

금번 MIDAS FAQ는 지난 시간에 이어 탄소성보법 해석시 결과를 검토하는 항목에 대해서입니다. 탄소성해석 법이란 지반은 수평지반반력계수를 지닌 탄소성 스프링, 지보재는 탄성 스프링, 흙막이 벽체는 보(Beam)로 가정하여, 외부의 하중에 저항하는 거동을 효과적으로 해석하는 방법입니다. 이러한 탄소성해석법은 지반을 굴착함에 따라 단계적으로 변하는 변위 및 토압 등을 충실하게 계산할 수 있어 많은 전산프로그램이 이 원리에 따라 개발되어 설계에 적용되고 있습니다. 국내에도 여러 종류의 상용화된 탄소성보법 프로그램이 있으며 GeoX에서는 해석된 결과를 바탕으로 설계 계산서와 해석 보고서를 자동으로 생성해 주고 있습니다.

본 FAQ에서는 midas GeoX에서 탄소성보법 해석에 영향을 미치는 요인들과 결과를 검토하는 항목들에 대해 자세히 배워보도록 하겠습니다.

1. 해석옵션 설정

모델링된 가시설 구조물의 목적에 맞는 해석을 수행하기 위해 계산항목, 계산방법 등을 설정하는 항목입니다.

일반	
흙막이 벽체 분할간격	0.5 m
비선형 반복해석 방법	<input type="radio"/> 초기 감성법 <input checked="" type="radio"/> Newton-Raphson법
최종 굴착 시공단계	CS9: 굴착 10 m
<input type="checkbox"/> 영구조건 검토 시공단계	CS9: 굴착 10 m

그림 1. 해석옵션

흙막이벽체의 분할간격은 흙막이벽체를 보(Beam)요소로 모델링할 때, 보요소의 최대분할 간격을 의미합니다. 탄소성보법에서는 요소 분할 간격에 따라 지반 스프링이 설치되며 벽체의 하단, 토층 및 수위의 경계점, 지보재와 슬래브의 설치지점, 각 단계별 굴착선에 대하여 절점이 자동으로 생성됩니다. 흙막이벽체의 분할간격이 입력된 크기에 따라 흙막이벽체에 대한 계산결과 산출위치가 달라지게 됩니다. 일반적으로 **탄소성보법 해석만 수행하실 경우 흙막이벽체의 분할간격은 0.1~0.5 사이의 값을 사용하시는 것을 권장합니다.**

최종 굴착 시공단계는 근입장 검토시에 사용되는 항목으로 GeoX에서는 본 구조물(벽체 및 슬래브)이 생성되기 바로 전 단계를 최종 굴착단계로 간주합니다. 만일 최종 굴착단계가 아닌 중간단계에서 근입장 검토가 필요하다면, 사용자가 직접 검토할 시공단계를 설정할 수 있습니다. 또한 흙막이벽체를 공사 중 일시적으로 설치한 가시설 벽체가 아닌 본 구조물의 영구벽체로 사용하고자 할 경우 영구조건 검토 시공단계를 체크하시면 됩니다. 영구조건 검토시공단계로 선택한 경우 해당 시공단계에서의 굴착깊이, 활성화되어 있는 지보재 상태 그대로 별도의 정적해석을 수행하게 되며 이전 단계까지의 누적된 변위, 응력은 고려되지 않습니다.

일반적인 가설 흙막이벽체에서 굴착단계별 토압계산은 Rankine의 삼각형 토압을 적용하는 것이 안정적입니다. 흙막이벽체를 설계함에 있어 굴착단계별 검토시에 삼각형 토압분포를 적용하고 굴착 및 버팀구조가 완료된 후의 장기적인 안정해석에서는 경험토압을 적용하며, 안정성 검토 및 부재단면 검토시에 두 가지 경우의 해석을 모두 병행한 후 그 결과를 종합하여 설계를 수행하게 되어 있습니다. **장기적인 안정해석에서 경험토압을 적용할 경우 영구조건 검토시공단계를 체크하고 해당 시공 단계를 선택하시면 됩니다.**

2. 근입장검토

흙막이벽에 대한 굴착이 시공되면, 배면측과 굴착측의 측압차가 발생하게 됩니다. 이 때, 배면측의 주동토압과 굴착측의 수동토압간의 관계가 안정성을 확보할 수 있는 충분한 근입깊이 확보가 필요합니다.

midas GeoX에서는 그림 2에서 보듯이 **최하단과 최하단 직전 시공단계에서의 버팀보를 중심으로 한 수동토압에 의한 저항모멘트와 주동토압의 모멘트의 비로서 근입깊이의 안정성을 산정**합니다. 근입깊이를 결정할 때에는 Rankine-Rusel 토압을 사용하며, **토류용 강말뚝의 근입깊이에 대한 안정은 저항모멘트가 활동모멘트의 1.2배 이상이어야 하며 최소 근입깊이는 1.0m 이상으로 합니다.**

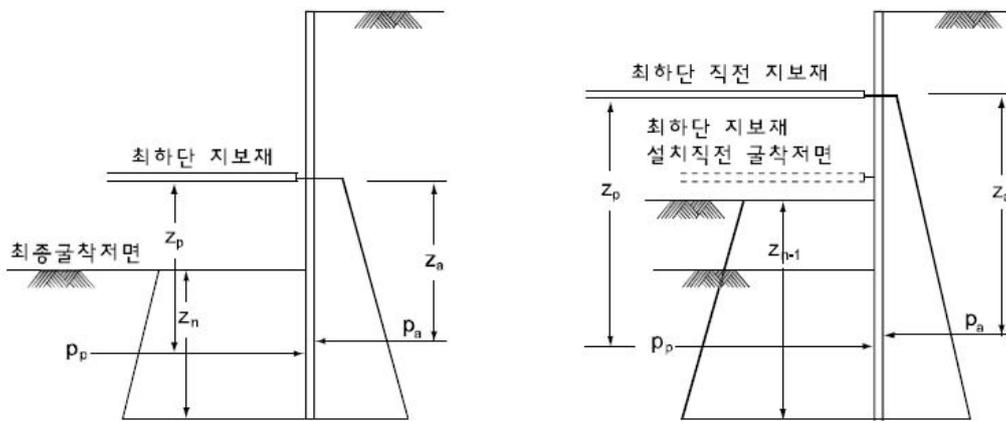


그림 2. 시공단계별 근입깊이 검토

엄지말뚝(H-Pile)을 이용한 흙막이 벽체의 경우 굴착지면 상단과 하단의 한 개당 말뚝이 받아야 하는 모멘트 폭과 저항할 수 있는 지반의 저항폭이 다르게 적용됩니다.

즉, 뒷채움토가 채워지는 토류벽 상부의 주동토압(P_{a1})은 엄지말뚝 사이에 설치된 토류판 길이만큼의 활동모멘트가 작용하는 반면에 하부의 주동토압(P_{a2})과 수동토압(P_p)은 엄지말뚝만으로 토압을 받게 됩니다. 또한 하부의 주동토압(P_{a2})과 수동토압(P_p)을 받는 폭은 지반의 경도에 따라 실무적으로 Flange폭의 1~3배 (표 1 참조)까지 적용할 수 있으며 해석웍션에서 사용자가 판단하여 수정할 수 있습니다. 흙막이벽체의 형상이 H-Pile이 아닌 경우 단위 폭(1m)를 적용하는 것이 일반적입니다.

근입장 검토

굴착상면 주동토압 폭 m

굴착하면 주동토압 폭 m

굴착하면 수동토압 폭 m

자립식 근입장 검토

모멘트 균형법 간략식

자립식 기준점 변경

h m

그림 3. 근입장 검토

표 1. 강말뚝에 작용하는 수동토압 작용폭(서울지하철 설계기준, 1990)

지반의 상태	사질토	$50 \geq N \geq 30$	$30 \geq N \geq 10$	$N \leq 10$
	점성토	$N \geq 8$	$8 \geq N \geq 4$	$N \leq 4$
토압의 작용폭		Flange 폭의 3배	Flange 폭의 2배	Flange 폭

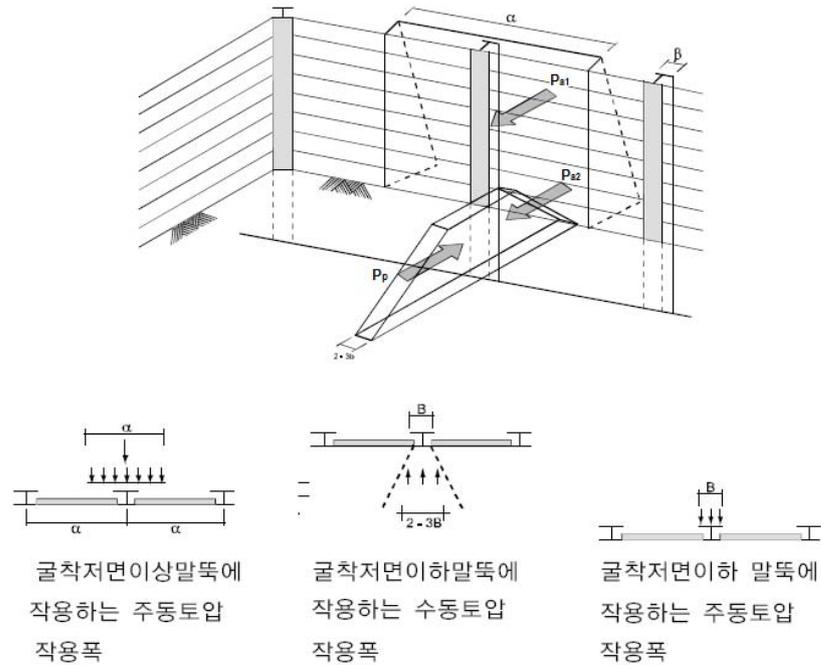


그림 4. 엄지말뚝의 토압 작용폭

3. 근입장 검토시 주동토압

위에 언급한 바와 같이 근입장의 안전율은 주동토압(P_a)에 의한 회전모멘트(M_A)와 수동토압(P_p)에 의한 저항모멘트(M_p)의 비(M_p/M_A)로 나타나며 산정되는 식은 다음과 같습니다.

$$P_a = (\gamma z + q) \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) - 2c \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})$$

$$P_p = \gamma z \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})$$

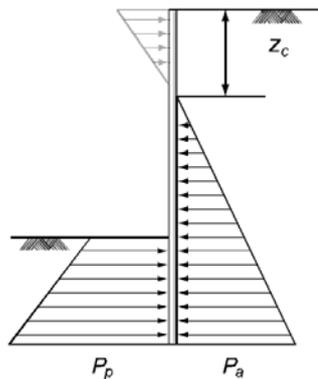


그림 5. 점성토에서의 토압분포

점착력을 가진 지반의 주동토압을 구하면 그림 5와 같이 상층부에서는 토압이 (-) 가 되며 실제와 다른 계산치가 구해집니다. 주동토압이 (-) 가 되는 것은 모순이 되므로 (-) 부분의 토압은 0으로 생각하여 토압분포를 정합니다. 그림 5에서 표시하는 Z_c 를 점착력 높이라고 부르며 이 값은 다음과 같습니다.

$$Z_c = \frac{2c}{\gamma} \cot\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) - \frac{q}{\gamma} = \frac{2c}{\gamma} \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) - \frac{q}{\gamma}$$

이와 같은 이유로 **굴착저면의 점착력이 과도하게 크게 입력되어 있는 경우 주동토압이 0으로 산정될 수 있으며 이 때의 안전율은 ∞ 로 나타납니다.**

4. 보일링 검토

사질토 지반을 굴착하는 경우 가설흙막이 배면의 수위와 굴착내의 수위차가 생기면 이 수위차에 따라서 굴착내에는 상향의 침투류가 생기게 됩니다. 이 침투력과 물의 수중에서의 유효중량과의 균형이 파괴되면 굴착저면, 특히 흙막이 말뚝 부근의 흙은 마치 액체와 같이 되어 끓어오르는 듯한 현상이 일어납니다. 이와 같은 현상을 보일링(Boiling)이라고 부르며, 일단 보일링이 생기면 그 부근의 흙의 저항력은 급격히 감소하게 되어 흙막이벽의 붕괴사고를 유발하게 됩니다. 보일링에 대한 검토는 Terzaghi 이론과 한계동수구배를 고려하는 방법이 많이 사용되며 두 식을 모두 만족해야 합니다.

midas GeoX에서는 최종굴착면 주변의 지반이 사질토($\phi > 0$)인 경우에 한하여 보일링 검토가 이루어지게 됩니다.

5. 히빙 검토

연약한 점토질지반의 경우 굴착배면토의 중량이 굴착저면 이하의 지반지지력보다 크게 되면 지반내의 흙이 미끄러지면서 굴착저면이 부풀어 오르는 경우가 있는데 이것을 히빙(Heaving) 이라고 합니다. 히빙이 발생하는 것을 막기 위해서는 우선 지하수가 흘러 들어오지 못하도록 막아야 하며, 충분한 근입깊이의 강성이 높은 흙막이벽을 설치해야 합니다. 그리고 굴착 예정 지역의 점성토 지반을 개량하여 점성토의 전단강도를 크게 하여야 합니다.

이론상 이상적인 점토는 c값이 존재하고 ϕ 값이 0이나 midas GeoX에서는 굴착저면에 해당되는 근입부를 기준으로 C값이 0이 아닌 경우에 한해서 히빙 검토가 이루어지게 됩니다. 따라서 ϕ 값이 존재하는 경우 이에 대한 영향을 고려하여 점착력만이 아닌 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 의 식을 이용하여 전단강도로 검토하고 있습니다.

또한 표 2와 같이 midas GeoX에서는 굴착깊이와 굴착깊이를 고려하여, 다양한 방법을 통해 히빙에 대한 안정성을 검토하고 있습니다. 말뚝의 강성 혹은 근입깊이가 고려되지 않고 계산방법에 따라서는 아무리 강한 말뚝을 깊게 근입하더라도 계산상 히빙이 일어나는 결과가 될 경우도 있기 때문에 이와 같은 불리함을 피하기 위해서 히빙에 대한 안정계산에 대한 말뚝의 강성과 근입깊이를 고려하는 방법도 자동으로 이루어집니다.

표 2. midas GeoX에서 고려된 히빙 검토방법

	얕은 굴착(H/B < 1)	깊은 굴착(H/B > 1)
굴착길이(L) 비고려	Terzaghi-Peck 방법	Bjerrum & Eide 방법
굴착길이(L) 고려	Tschebotarioff 방법	
모든 경우	말뚝의 강성 및 근입깊이를 고려한 히빙검토	

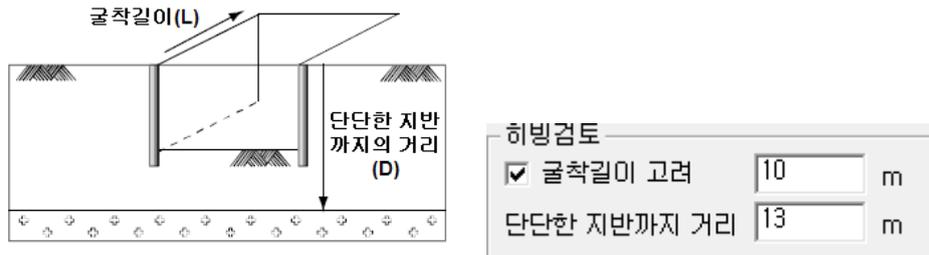


그림 6. 히빙 검토시 고려되는 변수

6. 기타 유의사항

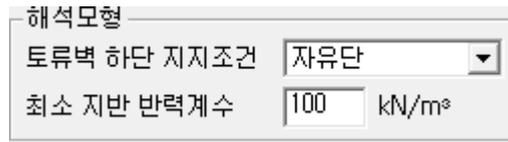


그림 7. 해석모형

해석 모형에서는 사용자가 토류벽 하단의 지지조건을 선택할 수 있습니다. 근입깊이가 충분히 깊어서 수동토압이 크고 굴착으로 인한 변위의 영향이 하단까지 미치지 않을 때는 자유단으로 입력하였을때도 하단은 회전 및 이동이 일어나지 않아 힌지조건이나 고정단 조건으로 입력한 것과 같은 효과가 나타납니다. 반면, 근입장이 부족하거나 지반이 연약하여 충분한 수동토압이 확보되지 않을 경우 하단에 회전 및 이동이 발생할 수 있으며 이런 경우 토류벽의 하단 지지조건을 자유단으로 설정합니다. 일반적으로 토류벽 하단부분의 지지조건은 인위적으로 고정하지 않는 자유단으로 설정하시면 됩니다.

최소 지반반력계수의 항목은 탄소성보법 반복계산시 수렴성을 좋게 하기 위한 기능입니다. 벽체의 변위가 탄성한계를 벗어나면 지반은 소성상태가 되는데, 최소 지반반력계수값이 지정되어 있는 경우 소성상태인 지반에서도 약간의 지반스프링이 잔류하고 있기 때문에 반복계산시 수렴하지 않는 경우 불안정한 경우가 줄어들 수 있습니다. **일반적으로 100kN/m³의 값이 사용됩니다.**

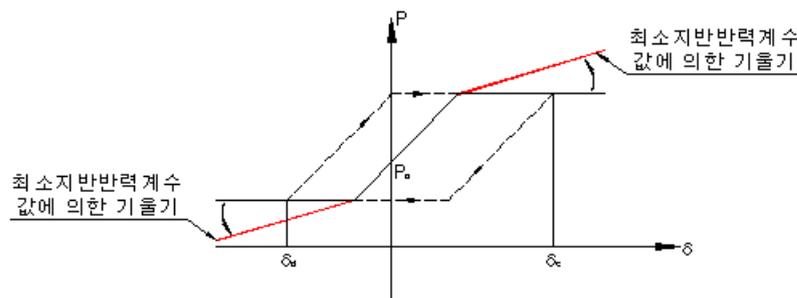


그림 8. 최소 지반반력계수

탄소성보법 해석방법에서 벽체의 변위에 따른 토압의 크기는 소성변위 적용여부에 따라 차이를 보이며 midas GeoX에서는 흙막이벽체의 소성변위를 고려한 벽체의 변위와 토압관계 곡선을 이용하여 실제 기존 지반의 거동을 적절히 반영할 수 있습니다. 벽체의 변위와 토압은 실제로 비선형으로 거동하지만, 탄소성보이론에서는 소성거동을 단순화하여 선형거동하는 것으로 가정하였습니다. 그림 9와 같이 흙을 모델링한 스프링은 주동토압과 수동토압의 범위내의 변위가 발생하였을 때는 탄성거동하지만, 주동토압과 수동토압의 범위를 벗어나는 변위가 발생하면 소성거동을 하게 됩니다. 소성영역에서의 거동은 벽체의 토압은 일정하게 작용하며 이 때 선행하중을 재하하는 것과 같은 탄성영역으로 변위를 발생하는 하중이 구조계에 재하된다면, 소성변위를 고려한 경우, 실선을 따라 거동하는 것이 아니라 점선을 따라 거동하게 됩니다. 이와 같은 경우 잔류변형이 발생합니다. 소성변위를 고려하지 않는 경우에는 실선을 따라 거동하며, 소성변위 옵션에서 발생하는 잔류변형은 발생하지 않습니다.

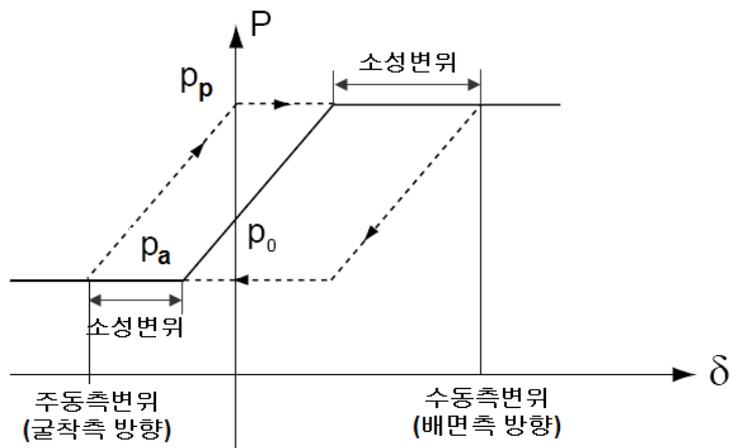


그림 9. 토압과 변위의 관계곡선