케이싱이 있는 현장타설말뚝의 거동에 관한 연구
A study on the Behavior of Large Drilled Shafts with Casings

송병석[1], Byeong Seok Song, 조남준[2], Nam Jun Cho

[1] 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ Eng, Kookmin Univ.
[2] 국민대학교 건설시스템공학부 부교수, Associate Prof, Dept. of Civil & Environ Eng, Kookmin Univ.

SYNOPSIS : 본 연구에서는 케이싱을 영구부재로 사용함으로써 기존의 현장타설말뚝과 비교하여 시공성, 품질균일성, 경제성, 내구성 등을 검토한다. 연구결과 케이싱을 영구부재로 사용하는 경우, 케이싱의 재사용을 위한 인발작업이 불필요하게 되고, 말뚝길이전체에 대하여 케이싱을 사용한다면 R.C.D공법에서 적용하는 슬러리공벽보호공정이 불필요하므로 시공성이 향상되는 것으로 판단된다. 케이싱을 영구부재로 사용하는 현장타설말뚝의 지지력은 일반 깊은 기초의 지지력을 산정하는 방법과 동일하게 구해질 수 있다. 대구경의 영구케이싱이 있는 현장타설말뚝을 시공한다면 공내에 간단한 장비와 인력을 투입해서 선단부를 그라우팅방법 등으로 강화시킴으로써 선단지지력을 효과적으로 증대시킬 수 있을 것이다. 또한 케이싱 내부로부터 미리제작한 구멍을 통하여 그라우팅, 전단키(shear key) 등을 주입 또는 압입함으로써 주면마찰력도 크게 향상될 수 있을 것으로 사료된다.

Key words : Drilled Shaft, Side friction, Bearing capacity, Grouting, Shear key

1. 서 론

영구케이싱이 있는 현장타설말뚝(Drilled Shafts with Permanent Casings)은 일반 현장타설말뚝을 시공할 때에 사용되는 굴착공법을 적용하며, 굴착시 공벽보호를 위하여 설치하는 케이싱을 회수하지 않고 영구부재로 사용하는 것이 특징이다. 영구부재로는 하중 및 지반조건 등을 감안하여 영구케이싱의 두께를 적절하게 확보한다면 철근케이지 없이 콘크리트만으로 시공될 수도 있을 것이다. 케이싱을 영구부재로 사용하는 현장타설말뚝의 지지력은 일반 깊은 기초의 지지력을 산정하는 방법과 동일하게 구해질 수 있다. 주면마찰력은 재하속도에 대한 지반의 배수속도에 따라 α-방법(비배수조건)과 β-방법(배수조건)을 사용할 수 있다. 영구케이싱의 주면마찰력은 일반 현장타설말뚝에 비해 떨어지기 때문에 그라우팅이나 전단키(Shear key) 등을 이용하여 지지력을 향상시킨다.

2. 일반 대구경 현장타설말뚝과 케이싱이 있는 현장타설말뚝의 비교

2.1 일반 대구경 현장타설말뚝

대구경 현장타설말뚝이란, 그림 1과 같이 오거드릴이나 보링 등의 방법으로 지반을 굴착하고, 굴착 공내에 콘크리트를 타설하여 만든 말뚝이다. 대구경 말뚝시공은 수평방향 저항에 유리하며, 지지층의 깊이에 따라 말뚝길이의 조절이 가능하다. 또한 말뚝 선단부에 구근을 만들어 지지력을 크게 할 수 있으며, 말뚝본수를 줄일 수 있고 말뚝항타의 소음을 줄일 수 있다. 반면 케이싱 타입에 의한 소음이 발생하고, 인접 말뚝의 타입 작업시 진동, 수압, 토압 등의 영향으로 품질관리에 어려움이 있다.

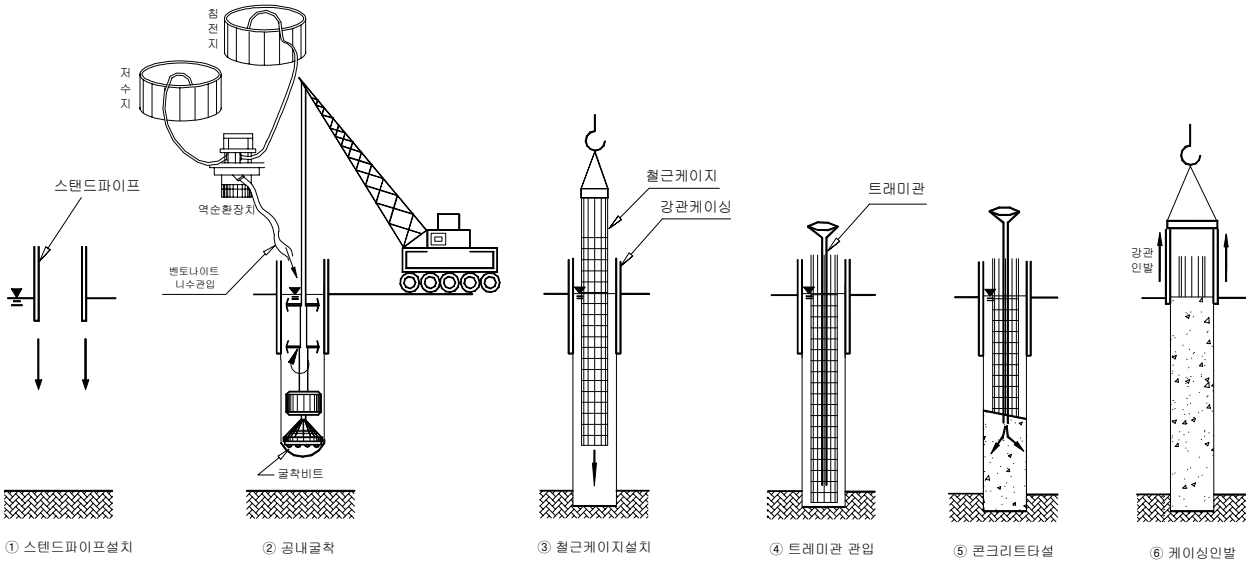

그림 1. 일반현장타설말뚝의 시공법

2.2 영구케이싱이 있는 대구경 현장타설말뚝의 설계

일반대구경 현장타설말뚝공법은 굴착 및 슬러리공벽보호, 케이싱·철근케이지설치, 케이싱인발의 순이다. 그러나 영구 케이싱이 있는 대구경 현장타설말뚝에서는 그림 2에서와 같이 슬러리공벽보호 작업과 철근케이지 제작설치 및 케이싱 인발의 과정이 없기 때문에 보다 효율적인 시공성이 기대된다. 다음시고성의 차이점은 표 1과 같다.

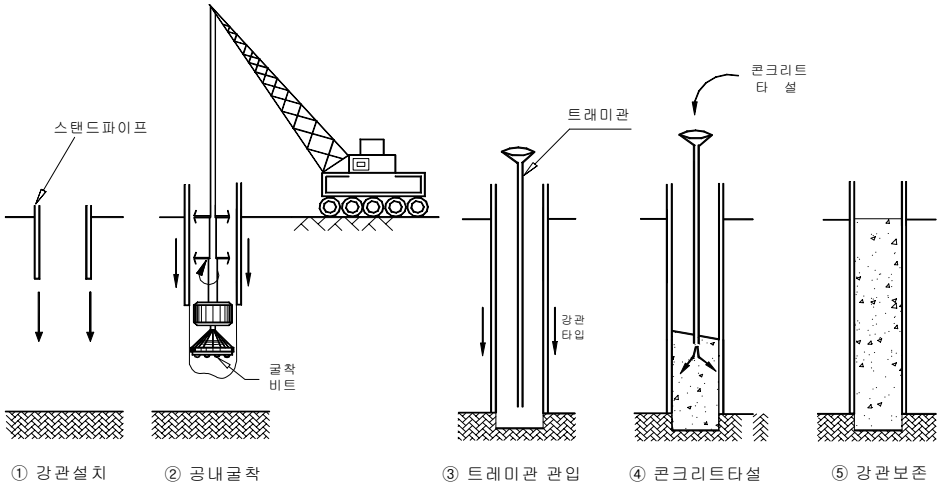

그림 2. 영구케이싱 현장타설말뚝의 시공법

표 1. 시공의 차이

	철근케이지	공벽보호공	스탠드파이프인발
현장타설말뚝	필요	필요	필요
영구케이싱 현장타설말뚝	불필요	불필요	불필요

2.3 대구경 현장타설말뚝의 품질관리분석

일반 현장타설말뚝의 품질분석에서 저하요인으로는 그림 3~그림 4와 같이 지반유동 및 함몰에 의한

공단면축소와 선단청소불량에 의한 과다 침하발생, 철근사이의 공백발생 등이 있다. 일반현장타설말뚝과 영구케이싱 현장타설말뚝의 품질관리 상의 시공의 차이는 표 2와 같다.

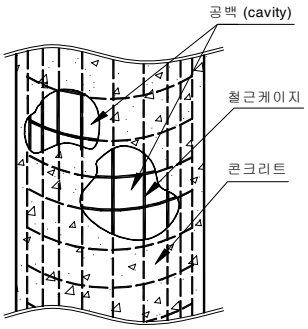

그림 3. 철근사이의 공백

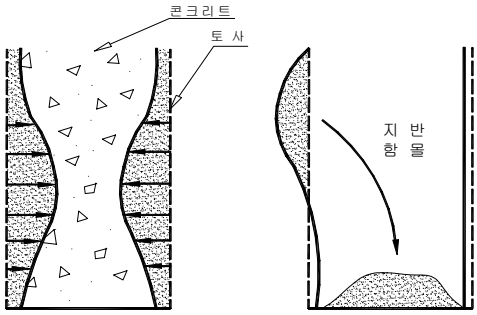

그림 4. 지반유동 및 함몰에 의한 공단면 변화

표 2. 품질저하 요인별 비교

	지반유동 및 함몰에 의한공단면 축소	선단 청소불량에 의한 과다침하발생	철근사이의 공백발생
현장타설말뚝	우려됨	우려됨	우려됨
영구케이싱 현장타설말뚝	우려 불식	우려 불식	우려 불식

2.4 대구경 현장타설말뚝의 경제성분석

그림 5.와 같이 케이싱을 영구 부재로 사용함으로써 기존의 일반 대구경 현장타설말뚝의 철근사용량 만큼을 강관케이싱으로 환산하여 사용한다면 공정소요시간이 현저히 줄어들 것으로 판단된다. 일반 대구경 현장타설말뚝에서는 철근케이지제작, 케이싱인발 등의 공정상 시간소요가 단축되므로, 영구 케이싱 대구경 현장타설말뚝은 인건비와 시간을 절약할 수 있다. 또한 말뚝공내에 철근케이지가 차지하는 공간이 작으므로 콘크리트의 슬럼프 값이 작은 콘크리트의 타설이 가능하며 굵은 골재를 사용할 수 있다.

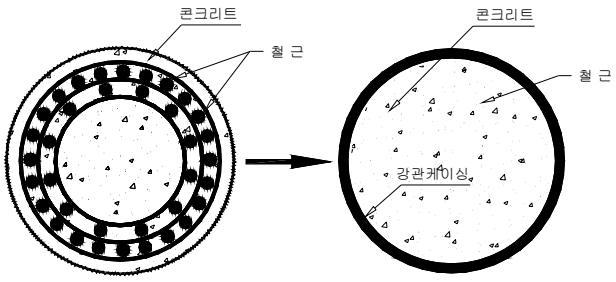

그림 5. 철근케이지의 강관케이싱환산

2.5 대구경 현장타설말뚝의 내구성분석

케이싱이 있는 현장타설말뚝의 설치장소와 지반환경에 따라 부식의 문제점이 발생할 수 있다. 부식의 원인은 산화와 환원에 의한 전기화학반응이며 강관 파일은 대기, 토양 및 해수 등의 환경에 접하게 된다. 부식의 문제를 해결하기 위해 국내에 사용중인 세라믹코팅이나 전기방식을 이용할 수 있다. 또한 그

림 6과 같이 합성소재로 수중에 접해있는 강관을 보호하여 부식의 문제를 해결할 수 있다. 표 3은 일반 현장타설말뚝과 영구케이싱 현장타설말뚝의 내구성 비교를 나타냈다.

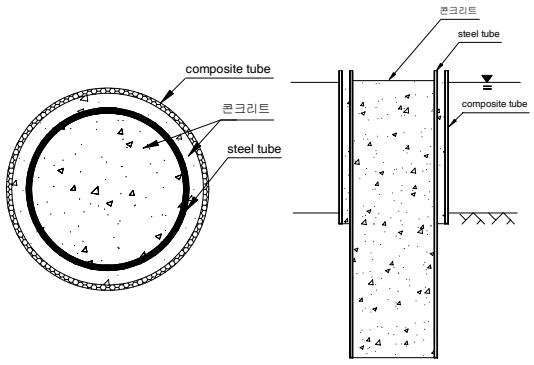

그림 6. 합성소재를 이용한 영구케이싱보호

표 3. 내구성 비교

	철재 피복	철재의 부식가능성	콘크리트의 염해가능성
현장타설말뚝	우려됨	우려됨	우려됨
영구케이싱 현장타설말뚝	우려 불식	우려 불식	우려 불식

3. 지지력산정

3.1 일반현장타설말뚝의 지지력

깊은기초에 작용하는 압축하중은 그림 3.1(a)과 같다. 이는 말뚝기초 끝단의 선단지지력과 옆 벽면의 주면마찰력으로 지탱한다. 보통 암반으로 이루어진 지반에서는 선단지지력이 우선시 되며 해안과 같은 연약지반에서는 주로 주면마찰력을 이용하는 마찰말뚝을 이용한다. 그림 3.1(b)는 이러한 현상을 작은하중의 점선에서부터 큰 하중 실선까지 나타낸다. 그림 3.1(c)에서는 단위주면마찰력은 선형적으로 증가한다고 가정한다. 현장타설말뚝의 압축력은 다음 식(1)과 같다.

$$Q_c + W = Q_{tc} + Q_{sc} \tag{1}$$

여기서, Q_c는 기초상의 압축하중, W는 기초의 무게, Q_{tc}는 선단지지력 Q_{su}는 주면마찰력 이다.

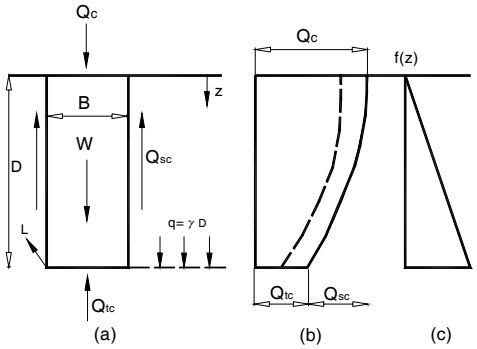

그림 7. 깊은기초의 지지력

3.1.1 압축력을 받는 주면마찰력

압축력을 받는 주면마찰력은 α계수를 이용한 비배수상태의 주면마찰력과 β계수를 이용한 배수상태의 주면마찰력으로 나뉜다. 비배수상태에서 주면마찰력은 식(2)이고 배수상태의 주면마찰력은 식(3)이다.

$$Q_{sc} = \pi B\, \alpha \int_0^D s_u(z)\, dz \tag{2}$$

$$Q_{sc} = \pi B \int_0^D \bar{\gamma} z \beta(z) dz \tag{3}$$

여기서, Q_{sc}는 주면마찰력, B는 말뚝의 직경, D는 말뚝의 근입깊이, α와 β는 토사와 말뚝의 부착계수, s_u는 비배수전단강도, z 는 깊이이다.

3.1.2 압축력을 받는 선단지지력

압축력을 받는 선단지지력은 비배수, 배수와 함께 암반상태의 지지력을 고려한다. 먼저 비배수상태와 배수 및 암반상태의 선단지지력은 각각 식(4), 식(5), 식(6)과 같다.

$$Q_{tc} = (N_c\, s_u\, \zeta_{cs}\, \zeta_{cd}\, \zeta_{cr} + N_q \gamma\, D\, \zeta_{qs}\, \zeta_{qd}\, \zeta_{qr}) A_{tc} \tag{4}$$

$$Q_{tc} = (0.5 B\, \bar{\gamma}\, N_\gamma\, \zeta_{\gamma s}\, \zeta_{\gamma d}\, \zeta_{\gamma r} + \bar{\gamma}\, D\, N_q\, \zeta_{qs}\, \zeta_{qd}\, \zeta_{qr}) A_{tc} \tag{5}$$

$$Q_{tc} = q_u (N_\phi + 1) \tag{6}$$

여기서, Q_{tc}는 선단 지지력, A_{tc}는 기초의 선단면적, B는 말뚝의 직경, D는 말뚝의 근입깊이, $\bar{\gamma}$는 유효단위중량,$N_c = 5.14, N_q = 1$의 기초지지력계수이고, γ는 흙의 단위중량, ζ는(ζ_s는 기초의 형상, ζ_d는 기초의 깊이, ζ_r는 기초의 강성) 지지력의 영향계수이다. 세부항목으로는 $\zeta_{qs} = \zeta_{qd} = \zeta_{qr} = 1$, $\zeta_{cs} = 1.2$, q_u는 암반의 일축압축강도, q_{uc}는 암석core의 일축압축강도, N_ϕ는 내부마찰각에 의한 지지력계수이다.

3.1.3 수평지지력 산정

수평저항력은 수평방향 정적평형 조건으로부터 구할 수 있다. 즉 수평하중 H_h와 극한모멘트 M_u이 말뚝의 두부에 작용할 경우 말뚝은 이 하중으로 인하여 수평으로 이동하려 한다. 이때 지반은 말뚝의 변위에 저항하게 되며 말뚝은 지반으로부터 수평반력을 받게 된다. 이 수평반력은 말뚝 변위의 증가에 따라 증가하여 극한저항력에 까지 도달하게 된다. 식(7)과 식(8)은 각각 극한수평지지력과 극한모멘트를 나타낸다. 그림 8~그림 9는 각각 점성토일때 얕은기초와 깊은기초의 두부고정상태를 나타낸 그림이다.

$$H_u = \int_0^{z_r} p_u B\, dz - \int_{z_r}^D p_u B\, dz \tag{7}$$

$$M_u = H_u\, e = -\int_0^{z_r} p_u B z\, dz + \int_{z_r}^D p_u B z\, dz + H_t D \tag{8}$$

여기서, M_u는 극한모멘트, H_h는 수평하중, H_t는 선단지지력의 수평-모멘트하중, p_u는 극한 수평토

압, e는 이심률(=2차곡선이 갖는 상수의 하나)이다.

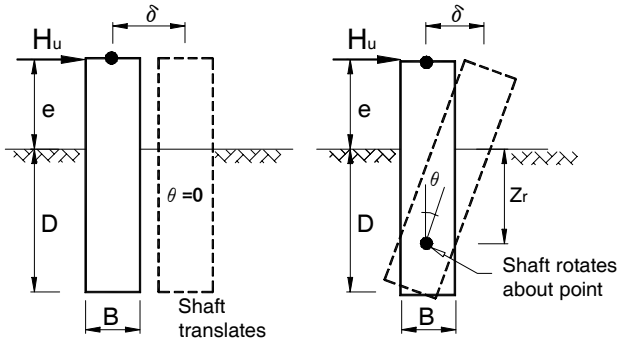

그림 8. 점성토일때 얕은기초의 수평지지력과 휨모멘트

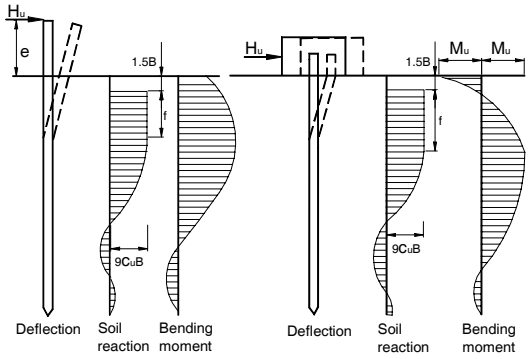

그림 9. 점성토일때 깊은기초의 수평지반반력과 휨모멘트

3.2 영구케이싱이 있는 현장타설말뚝의 지지력

영구 케이싱이 있는 현장타설말뚝은 일반현장타설말뚝을 시공할 때에 사용하는 공법을 적용한다. 케이싱을 영구부재로 사용하는 현장타설말뚝의 지지력은 일반 깊은기초의 지지력을 산정하는 방법과 동일하게 구해질 수 있다. 또한 영구케이싱이 있는 현장타설말뚝에서 강재와 지반의 경계조건의 작용은 강재의 거칠기에 따라 다르다.

3.2.1 연직 압축하중에 대한 주면마찰력

영구케이싱 현장타설말뚝의 압축력을 받는 주면마찰력은 일반 현장타설말뚝과 같이 α계수를 이용한 비배수상태의 주면마찰력과 β계수를 이용한 배수상태의 주면마찰력으로 나뉜다. 그러나 강재-지반사이의 부착정도에 따라 지지력이 다르다. 표 4는 지반의 마찰각에 대한 접경마찰각이며 거친콘크리트는 일반 현장타설말뚝에서의 콘크리트이며 흙의 마찰각과 유사하다. 매끄러운 콘크리트는 거푸집을 이용한 다시말하면 기성말뚝에서의 콘크리트라 할 수 있다. 일반적 수평토압계수는 정지토압계수보다 작은 값을 쓰며 배수상태의 주면마찰력은 식(9)와 같고 비배수상태는 지지력이 식(2)와 동일하다.

$$Q_{sc} = \pi B \int_0^D \bar{\gamma}\, z\, K(z) \tan \bar{\delta}\, dz \qquad (9)$$

여기서, Q_{sc}는 주면마찰력, K는 수평토압계수, $\bar{\gamma}$는 유효단위중량, $\bar{\delta}$는 경계조건에서의 유효마찰각이다.

표 4. 지반의 마찰각에 대한 접경마찰각(interface friction angle)의 비

지반/재료의 접경조건	접지마찰각($\bar{\delta}$) / 흙마찰각($\bar{\phi}$)
모래 / 거친 콘크리트	1.0
모래 / 매끄러운 콘크리트	0.8 - 1.0
모래 / 거친 강관	0.7 - 0.9
모래 / 매끄러운 강관	0.5 - 0.7
모래 / 목재	0.8 - 0.9

3.2.2 연직 압축하중에 대한 선단지지력

영구케이싱이 있는 현장타설말뚝의 선단지지력은 일반현장타설말뚝과 동일하며 식(2)과 유사하게 쓴다. 다만 공내 굴착상태와 단면의 균일성에 따라 지지력차이가 있을 수 있다.

3.2.3 수평지지력산정

영구케이싱 현장타설말뚝의 수평지지력은 일반 현장타설말뚝의 수평지지력과 동일하며 식(7)과 같이 쓴다. 그러나 일반현장타설말뚝은 소성말뚝(Plastic piles)으로 적용하며 영구케이싱 현장타설말뚝은 강성말뚝(Rigid piles)과 같다.

4. 영구케이싱이 있는 대구경현장타설말뚝의 성능향상

4.1 주면마찰력의 성능향상

강관케이싱이 있는 현장타설말뚝은 강재-지반사이의 부착력이 떨어지기 때문에 일반 현장타설말뚝에 비해 주면마찰력이 작다. 강관표면에 주면마찰력을 보완하기 위해 새로운 공법이 필요하다. 그림 10에는 강관케이싱의 나사형식마개로 덮인 배출구이며 강관케이싱의 배출구는 콘크리트 타설 전에 그라우팅 주입부로 이용된다. 그림 11(a)와 같이 강재-지반 사이의 그라우팅 주입은 주면마찰력 향상에 한 몫을 할 것으로 판단된다. 그림 11(b)에서는 그라우팅 배출구 상에 전단키를 설치한다. 그라우팅 후 전단키 설치가 가능하다면 주면마찰보강이 더욱 확실할 것으로 사료된다. 마지막으로 그림 12.는 영구케이싱 현장타설말뚝의 주면마찰력을 보완하기 위해 그라우팅을 한다. 그라우팅을 할 때 사질지반과 점토지반의 경우가 있는데 사질지반에서는 시멘트풀이 흙입자 사이에 침투하여 지반을 강화한다. 또한 점토에서는 점토를 밀어내는데 이를 Compaction grouting이라 한다. Compaction grouting의 이용으로 주변면적이 넓어져 주면마찰력이 증가하며 마찰계수인 (α, β)와 수평토압계수(K)또한 증가한다.

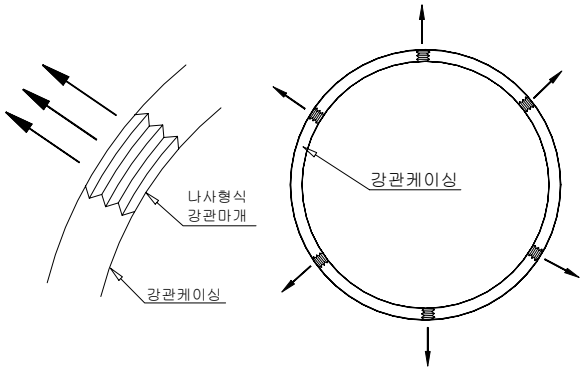

그림 10. 케이싱에 그라우팅 배출구 설치

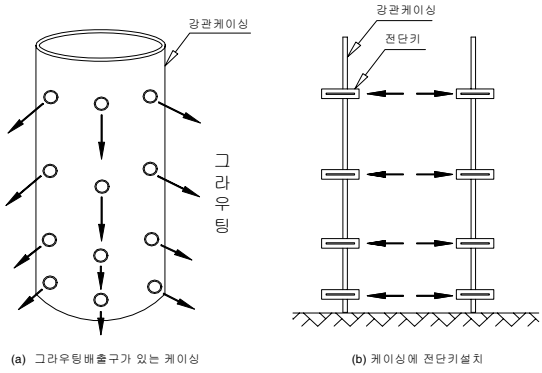

그림 11. 그라우팅 분사 후 전단키 설치

4.2 선단지지력 성능향상

케이싱이 있는 현장타설말뚝의 선단부는 단단한 기반암을 하는 것이 일반적이다. 강관케이싱의 설치 또한 암반지지를 기본으로 한다. 그러나 강관 케이싱의 암반 근입의 경우 선단부 균열이 발생할 수 있으며 암반의 절리발달 상태에 따라 강도의 정도를 결정한다. 또한 암반의 절리의 틈 사이로 해수가 유입할 가능성은 불가피하며, 이러한 문제점들을 보완하기 위해서는 선단부를 보강해야한다. 그림 13.의

선단보강 그라우팅은 강관케이싱 설치 후 그라우팅 주입관을 고강도 시멘트로 미리 고정한다. 마지막으로 고정된 관을 통해 암반절리를 중심으로 그라우팅을 주입한다. 선단부분의 보강그라우팅을 이용한다면 해수유입의 문제점이 줄어들 뿐만 아니라 선단지지 향상에 큰 기여를 할 것이라고 사료된다.

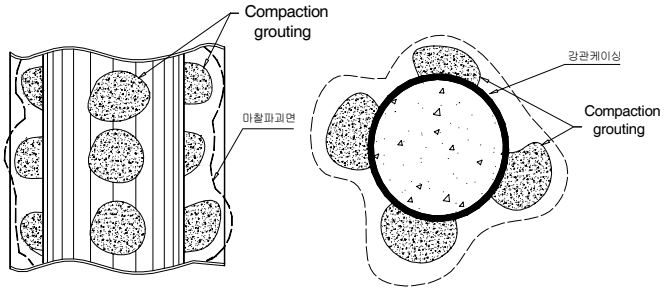

그림 12. Compaction grouting

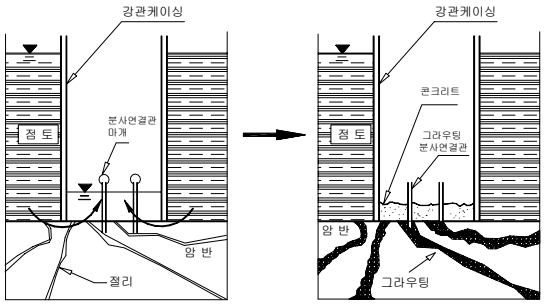

그림 13. 말뚝의 선단부분 그라우팅보강

5. 결론

1. 영구케이싱이 있는 현장타설말뚝은 슬러리공벽보호 공정이 불필요하기 때문에 균일한 품질이 가능하다.
2. 케이싱이 있는 대구경 현장타설말뚝은 일반 대구경 현장타설말뚝 공법에 비하여 공정이 짧기 때문에 향후 현장적용에 활용될 것으로 기대됨
3. 강관부식과 강도저하에 따른 문제점은 향후 확실한 연구 필요
4. 케이싱이 있는 대구경 현장타설말뚝의 주면 및 선단 부분의 보강으로 일반 대구경 현장타설말뚝에 비하여 신뢰성있는 기초시공이 기대됨

6. 참고문헌

1. 대한토목학회(2001), 도로교 설계기준(하부구조편)
2. 배성우, 황성일, 조남준(1996) "현장타설말뚝의 하중-침하곡선의 예측" 국민대학교, 석사학위논문
3. 일본토질공학회(1997), " 말뚝기초의 설계법과 해설" 김준석 역, pp438~459
4. Braja M. Das "Principles of Foundation Engineering"-5E pp578~624
5. Broms B. B.(1981) "Precast piling practice", pp19~21
6. Design Manual ; Soil Mechanics(DM-7.1, DM-7.2, DM-7.3)
7. Duncan C.Wyllie.(1992) "Foundation on Rock", pp206~223
8. Hansen, J. B.,(1961)"The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", Bulletin 12, Danish Geotechnical Institude, Copenhagen, pp5-9
9. Kulhawy, F. H.(1983) "Transmission Line Structure Foundations for Uplift-Compression Loading", Report No, EL-2870 Research project 1493-1. Cornell Uinversity, pp8-1~8-26
10. Kulhawy, F. H.(1995) "Reliability-Based Design of Foundation for Transmission Line Structuress", Report No, TR-105000 Research project 1493-04. Cornell Uinversity, pp6-1~8-19
11. Ooi, L H & Carter, J P.,(1987) "International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts", Volume 24, Issue 3, Page 91
12. Poulos, H. G. and Davis, E. H.(1980) "Pile Foundations Analysis and Design", John Wiley and Sons, New York, pp 397
13. Tomlinson M. J.,(1987) "Pile Design and Construction Practice", Third edition pp205~216