

고압분사주입공법으로 보강된 석회암공동의 거동특성

홍원표¹ · 홍건표² · 여규권^{2*}

¹중앙대학교 공과대학 건설환경공학과

²삼부토건(주) 기술연구실

The Behaviour Characteristics of Reinforced Limestone Cavities by High Pressure Jet-Grouting

Hong, Won-Pyo¹, Hong, Kun-Pyo², and Yea, Geu-Guwen^{2*}

¹Dept. of Civ. & Environ. Engrg., Chung-Ang University

²Dept. of R&D, Sambu Construction Co., Ltd.

석회암지역은 외부의 압력에 의한 파쇄대와 용해성공동 등과 같은 지질학적인 결함을 대부분 갖고 있다. 특히, 장대교량을 건설할 경우 지질학적인 결함을 갖고 있는 석회암공동의 처리는 꼭 필요하다. 석회암 공동에서 기초의 침하량을 줄이고 지반을 보강하기 위한 대책공법으로 고압분사주입공법이 많이 활용되고 있다. 그러나 고압분사주입공법은 석회암공동에 대한 보강공법으로 활용되어 왔으나 연구실적과 기술적인 자료의 축적이 부족한 편이다. 그러므로 본 논문은 고압분사주입공법에 의하여 보강된 석회암공동 구간에 대하여 강도특성과 변형특성에 대한 연구결과를 제시하였다. 그리고 하중전이시험이 수반된 정재하시험에 의하여 지지력특성도 논의하였다.

주요어 : 고압분사주입공법, 석회암공동, 지지력, 하중전이시험

Limestone area have mostly certain geological defects such as the internal cavities due to melting and fractured zone by external pressures. Especially, in case of constructing grand bridge, the treatment of the limestone cavities area having the geological defects is inevitable. In order to reduce foundation settlement and to reinforce the ground in the limestone cavities area, high pressure jet grouting has been carried out as a countermeasure method. Despite the fact that high pressure jet grouting method has already adopted at a lot of limestone cavities area, but the amount of research and technical data on the high pressure jet grouting have not been accumulated properly so far. Therefore this paper intends to investigate the strength characteristics and deformation characteristics for reinforced limestone cavities area by high pressure jet grouting method. In addition, load carrying capacity obtained by static pile load test with load transfer measuring system is analyzed.

Key words : High Pressure Jet Grouting, limestone cavities, load carrying capacity, load transfer measuring system

서 론

최근 국내에서는 중부내륙 산간지대를 통과하는 도로 공사 구간 중 석회암층이 분포하고 있는 지역에서 장대교량 가설공사가 빈번히 수행되고 있다. 그러나 석회암의 특성상 대부분이 용해성 공동과 점토가 협재된 파쇄대 등과 같은 지질학적인 결함을 갖고 있어 대형구조물을 지지하는 기초지반으로 불리하다.

고속도로 및 국도 공사시 교량과 같은 대형구조물을 석회암층에서 시공할 경우 석회암 공동에 교량구조물의 하중이 전달되어 장기적으로 교각간의 부등침하를 유발시켜 교량의 안정성에 유해요인으로 작용할 수 있다. 그러므로 석회암층에서 교량과 같은 대형구조물 시공시 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위하여 지반을 보강하여 강도를 증가시켜야 하는데 이러한 목적으로 고압분사주입공법을 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 아직

*Corresponding author: moonju@sambu.co.kr

고압분사주입공법에 대하여 지반보강효과, 개량체의 강도특성, 개량체의 변형특성에 대해서는 명확히 규명되어 있지 못한 실정이다. 본 연구에서는 석회암공동에 주로 보강공법으로 적용되고 있는 고압분사주입공법에 의한 지반보강효과 및 개량체의 역학적인 특성을 정량적으로 평가하고자 한다. 대상현장은 교량 기초지반에 석회암공동이 존재하여 고압분사주입공법이 적용되었으며 지반 개량체에서 코어를 채취하여 각종 실내시험 및 현장시험을 실시하였다. 실내시험을 통하여 압축강도, 탄성계수, 포아송비 등의 강도특성 및 변형특성을 조사하였다. 현장시험으로는 지반개량체 내의 시추공에서 공내재하시험을 실시하였다. 또한, 개량체에 대하여 하중전이시험을 수반한 정재하시험을 실시하여 지지거동특성을 분석하였다.

침식성 석회암지역의 특성

석회암은 퇴적암으로서 탄산염 퇴적물이 암석화된 것으로 국내에서는 강원도 남동부와 이에 인접한 충북과 경북의 일부지역에서 비교적 넓게 나타나고 있다. 한반도에서는 석회암이 전체면적의 약 7%를 차지하며 그 중 남한에 5%정도 분포하고 있다.

석회암은 방해석(CaCO₃)과 돌로마이트(CaMg(CO₃)₂) 등으로 주로 구성되어 있으며 탄산수가 석회암지대의 탄산광물인 방해석과 돌로마이트를 용식시키는 화학적 풍화를 일으키며 이에 대한 반응은 식 (1)과 같다.

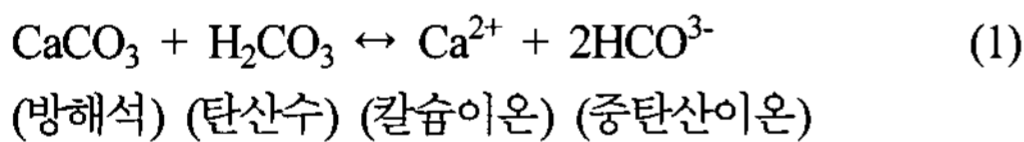


Fig. 1은 용식공동과 카르스트지형 형태의 발달과정을 나타내고 있다. 카르스트 지형은 크게 네 가지로 구분할 수 있는데 성장기, 초기성숙기, 후기성숙기 및 노년기의 단계로 구분 할 수 있다.

성장기는 Fig. 1(a)에서와 같이 지표면에서는 큰 변화가 없으며 Fig. 1(b)와 같이 초기성숙기에는 암석중에 발달된 수직절리들이 용해작용으로 확대되면서 침단석과 수직공동을 형성시킨다. 후기성숙기인 Fig. 1(c)는 지하 천부에서 형성된 수직공동이나 지하 심부의 공동천반이 붕락되면서 함몰구조를 생성시킨다. 이러한 함몰구조를 씽크홀(sinkhole)이라고 한다. Fig. 1(d)는 노년기로 석회암이 완전히 용식을 받아 석회성분은 제거되고 비가용성 불순물로 이루어진 석회암 지대이다.

이러한 석회암지대는 상부에 둥글거나 뿔족한 형태의 침단석(Pinnacle)이 존재하므로 토사와 암반의 경계면은 아주 불규칙하다. 또한, 공동의 분포를 정확히 파악하는 것은 거의 불가능한 것으로 판단된다. 따라서 다른 암석 지대에 비해서 예측 불가능한 요소가 잠재적으로 존재하므로 시공전의 지반조사뿐 아니라 시공중의 지반조사에 상당한 비중을 두어야 한다.

현장시공 및 지층특성

교량기초 하부지반에 석회암공동과 점토가 협재된 파쇄암층을 보강하기 위해 초고압 분출수에 의해 지반을 세굴하고, 세굴된 토립자를 지표로 배출함으로써 지중에 인위적인 공간을 만들어, 그곳에 경화재를 충전하여 원주상 고결체를 만드는 고압분사주입공법을 이용하였다. 지반개량체 구성에 이용된 분사시스템은 삼중관 룯드 분사주입 방식이며, 그 대표적인 시스템의 개요는 Fig. 2와 같다.

제 1현장

현장개요

제 1현장은 경북 문경시 유곡동과 불정동에 위치한 고속도로 교량 건설현장이며, 2개 교량기초 지반에 대

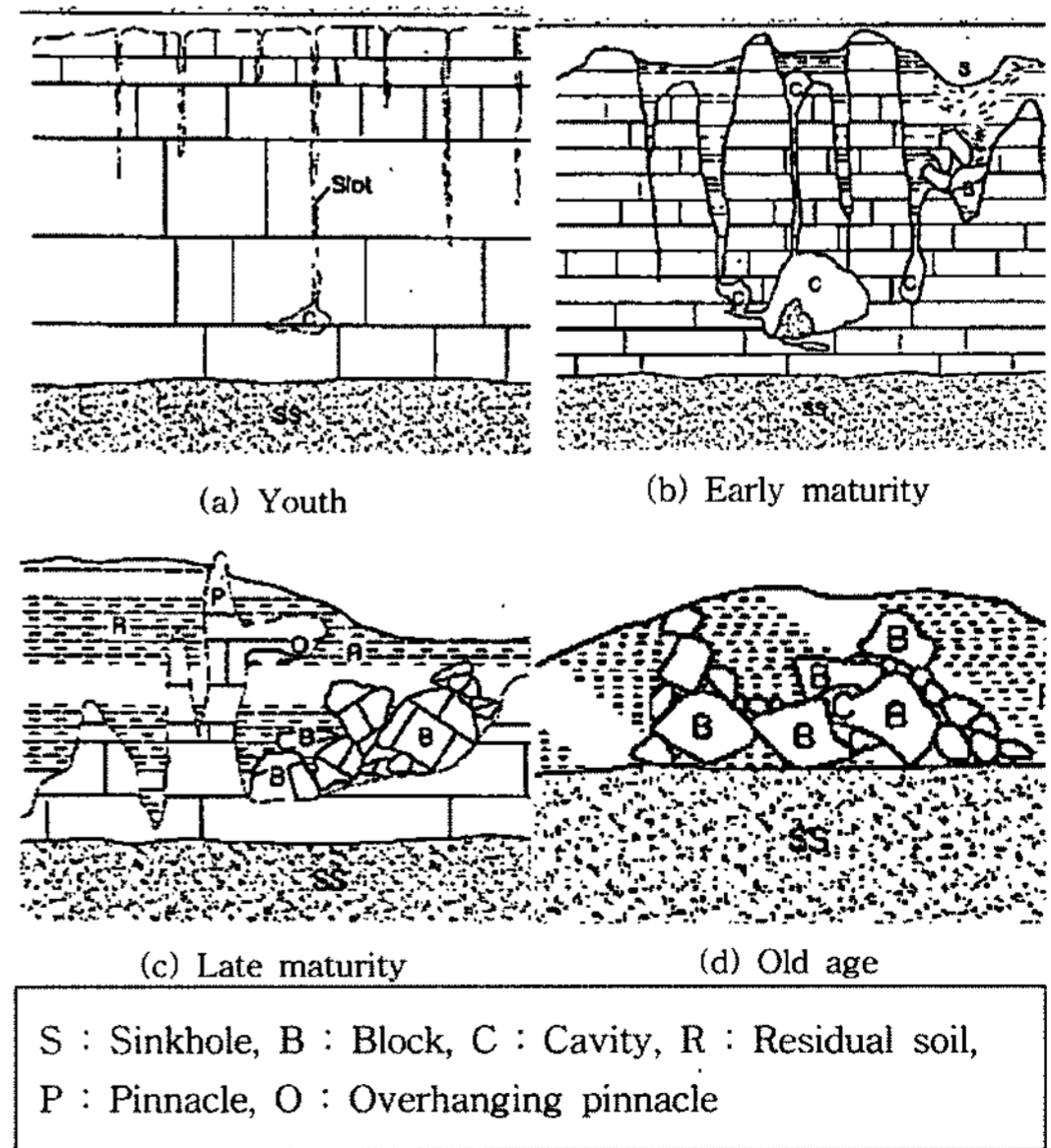


Fig. 1. Development of solution cavities and karst features (Richard E. Goodman, 1993).

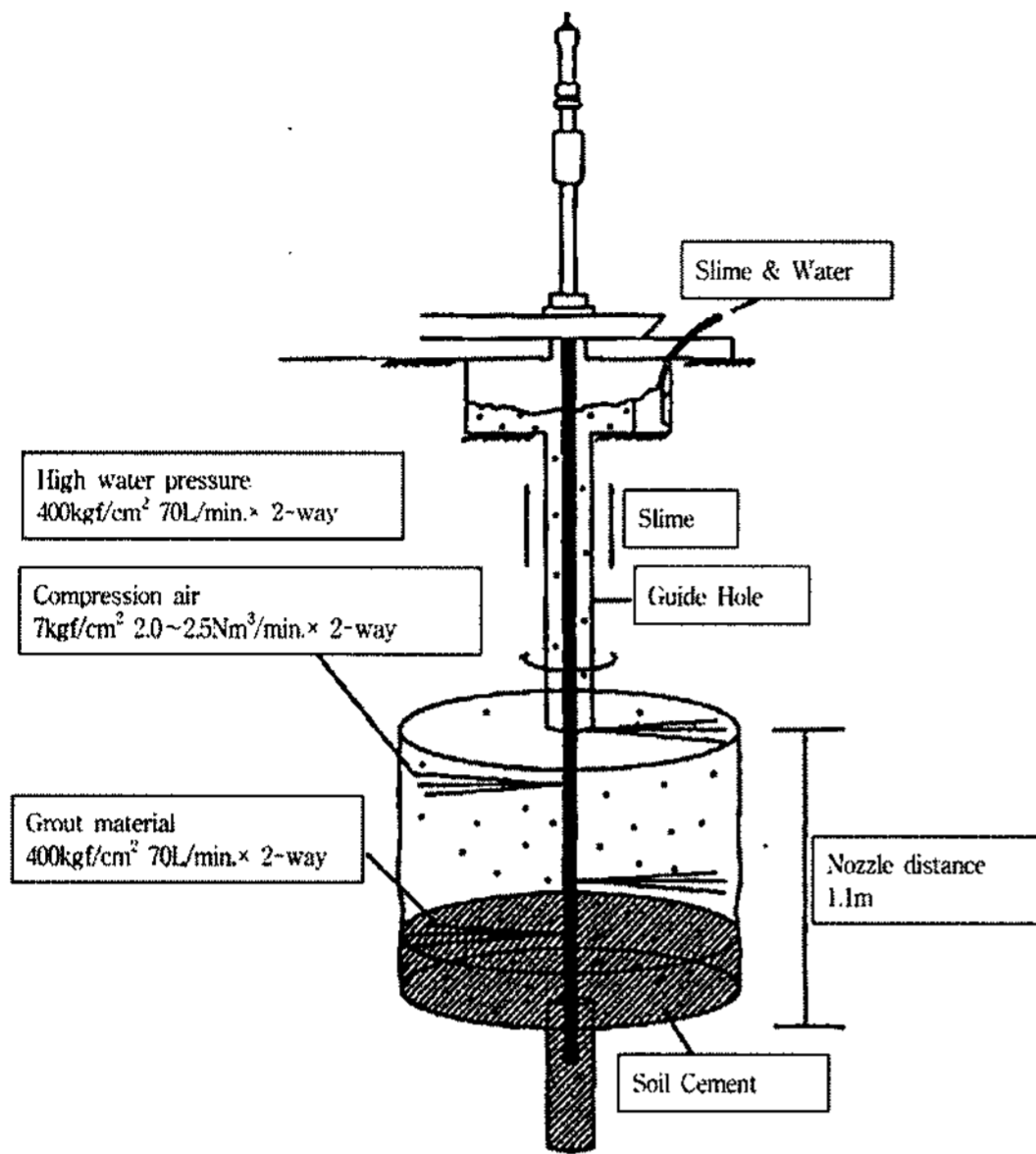


Fig. 2. System for High Pressure Jet Grouting.

하여 시추조사 및 물리탐사를 실시한 결과 파쇄암층 사이의 공동에 점토가 협재되어 있으며, 균열면의 파쇄대가 불규칙하게 산재되어 있었다.

따라서, 고압분사주입공법에 의한 개량체의 직경을 토사층에서는 1.8 m, 암반층에서는 1.2 m 정도로 형성시켰다. 개량심도는 교량기초의 형식, 지반조건, 공동의 규모 및 점토가 협재된 파쇄대의 분포에 따라 GL-9 m에서 GL-28 m까지 주입하였다. 조성된 개량체의 고결형상은 Fig. 3과 같다. 주입전에 지층상태를 코어 보오링으로 확인하면서, 분사용 제트 천공기(D = 90 mm)를 이용하여 소요심도까지 천공하였다. 룯드를 암반구간에서는 12분/m, 토사구간은 16분/m의 속도로 인발하면서 상단부에



Fig. 3. Shape of grout material (site 1).

있는 노즐에서 400 kg/cm²의 초고압수와 7 kg/cm²의 압축공기를 동시에 분사시켜 지반을 세굴 시키면서 지중에 공간을 형성하였다. 이때 파쇄된 토사를 지표면에 배출시킨 후 룯드 하단 측면에 있는 노즐에서는 300 kg/cm²의 압력으로 경화재를 분사시켜 절삭하단부에서 경화재로 지중에 형성된 공간을 충전 시키면서 지반개량체를 조성하였다. 특히, 공동부 및 점토가 협재된 파쇄대 구간은 충분한 구근을 형성시키기 위하여 인발속도를 최대 30분/m로 하고 슬라임이 배출될 때 까지 주입하였다. 경화재 시공배합조건은 시멘트 1,036 kg과 물 670 kg으로 배합하였다.

지질특성

본 구간의 지층분포는 상부로부터 표토, 풍화토, 점토 협재층(공동), 풍화암 및 연암층 순으로 분포하고 있다. 지표층을 형성하는 표토층은 약 1.5 m 두께로 분포하고 있으며, 황적색의 점토, 파쇄암층 등으로 구성되어 있다. 점토가 협재된 공동은 황적색의 색조를 띠며 파쇄대인 풍화암층은 사암의 절리 발달로 파쇄가 매우 심하며 코아회수율은 불량한 상태이며 암갈색 내지 황적색의 색조를 띠고 있으며 일부구간에서 점토분이 함유되어 있다. 기반암인 석회암은 심한 풍화로 인하여 점토화된 상태로 파쇄암이 혼재되어 있다.

제 2현장

현장개요

제 2현장은 충북 괴산면, 연풍면, 삼풍면 일대에 위치한 고속도로구간 중 교량건설 현장이며, 3개 교량기초 지반의 시추조사 및 물리탐사 결과 파쇄암층과 파쇄암층 사이의 공동에 점토가 협재되어 있으며, 균열면의 파쇄대가 불규칙하게 산재되어 있다. 따라서 교량기초 지반의 석회암 공동부 및 점토가 협재된 파쇄대를 보강하기 위하여 고압분사주입공법을 이용하였다. 지반개량체 조성에 이용된 분사시스템은 삼중관 룯드 분사주입방식이며, 개량체의 직경은 2.3 m 정도로 형성되었고 개량심도는 교량 기초 지반별로 공동 및 점토가 협재된 파쇄대 분포에 따라 GL-8 m ~ GL-30 m로 주입하였다. 조성된 개량체의 고결형상은 Fig. 4와 같다.

시공순서는 설계 계획심도까지 천공기를 이용하여 천공하고, 룯드를 21분/m의 속도로 인발하면서 상단측면에 있는 노즐에서 400 kg/cm²의 초고압수와 20 kg/cm²의 압축공기를 동시에 분사시켜 지반을 세굴 파괴시켜

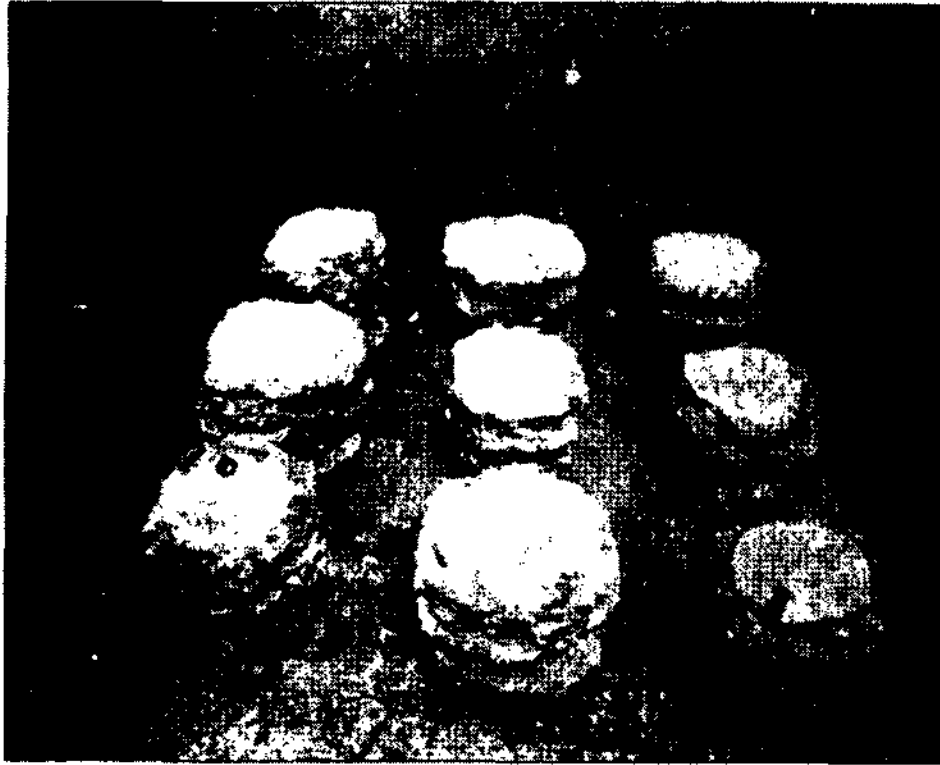


Fig. 4. Shape of grout material (site 2).

지중에 공간을 형성하였다. 이때 파쇄된 토사를 지표면에 배출시킨 후 롯데 하단 측면에 있는 노즐에서 2차적으로 400 kg/cm^2 의 압력으로 경화재와 20 kg/cm^2 의 압축공기를 분사하여 절삭범위를 더욱 확대시키면서 절삭하단부터 경화재로 지중공간을 충전시켜 지반개량체를 조성하였다.

점토가 충전된 공동구간은 슬라임이 배출될 때까지 최고 33분/m 동안 주입하여 충분한 구근이 형성될 수 있도록 하였다. 경화재 시공배합조건은 물과 시멘트 배합비를 1:1로 하였다.

지질특성

본 지역의 지질학적 특성은 고생대 퇴적암지층으로 단층 및 습곡 등 복잡한 지층구조와 다양한 불연속면이 형성되어 있다. 특히 석회암지형에서 발생하는 지하수의 작용으로 인해 기반암이 용해되어 형성된 공동이 나타나는 카르스트지형이다. 풍화토층은 완전히 풍화된 상태로서 암석 본래의 역학적 성질은 상실된 상태이다. 표준관입시험에 의한 N치는 9/30~16/30로서 느슨 내지 보통 조밀한 상대밀도를 보이고 있고, 담갈색의 색조를 띠고 있으며, 모래섞인 실트로 구성되어 있다. 풍화암층은 기반암인 하부풍화대 지층으로서 장기간에 걸쳐 화학적, 물리적 풍화작용 및 변질작용을 받아 원위치에 잔류하는 지층으로 암석본래의 역학적 성질은 상실한 상태이다. 굴진시 모래섞인 실트로 분해되며, 색조는 담갈색을 띠고 있다. 또한 암층과 풍화암층이 약 15~20 cm 간격으로 반복된다. 기반암인 연암층은 회색의 색조를 나타내며, 매우 심한 균열 내지 보통 균열, 매우 심한 풍화 내지 보통 풍화상태를 나타내고 있다. TCR은 35.0~45.0%, RQD는 0.0~8.0%를 나타내고 있다.

제 3현장

현장개요

제 3현장은 경북 문경시 문경읍 모곡리 일대에 위치한 고속도로구간 중 교량건설 현장이며, 교량기초 하부 지반에 대한 시추조사 및 물리탐사 결과 파쇄암층과 파쇄암층 사이의 공동에 점토가 협재되어 있으며, 균열면의 파쇄대가 불규칙하게 산재되어 있다. 교량기초 지반의 석회암 공동부 및 점토가 협재된 파쇄대를 보강하기 위해 고압분사주입공법을 이용하였다.

개량체의 직경은 2.3 m 정도로 형성되었고 개량심도는 교량 기초 지반별로 공동 및 점토가 협재된 파쇄대의 분포에 따라 GL-23.5 m로 주입하였다. 시공순서는 소요 계획심도까지 천공기를 이용하여 천공하고, 롯데를 21분/m의 속도로 인발하면서 상단측면에 있는 노즐에서 400 kg/cm^2 의 초고압수와 20 kg/cm^2 의 압축공기를 동시에 분사시켜 지반을 세굴하면서 지중에 공간을 형성하였다. 이때 파쇄된 토사를 지표면에 배출시킨 후 롯데 하단 측면에 있는 노즐에서 2차적으로 400 kg/cm^2 의 압력으로 경화재와 20 kg/cm^2 의 압축공기를 분사하여 절삭범위를 더욱 확대시키면서 절삭하단부터 경화재로 지중공간을 충전시켜 개량체를 조성하였다. 점토가 충전된 공동구간은 슬라임이 배출될 때까지 최고 34분/m 동안 주입하여 충분한 구근이 형성될 수 있도록 하였다. 경화재 시공배합조건은 물과 시멘트 배합비를 65%로 하였다.

지질특성

본 구간의 지층분포는 상부로부터 충적층(모래질자갈), 풍화토, 풍화암 및 연암층 순으로 분포하고 있다.

충적층은 하상퇴적물로서 중세립의 모래질 자갈층으로 구성되어 있다. 자갈은 크기가 3.8~5.6 cm 내외의 퇴적암력으로 구성되어 있다. 시추조사시 자갈 코아가 회수되었으며, 매우 조밀한 상태이다. 풍화토층은 담갈색을 띠며 석회암의 상부풍화대로 화학적 풍화를 받아 완전~심한 풍화 상태를 보이며, 모암인 석회암의 구조 및 조직이 관찰되었다. 시추조사시 실시한 표준관입시험 결과 N치는 보통조밀~매우 조밀한 상태를 보이며 실트질 모래로 분해된다. 풍화암층은 황갈색~암갈색을 띠며 사질천매암이 화학적 풍화작용을 받아 심한 풍화~보통 풍화상태를 보이며, 차별풍화작용으로 인해 부분적으로 암편이 분포하고 있다. 시추조사시 부분적으로 시추코아를 형성하며, 매우 조밀한 상태를 보이고 있으며 일부 시추공에서 석회암층이 협재되어 있다. 연암층은 주로 세립

의 입자로 구성된 석회암 및 중세립의 입자로 구성된 사질천매암이 부분적으로 풍화된 지층으로 암회색~백색을 보이며, 사질천매암은 암청색을 띤다. 석회암층은 부분적으로 용해 충전공동 및 파쇄대를 수반하며, 사질천매암은 엽리구조가 관찰되며, 엽리면을 따라 균열이 발달하여 있다. 사질천매암은 주로 엽리면을 따라 균열이 발달되어 있으며, 균열면은 평면형으로 완만한 상태를 보인다. TCR은 79~36%, RQD는 37~9%로 암반의 절리상태는 불량 내지 매우 불량한 상태이다.

지반개량체의 특성 분석

제 1, 2, 3현장의 경우 고압분사주입공법에 의해 조성된 개량체에서 코어를 채취하여 개량체의 일축압축강도를 측정하였으며 특히, 제 2, 3현장의 경우 포아송비 및 탄성계수를 측정하기 위해 공시체의 종횡방향으로 변형률게이지(strain gauge)를 부착하여 횡방향 변형율과 축방향 변형율을 측정하였다. 그리고 제 2현장의 말뚝기초는 하중전이시험을 수반한 정재하시험을 실시하여 지지력거동 특성을 평가하였다.

주입순서에 따른 일축압축강도

고압분사주입공법에 의해 조성된 지반개량체의 코어를 채취하여 개량체의 일축압축강도를 측정하였다. 제 1현장의 경우 일축압축시험용 공시체는 각 교량 기초별로 총 266개의 공시체를 제작하여 Fig. 5와 같이 일축압축강도를 측정하였다. 본 현장의 경우 개량체의 직경이 1.2m로 다소 소구경의 고결체이며 여러 열을 바깥쪽에서 안쪽의 순서로 주입할 경우 즉, 중첩하여 시공할 경우에 대하여 주입순서별 일축압축강도의 변화를 비교하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 주입순서에 따른 일축압축강도는 외부에서 내부로 갈수록 개량체의 강도

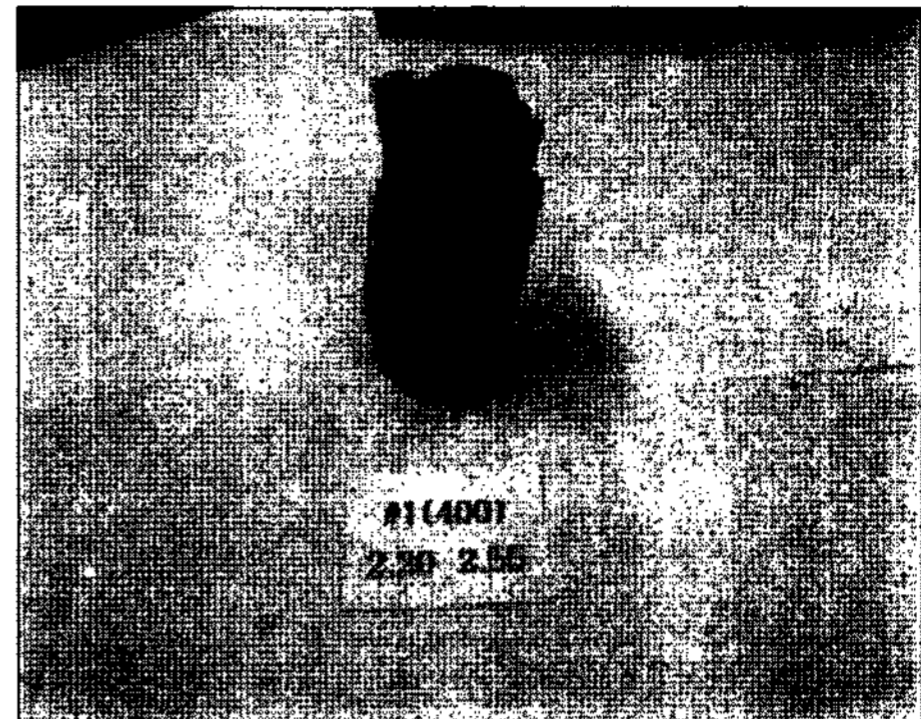


Fig. 5. Failure shape of specimen.

가 증가하는 것을 알 수 있다.

이에 대한 원인은 외부의 개량체는 내부의 개량체를 시공할 경우 경화제가 인접한 파쇄대나 공동부로 손실되는 것을 억제하는 커튼월의 역할을 하여 조밀하게 충전되어 결과적으로 강도가 증가하는 것으로 나타났다.

심도에 따른 일축압축강도

Fig. 6은 연구대상 현장의 일축압축강도와 개량체 심도와의 관계를 나타낸 그림이다. 제1현장의 경우 일축압축강도의 분포범위는 89 kg/cm²~317 kg/cm²이며 제 2현장의 경우 일축압축강도의 분포범위는 62 kg/cm²~300 kg/cm²이고 제 3현장의 경우 66 kg/cm²~303 kg/cm²로 3개 현장 모두 최저치와 최대치의 분포범위가 크게 발생하였다. 그리고 공동과 점토가 협재된 파쇄대층을 포함하고 있는 석회암공동에서 시료의 일축압축강도는 개량체의 심도와 거의 상관성이 없는 것으로 나타났다. 이러한 경향을 보이는 이유는 첫째로, 지층이 균일하지 못한 것을 들 수 있다. 지반개량시 세굴된 토립자의 일부가 경화제에 혼입되어 개량체를 조성하게 되는데 사례 현장 지역은 용해성 공동과 점토가 협재된 파

Table 1. Unconfined compressive strength for grout sequence.

Grout sequence	Unconfined compressive strength (kg/cm ²)		Remarks
	Range	Average	
1st	89~158	117	
2nd	98~177	124	
3rd	103~182	147	
4th	137~212	172	
5th	137~211	167	
6th	173~317	206	
7th	176~245	210	

쇄대가 불규칙하게 분포하고 있으므로 심도에 따라 강도의 증가량이 일정하지 않다. 둘째로, 지반개량시 룯드의 인발속도를 공동이 존재하는 구간에서는 시멘트 밀크에 의한 슬라임이 배출될 때까지 주입하여야 되나 일부 구간에서 룯드 인발속도를 주변의 일반적인 지층과 동일하게 상승시켜 주입이 충분하지 못한 구간이 발생된 것으로 판단된다. 이러한 특성으로부터 공동과 점토가 협재된 파쇄대를 포함하고 있는 석회암공동 구간에서 고압 분사주입공법에 의하여 조성된 개량체의 일축압축강도는 인발속도에 따라서 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

변형특성

Fig. 7은 제 2, 3현장의 개량체로부터 채취한 공시체에 대하여 일축압축강도와 탄성계수의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 도시된 바와 같이 제 2현장의 경우 탄성계수의 분포는 $0.719 \times 10^5 \text{kg/cm}^2 \sim 2.780 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 의 범위에 분포하고 있으며 제 3현장의 경우 탄성계수의 분포는 $1.454 \times 10^5 \text{kg/cm}^2 \sim 2.715 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 의 범위로 제 2현장과 3현장의 분포범위가 비슷한 것으로 나타났다. 또한, 일축압축강도가 증가할수록 탄성계수도 비례하여 선형적으로 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이는 개량체의 강도특성과 변형특성에 일정한 상관관계가 존재함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 7에서와 같이 탄성계수와 일축압축강도의 관계를 나타내면 다음 식 (2)와 같다.

$$E = (900 \sim 1900)q_u \quad (2)$$

제 2, 3현장의 개량체에서 채취한 시료의 탄성계수는 Fig. 7에 도시된 바와 같이 콘크리트의 탄성계수($E = 15,000\sqrt{F_{ck}}$) 산정식에서 산출된 값과 매우 유사한 분포를 보이고 있다. 이는 경화재 주입시 세굴된 토립자가 시멘트 밀크와 혼입되어 모르타르 또는 콘크리트의 강도특

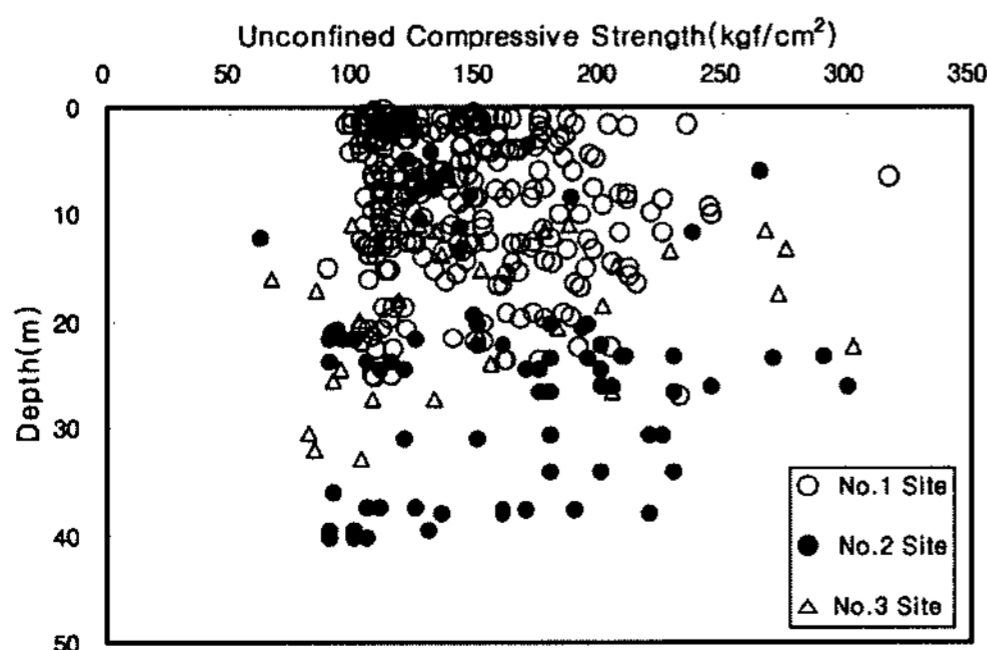


Fig. 6. The relationship between depth and unconfined compressive strength.

성을 갖는 고결체로 개량체가 조성된 것으로 판단된다.

Fig. 8은 연구대상 현장의 일축압축강도와 포아송비의 관계를 나타낸 것이다. 개량체의 일축압축시험과 병행하여 공시체의 종, 횡방향으로 변형률계이지를 부착하여 포아송비를 측정된 결과 제 2현장의 경우 0.16~0.30이고, 제 3현장의 경우 0.16~0.27이다. 석회암공동 지역의 지반 개량체의 포아송비는 콘크리트의 포아송비 0.15~0.20(평균 0.17)보다 약간 크게 나타났으며, 암석의 포아송비 0.1~0.3와 비슷한 값을 보이고 있다. 개량체의 포아송비는 일축압축강도 150kg/cm^2 까지는 선형적으로 감소하다가 그 이후에는 일축압축강도의 증가와 무관하게 거의 일정한 값을 보이고 있다. 이는 개량체의 변형특성은 일정한 강도 이상에서는 거의 일정하다는 것을 의미한다.

공내재하시험 결과 분석

제 2현장에 대하여 공내재하시험을 실시하여, 고압분사주입공법에 의한 주입전 원지반과 주입후 개량체의 변형계수와 지반반력계수의 특성을 Fig. 9, 10에 나타내었다. 공내재하시험은 고압분사주입공법으로 시공전 원지

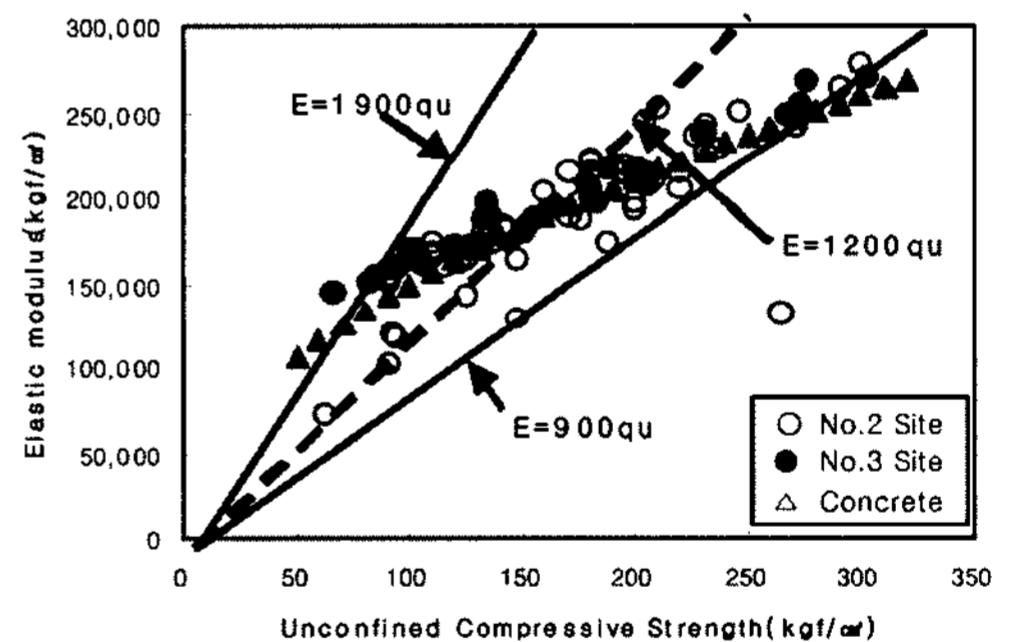


Fig. 7. The relationship between unconfined

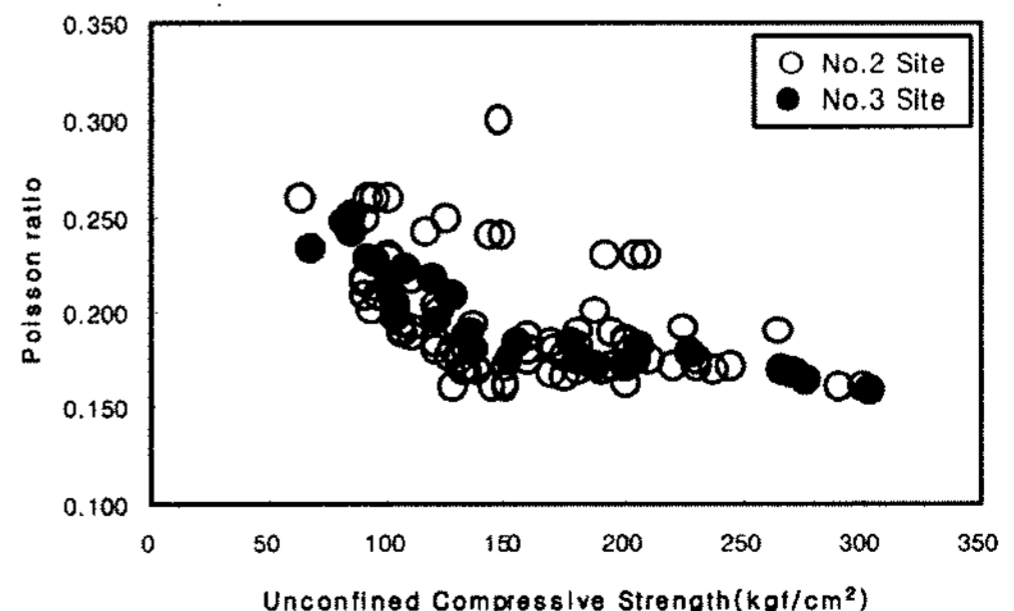


Fig. 8. The relationship between unconfined compressive strength and elastic modulus, compressive strength and poisson ratio.

반에 NX-size의 보링을 실시한 6개소의 시추공에서 실시하였고 시공후 개량체의 시료를 채취하기 위해 NX-size의 보링을 실시하여 코어를 채취한 후 9개소의 시추공 내에서 임의의 깊이에서 실시하였다. 개량전 원지반의 공내재하시험 결과, 변형계수는 $388 \text{ kg/cm}^2 \sim 6,214 \text{ kg/cm}^2$, 지반반력계수는 $12.46 \text{ kg/cm}^3 \sim 8,751 \text{ kg/cm}^3$ 의 범위에 분포하고 있었다. 개량후 고결체의 공내재하시험 결과, 변형계수는 $2,883 \text{ kg/cm}^2 \sim 9,645 \text{ kg/cm}^2$, 지반 반력계수는 $66.30 \text{ kg/cm}^3 \sim 19,120 \text{ kg/cm}^3$ 로 증가하는 특성을 보이고 있다. 이는 석회암 공동부 지역에서 고압분사주입공법이 충분한 지반개량효과를 나타내는 것으로 평가되었다.

하중전이시험을 수반한 정재하시험 결과

석회암공동에 말뚝을 시공할 경우 말뚝지지 거동특성을 평가하기 위해 어스앵커의 인발력을 이용하여 하중전이(load transfer)측정을 병행, 정재하시험을 수행하였다(Fig. 11). 하중전이를 측정하기 위해 시공 전 말뚝에 미리 전기저항식 변형률게이지를 심도별로 부착하였으며 정재하시험을 통하여 재하하중크기에 따라 단계별로 말뚝깊이별 변형률(strain)을 측정하고 이를 말뚝의 단면

적, 탄성계수를 이용한 탄성론에 근거한 Hook's law를 이용하여 축력(axial force)으로 환산함으로써 말뚝이 시공된 심도별 주변마찰력의 분포 및 크기 그리고 선단지지력을 평가하였다.

시험말뚝 No.37은 선굴착 후 강관말뚝(D508 mm×12 t, L=13.5 m)의 선단부를 풍화토층에 위치시킨 후 선단하부로 약 12 m 정도 고결체를 형성시켰으며 말뚝 주변은 시멘트밀크 주입으로 충전, 고결 처리한 말뚝이다. 말뚝주변에 시공된 어스앵커의 마찰력을 하중조달 방법으로 압축 정재하시험(4 cycle)을 수행하였으며 재하된 최대하중은 360 ton으로서 이때 침하량이 3.3 cm로, 전단계인 350 t일 때의 침하량 1.7 cm에 비하여 침하증가량이 재하하중의 증가량에 비하여 급격히 증가하는 극한파괴 현상이 발생하였다(Fig. 12). 최종시험하중 360 ton 재하 도중 지반개량체가 파괴되어 침하가 급격히 증가하는 극한상태에 도달되므로 이때의 하중을 극한하중으로 고려하여 말뚝의 허용지지력을 산출한 결과 144 ton/본으로 산정되었다.

시험말뚝 No. 48은 선굴착 후 강관말뚝((D508mm×12 t, L=21.0 m)의 선단부를 연암층에 위치시킨 후 No.37 말뚝과 동일하게 선단하부로 약 12 m 정도 고결체를 형성시켰으며 말뚝주변은 시멘트밀크 주입으로 충전, 고결 처리하였다. 말뚝주변에 시공된 어스앵커의 마찰저항력을 이용하여 압축 정재하시험(5 cycle)을 수행하였으며 재하된 최대하중은 420 ton으로서 이때의 침하량이 2.3 cm로 말뚝의 항복현상이나 극한현상의 징후가 보이지 않는 매우 양호한 지지거동을 보여주고 있다(Fig. 13). 따라서 해석한 축력분포 및 주변마찰력, 선단지지력 등은 극한값이 아니며 이론상 최소항복하중의 의미를 갖는 것으로 분석하였다. 시험말뚝 No. 48은 극한하중 및 항복하중이 나타나지 않았으므로, 최대재하하중 420 ton을 최소항복하중으로 가정하여 말뚝의 허용지지력을 산출하여 본 결과 210 ton/본 이상으로 산정되었다.

말뚝의 주변지반과 선단부 지반조건에 따른 선단지지력과 주변마찰력의 크기 및 분포를 평가하기 위해 실시된 하중전이측정을 수반한 정재하시험결과는 Fig. 14 및 Fig. 15와 같다. Fig. 14(a)와 Fig. 15(a)는 말뚝에 작용하는 축력의 변화를 심도별로 나타내었는데, 말뚝을 통해 하부로 전달되는 축력의 크기는 심도가 증가하면서 감소되는데 이는 말뚝주변부에서 주변마찰력이 발휘되고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 심도에 따른 단위 주변마찰력의 크기는 Fig. 14(b)의 경우 심도에 따라 증가하는 양상을 보이고 있는데 이는 시험말뚝 No. 38의

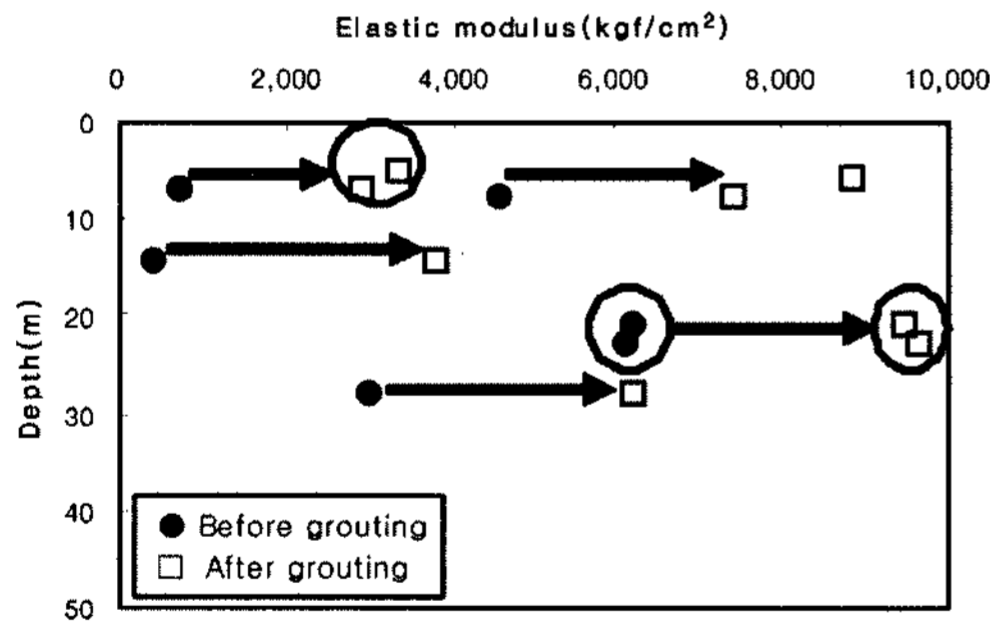


Fig. 9. Change of elastic modulus.

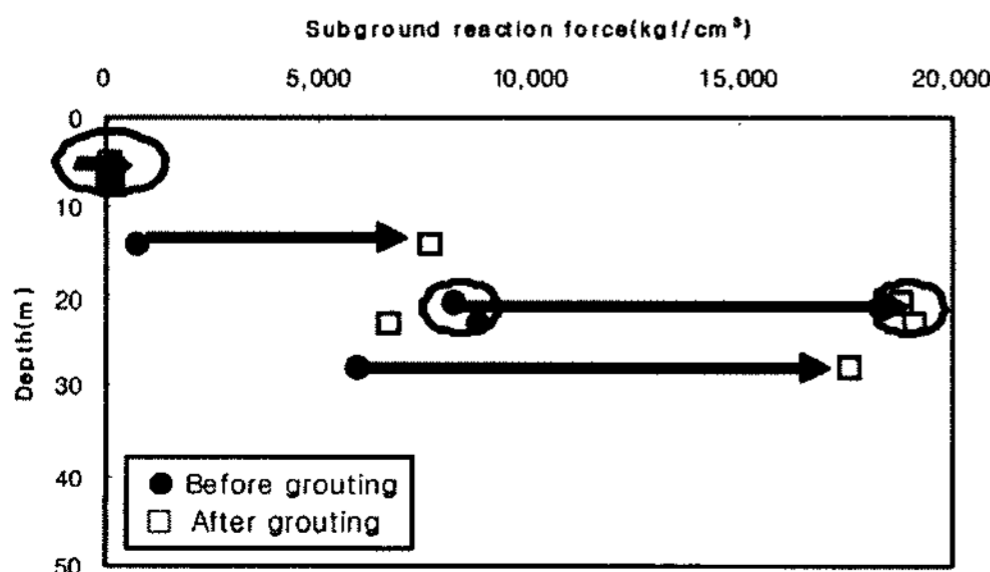


Fig. 10. Change of sub-grade reaction coefficient.

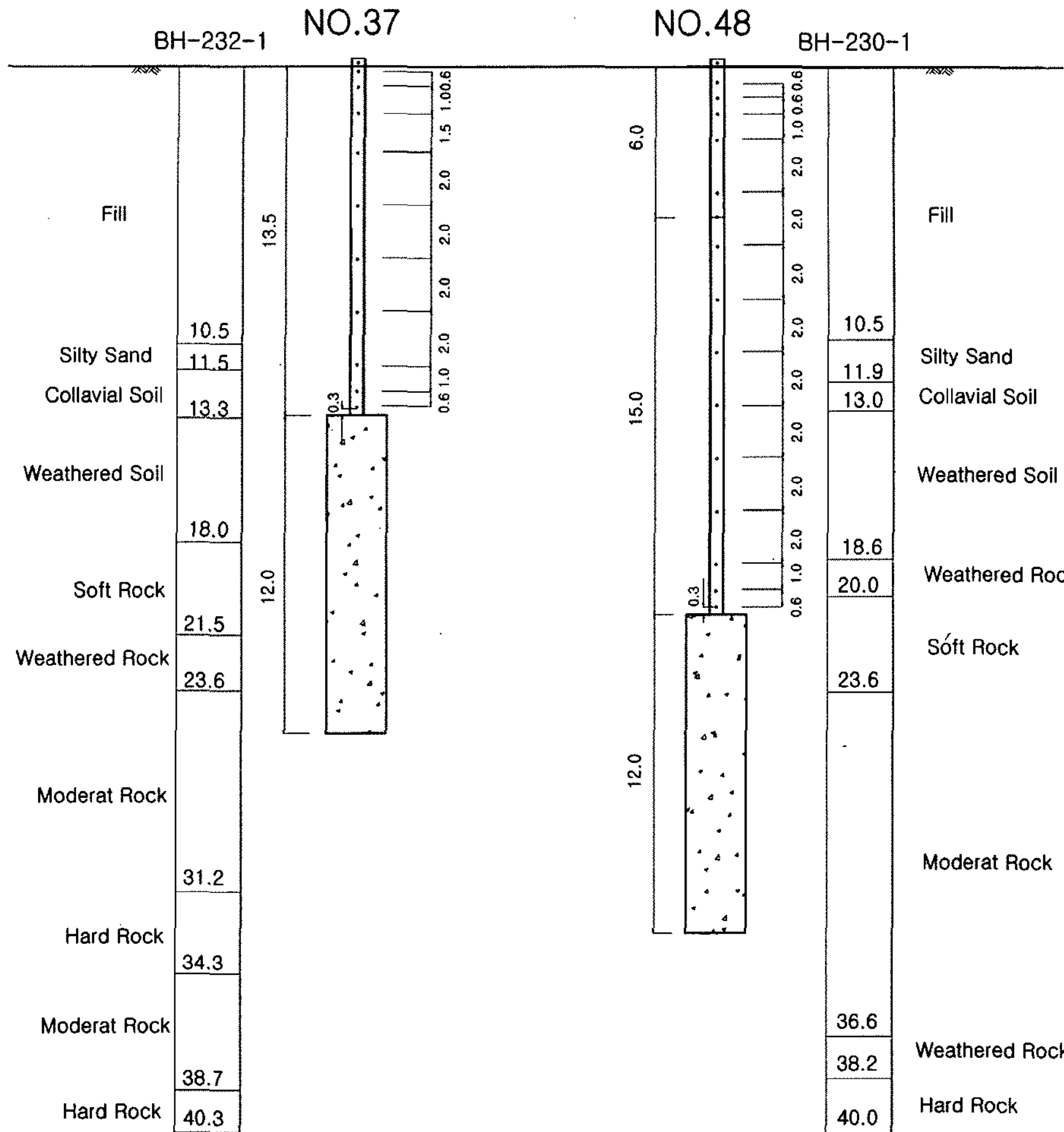


Fig. 11. Measurement system for load transfer test.

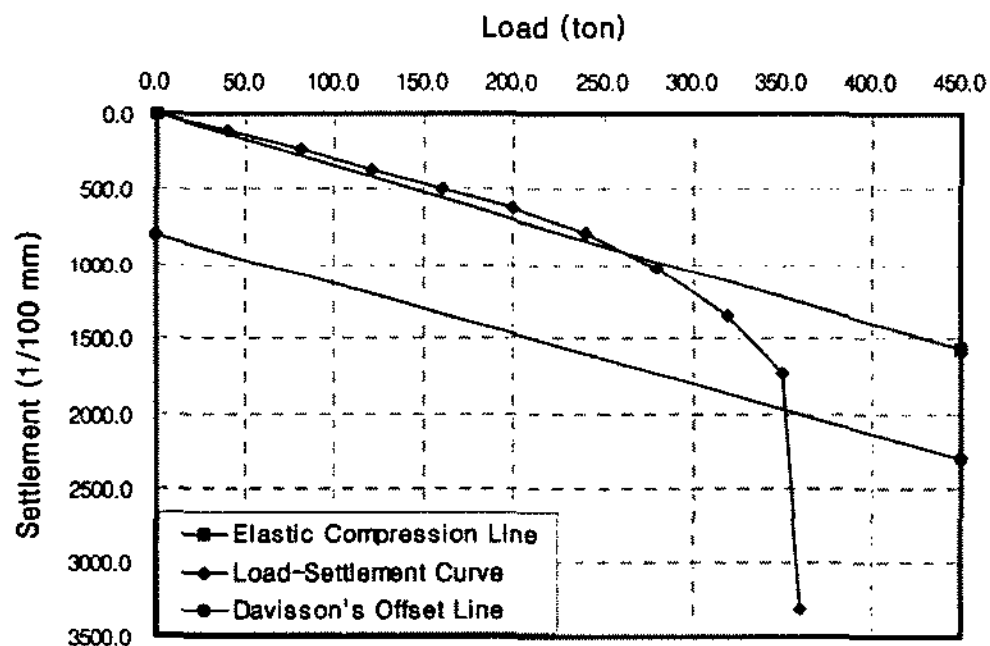


Fig. 12. Davisson's method (Pile No. 37).

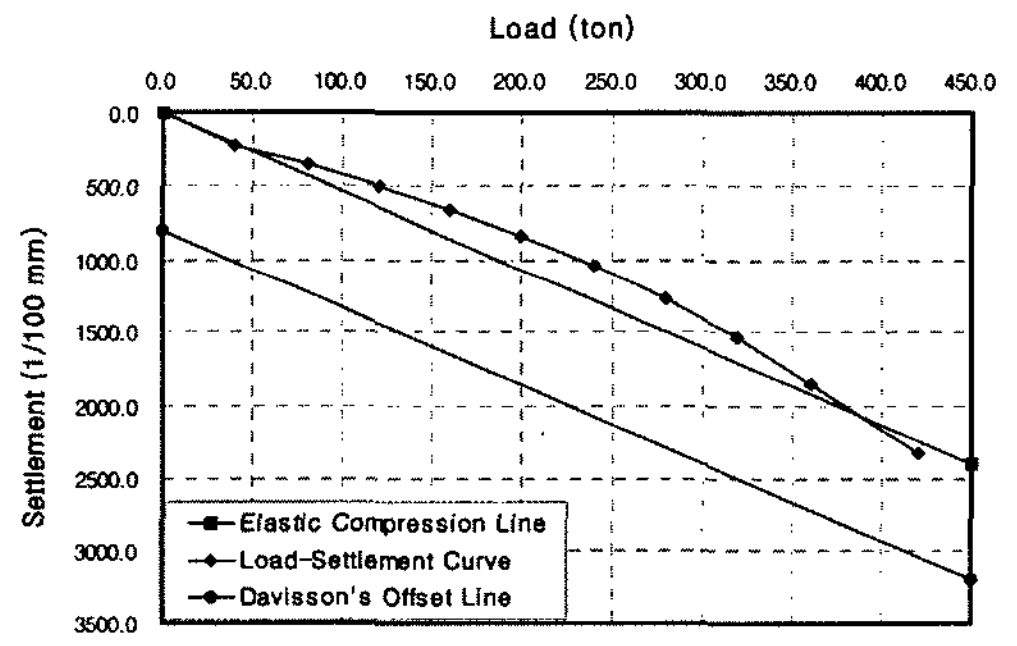
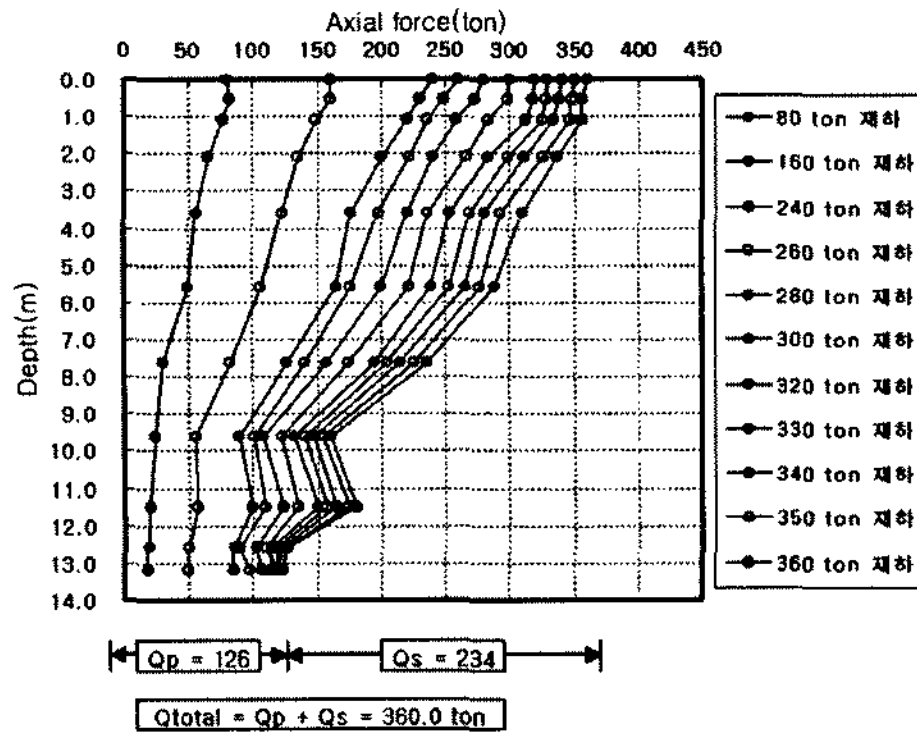


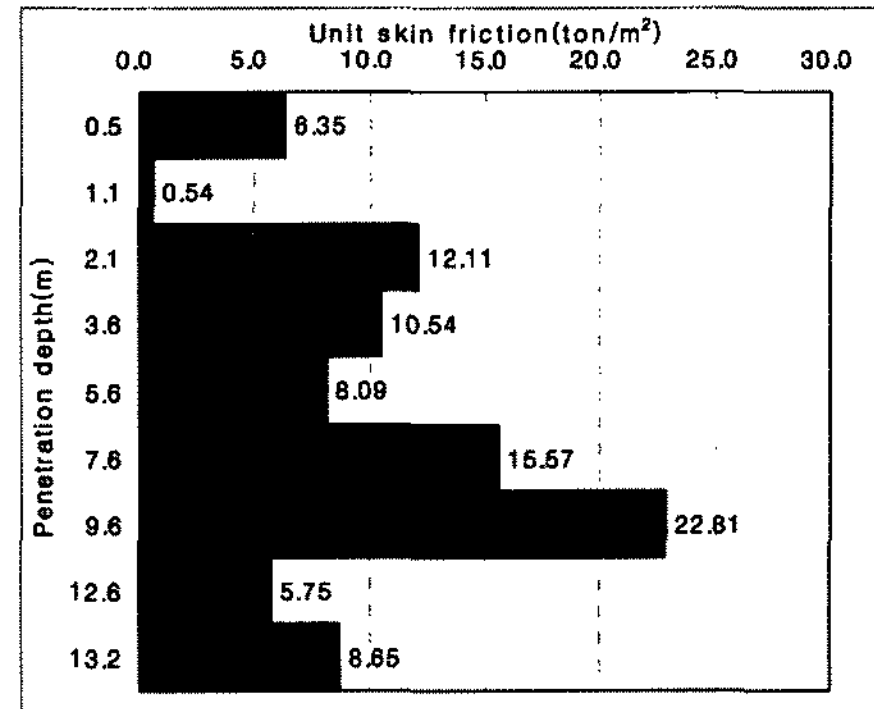
Fig. 13. Davisson's method (Pile No. 48).

주변지반이 공동이나 점토가 협재된 파쇄대가 없는 매립층으로 구성되어 있어 하부로 갈수록 구속응력이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 15(b)의 경우 시험말뚝 No. 48의 단위주면마찰력은 공동과 점토

가 협재된 파쇄대를 포함하고 있는 풍화토층에서 상부 매립토층에 비하여 단위주면마찰력이 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 말뚝두부에 작용하는 축하중에 대한 분담비율은 시험말뚝 No. 38의 경우 말뚝두부에 작

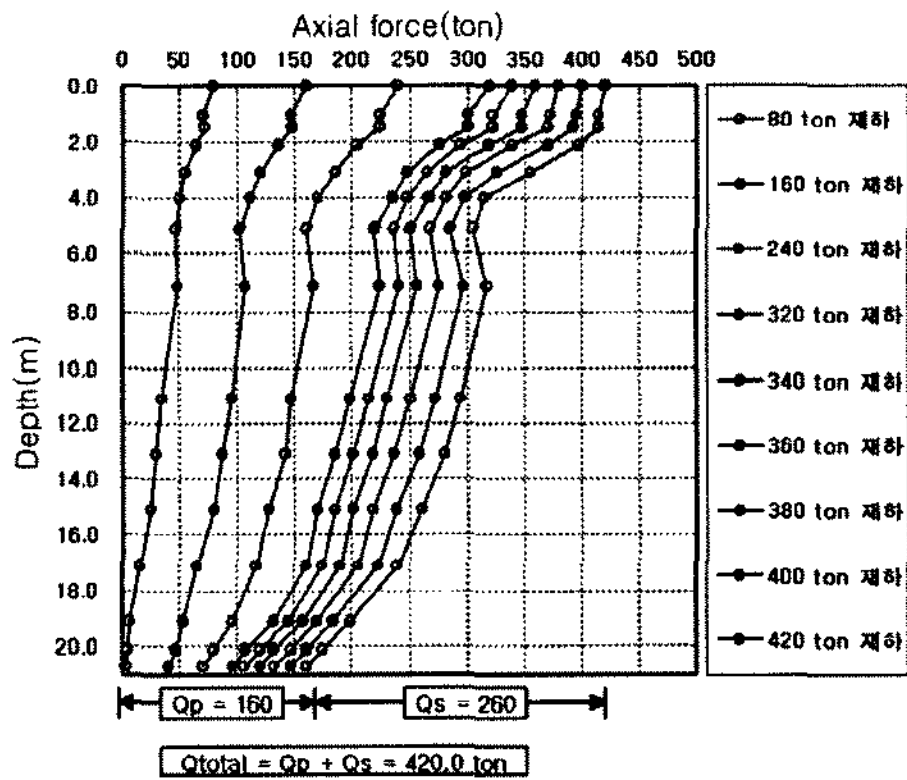


(a) The distribution of axial load

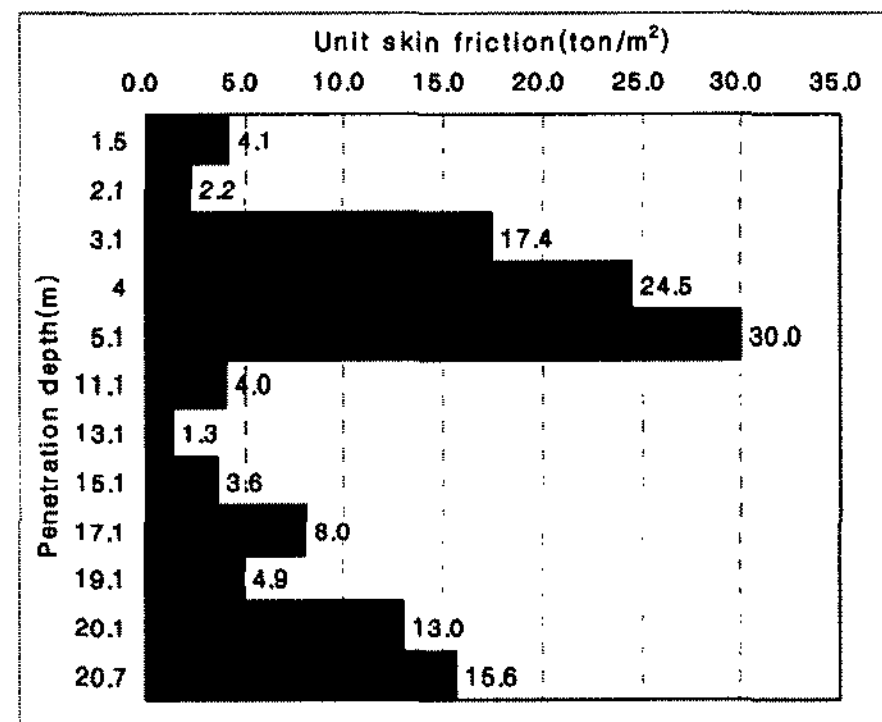


(b) The distribution of unit skin friction

Fig. 14. Test pile No. 37.



(a) The distribution of axial load



(b) The distribution of unit skin friction

Fig. 15. Test pile No. 48.

용하는 최대하중 360에 대하여 분담비율은 선단지지력이 35%이며 주변마찰력이 65%이다. 시험말뚝 No. 48은 최대하중 420에 대하여 분담비율은 선단지지력이 38%이며 주변마찰력이 62%로 시험말뚝의 길이와 무관하게 하중분담비율이 시험말뚝 No. 38과 비슷한 값을 보이고 있다. 이는 공동과 점토가 협재된 파쇄대층에서 주변마찰력이 거의 발생이 되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

결론

용해성공동과 점토가 협재된 파쇄대가 분포하는 석회암층에 구조물을 설치하기 위하여 고압분사주입공법으로 지중에 개량체를 조성하였으며 개량체의 강도특성, 변형특성 및 지지거동 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고압분사주입공법에 의한 개량체의 일축압축강도는 주입순서에 따라 영향을 받으며 바깥쪽 열에서 안쪽 열순으로 갈수록 개량체의 일축압축강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 외부의 개량체에 의하여 경화제가 파쇄대나 공동부로 손실되는 것을 억제하는 커튼월 역할에 의한 것으로 판단된다.

2. 지중에 조성된 개량체에서 채취한 시료에 대한 일축압축강도는 심도와 무관하게 62 kg/cm²~317 kg/cm²의 분포로 최저치와 최대치의 분포범위가 매우 넓은 것으로 나타났다. 이는 공동이나 점토가 협재된 파쇄대 구간의 지층특성과 지반개량시 룯드의 인발속도의 차에서 기인된 것으로 판단된다.

3. 개량체에서 채취한 시료의 탄성계수(E)와 일축압축강도(qu)은 E = (900~1900)qu와 같은 상관성이 있는 것으로 나타났다.

4. 개량체의 포아송비는 일축압축강도 150 kg/cm^2 까지는 거의 선형적으로 감소하다가 그 이후부터는 일축압축강도의 증가와 무관하게 거의 일정한 값을 나타내고 있는데, 이는 개량체의 변형특성은 임의의 강도 이상에서는 거의 일정하다는 것을 의미한다.

참 고 문 헌

- 김동욱(1995), “고압분사주입공법에 의한 개량체의 역학적 특성”, 중앙대학교 건설대학원, 석사학위 논문
 김산식(1998), “3중관 주입공법에 의한 지반개량 효과에 관한 연구”, 한양대학교 산업대학원, 석사학위 논문
 윤중만, 홍원표, 유승경(1996), “고압분사주입공법에 의한 지반개량 사례 연구(I)”, 한국지반공학회지, 제12권 제4호, pp. 33~45
 유충식(1997), “지하공동 위에 위치한 확대기초의 지지력 산정기법”, 한국지반공학회지, 제13권 제1호, pp. 75~84
 임수빈, 김문국, 조병철, 임철훈(1998), “공동 및 점토층 재 파쇄대가 산재된 석회암층의 교량 기초지반 보강 공법”, 한국지반공학회 98 national conference, pp. 121~128
 최진호, 남열우(2003), “SIG공법으로 보강된 석회암 공동부 교량기초의 지지력”, 한국지반공학회지, Vol. 19, No. 7, pp. 37~44
 R.E, Goodman(1993), “Engineering geology : rock in engineering construction”, J, Wiley”
 Vesic, A.S.(1973), “Analysis of ultimate loads of shallow foundations”, Jour., SMFED, ASCE, Vol. 99, No. SM1, pp. 45~73

홍원표

중앙대학교 건설환경공학과
 156-756, 서울시 동작구 흑석동 221번지
 Tel: 02-820-5258
 Fax: 02-824-0580
 E-mail: wphong@cau.ac.kr

홍건표

삼부토건(주) 기술연구실
 100-804, 서울시 중구 남창동 9-1번지
 Tel: 02-3706-2545
 Fax: 02-756-3905
 E-mail: gphong@sambu.co.kr

여규권

삼부토건(주) 기술연구실
 100-804, 서울시 중구 남창동 9-1번지
 Tel: 02-3706-2537
 Fax: 02-756-3905
 E-mail: moonju@sambu.co.kr