

SIG공법에 의한 구조물기초지반에서의 복합지반개량 평가

Evaluation of Composite Ground Improvement at Structural Foundation Ground by Super Injection Grouting

김 종국¹⁾, Jong-Kuk Kim, 손 형호²⁾, Hyung-Ho Son, 이 호관³⁾, Ho-Kwan Lee, 성 기 광⁴⁾, Ki-Kwang, Sung

- ¹⁾ 한국건설품질시험원 과장, Manager, Institution of Korea Construction Quality Test.
²⁾ 한국건설품질시험원 부장, General Manager, Institution of Korea Construction Quality Test.
³⁾ 쌍용건설(주) 과장, Manager, Ssang Yong E & C
⁴⁾ 인천국제공항공사 건설시험소, Res. & Analysis office, Incheon International Airport Corp.

SYNOPSIS : In this paper, when structures are constructed in the soft ground with poor bearing capacity at Incheon International Airport(railroad area), as for the grouting columns built in soft ground by high pressure jet grouting with Triple tube rod(super injection grouting), the effects on reinforcement and bearing capacity of ground are investigated. A unconfined compressive strength tests has been performed on the specimens sampled from the grouting columns and a mass plate bearing test has been performed on a grouting column. The test results show that super injection grouting has a sufficient effect on composite ground improved of foundation ground and restraint of settlement of structure.

Key Words : super injection grouting, grouting columns, Composite Ground Improved.

1. 서론

인천국제공항은 국제 항공수요의 90%를 차지하는 인구 2,000만의 수도권 배후지역으로 서울도심에서 공항까지 약 100km 이내로 약 40분대 도달을 목표로 수도권지역의 기존 및 장래 주요교통계획망과 연결되도록 영종도 및 용유도 지역에 계획되었다. 총 연장 40km의 8차선으로 건설된 전용고속도로와 총 연장 62km의 복선공항철도로 계획되어 인천국제공항과 서울을 연결하는 역할을 하게 된다.

이와 관련하여 인천국제공항 1단계 지역내 철도노반 시설공사가 기 수행되었으며, 본 공사의 일부 연약지반 구조물기초 구간에서 지반 지지력이 부족한 것으로 나타나 전면적인 검토를 토대로 SIG(Super Injection Grout; 3중관 고압분사주입)공법을 지반보강공법으로 적용하였다. SIG공법은 공기와 물의 힘으로 지반을 굴삭하여 지표로 배출하고 대신 지중에 만들어진 공극에 고화재를 충전하는 치환공법의 일종으로 그리우팅(grouting)이라는 이름으로 약액주입공법 혹은 강제교반공법으로 명명하고 있다. 최근 고압분사주입공법은 불량한 연약지반, 지하수위저하, 기초지반의 침하 및 측방유동현상 사면붕괴의 방지, 기존구조물의 언더피닝, 기초보강, 터널전면의 자립 및 차수 등에 활용되고 있는 추세에 있으며, 지중에 조성된 개량체는 기초 지반의 지지력 및 지반보강공사에 유용하게 이용하고 있는 실정이다. 본 공법에 의하여 지중에 형성된 개량체로서의 지반개량효과 및 지지력이 충분히 발휘되는지를 명확하게 규명할 자료가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 기 수행된 공항철도 노반시설공사의 구조물 기초지반에 개량된 SIG공법의 지반보강 사례를 토대로 복합지반개량효과를 분석하였다. SIG에 의해 형성된 복합지반에 대하여 지층상태, 지반의 굳기 및 고화재의 배합비 등에 따른 강도특성을 파악하였으며, 대형 평판재하시험에 의한 지지력특성을 검토하였다.

2. SIG공법에 의한 복합지반개량

SIG 공법은 그림 1과 같이 물에 높은 압력을 가하여 얻어진 강력한 힘으로 지반의 조직을 파괴하여 이것을 지표로 배출함으로써 지중에 인위적인 공간을 만들고 다시 그곳에 고화재를 충전하여 견고한 개량체를 만드는 것으로 흙과 고화재를 가능한 범위까지 치환하는 것이다. 이 공법의 기본원리는 물과 공기의 힘으로 흙이 절삭되는 것은 초고압 분류수가 가진 운동에너지가 지반의 조직구조를 파괴함과 동시에 입자를 이동시켜 공간을 만들기 때문이다. 그 파괴의 메카니즘은 대체로 동압(動壓), 분류수와 맥동부하(脈動負荷), 물썰기의 효과, 분사되는 물방울에 의한 충격력, 공동현상(cavitation) 등이 단독 또는 복합적으로 작용하는 것이라고 알려져 있다. 본 공법의 가장 큰 장점은 주입공법시 발생 가능한 수압파쇄현상과 지반유기현상을 최소화 할수 있는 것으로 알려져 있고, 토류벽이나 기존 구조물에 대한 영향이 없으며 소음이나 진동, 분진, 악취 등의 영향이 적은 것으로 나타났다. 또 굴착된 공간에 고화재를 충전하는 것이기 때문에 개량체의 강도가 균일하고 다른 Column Jetting기설물과의 밀착성이 좋으며 타공법에 비해 개량체의 직경을 크게 할수 있다. 반면에 옥석을 포함한 자갈층, 인위적으로 매립한 지반, 연암이상의 지반, 섬유질이 많은 부식토 지반 등에는 문제가 예상될수 있으므로 주의를 해야 한다. 또한, Air, Water, Grout의 3중관에 의한 주입시공에 있어서 인접구조물 기초의 파손과 같은 부작용을 유발시킬수 있으므로 지반특성 및 인접구조물 등 현장여건을 충분히 감안하여 3개관의 압력을 조절하는 등 각별히 유의하여야 한다.

SIG 개량체가 형성된 개량지반은 강성정도에 따라 지반과 SIG개량체의 상호작용에 의해 복합지반효과를 보이게 되며, 개량체의 일축압축강도는 점성토 20~150kg/cm², 사질토 160~200kg/cm² 정도로 알려져 있다. 본 현장의 경우 Box구조물을 지지하는 기초는 연약 점성토지반임을 감안할 때 SIG개량체는 주변마찰력을 기대하기가 어려운 점과 하중분담을 선단지지력에 의존하지 않고 원지반과 개량체의 복합적인 거동 특성을 고려한 복합지반개념에 따른 지반개량 설계가 이루어졌다.

일반적으로 복합지반효과는 개량면적이 클 경우 지반개량효과 증대가 크게 나타나는 특성을 보이며, 상대적으로 개량면적이 작을 경우에는 그 영향을 고려하지 않은 것이 보편적이며, 연약지반에서의 복합지반 거동사례는 샌드파일공법, 샌드컴팩션파일공법 등에서 그 경향성을 확인할수 있다.

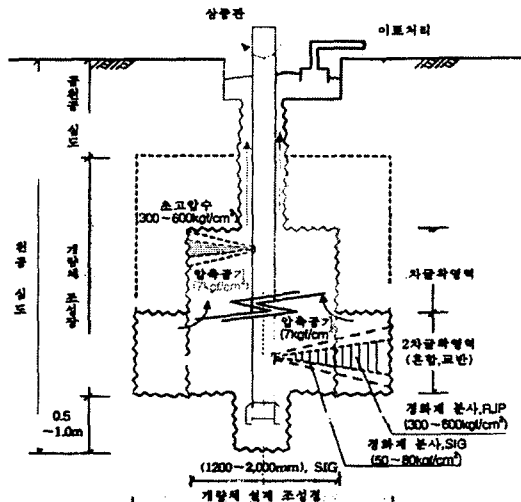


그림 1. SIG공법의 기본 개념도

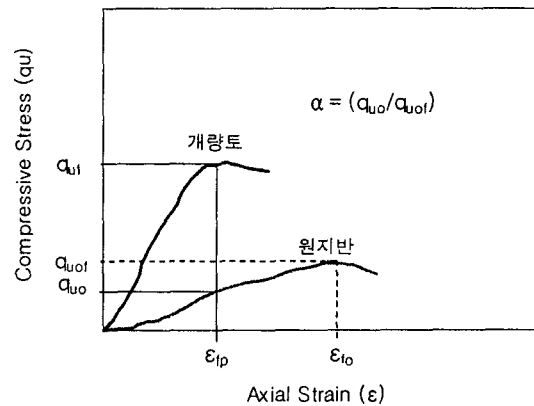


그림 2. 개량토와 원지반의 응력 - 변형률 관계

복합지반개념에서는 개량토와 미개량토의 면적평균인 식 (1)의 강도를 갖는 개량지반으로서의 응력분담 효과가 나타났을 때의 지반으로 간주한다.

$$C' = C_p \cdot \alpha_p + \alpha \cdot C_o(1 - \alpha_p) \text{ ----- (1)}$$

C' : 복합지반의 평균비배수강도

- C_p : 개량토의 전단강도 ($q_u/2$)
- C_o : 원지반의 전단강도 ($q_u/2$)
- α_p : 개량면적을
- α : 개량토의 파괴변형에 해당하는 지반강도와 C_o 의 비

여기서 α 는 개량토의 최대 일축압축강도로 나타내는 변형율에 해당하는 지반의 일축압축강도와 원지반의 최대 일축압축강도의 비로 정의되며 개량토와 원지반의 응력-변형률관계는 그림 3과 같다.

이러한 복합지반효과에서와 같이 SIG공법에 의하여 흙의 내부마찰각 ϕ 는 큰 변화가 없으나, 점착력 C 는 고화재의 고결체에 의하여 수배내지 10배이상 증가하는 것으로 나타나 지반의 강화는 지반의 점착력 때문인 것으로 알려져 있으며 그 값은 일률적으로 정해져 있는 것은 아니지만 증가하고 있는 것으로 알려져 있다. 즉, SIG공법에 의한 개량체와 주변지반에서는 고화재의 고결체강도에 의하여 지반개량효과를 평가하게 된다.

3. SIG공법 시공 및 시험

3.1 현장 개요

본 대상구간은 인천국제공항 1단계 지역내 철도노반 시설공사가 기 수행된 현장으로 대략적인 공사현황은 표 1와 같이 2복선 지하철도(신공항~차량기지간)의 Box구조물공을 지중에 시공하는 경우로 연장은 약 1.9km이며 이 중 쇄석치환구간을 제외한 약 380m구간에 SIG공법이 적용되었다.

표 1. 인천국제공항 1단계 지역내 철도노반시설공사 개요

구분	연장	토공	가시설공	구조물공	지반보강공	계측공
공사 규모	1,910m (2복선 지하차도 Box구조물)	굴착 1,115,928m ³ 퇴매우기 632,877m ³	Sheet Pile H-Beam E/ANCHOR	콘크리트 167,976m ³ 철근 31,639Ton 방수 152,046m ³	SIG공법 31,864m	경사계, 지하수위계, 간극수압계, 변형율계, 하중계 등

이는 Box구조물 저면 기초지반에 대한 지층상태분석, 지지력평가, 하부지반의 지반변형 등의 지반조사 결과가 일부구간에서 지지력이 다소 부족한 것으로 나타나 작업성, 시공성, 경제성 및 개량효과 측면 등의 전면적인 검토를 토대로 지반보강공법으로 선정된 것이다. 즉, 그림 4에서와 같이 지반 지지력에 대한 안정성 검토 결과, 대체로 N치가 10이하의 분포를 나타내는 지반에서 지지력이 부족한 것으로 판명되어 구조물의 중요도와 안전성, 경제성을 고려하여 SIG공법이 도입된 것이다.

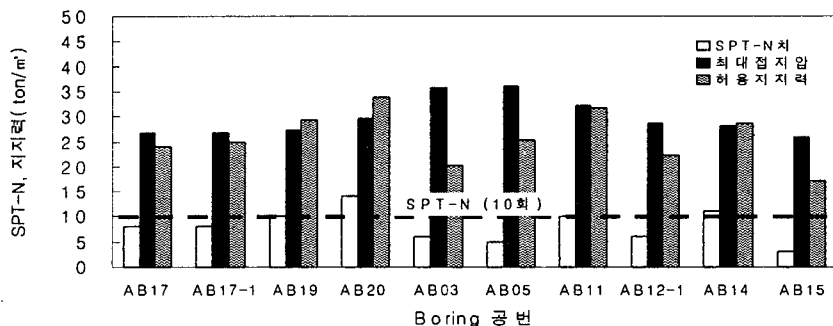


그림 4. Box구조물의 지층 대표단면에 대한 지지력 비교

본 대상구간의 지층구성상태는 그림 5와 같이 지표면으로부터 매립토층, 퇴적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층의 순으로 나타났다. 흙의 분류는 전반적으로 실트질 모래 내지 실트, 실트질 점토층을 이루고 있고 흙의 비중은 2.65~2.73, 소성지수가 3.5~30.1, $q_u = 0.178 \sim 0.62 \text{kg/cm}^2$, $C = 0.06 \sim 0.37 \text{kg/cm}^2$, $\phi = 0.0 \sim 33.6^\circ$ 로 나타났다. 특히, 표준관입시험의 N치는 3~50 범위로 각 위치별로 토층이 상당히 불규칙한 층후를 보이고 있다.

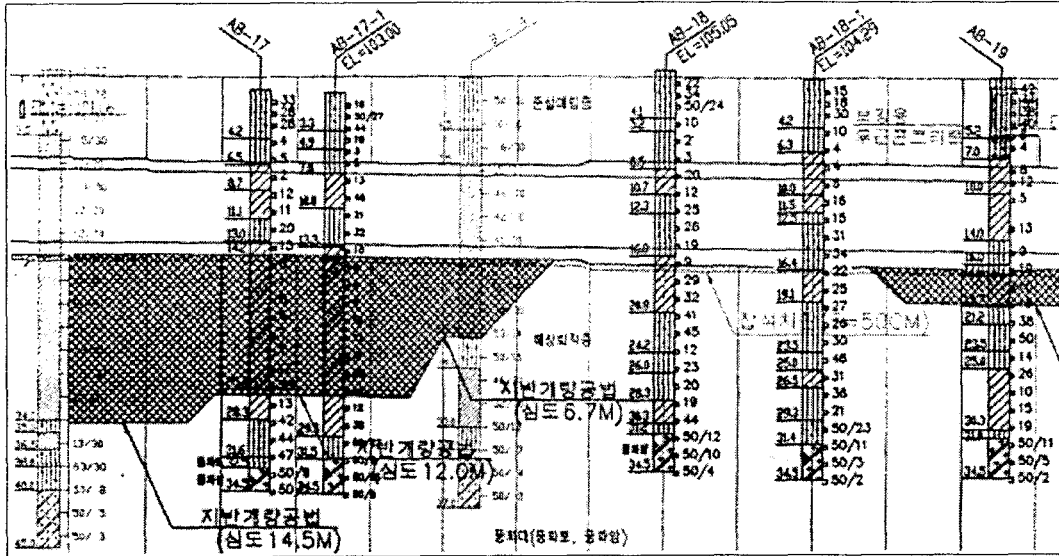


그림 5. 공항 1단계 지역내 철도노반구간의 대표적인 지층구성상태

본 구간에 적용한 SIG공법의 시공성을 확인하기 위하여 시험시공을 시행하였다. 이 때 고화재의 배합비는 4가지 조건 즉, 물 : 시멘트 = 300 : 350, 300 : 380, 300 : 400, 300 : 450 에 따라 시공되었으며, 대표적인 사양은 표 2와 같다. SIG시공은 Sheet pile을 설치하고 시공지반고까지 굴착후 기초지반 개량체를 조성한 다음 최종 지반고까지 굴착 후 개량체 두부를 정리하고 box구조물 기초를 시공하였다. 보강지반의 개량심도는 2.0m~17.2m로 $0 < N < 30$ 의 연약층을 개량하였다.

표 2. 3중관 초고압분사주입공법의 시공사양

SIG천공	SIG 시공사용압력			고화재 배합비		ROD인발 속도 (sec/cm)	고화재 단위분사량 (l/min)	비 고
	물	압축공기	고화재	물 (kg)	시멘트 (kg)			
Ø150mm	450	17	120	300	380	14	122	w/c=78.9%
Ø150mm	450	17	120	300	450	14	128	w/c=66.7%

3.2 개량확인시험

동 지역의 SIG개량체에 대한 강도 특성을 파악하기 위하여 시료를 채취하여 일축압축강도시험을 수행하였다. 시험공시체는 개량체 250회당 1개를 기준으로 코아를 채취하였고, 1구간 32개소, 2구간 27개소, 3구간 13개소의 총 72개를 채취하여 직경 5cm, 높이 10cm의 크기로 제작하였다.

또한, SIG공법에 의해 개량된 복합지반의 지지력이 충분히 발휘할수 있는가를 검토하기 위하여 대형 평판재하시험을 수행하였다. 시험은 그림 6의 모식도와 같이 복합지반면에 2.2m x 2.2m 사각 재하판등을 설치한 후 그 상단에 설계하중의 2~3배로 재하하중을 설치하여 단계별로 가압하면서 하중증가에 따른 단계별 침하량을 측정하는 방법으로 KS F 2444, ASTM D1196, 1994의 규정에 따라 실시하였다.

함하게 되어 원지반의 자연함수비가 많을수록 SIG개량체의 일축압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

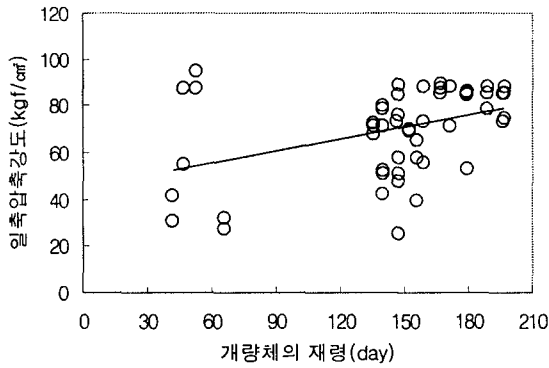


그림 8. 개량체 재령 - 일축압축강도와의 관계

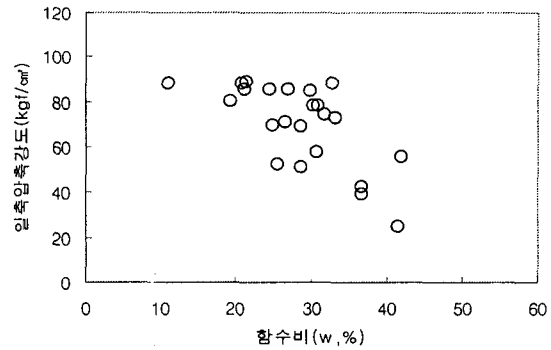


그림 9. 함수비 - 일축압축강도와의 관계

또한 그림 10의 N치 - 일축압축강도와의 관계에서 SIG 개량체의 일축압축강도는 원지반의 N치가 커짐에 따라 증가하고 있는 것으로 나타났으며, 그림 11은 일축압축강도를 전단강도로 환산할 경우로 SIG 개량체의 전단강도는 일축압축강도의 1/3~1/6의 범위를 보이고 있어 일반적인 개량체의 전단강도(일축압축강도의 1/2~1/3)범위보다 그 비가 더 작아지는 것을 알수 있었다.

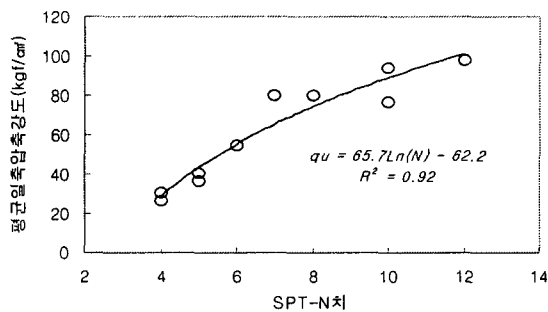


그림 10. N치 - 일축압축강도와의 관계

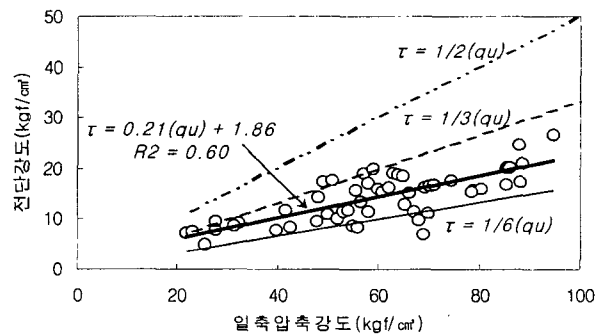


그림 11. 일축압축강도-전단강도와의 관계

SIG 공법에 의해 복합지반을 형성하는 경우 지반개량시 대상구간의 개량체의 일축압축강도 뿐만 아니라 전체적인 경제성과 안전성 및 개량효과를 고려하여 검토한 것으로 복합지반의 개량효과를 극대화 하기 위해서는 일축압축강도의 관리기준을 다소 낮은 범위로 설정하고 주입시 시멘트 밀크를 묽게하고 Rod의 회전 및 인발속도를 조정하여 적정 배합비로 시공하는 것이 경제적이고 효과적인 것으로 검토되었다. 동 구간의 경우 SIG 개량체의 일축압축강도는 고화재의 배합비, 개량체의 재령, 토질분포, 함수비, 지반N치 등에 따라 강도차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 시멘트량이 많을수록, 동일한 배합비에 대하여 재령일수가 길수록 대체적으로 일축압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 특히, $N > 6$ 의 지층 혹은 사질토층에 형성된 개량체의 일축압축강도가 $N < 6$ 의 지층 혹은 점토층에 형성된 개량체의 일축압축강도보다 다소 크게 나타났다. 이러한 원인으로서는 대상구간의 지반특성이 매우 불규칙한 층후를 보이고 있어 그 특성을 명확하게 파악하기 곤란한 점과 시공 및 품질관리의 어려운 점 등이 복합적요인이 작용하기 때문으로 추정된다.

이와같이, SIG공법에 의해 개량된 지반은 원지반의 응력분담비가 고려된 복합적인 거동특성에 따라 지반강도 개선된 것으로 나타났으며, 복합지반의 개량효과를 충분히 발휘하기 위해서는 개량체의 일축압축강도를 20~30kg/cm²로 관리하는 것이 효과적이며, 지반특성, 시공성, 경제성, 안정성등의 충분한 기술 검토와 시험시공을 토대로 품질을 확보하는 것이 중요한 것으로 평가되었다.

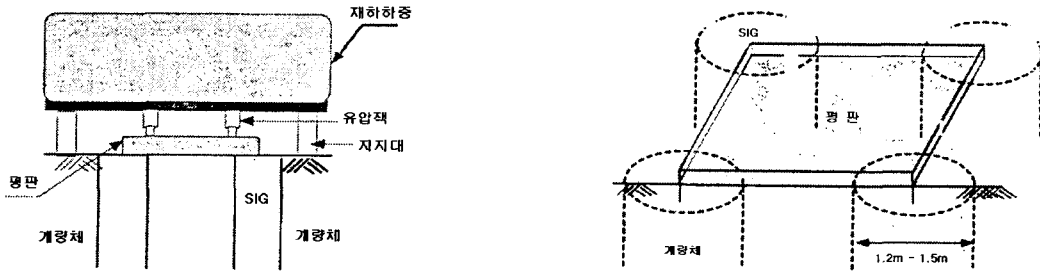


그림 6. SIG 개량체의 대형 평판재하시험

4. 시험결과 및 분석

4.1 지반개량체의 강도 특성

일반적으로 고압분사주입공법은 지중에서 개량체가 형성되어 지지력확보, 차수 등의 지반보강을 목적으로 이용하게 되며, 개량체가 구조물 기초보강역할을 하기 위해서는 소요 지지력은 물론 충분한 강도를 발휘하여야 한다. 이러한 지반보강공법의 지반개량효과를 확인하기 위해 다양한 시험이 수행되고 있으며 이 중 일축압축강도는 공학적으로 중요한 지표로 이용되고 있다. 이에 따라 SIG 공법으로 개량된 복합지반의 물리 및 역학적 특성이 개량체의 일축압축강도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 그림 7~11과 같이 비교하였다. 여기서, 원지반의 지반특성은 기 수행한 지반조사 자료를 참고하였으며 SIG개량체의 일축압축강도를 중심으로 그 영향을 살펴보았다.

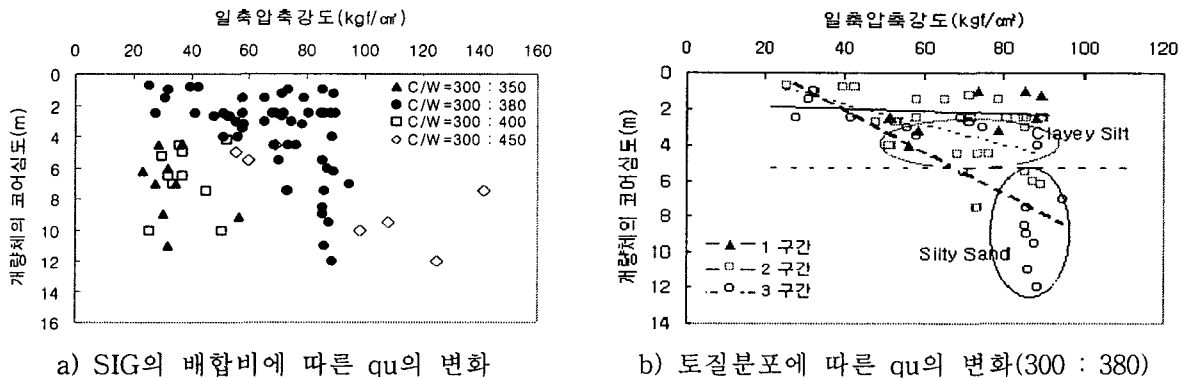


그림 7. SIG 개량체의 개량심도별 일축압축강도 분포

그림 7은 SIG 개량체의 개량심도별 일축압축강도 분포를 도시한 것으로, 그림 7(a)의 개량심도별 일축압축강도는 전체적으로 20~142kg/cm²의 범위로 나타났으며, N<6 지층에서는 20~60kg/cm², 6<N<10 지층에서는 60~90kg/cm²로 나타났으며, 개량체 주변지반을 일정두께의 잡석으로 치환한 지층에서는 일축압축강도가 상당히 크게 나타났다. 또한, 고화재배합비 C/W 300 : 380, 300 : 450인 경우 개량심도가 깊어질수록 일축압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 개량체가 지중에서 형성된 것으로 원지반강도가 개량체의 강도에 영향을 미치기 때문으로 판단되며, 그림 7(b)에서와 같이 지표하 약 2m심도를 제외한 그 이하의 심도에서 점토, 점토질 실트층에서보다는 실트질모래층에 형성된 개량체의 일축압축강도가 다소 크게 나타나고 있다.

그림 8의 개량체 재령에 따른 일축압축강도 변화를 살펴보면 재령일수가 길수록 압축강도는 다소 증가하는 경향을 찾아볼수 있다. 이는 고화재의 화학적 반응이 장기간에 걸쳐서 진행되기 때문에 반응이 끝나기까지는 장기를 요하고 초기강도에 비하여 상당히 커질수 있기 때문으로 판단된다. 그림 9는 원지반의 함수비와 일축압축강도와 관계의 관계를 나타낸 것으로 SIG개량체가 모르타와는 달리 내부에 토사를 포

4.2 지반개량체의 지지력 특성

원지반과 SIG 개량체로 형성된 복합지반의 지지력특성을 파악하기 위해 실시한 대형 평판재하시험 결과를 토대로 하중-시간-침하량 분석법 즉, 그림 12와 같이 (a)P-S 곡선법, (b)log P -log S법, (c)S - log(t)법, (d)ds/d(logt)법에 의하여 항복하중을 결정하였다.

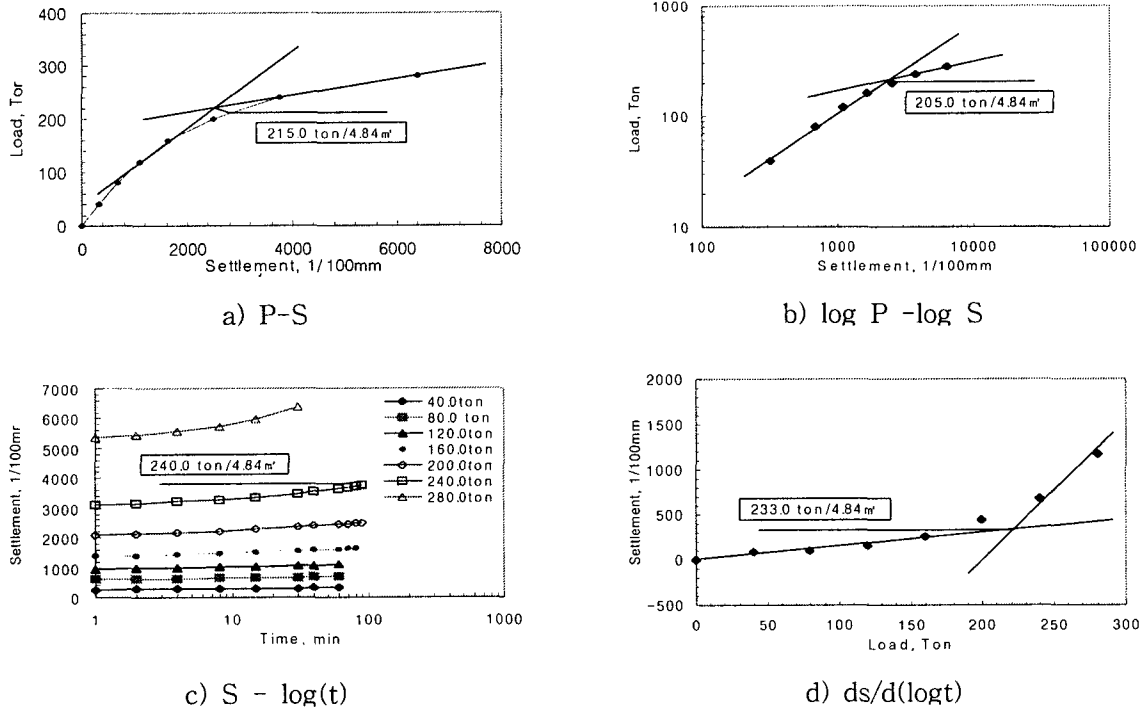


그림 12. 개량체의 항복하중 산정법

평판재하시험에 의한 허용지지력은 극한하중의 1/3, 항복하중의 1/2로 결정하고 있으므로 그림 12의 방법에 의하여 산정한 복합지반의 허용지지력은 표 3과 같이 33.646~56.163 ton/m²로 나타났다. 이는 설계지지력 32.016~40.281ton/m²을 고려할 때 충분한 지지력을 확보한 것으로 판단된다. 즉, 복합지반의 허용지지력은 원지반 지지력보다 크게 개선됨을 알수 있다. 또한, SIG 개량지반의 복합지반은 개량전보다 개량 후의 침하량은 작게 나타났으며 재하시험에 의한 즉시침하량 역시 1.5~4.9cm로 침하억지 효과가 있는 것으로 나타났다.

표 3. 대형평판재하시험 결과

구 분	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
시험위치	Sta. No 57+910	Sta. No 58+717	Sta. No 59+810	Sta. No 59+990
설계허용하중	40.281 ton/m ²	35.363 ton/m ²	32.017 ton/m ²	32.016 ton/m ²
계획최대하중	330.0 ton/4.0m ²	288.0 ton/4.0m ²	310.0 ton/4.84m ²	280.0 ton/4.84m ²
허용지지력	56.163 ton/m ²	49.031 ton/m ²	41.966 ton/m ²	33.646 ton/m ²
즉시침하량	1.5cm	4.9cm	2.4cm	3.6cm

한편, 복합지반의 거동특성을 살펴보기 위하여 비배수강도 증가효과 및 지지력 증대 효과를 그림 13, 14와 같이 비교하였다. 그림 13의 복합지반의 개량효과를 고려한 평균비배수강도는 약 8.3~16.8t/m²으로 개량전 6.73~9.48t/m²과 비교하면 1.1~2.7배로 증가한 것으로 나타났다. 그림 14의 재하시험에 의한 허용지지력은 설계지지력보다 약 5~40%정도 증가된 경향을 보이고 있고 원지반의 접지압 17.3~29.4t/m²

에 비하여 1.1~2.9배 정도 증가한 것으로 나타났다.

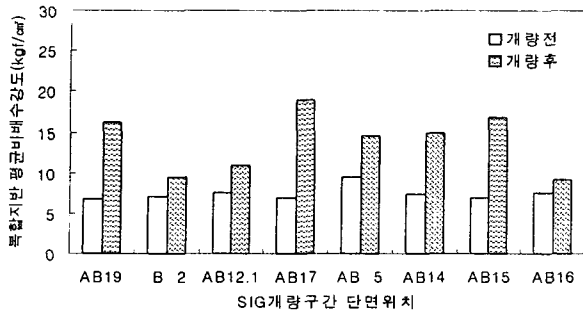


그림 13. 복합지반의 개량전·후의 평균 비배수강도 비교

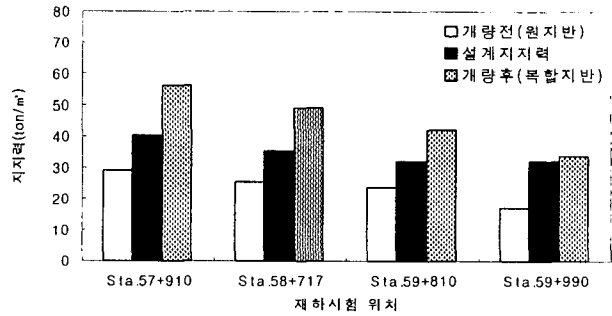


그림 14. 복합지반의 설계지지력과 허용지지력과의 비교

이는 원지반에 비해 고화재의 재료강성이 상대적으로 커 주변 원지반으로 응력이 분담으로 이루어진 것으로 판단할 수 있으며, 고화재와 토사가 혼합되어 개량체 주변지반의 함수비등의 감소로 공학적 성질이 개선되기 때문으로 사료된다. 따라서, SIG공법에 의한 복합지반의 개량효과는 구조물기초 보강으로서 충분한 지지력을 확보 할 수 있는 것으로 평가되었다.

5. 결론

Box구조물기초지반을 보강하기 위한 SIG공법에 의해 개량체의 강도 및 지지력 특성을 토대로 복합지반의 개량효과를 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. SIG공법에 의한 복합지반의 개량효과를 극대화시키기 위해서는 개량체의 일축압축강도를 20~30kg/cm²로 관리하는 것이 효과적인 것으로 검토되었으며, SIG 개량체의 일축압축강도는 고화재의 배합조건, 시공조건, 지반특성 등에 따라 강도차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 시멘트량이 많을수록, 동일한 배합비에 대하여 재령일수가 길수록 대체적으로 일축압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 또한, N >6의 지층 혹은 사질토층에 형성된 개량체의 일축압축강도가 N < 6의 지층 혹은 점토층에 형성된 개량체의 일축압축강도보다 다소 크게 나타나 충분한 기술검토 및 시험시공을 통해 품질을 확보하는 것이 중요한 것으로 평가되었다.
2. SIG공법에 의해 개량된 지반은 원지반의 응력분담비가 고려된 복합적인 거동특성에 따라 지반강도 개선된 것으로 나타났으며, 대형 평판재하시험결과에 의한 복합지반의 허용지지력은 원지반의 점지압보다 1.1~2.9배로 증가하였으며, 평균비배수강도 1.1~2.7배의 증가비와 잘 일치하는 것으로 나타나 SIG공법에 의한 지반개량은 충분한 강도와 지지력을 확보 한 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 건설산업연구소, (1993), "SIG공 공사비 산정에 관한 연구보고서"
2. 신공항건설공단, (1998), "인천국제공항 1단계 지역내 철도노반시설공사 기초지반보강공법 설계보고서"
3. 쌍용건설(주), (2000), "인천국제공항 1단계 지역내 철도노반 시설공사 시공개선보고서"
4. 심재구, (1981), 고압분사주입공법에 의한 UNDER PINNING공사 보고, 대한토목학회지, 제 29권, 제2호.
5. 천병식, 여유현, (2001), "샌드파일 설치지반에서의 복합지반효과", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 397-404
6. Ichihashi, Y. et al.(1985), "Jet Grouting in Airport Construction", Grouting Improvement Soil and Geosynthetics Edited by R. H. Borden, R. D. Holtz and I. Juran, ASCE, Vol. 1, pp.82~193.
7. T.S Nagaraj, (2000), "Composite Soft Ground - Its Formation and Characterization", Special Invitation Lecture, pp 1~25