

교량기초를 위한 석회암 공동지반의 지반보강 설계 및 시공

A design and construction for reinforcement of bridge foundations on the limestone cavities

*박종호¹⁾, Park Jong-Ho, 최용기²⁾, Choi Yong-Ki, 한현희³⁾, Han Hyun-Hee,
김태훈⁴⁾, Kim Tae-Hoon, 박용원⁵⁾, Park Yong-Won

- 1) 대원토질(주) 상무이사, Executive Director, DaeWon Soil Co., Ltd.
- 2) 대원토질(주) 대표이사, President, DaeWon Soil Co., Ltd.
- 3) 대원토질 기술연구소 책임연구원, Principal Researcher, Research Center, DaeWon Soil Co., Ltd.
- 4) 쌍용건설(주) 현장소장, Chief Director, SsangYong Engineering & Construction Co., Ltd.
- 5) 명지대 토목환경공학과 교수, Professor Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University

SYNOPSIS : Carbonate rocks such as limestone are susceptible to solution and show numerous solution cavities. For the construction of the structures such as bridge foundations and tunnel on the limestone cavities, the geological unconformities developed in the bed rocks, cavity systems and the filling types of solution deposits should be surveyed and analyzed. And also, the stability of structures on the limestone cavities must be taken into consideration in the view of the geotechnical engineering. As a result of analysis of the foundation settlement, an economic and effective reinforcement method is to be proposed and the construction by the proposed method is to be accompanied with verification of reinforcement effect. This paper is a case study of design and construction for the reinforcement of bridge foundations on the limestone cavity covered with thick bedded colluvial soils.

Key words : limestone cavity, bridge foundation, design and construction for reinforcement

1. 서론

최근에 산악지형을 통과하는 고속도로 건설공사 중 교량구조물이 차지하는 비중이 증가하는 추세에 있고 점차 대형화되면서 구조물의 하중을 지지하는 기초지반의 안전성에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이다. 특히, 우리 나라의 중부내륙 산간 및 동부지역의 기반암 중에는 고생대 조선누층군과 평안누층군에 속하는 탄산염암이 분포되어 석회암의 용해공동 및 특수 지질분포지역이 많으므로 이에 대한 지질 분포의 특성과악 및 이해가 중요하다. 이 논문은 두꺼운 붕적층 아래 석회암 공동이 분포하는 지역에 설치되는 교량기초를 보강하기 위하여 석회암 공동의 규모를 정밀조사하고 분석한 후 지반보강 설계 및 시공을 수행하고 보강효과를 확인한 사례 연구이다.

2. 지질특성 및 현황

2.1 지질 특성

이 지역은 한반도의 중부지방에 북동-남서 방향으로 분포하는 옥천대의 북동부인 소위 옥천비변성대에 위치하여 상부 고생대의 조선누층군에 속하는 석빙산석회암이 기반암으로 분포하고 강릉탄전의 평안누층군에 속하는 만항층이 부정합으로 피복하며 분포한다. 또한, 본 지역은 상기한 지층들을 북북동-남남서 방향으로 추정되는 단층선의 주변부를 중심으로 두꺼운 붕적층이 피복하고 있는 것이 특징이다.

2.2 현황

‘동해고속도로(동해~주문진) 확장공사(제○공구)’ 중 대상지역의 교량은 연장 50m의 교량으로서 상부 구조는 STEEL BOX 형식이고, 하부구조는 말뚝기초로 되어있다. 당 현장의 기반암은 대부분 석회암으로서 원 설계시 시추조사 결과와 시공전 확인시추조사 결과 교량 기초하부에는 두꺼운 붕적층 및 석회암 공동(최대 4.6m)이 불규칙하게 분포되어 있는 것을 확인하였다.

3. 석회암 공동지반 정밀 조사

3.1 석회암 분포지역의 지질학적 특성

우리나라 하부고생대의 조선누층군 내에는 많은 석회암이 분포한다. 석회암은 주로 방해석(calcite)과 돌로마이트(dolomite)로 구성되는 탄산염광물을 50%이상 포함하고 있는 퇴적암을 말한다. 이러한 석회암이 분포하는 지역에는 지형학적으로 지표가 가라앉아 형성된 돌리네(doline)가 자주 발달한다. 이와 같은 현상은 암반내에 발달된 층리, 절리 및 단층 등의 불연속면을 따라 빗물이나 지하수가 스며들어 조금씩 용식되어 형성된 석회동굴이 붕괴되어 형성된 것으로 지반조사시 특히 유의하여야 한다.

3.2 교량기초 설계를 위한 정밀 조사

석회암 공동분포 지역내 교량기초의 효과적인 설계 및 대책을 위해서는 석회암 공동의 분포 특성을 고려한 합리적인 조사가 수행되어야 한다. 조사는 대상지반의 지층구성상태, 공동 및 단층파쇄대 등의 분포현황 파악과 교량기초의 안정성 평가 및 수치해석에 필요한 지반 매개변수(Parameter) 산정을 목적으로 개략조사와 정밀조사로 구분되어 실시된다. 본 현장에서는 전기비저항탐사를 통해 추정되는 석회암 분포 특성을 개략적으로 파악한 후 시추조사와 시추공을 이용한 물리탐사와 같은 정밀조사를 실시하여 석회암의 분포특성을 파악하였다.

표 1. 조사 항목 및 활용 목적

조사 항목		획득 정보	활용 목적
현 장 조 사	시추조사	암석코어채취(TCR/RQD)	절리간격 확인, 암반분류
	표준관입시험 (S.P.T.)	N값 측정	지층구분, 토사 강도정수 추정 토사 탄성계수 추정
	지하수위 조사	지하수위 및 투수성	암반분류 및 평가
	전기비저항 탐사(쌍극자법)	전기비저항치	암반의 개략적 특성 파악
	시추공 영상촬영	시추공 영상	공동내 충전물의 유무 확인
	탄성과 토모그래피 (Seismic Tomography)	시추공간 탄성과 속도 공동 및 연약대 현황	현장 암반 탄성과 속도 탄성계수 유추 및 지반 모델링
실 내 시 험	압축강도시험	일축압축강도, 탄성계수	암반분류, 병형 특성 수치해석(침하량, 지지력)
	암석물성시험	단위중량, 포아송비, C 와 Ø 값	암반분류, 수치해석(지지력)
	토성시험	토질 특성	수치해석(침하량, 지지력)

3.2.1 전기비저항 탐사

이번 조사에서는 최근에 개발되어 이용이 급속히 확대되고 있는 탐사기법으로서 수직탐사와 수평탐사를 조합, 병행하여 지하의 지질구조를 영상화함으로써 고밀도의 해석이 가능한 쌍극자 배열(dipole-dipole array)을 이용한 2차원 전기비저항 영상법을 적용하였다.

3.2.2 시추조사

시추조사는 지반조사 중에서 가장 기본이 되는 조사로서 시추심도는 조사비에 밀접한 관계를 가지고 있다. 국내외 기관별 시추조사 심도의 추천기준을 검토한 결과 기초에 작용하는 지중용력의 영향권을 고려하여 기초 폭의 2배심도 또는 상부하중으로 인한 기초 접지용력의 10% 이하 되는 심도까지 시추할 것을 추천하고 있다. 따라서 이번 조사는 기초폭의 2배를 기준으로 하되 전기비저항탐사 결과 석회암 공동 또는 파쇄대가 기초폭의 2배를 초과하는 지역에 대해서는 기초폭의 3배 이상까지 추가로 실시하였다.

3.2.3 시추공 영상촬영

일반적으로 시추조사는 회수된 시료에 의한 제한된 영역의 정보만을 획득할 수 있었으나 최근 도입된 시추공 영상촬영은 시추공 중심으로부터 공벽을 향하여 거의 수직적으로 광파 빔(Optical Beam)을 방사하여 공벽을 스캐닝하듯이 촬영함으로써 공벽 영상을 Real Color로 재현하여 암반의 종류 및 상태, 절리 등의 불연속면의 분포 상태 등을 파악할 수 있으므로 본 연구에서는 OBI시스템을 이용하여 석회암 공동의 크기 및 충전 유무의 확인에 중점을 두었다.

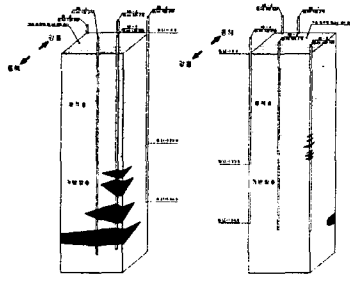
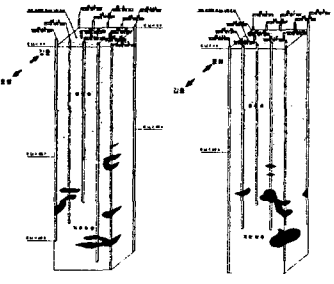
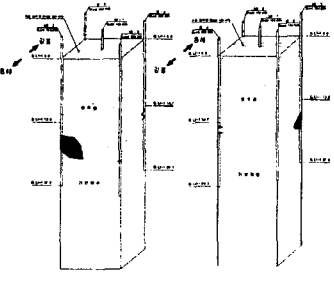
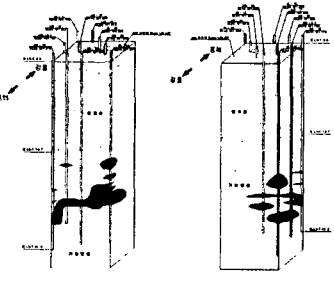
3.2.4 지오 토모그래피

인위적으로 발생시킨 탄성파 또는 전자기파가 매질을 통과하여 수신되는 신호를 분석하여 파가 지나온 단면의 물리적인 특성분포를 영상화하는 기법으로서 현재 국내에서는 레이다토모그래피, 전기비저항 토모그래피 및 탄성파 토모그래피가 주로 이용되고 있으며, 이 현장은 석회암 공동에 퇴적된 점토성분에 의한 전기전도도 값에 의해 전기비저항 및 레이더는 투과거리가 짧을 것으로 판단되어 탄성파 토모그래피를 이용하였다.

3.3 지반 조사결과

교량기초 하부에 대한 정밀지반조사 결과를 종합적으로 분석한 결과, 지표로부터 16.8~28.6m까지는 자갈 및 호박돌이 혼재된 실트질 점토로 구성된 붕적층이 두껍게 분포되어 있으며 기반암은 석회암으로서 단층대의 발달이 추정되는 5번 균도를 경계로 시점방향의 기초 암반은 R.Q.D가 7.4~17.0%정도로 파쇄대가 발달된 연장성이 불량하고 점토가 협재된 공동이 불규칙하게 형성되어 나타났다. 종점방향의 기초 암반은 R.Q.D가 45%정도로 비교적 신선한 암반이 분포하고 연장성이 비교적 양호한 최대 4.6m 정도의 석회암 공동이 지하수와 점토가 충전된 상태로 분포하는 것으로 조사되었다.

표 2. 석회암 공동 정밀조사 요약

구 분	공동 발달 형상	조사 항목	종합 분석
동해 A1		<ul style="list-style-type: none"> - 전기비저항 탐사 - 시추조사 - 탄성파토모그래피 	<ul style="list-style-type: none"> - 봉적층 : G.L.(-)16.8~27.0m - 기반암 : 석회암 - 평균 TCR : 70.1%, - 평균 RQD : 17.0% - 석회암 공동 : 점토 및 실트 포화 - 분포심도 : G.L.(-) 16.8~39.5m - 규 모 : 0.3~3.9m
강릉 A1		<ul style="list-style-type: none"> - 전기비저항 탐사 - 시추조사 - 탄성파토모그래피 - 시추공 영상촬영 	<ul style="list-style-type: none"> - 봉적층 : G.L.(-)22.3~28.6m - 기반암 : 석회암 - 평균 TCR : 62.8%, - 평균 RQD : 7.4% - 석회암 공동 : 점토 및 실트 포화 - 분포심도 : G.L.(-) 22.2~43.7m - 규 모 : 0.3~2.8m(불규칙)
동해 A2		<ul style="list-style-type: none"> - 전기비저항 탐사 - 시추조사 - 탄성파토모그래피 	<ul style="list-style-type: none"> - 봉적층 : G.L.(-)18.6~23.6m - 기반암 : 석회암 - 평균 TCR : 92.8%, - 평균 RQD : 45.9% - 석회암 공동 : 실트질 점토 충전 - 분포심도 : G.L.(-) 14.7~26.2m - 규 모 : 0.1~3.4m(국부적)
강릉 A2		<ul style="list-style-type: none"> - 전기비저항 탐사 - 시추조사 - 탄성파토모그래피 - 시추공 영상촬영 	<ul style="list-style-type: none"> - 봉적층 : G.L.(-)16.0~28.3m - 기반암 : 석회암 - 평균 TCR : 81.5%, - 평균 RQD : 44.0% - 석회암 공동 : 지하수/점토 충전 - 분포심도 : G.L.(-) 18.6~39.4m - 규 모 : 0.3~4.6m(대규모)

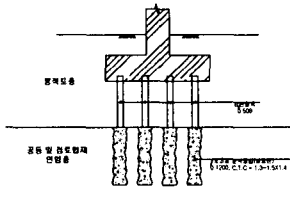
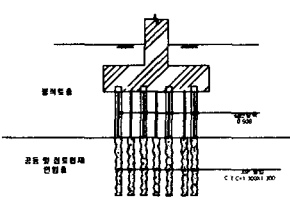
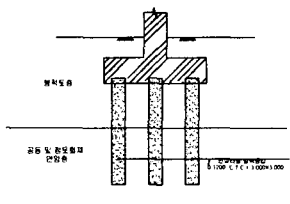
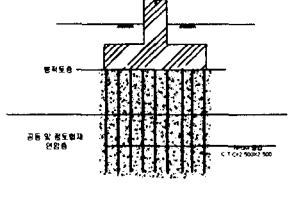
4. 석회암 공동 보강설계

4.1 석회암공동 보강공법 비교

석회암 공동 보강대책 공법은 말뚝을 통하여 상부하중을 지반의 견고한 지지층에 전달하는 말뚝공법이나 상부하중이 영향을 미치는 지층까지 지반을 보강하는 공법으로 대별할 수 있다. 말뚝기초공법은 기초하부에 견고한 지지층이 확인되는 경우에만 가장 확실한 보강대책이 될 수 있으며 당 현장과 같은 석회암 공동이 분포하는 지역은 기초지반의 강성을 전반적으로 증가시키는 공동보강 공법 중 JSP공법, 대구경 현장타설말뚝 공법, 삼중관 초고압 분사공법 등에 대한 안정성, 시공성 및 경제성을 검토하였으

며 각 공법에 대한 비교표는 표 3.과 같다.

표 3. 석회암 공동 보강공법 비교

공 법	개요도	시공 방법	적용성
P.R.D. + 초고압 분사공법 (삼중관)		기반암 선단까지 천공 후 강관을 삽입한다. 물, 압축공기, 시멘트 밀크를 3중관 룯드를 통하여 초고압으로 분사함으로써 연약한 지반을 굴삭함과 동시에, 굴삭된 공간에 시멘트 밀크를 채워 원주형 기둥을 지중에 형성하는 공법.	- 상부노즐은 300~600kg/cm ² 의 초고압수와 공기를 이용하여 토사 및 연약대를 절삭하고 치환한 후, - 하부노즐은 50~600kg/cm ² 으로 시멘트 밀크를 분사하여 고품질의 원주형 고결체 형성. - 3중관을 이용함으로써 슬라임의 배출능력이 2중관 공법에 비하여 월등하다.
J.S.P. 공법 (이중관)		압축공기와 시멘트 밀크를 2중관 룯드를 통하여 분사함으로써 연약지반을 굴착하고, 굴착된 토사와 시멘트 밀크를 혼합하여 원주형 소일시멘트 기둥을 지중에 형성하는 공법.	- 공기와 시멘트 밀크를 200~400kg/cm ² 의 압력으로 직접지반에 분사한 후, 절삭된 토사와 교반·혼합하여 원주형 기둥 및 구근을 형성. - 슬라임 배출이 적어 개량지반의 강도가 다소 적다. - 재료(시멘트)의 손실이 많다.
현장타설 말뚝공법 (회전식 굴삭+RCD)		대구경 천공장비를 이용하여 역순환 방식(R.C.D)으로 지층까지 선 굴착하고 슬라임을 제거한 후, 천공홀내에 조립된 철근망을 삽입하고 트레미관을 이용하여 철근콘크리트 기둥을 형성하는 공법.	- 상부구조물의 하중이 대단히 크거나 중요한 구조물 하부기초로 적당. - 확실한 시공이 가능하며, 시공된 말뚝의 품질이 우수하다. - 말뚝 한 개당 분담하중이 매우 크므로 확실한 지지층이 필요.
Micro Pile 공 법		적천공 방식의 천공장비를 이용하여 소정의 깊이까지 천공함과 동시에 강관을 삽입하고, 강관내에 Air Pack를 설치한 후, 시멘트 밀크 및 LW액을 다단식으로 지반에 주입하여 지반을 보강하는 공법.	- 지반의 균열 및 절리 또는 공동부에 시멘트 밀크를 다단으로 주입(10~20kg/cm ² ±5kg/cm ²)하여 넓은 범위를 충전하는 공법. - 침투 및 활렬주입이 가능하며 균등한 지반 보강에 유리. - 직접기초 하부의 연암파쇄대 및 대규모 단층보강에 효과적.

4.2 초고압 분사공법(삼중관) 적용

정밀지반조사 결과 교량기초 저부에서 발견된 다수의 점토층진 공동 및 불규칙한 형태로 형성된 연암파쇄대층의 영향을 고려하여 교량기초 구조물의 안정성을 검토한 결과 침하량이 허용범위를 초과하는 것으로 나타남에 따라, 초고압 분사공법(삼중관)을 적용하여 공동내부에 충전되어 있는 점토를 고압수(300~600kg/cm²)로 절삭해내고 Cement Paste로 충전하여 주변암반과 일체화된 복합지반을 형성시킴으로써 구조물의 장기적인 안정성을 확보하고자 하였으며 보강심도는 공동분포 형상의 불규칙성을 고려하여 지반보강시 확인된 공동중 최하부에 위치하는 공동의 바닥면에서 5.0m를 추가로 보강하는 것으로 설계 및 시공하였다.

또한 공동 및 균열, 파쇄대내의 점토를 고압수로 절삭해서 지표로 배출시키고, 그 대신 시멘트 풀을 고압으로 충전하여 주변암반과 일체화된 복합체를 형성한다고 가정하여 공동내의 점토 및 파쇄대의 협재된 점토물성치를 초고압 분사공법(삼중관)에 의한 복합체의 물성치로 환산해서 침하량을 검토한 결과 침하량이 모두 허용범위 이내에서 수렴하는 것으로 나타났다.

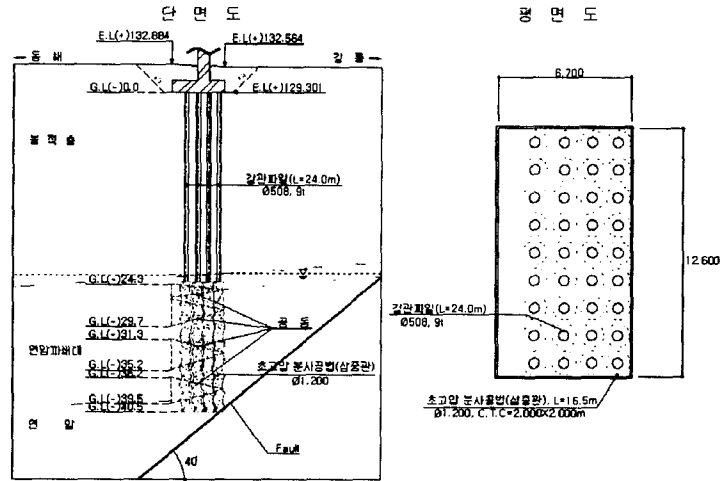


그림 1. P.R.D.+초고압분사공법의 설계 개요도

5. 보강효과 확인

P.R.D.+초고압분사공법을 적용하여 석회암 교량기초부를 보강하고 적용된 공법의 효과를 검증하기 위하여 시추조사에 의한 육안확인, 채취된 고결체의 일축압축 강도시험, 보강전·후 탄성파 토모그래피 탐사 및 강관말뚝 재하시험(정재하 시험) 등을 실시하였다.

5.1 시추코어 강도시험

석회암 공동이 분포하는 교량기초지반을 초고압 분사공법으로 시공한 후 기초위치별 임의로 선정된 지점에서 시추조사를 실시하여 회수된 시료의 육안관찰 및 채취한 고결체에 대한 실내시험을 실시하였으며, 실내시험 결과 고결체의 일축압축강도는 모두 설계기준 강도(36kg/cm²) 및 시공관리 기준강도(150kg/cm²)이상으로 확인되었다.

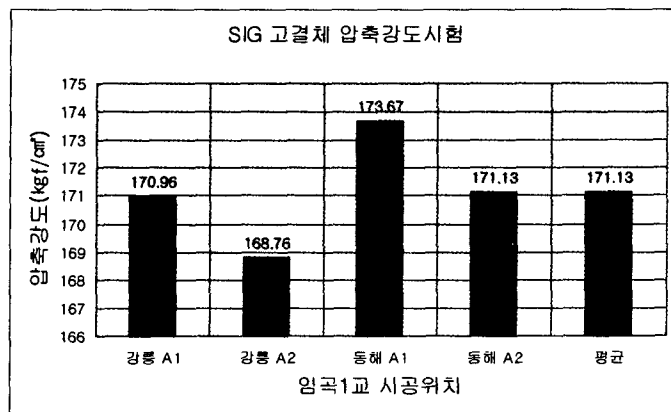
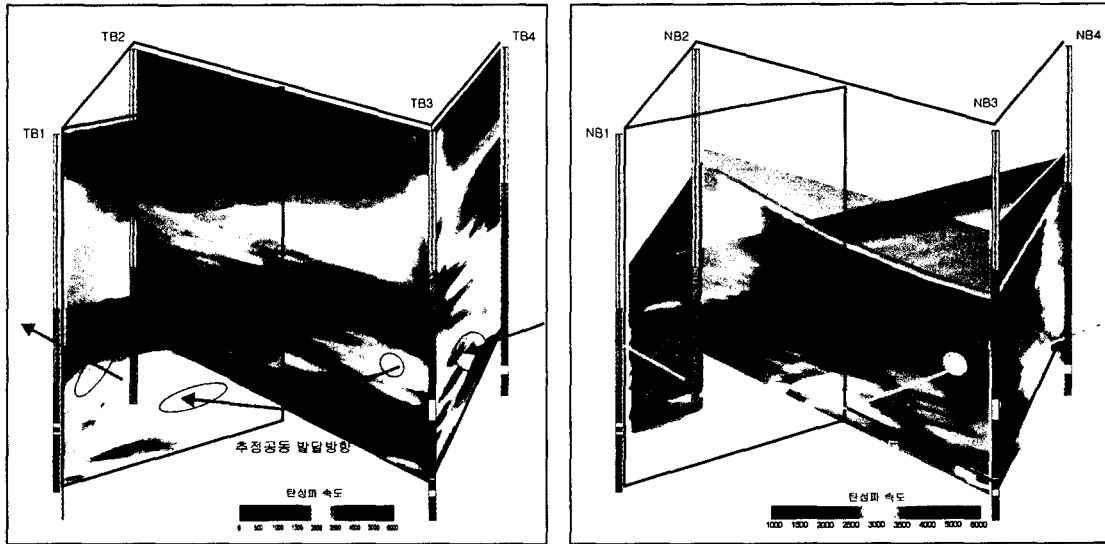


그림 2. 시추코어 일축압축강도시험 결과

5.2 탄성과 토모그래피 탐사

초고압 분사공법의 시공 전·후에 탄성과 토모그래피 탐사를 실시하여 교량기초 지반에 대한 탄성과 속도의 변화를 비교함으로써 각 탐사단면별 보강효과를 검토하고 이를 3차원적 해석기법을 이용하여 탄성과 속도단면을 비교, 검토하였다.



< 보강전 3차원 종합해석 >

< 보강후 3차원 종합해석 >

그림 3. 탄성과 토모그래피 3차원적 분석결과 비교

5.3 강관말뚝 재하시험

교량기초 하부의 보강된 공동상부에 설치된 강관 말뚝에 대한 지지력을 구하기 위하여 시험말뚝에 대한 정재하방법을 실시하여 허용지지력을 구하고 설계 지지력과 비교, 검토하므로써 말뚝기초의 안전성을 검토하였다.

시험 말뚝의 시험결과를 P-S곡선분석, LogP-LogS곡선분석, S-LogT곡선분석, Davission's곡선분석, P- Δ s/ Δ (log t)곡선 분석 등에 의한 항복하중 분석, 전침하량 분석 및 잔류침하량 분석결과 허용지지력은 166.25Ton이상으로써 설계지지력(70.0Ton/본)이상 발휘되는 것으로 판단할 수 있으며 반력말뚝의 인발거동량 분석결과 상방향 인발량이 1.35mm~1.54mm이며 하중 제거 후 잔류 인발량은 0.02mm~0.05mm로 『토목공사 표준 일반시방서 3-4-2』 규정(3mm) 이내로 확인되었다.

6. 결 론

이 논문은 우리나라 대부분의 석회암 공동 분포특성과 달리 매우 두꺼운 붕적층이 기반암을 부정합으로 피복하고 있는 지역의 교량 기초부에서 현장특성을 고려한 정밀지반조사를 실시하고 종합분석하여 공동보강 대책공법으로 선정된 P.R.D.+초고압 분사공법에 대한 설계 및 시공 사례이다.

1) 조사지역은 옥천대의 북동부인 소위 옥천비변성대에 위치하여 상부 고생대의 조선누층군에 속하는 석병산석회암이 기반암으로 분포하고 강릉탄전의 평안누층군에 속하는 만항층이 부정합으로 피복하며 분포한다. 또한, 본 지역은 북북동-남남서 방향으로 추정되는 단층선의 주변부를 중심으로 두꺼운 붕적층이 피복하고 있는 것이 특징이다.

2) 교량기초지반에 분포하는 석회암 공동의 규모 및 분포특성을 파악하기 위하여 전기비저항 탐사에 의한 기반암의 개략적인 형상을 파악한 후 탐사결과를 기준으로 시추위치 및 심도를 결정하였으며, 시추조사와 더불어 시추공 영상촬영(OBI시스템) 및 탄성파 토모그래피를 이용하여 공동의 퇴적물에 따른 분류와 공동의 형상을 조사하였다.

3) 조사결과 지표로부터 16.0~28.6m까지는 붕적층이 분포하며 기반암으로 분포하는 고생대 석빙산석회암은 5번 균도를 경계로 시점방향은 균열 및 파쇄대가 분포하며 파쇄대를 중심으로 점토협재된 0.2~3.9m규모의 석회암공동이 G.L.(-)43.7m까지 분포하는 것이 확인되었다. 종점방향은 비교적 신선한 석회암이 분포하며 최대 직경 4.6m정도의 대규모 공동이 분포하는 것으로 확인되었으며, 공동내 퇴적물에 의한 4가지 분류(Statham and Baker, 1986) 중 대부분이 Type II에 해당하는 것으로 확인되었다.

4) 교량기초 하부지반의 석회암 공동 보강공법으로는 두껍게 분포하는 붕적층과 석회암 공동의 분포특성을 고려하여 P.R.D.+삼중관식 초고압 분사공법을 선정하고 수치해석을 통한 안전성 검토를 실시하여 교량기초 보강을 설계하였다.

5) 보강된 교량기초지반의 보강검증을 목적으로 기존의 효과검증 방법인 시추조사, 고결체의 압축강도 시험, 탄성파 토모그래피 탐사를 실시하였으며, 이번 조사지역의 경우 현장 특성을 고려하여 추가로 강관말뚝 재하시험(정재하 시험)을 통하여 보강효과를 최종 확인하였다.

참고문헌

1. 김학수, 최원석, 윤운상, 김재민(1999), "카르스트 지역 내 교량 기초의 보강을 위한 조사 설계 사례 -재천, 단양지역", 한국지반공학회 암반역학위원회 세미나논문집, pp. 147~163.
2. 신희순, 선우춘, 이두화(2000), "토목기술자를 위한 지질조사 및 암반분류", 구미서관
3. 쌍용건설주식회사(2001), 동해고속도로(동해-주문진간) 확장공사 제6공구 교량 기초부 석회암 공동 보강 결과 보고서.
4. 임수빈(1998), "석회암 지대의 교량기초 설계시 지반조사 기준에 대한 고찰", 한국지반공학회 '98 가을 학술발표회 논문집, pp. 69~73.
5. Fookes, P.G and Hawkins, A.B.(1988), "Limestone weathering: its engineering significance and a proposed classification scheme", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.21, pp.7~31.
6. Statham, I. and Baker, M.(1986), " Foundation problems on limestone: A case history from the carboniferous limestone at Chepstow, Gwent", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.19, pp.7~31.