

IGM에서의 현장타설말뚝 설계

본고에서는 국내 지반특성상 IGM으로 분류할 수 있는 지반이 상당부분 분포하고 있는 점을 고려하여 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 연직지지력에 관한 이론의 국내 활용방안을 모색하고자 FHWA 보고서(1996, 1999)의 내용을 간략하게 소개하고자 한다.

1. 머리말

현장타설말뚝에 대한 연직지지력 예측이론은 1970년대 이후부터 활발히 진행되어 토사와 암반에 대해 많은 연구 및 제안이 이루어져 왔으며, 이들 이론은 국내의 주요 설계기준에 인용되고 있다.

현재 현장타설말뚝의 연직지지력 산정시 주로 지반을 토사와 암반으로 구분하여 극한 주면마찰력과 선단지지력을 각각 산정하고 이를 단순히 합하여 전체 극한지지력을 산정하는 방법을 이용하고 있다. 이는 서로 다른 범위에서 발휘되는 극한 주면마찰력과 선단지지력을 고려해 볼 때, 실제 말뚝의 하중-변위거동 및 하중전이특성과는 상이한 것이다. 또한, 국내 주요 설계기준들에는 토사와 암반의 중간특성을 갖는 지반(IGM)에 대한 구체적인 설계방법이 제시되어 있지 않아서, 설계시 IGM의 높은 저항특성을 고려하지 못해 실측치에 비해 말뚝기초의 지지력을 과소평가하고 있는 실정이다. 그리고 설계자에 따라 IGM을 토사 또는 암반으로 각기 달리 분류하고, 설계정수 산정시 충분하고 상세한 지반조사가 대부분 이루어지지 않아 단순히 표준관입시험결과인 SPT-N치나 일축압축강도시험 등 몇 가지 실내 및 현장시험 결과를 이용해 지반정수를 추정함으로써 지지력 예측값이 다양하게 나타나 그 값의 신뢰성이 떨어지는 경향이 있다.

따라서, 국내의 경우 IGM을 지지층으로 하는 경제적인 말뚝설계가 될 수 있음에도 불구하고 대부분 관행적으로 연암층 이상을 말뚝의 지지층으로 채택하고 있는 실정이다.

FHWA의 연구보고서(1996)와 FHWA 설계기준(1999)에서는 IGM에 대해 소켓주면부 거칠기나 강도, 점성과 비점성의 지반조건, 접촉면의 교란도, 콘크리트의 슬럼프 및 타설속도, 말뚝의 형상 및 근입깊이 등을 고려할 수 있도록 설계방법이 제안되어 향후 말뚝 설계시에 중요한 참고자료로 활용할 수 있게 되었다.

본고에서는 국내 지반특성상 IGM으로 분류할 수 있는 지반이 상당부분 분포하고 있는 점을 고려하여 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 연직지지력에 관한 이론의 국내 활용방안을 모색하

고자 FHWA 보고서(1996, 1999)의 내용을 간략하게 소개하고자 한다.

2. IGM의 정의

IGM은 앞에서 잠시 언급한 것처럼 토사와 암반의 중간특성을 갖는 지반으로 정의되며 일반적으로 굴착이 비교적 용이하고, 작용하중에 대한 효과적인 저항력을 제공한다. 다시 말해 토사에서 암으로의 전이과정에 있는 지반으로 단단한 흙(hard soil) 또는 연약한 암(weak rock)이 이에 속한다.

현장타설말뚝과 가장 일반적으로 비교되는 항타말뚝은 IGM에서 시공이 어렵고, 항타로 인한 말뚝의 손상이 자주 발생한다.

3. IGM의 분류

IGM은 표 1과 같이 세가지로 분류되며 Categories 1과 2 IGM은 Cohesive IGM이며, Categories 3 IGM은 Cohesionless IGM이다.

〈표 1〉 IGM의 분류

Categories	Geomaterial Type	Remark
1	heavily overconsolidated clays clay shales saprolites mudstone (claystones, siltstones)	cohesive prone to smearing when drilled
2	limestones limerock sandstones argillaceous geomaterials	cohesive not prone to smearing when drilled
3	very dense granular geomaterials residual, completely decomposed rock glacial till	Primarily cohesionless

정량적으로 IGM을 분류하면 다음과 같다.

- Cohesive IGM : $0.25 \text{ MPa} < s_u$ (비배수전단강도) < 2.5 MPa
- Cohesionless IGM : $N > 50 / 0.3 \text{ m}$



3.1 Categories 1 IGM

점착력이 있고 물과 접했을 경우 과도한 강도저하를 보이는 q_u 가 범위 0.5~5MPa 정도인 지반이다. 이러한 지반의 특징은 물과 접하게 되면 느슨해지고 쉽게 연약해지며, 굴착중 교란될 수 있다는 것이다. Morganstern 등(1974)은 물에 민감한 점토질 지반을 첫째, 자연함수비에서 일축압축강도가 3.5MPa보다 작을 때, 둘째, 물과 접하게 되면 본래의 일축압축강도의 60%이상에 해당하는 비배수압축강도 손실이 발생할 경우, 셋째, 자연함수비가 1%만 증가하여도 즉각 반응하는 경우의 3가지로 정의했다. 이러한 지반에 대한 적절한 판정 시험으로는 직경 50mm이하의 원형 공시체를 삼축시험기로 구속압 350MPa 상태에서 3일간 증류수를 흡수시킨 후에 비배수 상태에서 파괴시험을 실시하는 방법이 있다. 만약 상기의 특성중 하나라도 나타난다면, 말뚝 시공 중 콘크리트와 IGM 경계면에서 IGM이 재생형되어 연약해질 것이고, 설계시에 “매끄러운” 조건으로 검토되어야 한다. 반면, 0.3 m이하의 수직공 양쪽 벽면에 최소 25mm이상의 흠이 전단키의 기능으로 존재할 경우에는 “거친” 조건으로 설계한다. 또한, 교란된 IGM의 두께가 콘크리트 타설시 시추공 전체 벽면에 2.5mm 이상 발생하지 않거나, RF(거칠기 계수)가 0.1 이상이고, 교란범위가 2.5 mm 미만인 경우, 또는 “거친” 조건을 이용한 계산치와 재하시험시의 하중준이 특성이 일치할 때와 같

은 사항에 해당된다면 “거친” 조건으로 가정할 수 있다.

설계시 거칠기와 교란도는 매우 중요한 고려사항이며, 만약 “거친” 또는 “교란되지 않은” 상태를 구분할 수 없다면, 말뚝은 “매끄러운” 조건으로 설계된다.

3.2 Categories 2 IGM

분류 2의 IGM은 일반적으로 물에 대하여 민감하지 않으며, 석회석, 석회암, 사암과 같은 $q_u = 0.5\sim 5\text{MPa}$ 의 점성토, 탄소질/규산질로 굳어진 지반이다. 이러한 IGM 역시, 분류 1과 마찬가지로 시추공이 “매끄러운” 조건인지 “거친” 조건인지의 평가가 설계에서 매우 중요시 된다.

3.3 Categories 3 IGM

모든 비점착성 IGM에 적용되며, N치 50이상의 입상토, 입상의 풍화암 등이 여기에 속한다. 설계시에는 N치와 지하수위, 흙의 단위중량만이 필요하다. 실측결과와의 비교에 의하면 N치를 100으로 제한할 경우가 잘 일치한다고 보고되고 있다(FHWA, 1996).

4. IGM에서의 현장타설말뚝 설계모델

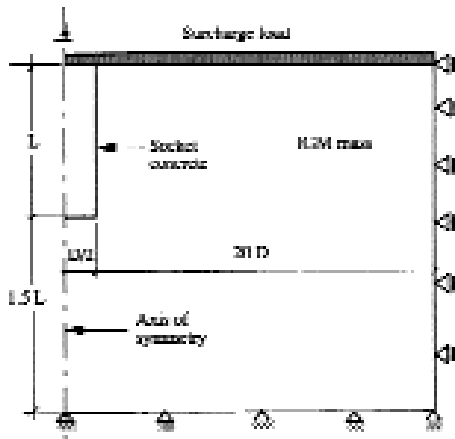
IGM에 근입된 현장타설말뚝의 연직지지력을 산정하는 방법으

로 두 가지 설계모델이 제안되었다(FHWA, 1996). 이 두 가지 설계모델은 말뚝의 지지력을 직접적으로 산정하는 것이 아니라 하중-침하관계를 예측함으로써 특정 변위에 상응하는 지지력을 예측하는 방법이다.

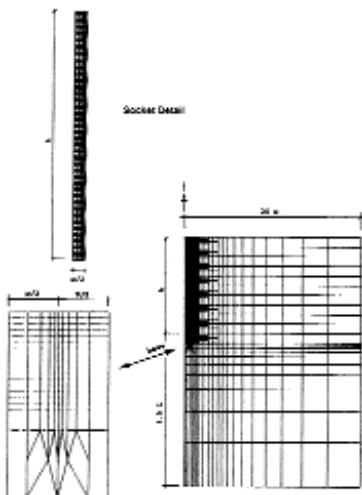
4.1 모델 1

모델 1은 Category 1과 2 IGM에서 적용할 수 있는 설계모델로 parametric finite element study를 통해 제안되었다. 그림 1은 모델 개발을 위한 유한요소해석시 하중 및 경계조건을 나타낸 것이며, IGM 소켓 주변부 거칠기 조건에 따른 유한요소망은 그림 2 및 3과 같다. 그림 4는 주변부가 거친 조건일 때, 콘크리트와 IGM 경계면의 형태를 사인곡선으로 이상화 한 것이다.

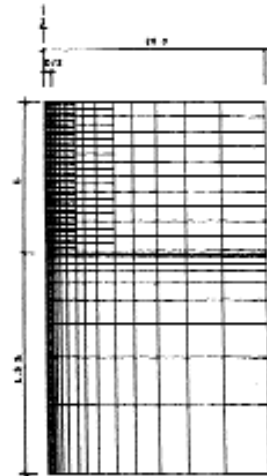
〈그림 1〉 유한요소해석시 하중 및 경계조건



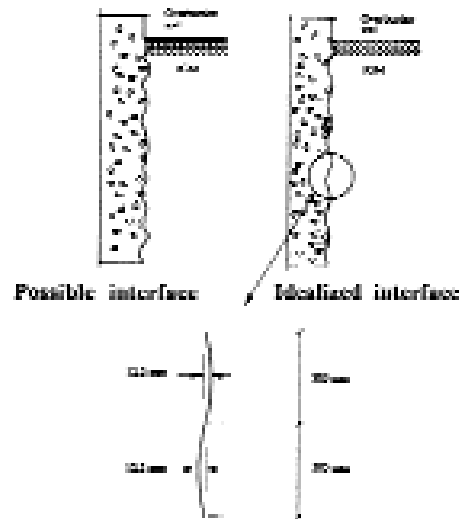
〈그림 2〉 IGM 소켓 주변부가 거친 조건일 때의 유한요소망



〈그림 3〉 IGM 소켓 주변부가 매끄러운 조건일 때의 유한요소망



〈그림 4〉 콘크리트-IGM 경계면의 이상화(IGM 소켓 주변부가 거친 조건일 때)



설계모델 1을 이용하여 Cohesive IGM에서 IGM 소켓 주변 거칠기 조건에 따른 지지력을 산정할 수 있으며 지지력 산정시 외적, 내적으로 고려할 수 있는 요소들은 다음과 같다.

- IGM의 비배수 압축강도
- IGM의 팽창성과 내부마찰각
- 현장타설말뚝 콘크리트와 IGM 경계면의 거칠기 특성
- 경계면의 마찰각
- 경계면의 교란 특성(콘크리트와 교란되지 않은 IGM 사이에 재성형된 지반의 존재 여부)

- 콘크리트와 IGM의 탄성계수
- IGM 내부에 존재하는 soft seam의 두께 및 탄성계수
- 콘크리트와 IGM 사이의 초기 접촉 압력
- 소켓의 깊이 및 직경

4.2 모델 2

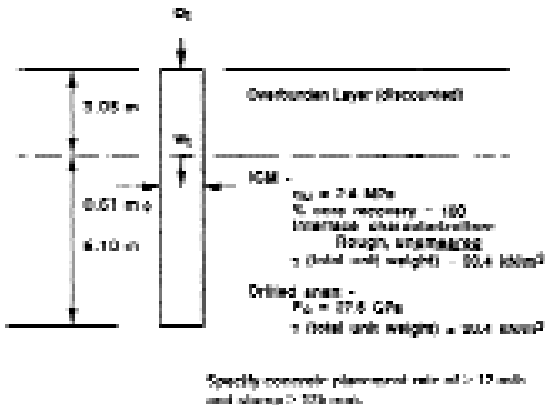
모델 2는 Category 3 IGM에서 적용할 수 있는 설계모델로 Mayne-Harris와 Majano 등의 방법과 동일하다. 이 방법은 완전히 풍화 및 파쇄되어 불교란 시료의 채취할 수 없는 점성이 없는 암에 대해 표준관입시험결과를 이용해 현장타설말뚝의 주면마찰력과 선단지지력을 산정하는 방법이다. 또한, 이 방법은 모델 1에서처럼 콘크리트의 압력은 지지력 산정시 이용하지 않으며, 콘크리트가 빨리 타설되어 지반은 K₀ 상태를 유지한다고 가정하였다. 설계모델 2를 이용하여 Cohesionless IGM에서의 지지력을 산정할 수 있으며 지지력 산정시 외적, 내적으로 고려할 수 있는 요소들은 다음과 같다.

- 콘크리트와 IGM의 탄성계수
- IGM의 내부마찰각 (배수시)
- IGM의 정지토압계수
- IGM의 유효연직응력
- 소켓의 형상

5. 지지력 계산에

지반조건 및 현장타설말뚝 제원이 그림 5와 같은 경우, IGM 소켓두부에서의 침하량, w_t = 25mm일 때의 극한지지력 산정하면 다음과 같다. 단, IGM 소켓 주면부는 거친 조건으로 가정함.

〈그림 5〉 지반조건 및 현장타설말뚝 제원



1) $E_m = 115q_u$ 로 가정 $\Rightarrow E_c / E_m = 100$

2) $f_{aa} = f_a = 2.4 / 2 = 1.2MPa$

(\because RQD = 100% $\Rightarrow E_m/E_c = 1.0$)

〈표 2〉 RQD에 근거한 E_m/E_i 값 (Modified after Cater and Kulhawy, 1988)

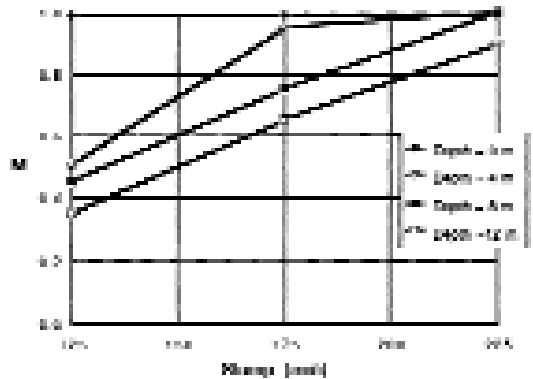
RQD (%)	E _m /E _i	
	Closed Joints	Open Joints
100	1.00	0.60
70	0.70	0.10
50	0.15	0.10
20	0.05	0.05

〈표 3〉 E_m/E_i 값에 근거한 f_{aa}/f_a 값 (O'Neill et al., 1996)

E _m /E _i	f _{aa} /f _a
1.0	1.0
0.5	0.8
0.3	0.7
0.1	0.55
0.05	0.45

3) $\sigma_n = M\gamma_{czc} = 0.92(20.4)(6.1) = 115kPa$

〈그림 6〉 콘크리트 슬럼프값에 따른 계수 M 값 (O'Neill et al., 1996)



4) $n = \sigma_n / q_u = 115 \text{ kPa} / 2400 \text{ kPa} = 0.048$

5) $L/D = 6.1 / 0.61 = 10$

6) $Q = 1.14(L/D)^{0.5} - 0.05 \left[(L/D)^{0.5} - 1 \right] \log(E_c/E_m) - 0.44$
 $= 1.44(10)^{0.5} - 0.05 \left[(10)^{0.5} - 1 \right] \log(100) - 0.44 = 2.94$

7) $\Gamma = 0.37(L/D)^{0.5} - 0.15 \left[(L/D)^{0.5} - 1 \right] \log(E_c/E_m) + 0.13$
 $= 0.37(10)^{0.5} - 0.15 \left[(10)^{0.5} - 1 \right] \log(100) + 0.13 = 0.651$

8) $H_f = \left[(E_m Q) / (\pi L \Gamma f_{aa}) \right] w_t$

