하여 설계 지지력을 확보하지 못하여 재 보강을 실시하였다. 이후 정재하시험을 실시한 결과, 허용 지지력은 135.0 tonf로 설계하중(89.0tonf) 보다 큰 결과를 얻었다.

3. 석회암 공동 및 파쇄대 발달한 지반에 대한 S.I.G 보강을 실시한 결과, 현장 적용성이 뛰어난 것을 확인하였다. 향후, S.I.G 고결체를 통한 지반 보강에 필요한 관리규준 및 설계 방안이 확립되도록 후속 연구 과제의 진행이 필요하다.

## 2003 지반굴착/정보화시공 학술발표회 개최안내

한국지반공학회 지반굴착/정보화시공 위원회에서는 2003년 지반굴착/정보화시공 학술발표회를 다음과 같이 개최하고자 하오니 회원 여러분의 많은 참여를 부탁드립니다.

1. 일 시 : 2003년 10월 17일 (금) 14:00~17:00
2. 장 소 : 성균관대학교 의과대학 대강당 (수원 자연과학 캠퍼스)
3. 논문마감일 : 2003년 9월 15일
4. 등 록 비 : 정회원 20,000원, 학생회원 10,000원
5. 연 락 처 : 성균관대학교 김낙경 (031) 290-7521