

석회암공동 분포구간에 대한 설계사례 분석을 통한 합리적인 교량기초 계획



김경태

한국종합기술 지반부 부장
토질 및 기초기술사
(kkt@kecc.co.kr)



한진희

한국종합기술 지반부 부장
토질 및 기초기술사
(soiler@kecc.co.kr)



이광희

한국종합기술 지반부 차장
토질 및 기초기술사
(lkhee@kecc.co.kr)



정민교

한국종합기술
지반부 사원
(mminkyo@kecc.co.kr)

1. 서론

도로 계획시 석회암구간에 공동이 출현될 경우, 쌓기부에 대하여 대규모적인 공동붕괴가 발생되지 않는다면 일반구간의 경우와 동일조건과 방법으로 설계를 한다. 그러나 교량기초부에 공동이 발생될 경우에는 지지층에 대한 공동분포 특성파악과 이에 따른 보강이 필수적으로 요구된다. 특히, 기존노선의 확장설계인 경우에는 설계단계에서 기존교량의 간섭으로 교량교각/교대의 정 위치에 공동분포 특성조사가 한계성이 있으므로 시공중 보완조사계획이 중요할 것이다.

따라서 본 사례는 평창군의 국도00호선 도로건설공사의 설계사례를 통하여 보다 합리적인 교량기초에 대한 석회암공동 보강방향 및 시공 중 보완조사 수립의 방향성을 제시하고자 한다.

첫째, 석회암공동 충전상태 특성을 고려한 합리적인 기초보강공법을 제시하였다.

둘째, 그라우팅으로 보강된 석회암공동구간에 대한 풍화암 지지조건, 그라우팅 강도조건, 연암지지조건에 대하여 지지력평가를 수행하여 비교분석하였다.

셋째, 두꺼운 자갈층 하부에 석회암공동이 출현할 경우, 직접기초와 말뚝기초에 대하여 구조물의 영향범위를 고려 상호 비교검토를 하였다.

넷째, 석회암 공동의 불규칙 다차원적인 분포특성 파악을 위한 시공 중 확인조사방향을 제시하였다. 특히 확장구간의 경우에는 기존도로운영으로 접근에 제한이 있어 설계단계에서 상세조사가 불가하므로 시공 중 공동분포 특성파악을 위한 정밀조사계획이 필요하다.

2. 사례구간의 석회암공동 분포현황 및 특성

2.1 석회암 분포현황

사례지역은 강원도 평창군 일원으로 지질도 분석결과 정선석회암 분포구간으로 시추조사결과 대부분의 교량기초구간에 석회암공동이 확인되었다.

2.2 석회암공동 분포특성

시추조사결과 부분적으로 1.0m 내외의 소규모 공동 또는 공동으로 예상되는 구간이 반복적으로 분포하며 부분적으로 점토 충전물이 회수된 상태, 순환수와 로드 등의 자유낙하 정도, 채취된 코아 상태 및 문헌자료분석에 의거하면 공동분류는 다음의 범주에 속하는

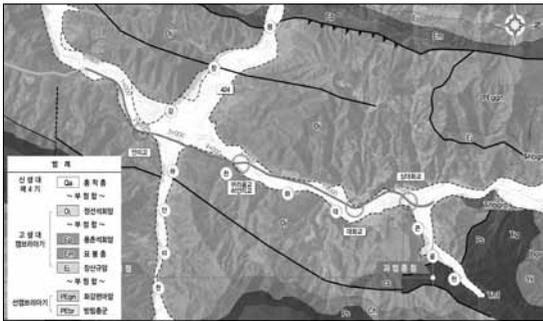


그림 1. 과업구간 지질도

표 1. 공동 분류 및 특징

구분	공동 분류
공동형태에 따른 분류	• 연암, 보통암 구간 중 1.0m 내외의 층후로 반복 분포 → 좁은 간격의 망상형 공동
발전단계에 따른 분류	• 절리면 융해로 인한 소규모 고립된 공동 → II 단계 : Minar Karst
충진물에 의한 분류	• 층상의 점토 및 점토질 실트 부분 회수 → Type II : 소규모 고립된 공동

것으로 판단되었다.

따라서 본 조사지역의 공동은 서로 연결된 형태인 망상형보다는 공동이 연결이 되지 않고 각각 고립된 형태로 분포하는 것으로 판단된다.

2.3 석회암(공동)지대 구조물의 공학적 문제점

1) 공동상부 지반의 함몰

- 공동주변의 지하수위 변동과 같은 내적요인 및 상재하중의 증가와 같은 외적요인에 의해 함몰이 발생할 수 있으며, 지하수위 저하로 인한 상부하중의 부력감소, 공동이 계속 성장하여 천정부가 넓어지는 경우에는 전단파괴 등의 원인이 된다.
- 공동의 붕괴는 지질구조와 밀접한 관련이 있어 단층 및 절리의 방향에 따라 석회암공동의 발달 및 함몰 양상이 지배를 받는다.

2) 구조물의 침하

- 구조물의 침하는 공동의 함몰에 비해 점진적으로 나타나며 공동의 함몰이 주로 빈 공동에서 발생하는 데 비해 구조물의 침하는 충전공동에서 많이 발생한다.
- 침하유형은 공동의 분포형태에 따라 전 침하, 부등침하(상대침하) 그리고 각변위의 형태로 나타난다.

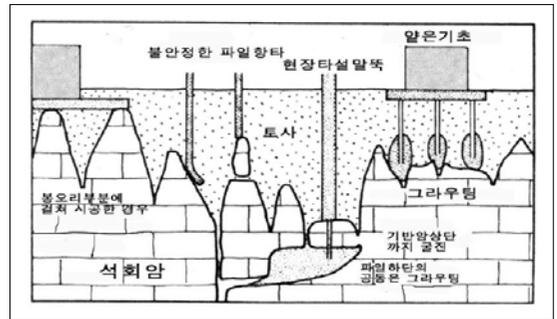


그림 2. 석회암지대 구조물의 공학적 문제점(Waltham, 1994)

3) 구조물기초의 공학적 문제점

석회암의 차별침식으로 인해 암상의 표면이 뾰족하게 형성되어 있어 말뚝기초 시공시 위험을 초래하는 경우가 많으며 석회암지대뿐만 아니라 석회암지대 주변 암석과의 경계부는 특히 공동의 발달 가능성이 높다.

행이 불가하므로 적용성은 더욱 낮은 것으로 판단된다.

3. 석회공동 구조물기초 보강공법 검토

3.1 기초공법 선정

보강방안은 공동의 영향이 미치지 않은 깊이까지 말뚝길이 증가하는 방안과, 말뚝길이 증가 없이 공동에 대한 그라우팅 보강방안에 대하여 검토하였다. 그러나 말뚝길이 증가의 경우에는 공동분포특성의 정확한 정보 획득 한계성으로 적용성이 낮은 것으로 판단하였다. 특히 공용중인 확장설계의 경우에는 정위치에서 조사수

3.2 그라우팅보강공법 계획

1) 공동분포특성을 고려한 공법 선정시 고려사항
지반조사결과에 의거 공동의 분포특성을 크게 2Type으로 분류하여 각 특성에 부합되는 그라우팅공법을 적용하도록 계획하였다.

2) 그라우팅공법 선정

교대/교각 중 충전물 회수가 불가하고 연약점성토 및 부분 충전된 상태로 추정된 구간에 대하는 몰탈로 제한 범위에서 채움 및 압밀(다짐)될 수 있는 압력다짐 공법을 선정하였고, 충전물 회수로 공동 대부분 충전된 상태로 추정된 구간에 대하여는 충전물질을 배출 치환할 수 있는 공법인 고압분사공법을 선정하였다. 각 공법의 특징은 다음 표 4와 같다.

표 2. 석회암 공동 분포구간의 설계사례 분석을 통한 합리적 교량기초계획 선정

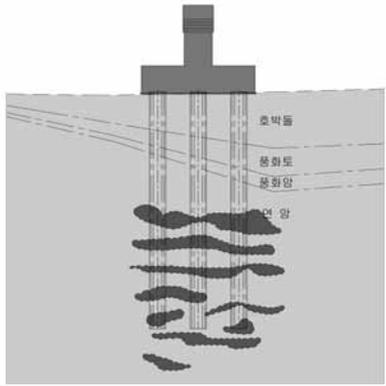
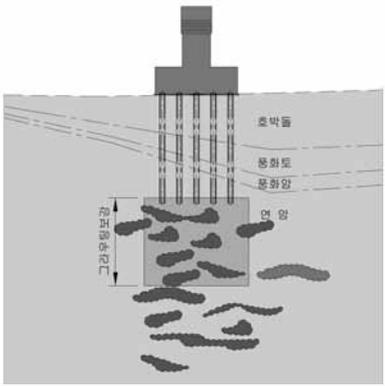
구분	현장타설말뚝	매입말뚝 + 그라우팅공동보강
개요도		
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 대구경, 장심도 암반굴착 능률 저하 및 공기 증가 • 공동분포 정확한 정보 필요 • 공동/파쇄대경우 하중전이에 Creep변형 발생 • 말뚝선단 하부공동 존재시, 말뚝 휨 혹은 뒤틀림 발생 • 주면 마찰력 큼 	<ul style="list-style-type: none"> • 소·중형 장비로 좁은 작업공간에서 시공 가능 • 기초 하부 영향범위내 보강으로 불확실 요인 제거 • 공동내 충전/절삭 등으로, 심도에 관계없이 균일한 개량체 형성으로 지내력 확보 • 주면 마찰력이 비교적 작음
선정(안)		●

표 3. 공동 분포특성을 고려한 공법 선정시 고려사항

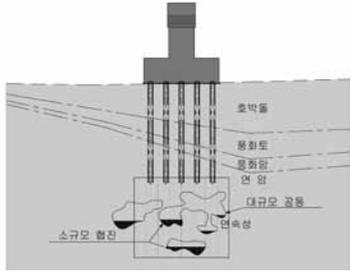
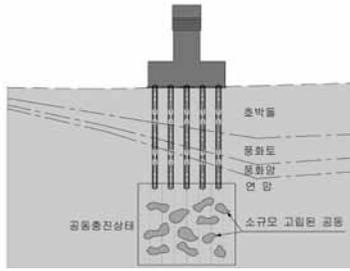
공동분포 특성	공동 빈상태/부분 충전상태/공동대규모/연결성 존재	공동 충전된 상태/소규모/고립된 상태
개요도		
고려 사항	<ul style="list-style-type: none"> 공동구간 충진을 위한 주입량 과다 발생 목적 범위 내에 주입가능, 개량 직경 형성 가능공법 선정 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 소요 강도 확보위하여 점성토의 충전물 질삭 치환 필요 약액/침투주입으로는 소정의 강도확보 어려움

표 4. 석회암 공동 보강공법의 특징

구분	약액침투 저압주입공법	압력다짐주입공법	고압분사공법
공법 개요	계획심도까지 천공후주입관을 설치하고 저압으로 주재와 경화재를 주입하여 Gel Time 조절을 통해 목적 범위내에 균일하게 지반내에 침투되도록 주입하는 공법	액상 그라우트 부 배합 유동성 몰탈 그라우트를 대상지반에 비배출 압력다짐주입하여 주상개량체에 의한 지중기초 구축과 지반복합개량을 도모하는 공법	계획심도까지 2, 3 또는 4층관을 삽입하여 천공후선단부 노즐을 통해 공기, 경화재 또는 물을 고압분사하여 지반을 절삭 및 지표면으로 배출시킴과 동시에 잔여지반과 교반하여 개량체를 조성하는 공법
특징	<ul style="list-style-type: none"> 대상 토질에 따라 주입재의 Gel Time 조절 가능 약액의 용탈, 용해로 인한 투수계수 증가, 강도저하, 장기내구성의 저하 	<ul style="list-style-type: none"> 공동이 빈상태 혹은 부분 충전된 상태인 경우 제한된 목적 범위에 요구직경 개량체 형성 비배출 주입으로 슬라임 및 폐기물 발생 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 공동이 충전되고 규모가 작은 경우 충전물질을 절삭치환하여 개량체 형성 유속있는 지반에서 급결 분사로 소요 구근 형성 가능
개량강도	2~20kgf/cm ³	80~150kgf/cm ³	10~150kgf/cm ³

4. 석회공동 기초그라우팅 보강시 설계검토

4.1 그라우팅 보강심도 검토

- 보강공법의 적용심도는 교량 기초의 하중 조건과 지반 조건으로부터 설계되어지는 기초 푸팅의 크기와 말뚝 기초의 근입 깊이가 미치는 응력 범위를 고려하여 적정 심도를 갖도록 결정된다.
- 한국도로공사는 석회암 지역으로 공동이 출현되는 지역에서 말뚝기초의 주면 마찰력이 발휘되지

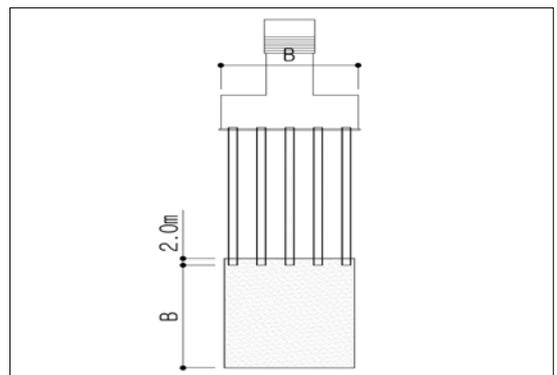


그림 3. 그라우팅 보강심도

않는다고 판단되면 푸팅 폭의 3배, 주변 마찰력이 충분히 발휘된다고 판단되면 푸팅 폭의 1배 심도까지로 정하고 있다.

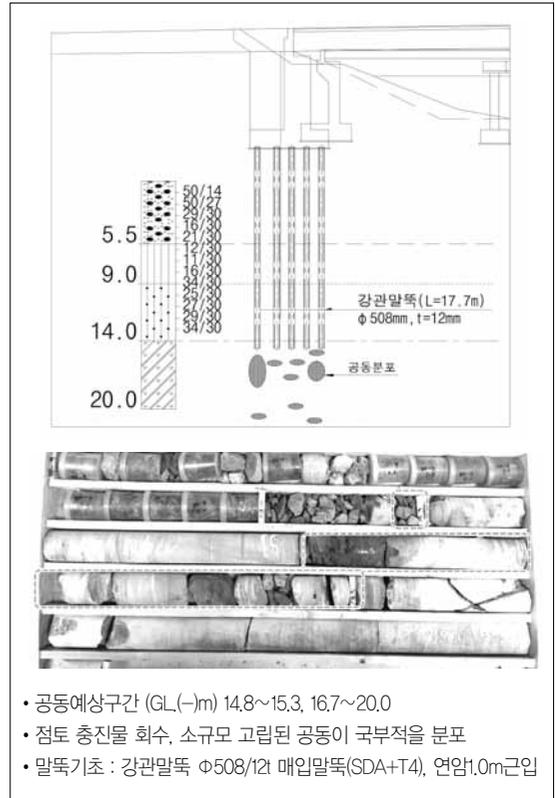
- 따라서 본 과업에서는 주변에 해당하는 지층이 대부분 모래, 자갈, 호박돌, 풍화암으로 주변 마찰력이 충분히 발휘된다고 판단되므로, 최대 보강심도를 푸팅 폭의 1배 심도까지로 계획하였다.
- 말뚝 선단부는 석회암 표면부 응식/침식으로 불규칙 특성과 공동이 암반 표면부에서 불연속특성에 의거 주로 발생하는 특성을 고려하여 2.0m정도는 근입 하도록 한다.

4.2 석회공동 그라우팅 보강시 말뚝기초 지내력 검토방법

4.2.1 검토조건

기반암 구간에 분포하는 석회암공동을 그라우팅 보강시, 지지력 검토방법은 공동분포특성과 보강강도를 고려하여 다음과 같은 3가지 방법으로 검토가 가능할 것이다.

첫째는 공동규모 및 분포범위가 크지 않은 경우 주변마찰력을 무시하고 연암강도를 그대로 이용하는 방법, 둘째는 공동분포가 파쇄화된 상태이고, 고립된 소규모의 공동이 교호하여 출현되어 파쇄화된 상태의 경우 풍화암지지 말뚝기초로 계산하는 방법, 셋째, 공동규모가 대규모인 상태인 경우로 이때는 그라우팅강도를 이용하여 지지력을 평가하는 방법으로 분류할 수 있다. 본 검토에서는 상기 3가지 조건에 대하여 각각 지지력의 추이를 분석하여, 합리적인 적용방향을 평



- 공동예상구간 (GL(-)m) 14.8~15.3, 16.7~20.0
- 점토 충전물 회수, 소규모 고립된 공동이 국부적 분포
- 말뚝기초 : 강관말뚝 phi 508/121 매입말뚝(SDA+T4), 연암1.0m근입

그림 4. 지층분포 현황

가하고자, 00교량의 A1에 대하여 검토를 수행하였다. 당 교대의 지층분포현황은 그림 4와 같다.

4.2.2 검토결과에 따른 합리적 지지력 산정방향

석회공동분포에 따른 합리적인 지지력 검토방향을 판단하고자, 일축압축강도에 따른 연암지지 조건과 풍화암지지 조건에 대하여 각각 지지력을 검토하였으며, 그 결과 표 5와 같다.

표 5. 일축압축강도에 따른 연암 및 풍화암 지지 조건시 지지력 검토결과

지지층 조건	일축압축강도 (kPa)	허용지지력(kPa)			반력 (kPa)
		재료의 허용압축응력	암반 주변마찰력고려	암반 주변마찰력 미고려	
연암지지 (지지층 상부주면마찰 미고려)	43,400(암반강도)	1,453	2,368	1,516	700
	10,000(그라우팅강도)		758	349	
풍화암지지(지지층상부 주면마찰고려)			901		

상기 결과에 의거 다음과 같은 지내력 산정방향을 제시한다.

첫째, 석회암공동규모가 연속성이 낮은 소규모의 고립된 공동이 분포하는 경우에는 석회암의 강도는 양호하므로 원지반 암반강도를 적용하고 암반 주면마찰은 미고려하는 것이 적정할 것으로 판단된다.

둘째, 연속적으로 대규모 석회암공동이 출현하는 경우는 암반지지 조건과 풍화암지지 조건 모두 검토하여 낮은 값을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 그라우팅 강도를 이용시 암반 주면마찰력을 미고려할 경우는 너무 보수적인 결과가 도출되므로 고려하는 것이 합리적일 것이다.

4.3 공동 분포특성을 고려한 기초형식 검토

일반적으로 말뚝기초와 직접기초의 구분은 지지층 심도가 5~7m를 기준으로 얇은 경우에는 직접기초, 깊은 경우에는 말뚝기초로 계획하나, 공동이 출현하는 경우에는 공동분포특성, 상부 퇴적 층후에 의한 지중응력범위와 그라우팅 공사비, 말뚝공사비 등 복합적인 분석에 의한 최적 기초공법 선정이 요구된다.

주요 고려사항은 다음과 같다.

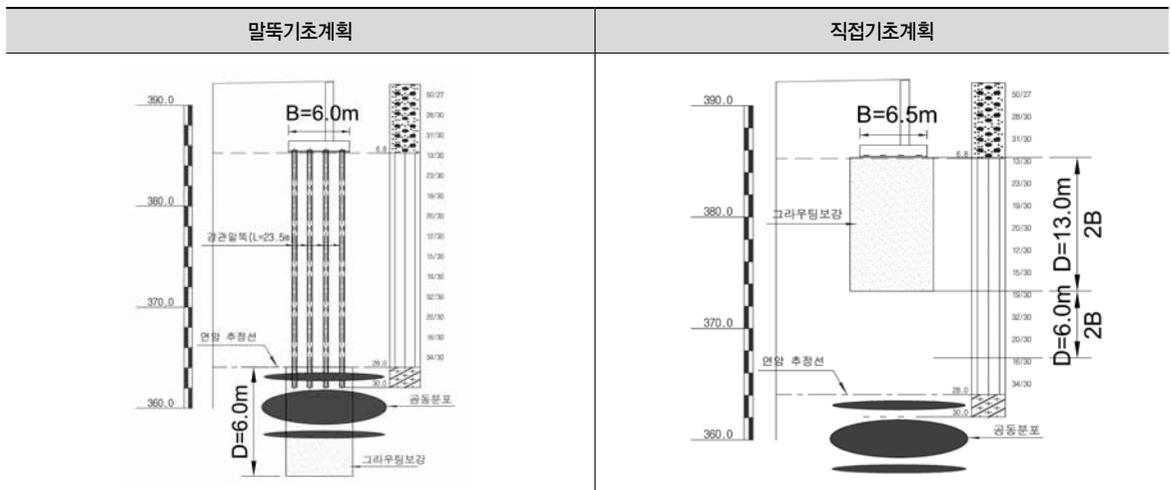
첫째, 기반암 상부 퇴적층후가 기초폭 2.0~3.0B이상으로 두꺼운 경우에는 퇴적층이 지지층으로 부족하나, 그라우팅 보강 후 계획하는 방안에 대하여 검토되어야 한다.

말뚝기초의 경우 기초하부 공동에 대하여 그라우팅이 되어야 하므로 말뚝길이 및 그라우팅 천공 깊이가 증가하여 경제성/시공성에서 불리할 수 있다.

둘째, 직접기초로 계획할 시에는 기반암 상부 층후가 직접기초 지중응력 영향범위 이상이면, 석회암에서 확인되는 공동 특성에 영향을 받지 않고 계획할 수 있는 장점이 있다. 직접기초의 그라우팅 시공심도는 기초형태(모양), 지층과 공동의 특성에 의하여 결정되어야 한다. 본 과업에서는 그라우팅공사비는 약 0.5억 증가하나, 말뚝재료비와 시공비에서 1.2억 감소로 약 0.7억 절감되는 것으로 검토되었다.

셋째, 퇴적층에 대한 그라우팅 보강 후 탄성계수, 점착력 증가는 아직까지 그 성질이 실험적으로 규명되지 못한 상황이고 정량화된 data가 없는 관계로 설계사례 및 논문자료를 검토, 증가율(1.3~1.5배)을 고려하여 설계정수를 산정하였다.

표 6. 공동분포 특성을 고려한 기초 형식검토



4.4 공동 출현구간 시공 중 보완조사계획

석회암 공동출현구간에 대한 시공 중 보완조사는 설계 단계시 조사수행 정도에 의하여 구분 계획되어야 한다.

특히, 정위치에서 조사가 불가하여, 인접위치에서 시추조사를 수행하는 경우, 조사기준 수립이 필요한 실정이다.

공동이 확인되었다고, 정위치가 아닌 위치에서 중심도 시추조사와 물리탐사는 석회암 공동의 불규칙 다차원적인 분포특성을 고려하면 큰 의미는 없을 것으로 사료된다. 따라서 이 경우에는 시추조사를 일반구간과 동일하게 수행하며, 단 시추심도를 5.0m규정하여 구간별 공동 출현여부 확인에 의미를 갖도록 하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

본 과업의 경우, 기존 노선의 개량으로 정 위치에서

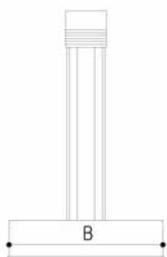
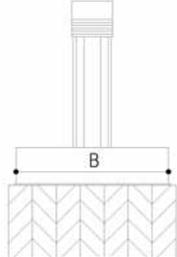
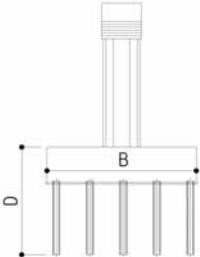
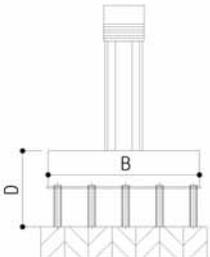
표 7. 설계시 조사수행 정도에 따른 시공중 보완조사 수립계획

구분	해당 내용	시공 중 보완조사 정도
설계단계 조사시 장비접근성이 확보되어 정 위치에 조사 가능한 경우	신설노선, 민원/지장물이 없어 장비 접근성 확보	최소한의 조사계획 수립
설계단계 조사시 장비접근성이 불가하여 정위치 조사 불가한 경우	기존노선확장, 민원/지장물이 없어 장비 접근성 불가	정밀조사계획 수립

표 8. 시공중 보완조사 항목 및 수량

항목	조사빈도	항목	조사빈도
시추조사	• 각 푸팅의 규모에 따라 1~3 공	시추공 영상촬영	• 기초 푸팅당 1회
지표 지질조사	• 교량 전체	공내 재하시험	• 교량당 1개소
탄성파 토모그래피	• 기초 푸팅당 1단면	수압시험	• 기초 푸팅당 1회
전기 비저항탐사	• 기초 푸팅당 1단면	실내시험	• 기초 푸팅당 1회

표 9. 기초형식별 시추조사 심도기준

구분	조사내용			
	직접기초	보강된 직접기초	말뚝기초	보강된 말뚝기초
기초단면도				
한국도로공사 기준	3B	3B	D+3B	D+3B
확인시추 적용 심도	3B	3B	D+3B	D+3B

조사수행이 대부분 불가하였으므로 시공 중 공동특성 파악을 위한 정밀한 조사계획을 수립 반영하였다.

시추조사의 심도는 교량 기초의 하중 조건과 지반 조건으로부터 설계되어지는 기초 푸팅의 크기와 말뚝 기초의 근입 깊이가 미치는 응력 범위를 고려하여 적정 심도를 갖도록 결정된다. 한국도로공사는 석회암 지역으로 공동이 출현되는 지역에서 말뚝기초를 예상할 경우 말뚝기초가 주변 마찰력이 발휘되지 않는다고 판단되면 푸팅 폭의 3배 깊이까지 조사하고 주변 마찰력이 충분히 발휘된다고 판단될 때는 푸팅 폭의 1배 심도까지 조사하도록 정하고 있다.

5. 결론 및 제언

석회암 공동 출현구간에 대한 교량기초 계획시 기초 지반 보강방법과 주요 검토사항에 대하여 다음과 같이 검토하였다.

첫째, 교대/교각 중 시추조사 중 충전물 회수가 불가하고 연약점성토 및 부분 충전된 상태로 추정된 구간은 몰탈로 제한 범위에서 채움 및 압밀(다짐)될 수 있는 압력다짐공법을 선정하였고, 충전물 회수로 공동 대부분 충전된 상태로 추정된 구간에 대하여는 충전 물질을 배출 치환될 수 있는 공법인 고압분사공법을 선정하였다. 따라서 공동 충전 물질을 포함한 공동의

연속성, 규모 등 특성파악이 매우 중요하다.

둘째, 그라우팅 보강된 말뚝기초의 지지력 평가방법은 크게 두 가지로 검토되었다.

- 석회공동규모가 연속성이 낮은 소규모의 고립된 공동이 분포하는 경우에는, 석회암 암반강도를 적용하고 암반 주변마찰은 미고려하는 것이 적절하며,
- 연속적으로 대규모 석회공동이 출현하는 경우는, 암반지지조건과 풍화암지지 조건 모두 검토하여 낮은 값을 적용하는 것이 합리적임.

셋째, 지층 및 공동분포특성을 고려한 직접기초와 말뚝기초 형식선정검토에서, 석회암공동 상부퇴적층 후가 2B이상인 경우에는 상부 퇴적 층후에 대한 그라우팅보강 후 직접기초계획방안이 경제성, 시공성 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

넷째, 시공 중 보완조사의 경우, 정 위치에서 조사가 불가하여 인접위치에서 시추조사를 수행하는 경우에는 지반조사를 일반조사와 동일하게 수행하고 단, 시추심도는 5.0m이상 규정하여 구간별 공동 출현여부 확인에 의미를 갖도록 하는 것이 합리적인 것으로 사료된다.