

장대교량의 적용에 따른 우물통기초의 안정성 검토

최근에 국내 해상에서 장대 교량의 적용사례가 점차 증가함에 따라 상부하중조건이 더욱 커지고 있으며, 이에 부합하는 기초 형식도 점점 대형화되는 추세이다. 이러한 구조적 조건하에서 일반적인 말뚝기초형식은 수심이 깊은 해상조건에서는 시공이 곤란하며, 또한 수평력 및 선박충돌시에 대해서도 취약하다는 단점이 있다. 최근에는 우물통기초 시공법의 향상방안으로 새로운 공법들이 적용되고 있는데 특히, 해상공법 특성상 널말뚝이나 벽강관에 의한 가물막이공법 적용이 곤란한 경우 강재뿔뿔을 이용한 가설공법이나 CT(Caisson Tube)가물막이 공법 등이 적용되는 사례가 있으며, 이에 대해 알아보려고 한다.



01 머리말

최근에 국내 해상에서 장대 교량의 적용사례가 점차 증가함에 따라 상부하중조건이 더욱 커지고 있으며, 이에 부합하는 기초형식도 점점 대형화되는 추세이다.

이러한 구조적 조건하에서 일반적인 말뚝기초형식은 수심이 깊은

해상조건에서는 시공이 곤란하며, 또한 수평력 및 선박충돌시에 대해서도 취약하다는 단점이 있다. 한편, 상기의 결점에 대하여 보다 안정적인 구조물인 케이슨 기초형식은 해상기초로 적용되는 기초형식 중에서 비교적 규모가 큰 기초형식이며 상대적으로 안정성 확보가 유리하고, 대수심 조건에서도 수평력 확보가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

이러한 케이슨 기초형식은 육상 또는 수상에서 건조되어 케이슨 자중 또는 재하중에 의하여 소정의 깊이까지 침하시키는 방법으로 그 구체 자체도 영구구조물의 일부로 적용되는 기초형식이며 일반적으로 해상장대교량 기초에 적용되는 케이슨 기초의 시공법은 다음 두 가지로 구분 할 수 있다.

1) 오픈케이슨(우물통기초)

우물통기초는 그 설치방법에 따라 크게 침설식과 거치식으로 구분하는데 먼저 침설식은 설치지점에서 구체저면의 흙을 케이슨내부에서 굴착 및 배출하면서 케이슨을 소정의 설치위치까지 침하시키는 방법이며 거치식은 사전에 설치지점을 구축하여 케이슨을 정착시키는 방법으로 상기 방법들은 현장여건 및 지반조건 등을 고려하여 적절한 시공법을 선정해야 한다.

일반적으로 기초굴착은 구체내부에서 그레브버킷이나 샌드펌프 등을 이용한 토사굴착과 기초 암발파에 의한 암굴착에 의해서 이루어지며, 목적지반까지 침하시킨 케이슨은 그 저부에 콘크리트를 쳐서 경화 후 콘크리트, 모래, 자갈 등의 속채움을 한다. 구체는 통상적으로 강재나 RC 등으로 만드는데 이는 케이슨 인양장량 등 시공조건 및 현장여건을 반영하여 결정해야 한다.

한편, 케이슨은 전장을 한꺼번에 만들어 침하시키는 것이 아니고 일반적으로 높이 2~3 m 정도로 구분하여 제작하는데 이를 1 로드(Rod)라 부르며, 각 로드별 제작 및 침설등을 반복하여 소정의 설치심도까지 시공하게 된다. 우물통기초의 단면형상은 크게 원형, 사각형, 트래형 등이 주로 적용되는데 이는 상부하중조건 및 시공조건 등을 충분히 고려하여 결정해야 한다.

2) 뉴메틱케이슨(Pneumatic Caisson)

대형구조물의 기초시공을 위한 공법의 한 종류로서 육상에서 제작한 강재케이슨(잠함, 潛函)을 해상위치에 설치한 후, 케이슨 작업실 내부에 압축공기를 불어넣어 내부의 물을 모두 배제하고, 육상작업과 동일하게 기초지반을 굴삭하면서 케이슨을 지지기반에 도달시키는 공법으로써 해상작업을 최소화시켜 시공성 및 안정성을 확보할 수 있는 공법이다. 일반적으로 뉴메틱 케이슨은 시공중 굴착심도의 조절이 가능하며, 작업실내에서 소요지지력의 확인이 가능하므로 기초로서의 신뢰성이 크다는 장점을 가지고 있다. 또한, 작업실내에서 작업원이 직접 굴착을 진행하므로 장애물 제거나 경사수정이 용이하여 균등한 침하가 가능하며, 주변지반의 훼손

없이 굴착하므로 환경피해를 최소화 할 수 있다. 그러나 특유의 기계설비를 필요로 하기 때문에 공사비는 일반적으로 오픈케이슨보다 고가이며 고기압하의 작업으로 인한 케이슨병의 발생우려가 있다.

표 1 | 국내외 해상교량에서의 케이슨기초 적용사례

기초형식	교량명	상부구조형식	수심조건
뉴메틱 케이슨 기초	Kiso river Bridge	엑스트라도즈교	15.0m
	돌산대교	사장교	8.0m
	영종대교	현수교	18.0m
우물통 기초	Ibi river Bridge	엑스트라도즈교	15.0m
	Ritto Bridge	엑스트라도즈교	21.0m
	아카시대교	현수교	60.0m
	무영대교	엑스트라도즈교	21.0m
	삼천포대교	강함성 사장교	24.0m
	고하대교	사장교	29.0m
	운남대교	엑스트라도즈교	22.0m
원도대교	강사장교	6.7m	

상기 <표 1>은 국내외 해상교량에 적용되었던 케이슨 기초형식의 적용사례를 나타낸 것이다. 수심조건은 최소 10m 미만에서 최대 60m까지로 비교적 깊은 수심조건에서 적용되었음을 알 수 있으며, 특히, 최근 국내 해상교량에서는 우물통기초의 적용빈도가 많음을 알 수 있다. 따라서, 본지에서는 상기 케이슨 기초형식 중 국내 해상교량에서 근래에 비교적 많이 적용되고 있는 우물통 기초형식에 대하여 개략적인 기초 설계법과 가설공법에 대해서 언급하고자 한다.

02 우물통 기초설계

1) 검토개요

우물통기초는 상대적으로 타 기초형식에 비하여 규모가 큰 구조물이므로 완성후는 물론 시공중에도 안정성 확보가 중요하며, 이에 대한 안정검토순서 및 주요검토사항은 다음과 같다.

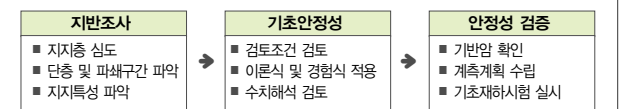
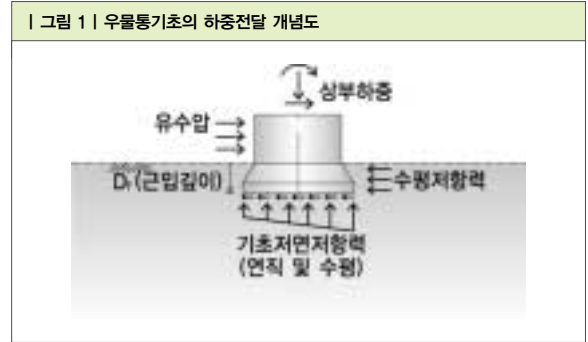


표 2 | 안정검토시 주요검토사항

주요항목	검토내용
지반정수 산정	<ul style="list-style-type: none"> 정역학적 지지력 검토 및 암반특성분석을 위한 지반정수 산정 연속체 해석 및 불연속체해석을 위한 설계정수 파악 기초 내진해석을 위한 동적 지반물성치 결정
지지층 선정	<ul style="list-style-type: none"> 우물통기초의 상부하중조건과 반력분포를 고려한 지지층 선정 지지층 선정의 적정성 검토 후 부적절한 경우 재검토 우물통기초의 지지력 및 침하량, 구체 진도, 기초저면 활동검토
안전성 검토	<ul style="list-style-type: none"> 기반암 절리특성을 고려한 기초안정검토 수행 상세하중조건을 고려한 수치해석적 검증 동적해석을 통한 지진시 안정성 확보

2) 검토방안

우물통기초 설계시 근입깊이(D_r)가 얼마 수평저항력을 기대하기 어려운 경우는 직접기초로 고려하여 안정검토를 실시해야하며, 근입깊이비(D_r/B)가 0.5이상인 경우는 지지력 및 침하검토 이외에 수평방향에 대해서도 안정성을 확보하여야 한다. (도로교 설계기준해설, 2001) 아래 <그림 1>은 다양한 하중조건에 대하여 우물통기초의 지반반력분포를 예시한 것이다.



일반적으로 우물통기초는 깊은기초로 분류되나, 허용지지력 산정시 지지층 유효근입깊이가 일반적으로 3이하인 경우는 얇은기초에 준하여 지지력을 산정한다. 이때 지지력 평가시에는 지지암반의 정확한 지지특성을 평가하여야 하는데 이를 위해서는 현장 공내재하시험 및 실내암석시험등을 통하여 합리적인 지반물성을 결정해야 한다.

한편, 암반상 기초의 지지력은 많은 문헌에서 추천값을 제시하고 있으나, 이는 개별구조물의 형태 및 기능, 침하, 변위에 대한 허용 기준 등을 고려할 수 없으며 동일한 암반에서도 다른 지지력을 제시하고 있고 일부 기준은 허용치를 보수적으로 추천하고 있으므로 이 경우에는 비경제적인 기초부가 조성될 여지가 있다.

따라서, 지지력 평가시에는 이를 감안하여 경험적 추천값은 계산된 지지력값과의 비교·검증용으로 적용하는 것이 좋다. 우물통기초의 침하량은 일반적으로 우물통 본체의 탄성침하량과 우물통 저면지반의 침하량, 우물통 주면마찰력에 의한 침하량으로 구분된다. 여기서 우물통 주면마찰력에 의한 침하량은 다른 두가지 요소에 비해 상대적으로 그 영향이 작으므로 무시할 수 있다(도로교 설계 기준 해설(2001), 구조물 기초설계기준 해설(2003)). 상기 우물통기초의 침하량 산정방법들은 아래 <표 3>에 나타내었으며, 각

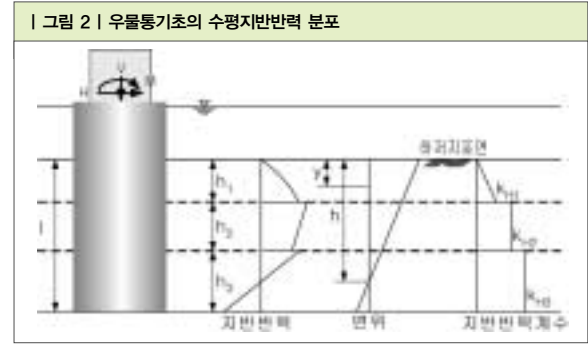
결과값들을 비교·검토한 후 총침하 및 부등침하에 허용침하기준을 만족하도록 설계하여야 한다. 우물통 기초는 상부하중 및 설계파압, 유수압 등에 의하여 우물통 구체의 전도 및 활동(저면 전단력)에 대해서도 안정성을 확보해야 한다. 일반적으로 우물통 구체의 전도는 기초저면에서의 작용력에 의한 전도편심이 허용편심내인 경우 안전하며, 활동에 대해서는 작용 수평력이 구체지중 및 기초저면에서의 마찰력 등을 고려한 활동저항력 보다 작게 설계하는 것이 바람직하다.

아래 <표 3>은 우물통 기초의 안정검토를 위한 검토방법 및 검토 기준을 나타낸 것이다. 또한, <표 4>는 지지기반암의 허용지지력 검토시 경험적 추천값을 나타낸 것으로 이는 <표 3>의 지지력값과 비교하여 합리적으로 결정해야한다.

검토항목	검토방법
지지력	연직 <ul style="list-style-type: none"> 정역학적 지지력 공식(Bell, Bowles 공식) 일축압축강도에 의한 방법 : Hoek & Brown의 제안식, Goodman의 제안식, 구조물 기초설계기준 해설(2003), 도로교설계기준 해설(2001) 공내재하시험 결과에 의한 방법 : 구조물 기초설계기준 해설(2003)
	수평 <ul style="list-style-type: none"> 수평지반반력 및 수동토압에 의한 검토
변위량	연직 침하 <ul style="list-style-type: none"> 변형영향계수 이용·구조물기초설계기준 해설(2003), 도로교설계기준 해설(2001), Schleicher 제안식(1992), AASHTO 기준 공내재하시험 결과에 의한 방법 : 구조물 기초설계기준 해설(2003)
	수평 <ul style="list-style-type: none"> 강체변위법(탄성변위량) : 도로교설계기준 해설(2001)
전도	<ul style="list-style-type: none"> 도로교설계기준 해설(2001)
활동	<ul style="list-style-type: none"> 도로교설계기준 해설(2001)

검토기준	지지력 경험치	비고
구조물 기초 설계기준 해설 PECK(1974)	105~860(tf/m ²) 110~3230(tf/m ²)	<ul style="list-style-type: none"> 암종별 및 연경도 고려 RQD에 의한 경험적 지지력
New York Building Code	80~600(tf/m ²)	<ul style="list-style-type: none"> 암종별 및 강도, 질리, RQD 특성 고려
German Standard DIN 4014(Part2)	150~800(tf/m ²) 이상	<ul style="list-style-type: none"> 암반풍화상태 및 절리간격 고려

전술한 바와 같이 우물통기초의 근입깊이비(D_r/B)가 깊어 수평지반반력을 고려해야 하는 경우 수평지지력 및 수평변위에 대한 안정검토를 실시해야 한다. 일반적으로 우물통기초는 연성거동 보다는 강체거동으로 가정하게 되는데 아래 <그림 2>는 외부 하중조건에 의한 우물통 기초의 거동양상과 수평지반반력 분포를 예시한 것이다. 여기서, 우물통에 접하는 상부 토사층이나 암반의 수평지반반력 계수는 공내재하시험 결과등을 이용하여 산정할 수 있다.



3) 수치해석에 의한 안정성 검증

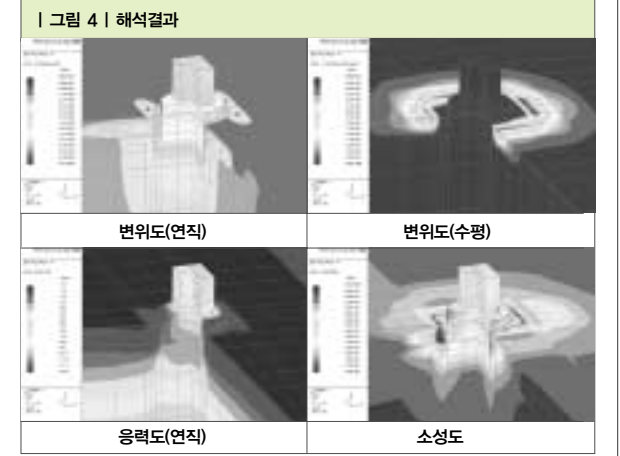
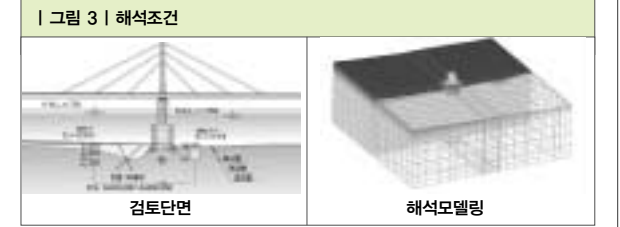
우물통기초의 안정성 검토시 앞서 설명한 기초 지반반력 및 변위량 산정방법은 각 설계기준서(도로교 설계기준, 구조물설계기준 등)에 제시된 방법으로써 기초안정성 확보여부 및 기초제원의 적정성 평가시 유용하게 적용될 수 있다. 그러나 상기 기준서에 의한 검토방법은 우물통기초를 강체로 가정 한 후 우물통기초 주변 지반을 3개의 지층으로 분할하여 안정성을 검토함에 따라 다음과 같은 문제점을 내포하게 된다.

- 기초의 깊이별로 변화하는 분포하중(유수압, 파압)을 그대로 반영할 수 없고 이를 상부의 하중으로 환산하여 적용하여야 하므로 하중에 대한 정확한 고려가 불가능하며,
 - 하부 기반암의 경사 등 지형적 변화요인 및 주변여건(인접구조물)에 의한 영향정도를 고려하는 것이 곤란하다는 결점이 있다.
- 따라서, 우물통기초 설계시 상기와 같은 문제점을 보완하기 위해서 3차원 수치해석적 방법을 이용할 수 있는데, 이는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 시공단계별로 우물통기초 및 주변지반의 형상을 비교적 정확하게 모델링 할 수 있으며,
 - 기존 계산법에서는 고려가 불가능했던 우물통기초에 작용하는 분포하중(유수압)을 깊이별로 고려할 수 있고,
 - 인접구조물과 기초부 각 위치별 응력 및 변위에 대한 검토가 가능하므로 소성영역을 이용한 위험구간의 예측이 가능하다는 장점이 있다.
- 따라서, 합리적인 우물통기초의 설계를 위해서는 각 설계기준서에 제시된 이론 및 경험적방법과 상기에서 언급한 수치해석적 방

법을 병행하여 검토하는 것이 타당할 것으로 판단되며, 이는 보다 상세한 구조검토로 설계의 적정성을 검증할 수 있고, 개략설계시 예측치 못한 문제점을 파악하는데 도움을 줄 것이다. 아래 <그림 3>~<그림 5>는 3차원 수치해석적 검토를 예시한 것으로서 상부 구조형식이 사장교이며, 하부 우물통기초의 인접 지반에 파쇄대가 존재하여 이에 대한 영향검토를 실시한 사례이다.

구분	적용현황	
해석기법	3차원 유한요소 해석(PENTAGON 3D)	
해석 모델	지반	Elasto-Plastic(Mohr-Coulomb) Model
	Conc	Elastic Model
적용 요소	벽체	Isotropic Elastic Model
	지반	8 Noded Solid Element
	Conc	8 Noded Solid Element
벽체	4 Noded Shell Element	



<표 5>는 3차원 수치해석을 위한 해석조건을 나타낸 것이며 해석 결과 최대 연직변위 및 수평변위는 각각 1.8cm, 6.9cm로 허용치 조건을 만족하였으며, 최대지반반력도 93.2tonf/m²로 계산되어 허용지지력 조건(660.7tonf/m²)을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 하부 지지기반암을 경질의 양호한 경암층(TCR/RQD =


100/82)으로 선정함에 따라 인접파쇄대 영향이 미미하게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

03 우물통기초 시공방안

1) 주요시공법

우물통 기초 시공방법은 해상 및 장비조건, 지반조건등에 따라 시공성, 경제성등을 고려하여 가장 합리적인 가설방안을 선정해야 하는데 통상적으로 우물통기초는 다음 두가지 방법에 의해서시공되는 경우가 많다.

표 6 | 우물통기초 시공방안

구분	거치식	침설식
개요도		
시공 방법	<ul style="list-style-type: none"> 우물통 거치장소 준설 및 면고르기 크레인에 의한 기성 우물통 운반 및 거치 기초저면 차수 및 양수 또는 Grouting 실시 속채움 및 구체 콘크리트타설 	<ul style="list-style-type: none"> 토사층 면고르기 또는 가축도 시공 우물통 내부 굴착과 동시에 우물통 침설 로드별 시공에 의한 소정의 심도 까지 침설 속채움 및 구체 콘크리트타설
특징	<ul style="list-style-type: none"> 공정이 비교적 단순 하상준설에 의한 수질오염 우려 기초저면 차수를 위한 별도의 공정 필요 수중공사이므로 기초저면 기반암 확인 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> 상부 토사층에 의한 우물통 침설 용이 차수가 용이하므로 기초품질 양호 가축도 조성 및 제거에 따른 추가비용 소요 및 수질오염 우려
적용성	<ul style="list-style-type: none"> 상부 토사층 두께 및 지지층 심도가 얇은 구간 적용시 유리 기반암 심도가 깊은 경우 준설량 과다로 불리 	<ul style="list-style-type: none"> 상부토사층 심도가 깊은 경우 유리 수심이 깊은 경우 가축도 시공이나 대형 기성 우물통 제작이 필요

상기 가설방법이외에도 상부 연약층 심도가 깊은 경우에는 연약 지반을 선개량 후 우물통을 거치하거나 현장타설말뚝 공법 등과 병행하는 방법등이 있으나 이러한 경우는 특수한 경우이므로 현장여건 및 경제성등을 고려하여 적합한 시공법을 선정해야 한다. 또한, 최근에는 우물통기초 시공법의 향상방안으로 새로운 공법들이 적용되고 있는데 특히, 해상공법 특성상 널말뚝이나 벽강관에 의한 가물막이공법 적용이 곤란한 경우 강제푼톤을 이용한 가설공법이나 CT(Caisson Tube)가물막이 공법 등이 적용되는 사례가 있어 이에 대한 적용성도 검토해야 할 것이다.

2) 우물통 시공시 주요검토사항

우물통기초는 해상에서 주로 시공되는 구조물로서 철저한 시공관리방안 및 품질관리가 요구되며, 특히 시공중 발생할 수 있는 문제점들을 사전에 예측하여 정밀 시공이 가능하도록 적절한 계측관리 및 시공관리가 이루어져야 한다.

아래 <표 7>은 이러한 우물통기초 시공시 품질 및 시공성 향상방안에 대해서 나타낸 것이며, <표 8>에는 품질개선 및 유지관리를 위한 주요검토사항을 나타내었다.

표 7 | 우물통기초 품질 및 시공성 향상방안

구분	검토내용
침하측진공법	<ul style="list-style-type: none"> 우물통 구체 침설 촉진 : 잿탕공법, 이수주입, 표면처리 등
기초 차수그라우팅	<ul style="list-style-type: none"> 시멘트 및 우레탄 그라우팅 : 구체내부 시공성 향상
기초 암발파 영향 검토	<ul style="list-style-type: none"> 수중충격압 감소, 수중어패류 보호 : Air Bubble 커튼 등
기초 세굴 영향검토	<ul style="list-style-type: none"> 하상 세굴 예방 : 기초세굴 방지(블럭공, 사석공 등)
기초저면 지하수 침투영향 검토	<ul style="list-style-type: none"> 기초내부 터파기시 침투안정성 확보 : 침투해석 및 양수계획 수립

표 8 | 우물통기초 품질관리 및 유지관리

관리항목	관리내용
날끝고도, 경사 관리	<ul style="list-style-type: none"> 우물통의 외벽면 4개소 이상에 날끝 밀면으로부터 드래프트 마크를 기입해 두어 드래프트 마크의 수중축량에 따라 우물통의 날끝 고도, 경사를 관리함
편심 관리	<ul style="list-style-type: none"> 우물통의 설계 중심위치에 인조점을 미리 설정해 두어 우물통 윗면에서의 중심 편심량 및 방향을 관리함 괴잉굴착량
괴잉굴착량 관리	<ul style="list-style-type: none"> 우물통 밀면 지반의 굴착상태에 따라 우물통의 침하 변동이 크게 좌우되므로 케이스는 내벽에 따라서 밀면 지반의 울퉁불퉁한 정도를 측정하여 항상 균등하게 굴착하도록 관리함
굴착도 관리	<ul style="list-style-type: none"> 굴착하 토사를 잘 관측하고 계획시의 토질 상황과 항상 비교 관찰하여 굴착기계의 변경, 주변마찰력 저감 공법의 선택 등 능률향상에 반영시킴
우물통내 수위 관리	<ul style="list-style-type: none"> 우물통 내외의 수위차는 보일링이나 허빙을 유발시킬 위험이 있으므로 우물통 내 수위변동 상황을 관찰하여 수위가 저하할 것 같으면 주수하는 등의 대책이 필요함
침하 관리도 작성 및 관리	<ul style="list-style-type: none"> 침하관리도는 공정의 진척상황을 한눈에 볼 수 있도록 할 뿐만 아니라 추후에 시공하는 우물통의 시공 계획을 합리적으로 작성할 수 있도록 하므로 우물통 시공시 반드시 작성토록 함

04 맺음말

① 최근에 대규모 해상교량 시공시 상부하중의 대형화 및 현장여건의 난해함으로 인해 보다 확실한 기초공법이 요구되고 있다.

이에 대하여 우물통기초 형식은 대수심 조건에서도 그 적용성이 우수하며, 별도의 가물막이 등이 불필요하다는 장점이 있어 시공성 뿐만 아니라 경제적 측면에서도 유리한 기초공법이다. ② 우물통 기초는 일반적으로 직접기초에 준하여 안정검토를 실시하며 근입심도가 깊은 경우 수평력에 대해서도 검토해야 한다. 지지층 선정은 신뢰성있는 지반조사결과를 바탕으로 변형계수, 일축압축강도 및 지지압반의 파쇄여부 등을 파악해야 하며, 기초지지력은 각 설계기준서에 명시된 방법에 의해 산정하는 것을 원칙으로 한다.

③ 이론 및 경험적 제안식에 의한 기초 안정검토방법은 지중조건 및 하중조건에 다양성 고려가 곤란하고, 특히 파쇄대가 인접하거나 우물통 단면조건이 복잡한 경우에는 개략적인 안정검토가 될 소지가 있으므로 보다 정확한 설계를 위해서는 상기 방법 외에 3차원적 수치해석방법을 이용하여 우물통 구체 및 지반거동양상을 검토하는 것이 바람직하다. ④ 우물통 기초의 시공방안은 기본적으로 거치식과 침설식으로 구분할 수 있으며 현장여건과 경제성 등을 고려하여 적합한 시공법을 선정해야 한다. S

