

흙막이 구조물(VII)

홍 원 표*1
이 영 남*2

9. 柱列式 흙막이壁體

9.1 개 요

도심지 굴착시공에서 중요시 되는 소음 및 차수와 관련된 문제를 해결해 줄 수 있는 가설흙막이벽체 건설방법으로 주열식벽체와 지하연속벽체가 흙막이구조물로 많이 사용되고 있다. 주열식 흙막이벽체는 현장에서 타설한 말뚝이나 기성제품의 말뚝을 1열 또는 2열 이상으로 설치하여 횡방향의 토압과 그 밖의 외력에 저항할 수 있도록 벽체를 시공하며, 지하연속벽체는 벤토나이트 슬러리의 안정액을 사용하여 지반을 굴착한 후 철근망을 삽입하고 콘크리트를 타설하여 지중에 철근콘크리트 연속벽을 형성하는 것이다.

최근 수년 사이에 오거장비의 경량화와 그 기능의 다양화 및 고압분사장비 등의 발달로 인해 시공속도의 향상과 비용감소 등이 가능하여져 주열식 말뚝의 사용이 증가하고 있다. 그리고 점성토 지반에서는 지하연속벽에 비하여 경제적인 측면에서 유리하게 사용될 수 있으며 지하연속벽 시공시 발생하는 많은 양의 굴착토 처리 문제도 발생하지 않는다는 장점이 있다.

본 강좌에서는 주열식 흙막이벽체의 종류 및

시공방법을 서술한 다음 주열식 벽체의 설계시 적용되는 토압, 벽체재료의 허용응력 및 주열식 흙막이벽의 설계법에 관하여 논의하였다. 마지막으로 주열식 흙막이벽체의 설계시 발생할 수 있는 문제점과 설계 예를 제시하였다.

9.2 주열식 벽체의 분류 및 시공방법

흙막이 벽체로서 사용되는 주열식 공법은 많은 문헌^(1~3)에서 자세히 다루어졌는데, 여러 문헌의 내용들은 종합하여 정리하면 주열식 흙막이 벽체를 축조하기 위해서 사용되는 공법들은 대체로 표 9.1과 같이 분류될 수 있다. 이 표에서 보면 주열식 흙막이벽체는 벽체를 구성하는 주요 구조재료에 따라 크게 Soil-Cement wall, Concrete wall 및 Steel Pipe wall로 구분할 수 있는데, 각각의 공법을 세분하여 그 특징과 시공법을 정리하면 다음과 같다.

9.2.1 소일시멘트 주열식 벽체

본 공법은 원지반 흙에 시멘트계 경화제를 오거 등으로 혼합하여 소일시멘트를 만들고, 이 벽체에 응력 부담재를 삽입하여 휨모멘트에 취약한 것에 대해 적절히 보강을 하기도 한다. 소일시멘트 주열식벽은 직경을 쉽게 조절할 수 있으며 조인트 부위의 누수 가능성을 개선할 수

*1 정희원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 현대건설 기술연구소 부장

있는 장점이 있다. 또한 이들 벽체는 말뚝간의 연결성이 좋아 차수성이 좋으며 토사 유실의 가능성이 적고 강성도 흙막이판 벽체나 널말뚝보다 좋은 편이며 시공기계의 개량과 시공관리의 진보 등에 따라 신뢰성이 향상되고 범용성이 증가하게 되었다. 그러나, 시공장비의 특성상 풍화암 지역에서는 시공이 불가능하므로 토사지반에서만 설치가 가능한 단점이 있다.

소일시멘트 주열식벽은 표 9.1에서와 같이 세분할 수 있으며, 이를 크게 나누면 교반날개에 의해 원지반 흙을 교반시켜 주열식 흙막이벽체를 건설하는 공법, 경화재 등을 고압분사하여 원지반 흙과 혼합하는 공법과 고압분사에 의해 치환된 지중공간을 시멘트계 경화재로 충전시키는 공법으로 크게 나눌 수 있으며, 그 각각을 몇가지로 자주 쓰이는 공법들로 다시 나눌 수 있다. 소일시멘트 주열식벽을 흙막이판으로서 사용할 때의 휨모멘트에 대한 보강책으로서 응력부담재를 사용하는데, 주로 사용되는 것은 H

형강이고 그의 I형강, 강관널말뚝, PC말뚝 등도 사용된다. 보강되는 응력부담재의 종류와 배치에 따라 여러가지 조합이 가능하나 주로 사용되는 것은 그림 9.1과 같다.

(1) 교반날개 오거에 의한 교반 공법

소일시멘트 주열식 벽체 중 SCW, SEC, DSM공법은 일축 혹은 다축 오거나 교반장치에 의해 지반내에서 흙과 고결재를 교반혼합 고결하여 벽체를 시공하고 벽체에 인장력이 작용할 때는 별도의 철재 보완이 요구된다. 시공법은 여러가지 공법마다 조금씩 차이는 있지만, 대체로 오거를 회전시켜 소정의 깊이까지 굴착한 다음 오거축을 통하여 안정처리재를 주입 및 혼합 교반하여 벽체를 형성하는 것이다. 특히 함수비가 큰 유기질토와 같은 경우나 지하수류가 격심한 경우에는 되풀이하여 혼합교반을 행하는 것으로 일반적인 시공방법은 그림 9.2에 도시되어 있다.

표 9.1 주열식벽체의 분류

벽체 구성재료에 의한 분류	공법원리에 의한 분류	공 법
Soil-Cement Wall	교반 날개에 의한 교반 방법	SCW : Soil Cement Wall
		SEC : Special Earth Concreting
		DSM : Deep Soil Mixing
	고압 분사에 의한 혼합 방법	CCP : Chemical Churning Pile Method
		JSP : Jumbo Special Pile
		JGP : Jet Grout Pile
	고압 분사에 의한 치환 방법	SIG : Super Injection Grout
		CJG : Column Jet Grout
	Concrete Wall	현장타설 콘크리트
CIP : Cast In-Place Pile		
PIP : Packed In-Place Pile		
Steel Pipe Wall	벽강관 말뚝	Steel Pipe Wall

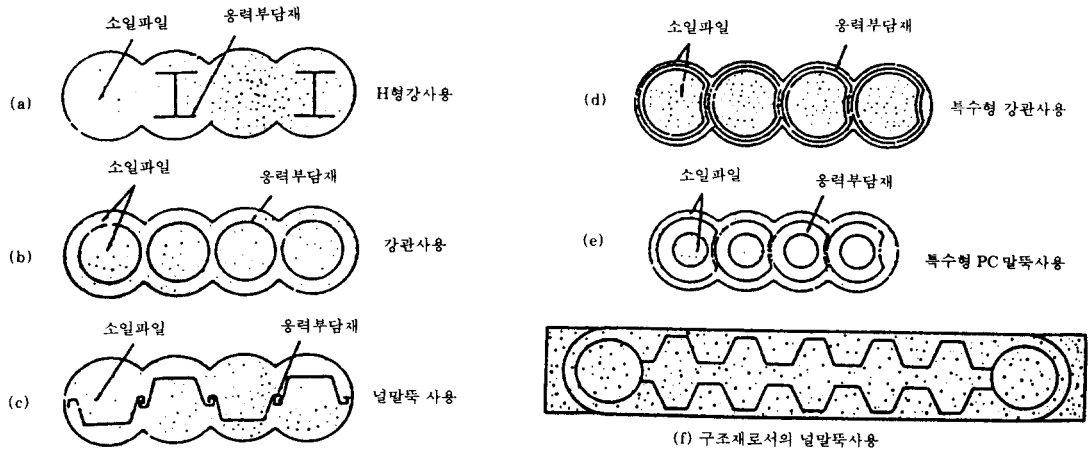


그림 9.1 소일시멘트 주열식 흙막이벽체의 보강방법

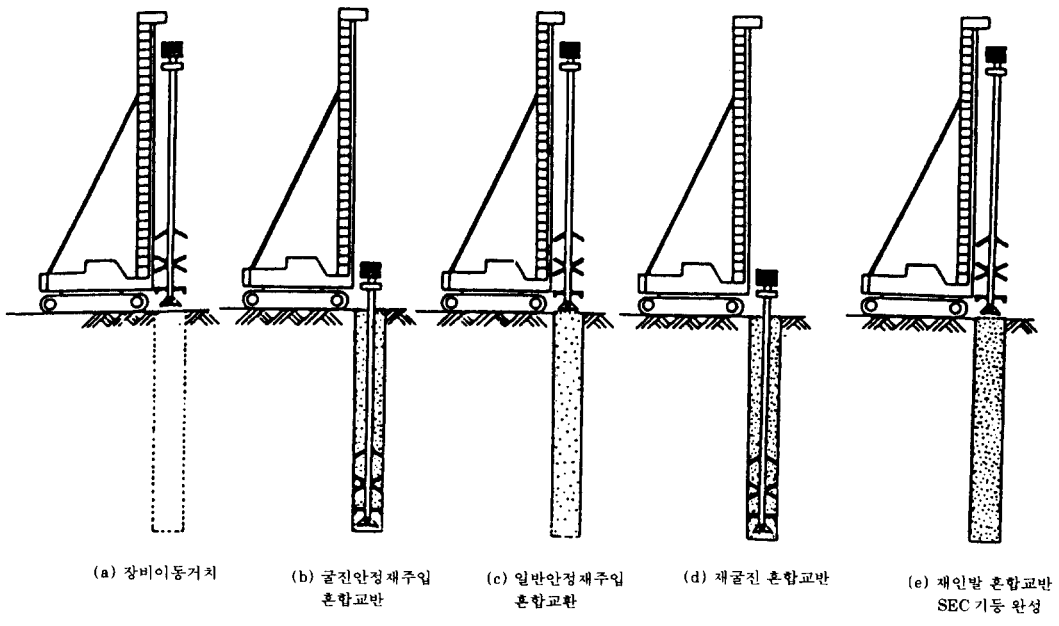


그림 9.2 교반날개 오거에 의한 공법 시공순서

교반날개를 이용한 소일시멘트 흙막이벽체의 특징은 표 9.2와 같이 요약할 수 있으며 이 공법은 여러가지 이점이 많아 광범위하게 사용되고 있지만 다음의 경우에는 주의가 요망된다.

① 교반대상범위에 유기질 토질과 염분을 함

유하는 토층이 있는 경우 소일시멘트의 강도가 영향을 받는다.

② 겹치는 것이 불충분한 경우와 교반 불량인 경우 그 부분에서 부터 누수가 생겨 지하 굴착에 지장을 주게 된다.

표 9.2 교반날개 오저에 의한 교반 공법의 특징⁽²⁾

항 목	특 징
대상 지반	㉔ N > 50의 砂礫層에 泥土시공도 가능한 공법이 있지만 일반적으로 경질지반에서는 시공 능률이 저하 ㉕ 사질토에서 강도가 높고, 점성토에서는 강도가 낮다. 유기질토의 경우는 사전 검토가 필요
시공 심도	㉔ 15~20m 정도의 것이 시공성이 좋지만, 공법에 따라서는 40m까지도 시공 가능 ㉕ 시공심도가 크게 되면, 挿入材가 이음말뚝이 됨
소음·진동	㉔ 저소음, 저진동 공법이고 시가지에서의 시공이 가능
강 성	㉔ 보강재의 선정에 따라 조정이 가능 ㉕ 지하연속벽 공법 만큼은 못하지만, 모르타르 주열식 지하 연속벽 공법과 같은 정도의 강성을 확보할 수 있음
지수성	㉔ 소일시멘트 말뚝을 겹쳐 시공을 하기 때문에 비교적 양호 ㉕ 용수가 발생할 때는 약액주입등의 대책이 필요
안정액 처리	㉔ 안정액을 사용하지 않기 때문에 안정액 처리 불필요 ㉕ 경화재 주입에 따라 잔토 처리 필요
비 용	㉔ 엄지말뚝 공법 < 강널말뚝 공법 < 본 공법 < 지하연속벽 공법

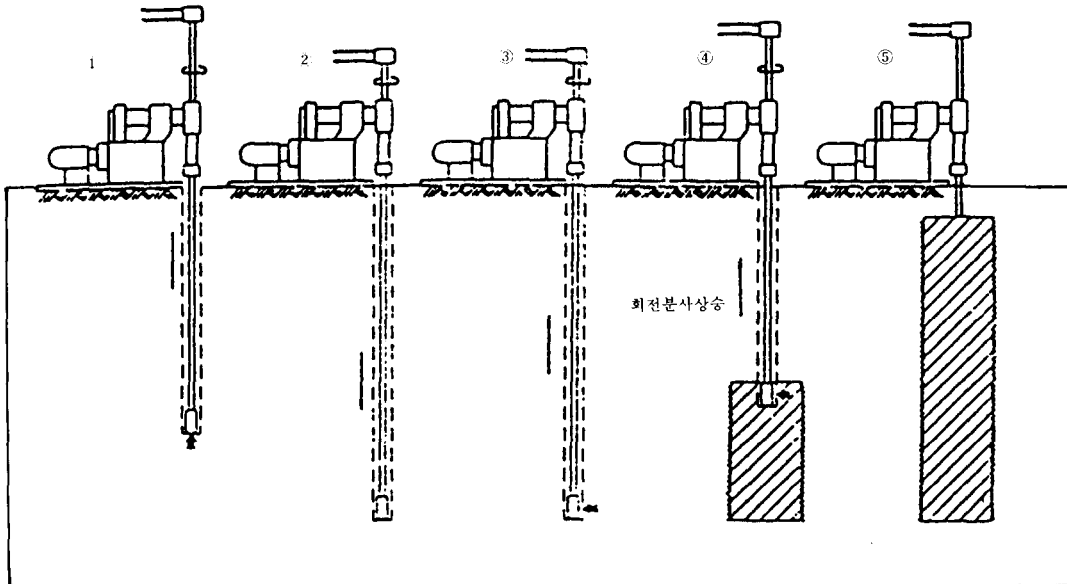


그림 9.3 고압분사 혼합공법의 시공순서

SIG공법의 기본원리는 토질공학의 기본원리인 과도한 과잉간극수압이 발생할때 전단강도가 손실되며 전단강도가 손실된 상태에서는 흙입자 저항이 감소하기 때문에 치환효과가 극대화 된다는 사실을 응용한 것이다.

9.2.2 Concrete Walls(현장타설 콘크리트 말뚝 벽체)

본 공법은 Earth Drill을 이용해서 지반을 천공하고 그 구멍에 H형강이나 철근을 집어 넣고 현장 타설 모르타르를 주입하여 말뚝을 형성하거나 반대로 먼저 모르타르를 주입하고 H형강이나 철근을 삽입하여 말뚝을 형성하여 흙막이판으로 이용하는 것이다.

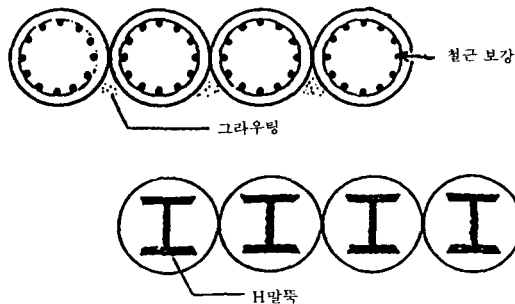


그림 9.6 현장타설 콘크리트 주열식 흙막이벽체

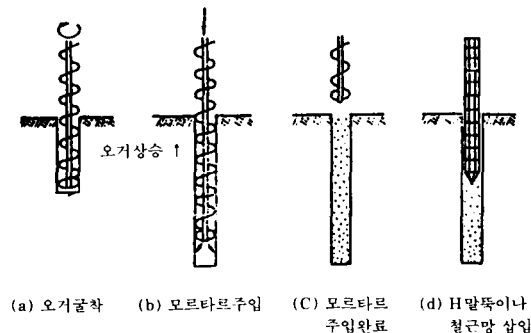


그림 9.7 PIP공법 시공순서

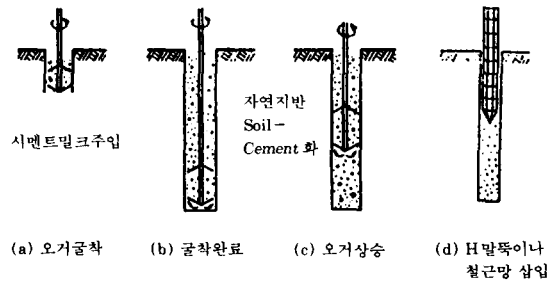


그림 9.8 MIP공법 시공순서

본 공법은 소일시멘트 흙막이벽체에 비하여 강성이 크고 특수장비가 필요하지 않으며 천공할 수 있는 모든 지반에 설치할 수 있으므로 지반조건에 구애를 받지 않는 장점이 있다. 반면에 기둥간의 연결성이 좋지 않아 벽체의 차수성이 나빠며 토사유실의 가능성도 매우 높다. 이들의 시공 예가 9.6에 도시되어 있다. 현장타설 콘크리트 벽체 축조를 위한 주열식 말뚝은 건조한 점성토 지반에 가장 적당하며 비점성 지반이나 Water-Bearing 지반의 경우는 사용이 제한된다. 현장타설 콘크리트 주열식벽의 공법을 세분하여 정리하면 표 9.3과 같다.

9.2.3 강관말뚝에 의한 주열식 흙막이벽 공법

이 방법은 이미 만들어진 강관말뚝을 일렬로 접촉시켜 향타하여 벽강관 흙막이벽체를 형성시키는 공법이다. 이 공법에 주로 사용되는 강관말뚝의 직경은 150mm 정도이며 얇은 심도로 굴착할 때 버팀대(Raker등)와 함께 많이 이용된다. 또한 이 공법은 특별한 향타장비가 없이 백호우(포크레인)를 이용할 수 있으며 향타 후 즉시 굴착할 수 있다는 장점이 있다.

9.2.4 주열식 흙막이벽체 공법의 비교

현재 이들 주열식 흙막이벽체는 여러가지 현장조건이 좋지 않은 곳에서 많이 활용되고 있으며 앞으로도 흙막이벽의 차수성과 강성증대의 효과가 필요한 곳에 많이 활용될 것이 예상된다

표 9.3 현장타설 콘크리트 주열벽체의 분류

공법	시공 원리 및 시공 순서	적 용 지 반	비 고
CIP	① 보링기로 소정의 깊이까지 굴착 ② 공내에 조립된 철근과 조골재를 채움 ③ 이 속에 모르타르를 주입하여 현지조성 말뚝을 시공	지하수위가 높은 지층 및 성토층등 극히 연약한 지층	
PIP	① Screw Auger로 소정의 깊이까지 지 천공 ② Auger 중심관 선단을 통하여 모르타르 또는 25mm 이하의 조골재가 혼합된 콘크리트를 주입 ③ 철근을 사용할 때에는 주입을 완료한 후에 철근을 압입하여 현지조성 말뚝을 시공 ④ 시공 절차 : 그림 9.7	지하수위가 높은 지층 및 성토층등 극히 연약한 지층	모르타르가 물, 잔모래, 시멘트 및 화학 첨가제로 구성되어 유동성이 매우 커서 철근 바구니는 모르타르가 채워진 구멍속에 쉽게 설치
MIP	① 보링기로 소정의 깊이까지 굴착 ② 천공한 구멍 및 구멍 주위의 자연지반을 Soil-Cement 또는 Soil-Concrete화 하며 철근을 압입하여 시공하는 Prepacked 공법의 일종 ③ 시공절차 : 그림 9.8	모래 지반에 가장 잘 적용. Core Boring으로 굴진이 가능한 지층, 직경 5cm이상 의자갈이 많은 지층, N치 20 이상인 지층, 전석이 혼재하는 지층의 경우는 적용되지 않음.	

표 9.4. 주열식 흙막이 공법의 비교

벽체분류	공법원리에 의한 분류	장 단 점	
Soil-Cement Walls	교반날개에 의한 방법	장점	① 차수성이 좋으며 토사유실의 가능성이 적음 ② 벽체의 강도가 널말뚝보다 큼 ③ 시공이 간편하고 빠름 ④ 함수비가 높은 연약지반에 시공가능 ⑤ 시공후 잔토가 소량
		단점	① 토사지역에서만 시공이 가능 ② 사력층에 시공 불가능
	고압분사에 의한 혼합 방법	장점	① 토층구성이나 토질에 의한 영향이 적음 ② 세립토 지반에서도 시공이 가능 ③ 지하 매설물에 영향이 적음
		단점	① 암반에서는 시공이 불가능

	고압분사에 의한 치환 방법	장점	① 수압파괴현상(Hydraulic Fracturing)이 없음 ② 지반응기현상이 발생치 않음 ③ 사력층에도 시공 가능
		단점	① 다른 소일시멘트 공법보다 고가
Concrete Wall	현장타설 콘크리트	장점	① 소일시멘트 벽체에 비해 강성이 큼 ② 모든 지반에 시공이 가능 ③ 소음, 진동이 거의 없음 ④ 시공단면이 작아 인접구조물에 영향을 주지 않음(지하연속벽 공법과 비교시)
		단점	① 기둥간의 연결성이 좋지 않음 ② 차수성이 나빠며 토사유실의 가능성 큼 ③ 공사기간이 길고 공사비가 증가 ④ 공벽의 안정을 위해 사용하는 이수(泥水)를 처리
Steel pipe Wall	벽강관말뚝	장점	① 시공이 빠름 ② 특별한 시공장비가 불필요
		단점	① 항타로 소음 발생

다. 그러나 이들 공법은 앞에서 설명한 바와 같이 여러가지 종류가 있으므로 각 공법의 특성을 파악하지 못하면 정확한 효과를 얻을 수가 없다.

상기에 열거한 세가지 흙막이벽체 공법들에 대한 공법상의 특성을 요약하면 표 9.4와 같다.

9.2.5 주열식 벽체의 배치방법

주열식 말뚝의 직경은 일반적으로 $\phi 300 \sim 450\text{mm}$ 가 많이 사용되고 있지만 필요에 따라 300mm에서 50mm간격으로 1000mm까지 시공이 가능하다. 주열식 말뚝의 배치방법은 그림 9.9와 같이 (a) 1열 접촉 시공(Contact style), (b) 1열 겹치기 시공(Overlapping style), (c) 갈짓자 배치(Zigzag style), (4) 차수용 그라우팅(Water Interrupt Wall, Grouting Water-Proof Chemicals)방법이 있다. 말뚝을 단순히 접촉시켜 시공하는 경우는 말뚝과 말뚝사이에 공간이 생기기 쉬우므로 투수층 지반의 경우에는 토사가 유출되지 않도록 말뚝과 말뚝사이에 약액주입 등의 보조공법을 병행한다.

겹치기 시공의 경우에는 1구멍씩 시공하지 않으면 안되지만 말뚝사이의 간격이 좁으므로 먼저 시공한 말뚝쪽에 오거가 해손 될 염려가 있고 또한 전 말뚝의 모르타르가 후에 시공할 말뚝쪽으로 유입될 우려가 있다. 또 철골말뚝이나 철근말뚝의 경우에는 겹치기 시공이 어렵기 때문에 겹치기 시공은 무근 모르타르 말뚝이어야 한다. 따라서 일반적으로 그림 9.9(e)와 같이 철골 모르타르 말뚝, 철근 모르타르 말뚝, 무근 모르타르 말뚝을 조합시켜 갈짓자로 배열하는 방법이 많이 사용되고 있다.

흙막이벽용으로 사용되는 주열식벽은 10m정도까지 단독으로 지지할 수 있지만, 그 이상 되면 보통 앵커로 보강하게 된다. 앵커를 사용함으로써 주열식벽의 처짐이나 이로 인한 흙막이벽의 이동을 감소시킬 수 있으며 또한 굴착후 지지대의 설치 사이의 임시단계에서 발생할 수 있는 큰 휨모멘트와 전단력에 저항하기 위해 요구되는 철근의 양을 앵커를 이용함으로써 감소시킬 수 있다.

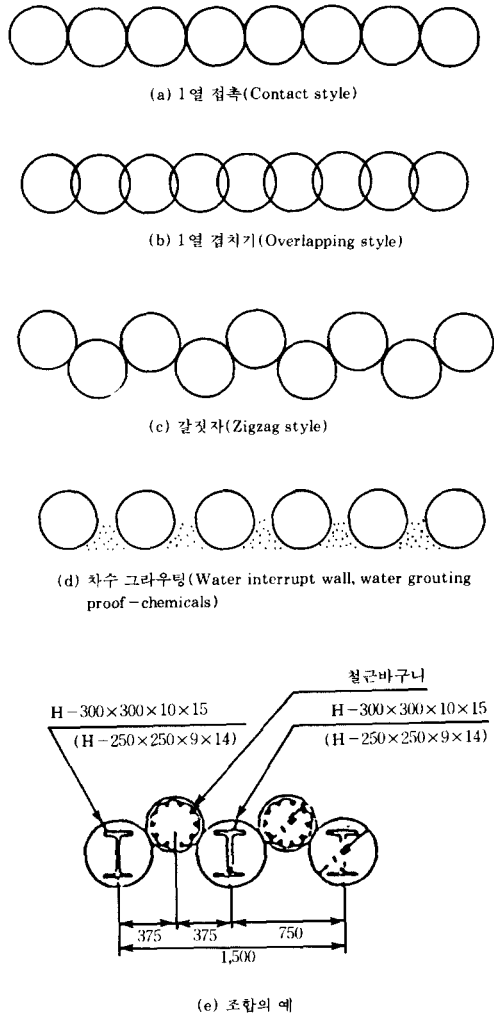


그림 9.9 주열식 말뚝의 배치방법

9.3 주열식 흙막이벽체에 작용하는 토압

흙막이벽을 벽체의 강성에 따라 구분하면 강성벽체와 연성벽체로 나눌 수 있으며, 강성벽체는 옹벽과 같은 철근 콘크리트벽으로 토압에 의한 휨이 일어나기 어려운 강성이 큰 흙막이벽을 말하고 연성벽체는 강널말뚝이나 횡널말뚝(흙막이판)공법과 같이 토압에 의하여 휨이 일어나기 쉬운 흙막이벽을 말한다.

그림 9.10은 옹벽과 같은 강성벽체가 항복(Yielding) 상태에 이른 경우의 벽체의 변형과 이때에 발생하는 횡토압을 보여주고 있다. 이 횡토압은 삼각형 분포를 나타내며 Rankine 이나 Coulomb의 이론으로 그 분포를 구할 수 있다. 그러나 실제의 경우에는 여러가지 다른 벽체의 변위형태, 변위량, 벽 마찰각 등이 존재하게 되는데, 이들에 따라서 토압의 분포와 크기는 고전적인 Rankine 이나 Coulomb의 이론에서 멀어지게 되는데, 본 강좌중의 하나인 “흙막이 구조물(II)”에 요약, 보고되어 있다.⁽⁵⁾

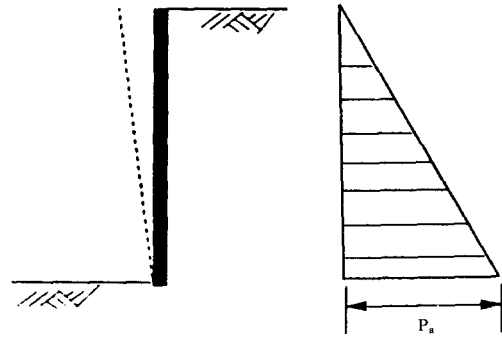


그림 9.10 강성벽체의 변형과 토압

연성벽체의 항복거동은 그림 9.11에서 보는 바와 같이 강성벽체의 경우와는 상당히 다른데, 이는 벽체에 작용하는 토압의 분포에도 크게 영향을 미치게 되는 것이다. 그림 9.11에서 보면, 벽체상부에서는 변위가 거의 발생하지 않으므로, 발생된 토압은 정지토압(at-rest pressure)에 가까울 것이며, 벽체의 하부에서는 항복 상태에 가까운 변위에 도달하여, Rankine 주동 토압보다도 작은 토압이 발생하게 된다. 따라서, 전체 토압분포는 옹벽에서의 삼각형 토압분포와는 상당히 다른 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 상기와 같은 불규칙한 토압분포는 실측 버팀대 하중과 엄지말뚝 등의 휨모멘트 값에 근거해서 계산한 토압분포와 유효요소 해석으로

얻은 토압분포에 의해서 입증되었다⁽⁷⁾. 그러나 실제의 토압분포는 시공순서와 지보시스템의 변위 등에 의해서 공사의 진행기간동안 상당한 변화가 발생하게 된다.

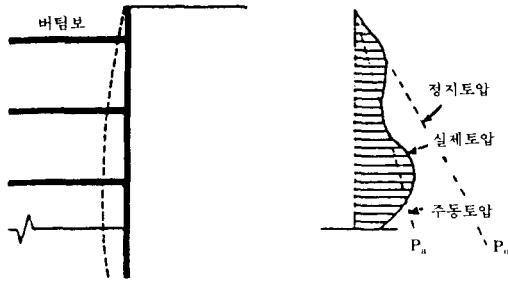


그림 9.11 연성벽체의 변형과 토압

이 그 형태가 불규칙 할 뿐만 아니라, 그 분포와 크기가 흙의 강성과 강도, 버팀대의 변위량과 항복정도, 벽체의 시공방법과 순서, 별체의 강성 등에 의해 좌우되기 때문에 이론식에 의해서 간단히 결정될 수 없다. 이러한 어려움 때문에 많은 연구자들이^{(11), (12)} 실측결과에 근거한 토압 분포도를 제시하였다. 이 분포들은 여러 대형공사에서 얻은 자료들을 도시하여 얻어진 최대 토압분포점들을 연결시켜 단순화하여 얻은 것으로서, 대부분의 경우에 상당히 안전측의 토압 분포를 주어 과다 설계하는 요인이 되고 있다. 최근에는 유한요소법과 같은 수치해석법을 이용하여 토압을 결정하려는 합리적인 방법이 사용되고 있는데, 사용되는 토질상수 값들에 대한 신뢰성과 버팀대 설치과정상의 미지의 사항들로 인한 문제들이 해결되어야 정확한 토압의 산정이 가능하게 된다.

주열식 흙막이벽체에 작용하는 실질적인 분포상태는 기둥의 단면치수와 압축강도, 응력부담재의 간격, 강성에 따라 다르지만, 주로 강성벽과 연성벽에 작용하는 토압분포의 중간에 해당한다고 볼 수 있다. 실제 설계시에는, 주열식 흙막이 벽의 근입깊이는 일반적으로 Rank-

ine-Resal의 토압공식을 사용하여 결정하게 된다. 주열식 흙막이벽의 단면 계산에 사용되는 토압분포는 경험 및 현장에서 계측된 토압 분포를 토대로 제안된 값을 사용하고 있다. 실제로 대다수의 굴착 현장에서는 버팀보를 다단으로 설치하는데 이때 흙막이판의 토압분포는 사각형의 형상을 나타낸다. 그리고 토압 분포의 형상과 크기는 배면토의 종류, 지하수의 유무 그리고 상재하중의 크기 등에 따라서 달라진다. 여러가지 다른 조건하에서의 연성벽체에 작용하는 토압분포는 본 강좌의 “흙막이 구조물(II)”에 요약, 보고되어 있다⁽⁵⁾.

9.4 설계법

주열식 흙막이벽은 소일시멘트와 H-말뚝 등과 같은 응력부담재로 구성된 복합구조를 이루기 때문에 단면산정이 일반 흙막이벽과 다르게 된다. 주열식 흙막이벽중 소일시멘트 주열식벽은 응력부담재와 소일시멘트로 구성되어 각각의 강성이 합해져서 응력부담재의 강성이 증가하는 것으로 보고되어 있으나, 실제로 이것을 크게 기대할 수 없기 때문에 설계시 연직방향의 휨응력이나 전단응력은 응력부담재만 부담하는 것으로 가정하는 것이 일반적이다. 연직방향의 휨응력과 전단응력을 받지 않는 소일시멘트 부분은 횡방향의 응력을 받으므로 이 응력에 견딜 수 있는 단면산정을 하여야 하며 이에 대한 방법은 9.4.2절에서 설명한다.

한편 철근콘크리트 주열식벽(CIP등)은 소일시멘트 주열식벽과는 달리 각각의 기둥이 연직방향의 휨응력과 전단응력을 부담하도록 설계하면 된다.

나머지 설계방법(응력부담재의 단면검토, 굴착 바닥면의 안정검토등)은 본 강좌(V)에 요약되어 있다⁽⁶⁾.

9.4.1 흙막이말뚝의 설치간격

(1)기본이론

주열식 흙막이벽에 작용하는 측방토압은 그

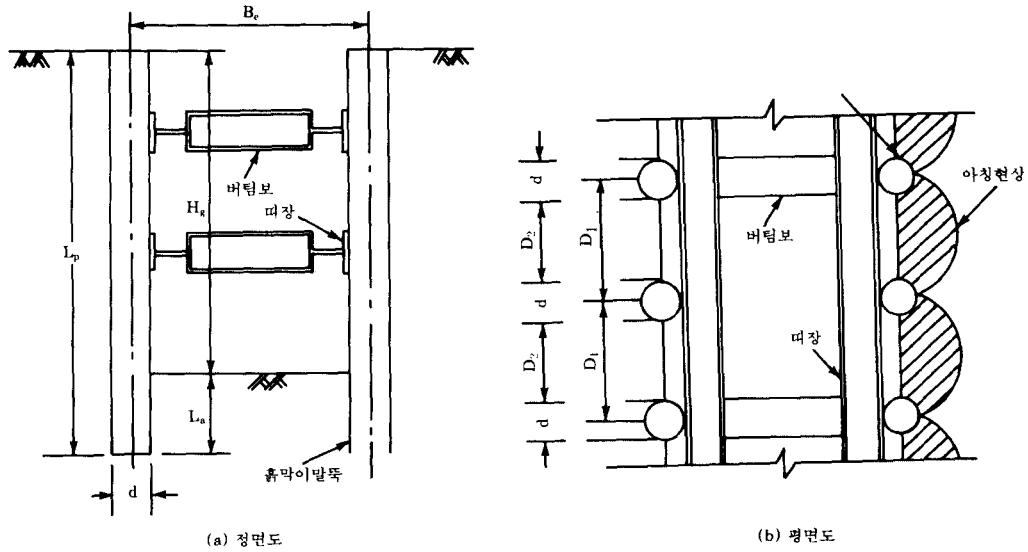


그림 9.12 주열식 흙막이벽

림 1(a) 및 (b)에서와 같이 H말뚝이나 강관이 응력부담재로서 주로 담당하도록 설계되어야 한다. 따라서 본 절에서는 이에 대한 흙막이말뚝의 적절한 설치간격을 결정하는 한방법을 설명하도록 한다.^{9), 10)}

그림 9.12는 직경이 d 인 RC 말뚝을 현위치에서 D_1 의 중심간격으로 일렬로 설치한 주열식 흙막이벽의 정면도와 평면도이다.

주열식 말뚝은 RC 말뚝 대신 직경 d 의 천공 내에 H말뚝과 시멘트모르타르를 사용하기도 한다. 말뚝을 설치한 후 굴착이 진행됨에 따라 말뚝사이의 지반은 말뚝열과 직각방향으로 이동하려고 할 것이다. 이 경우 말뚝의 이동이 버팀보(strut)와 띠장(wale) 등으로 구속되어 있으면 말뚝사이의 지반에서 arching현상이 발생하게 되어 지반이동에 말뚝이 저항할 수 있게 된다.

굴착저면 상부에서 지반의 아칭현상에 의한 주열식흙막이벽용 말뚝의 수평저항력 P_s 을 단위폭당으로 환산한 말뚝의 저항력 P_s/D_1 은 식 (1)과 같다.^{9), 10)}

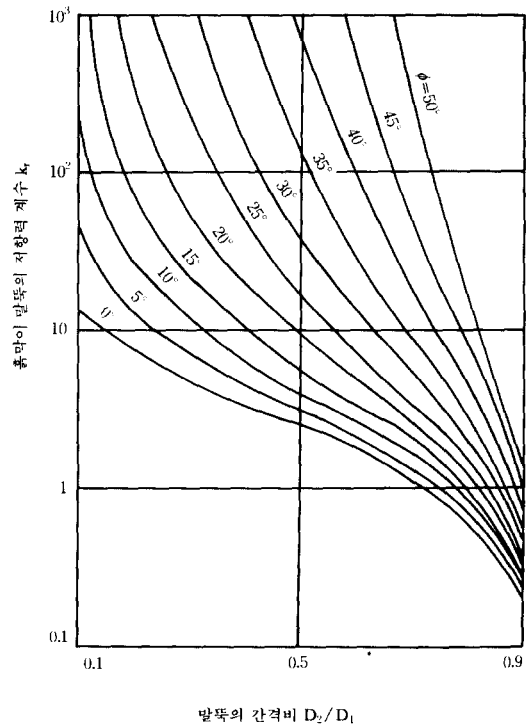


그림 9.13 흙막이말뚝의 저항계수

$$\frac{P_r}{D_1} = K_r c \quad (1)$$

여기서 D_1 은 말뚝중심거리, c 는 지반의 점착력 혹은 비배수전단강도, K_r 은 말뚝의 저항력계수로 내부마찰각 ϕ 와 말뚝간격비(D_2/D_1)의 함수로 그림 9.13에서 구할 수 있다.

주열식 흙막이벽용 말뚝을 설치할 수 있는 말뚝의 최대간격은 이 말뚝의 저항력이 흙막이벽에 작용하는 측압과 일치하는 경우의 말뚝간격으로 할 수 있다.

여기서 굴착깊이에 따른 흙막이벽에 작용하는 측압과 흙막이말뚝의 저항력의 분포를 도시하며 그림 9.14와 같다.

우선, 흙막이 말뚝의 저항력은 식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 깊이에 무관하며 그림 9.14(a)와 같이 矩形분포를 하게 된다. 한편, 흙막이벽에 작용하는 측압은 여러가지 방법으로 구할 수 있으나 가장 일반적인 측압분포는 그림 9.14(b)와 같은 삼각형분포 혹은 구형분포를 들 수 있다. 이 측압분포중 최대측압 $P(t/cm^2)$ 는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$P = K_r \gamma H \quad (2)$$

여기서 H 는 굴착깊이, γ 는 지반의 단위체적중량, K_r 은 측압계수이다.

말뚝간격은 최대측압이 작용하는 위치에서 측압과 저항력을 같게 놓으므로써 얻을 수 있

다. 따라서 식(1)과 (2)로부터 식(3)을 얻는다.

$$K_r c = K_r \gamma H \quad (3)$$

식 (3)으로 부터 말뚝의 저항력계수 K_r 은 식 (4)와 같이 된다.

$$K_r = K_L \frac{\gamma H}{c} \quad (4)$$

여기서 $\gamma H/c$ 는 Peck⁽¹³⁾의 안정수(Stability number) N_s 와 일치하므로 식 (4)는 식(5)로 다시 쓸 수 있다.

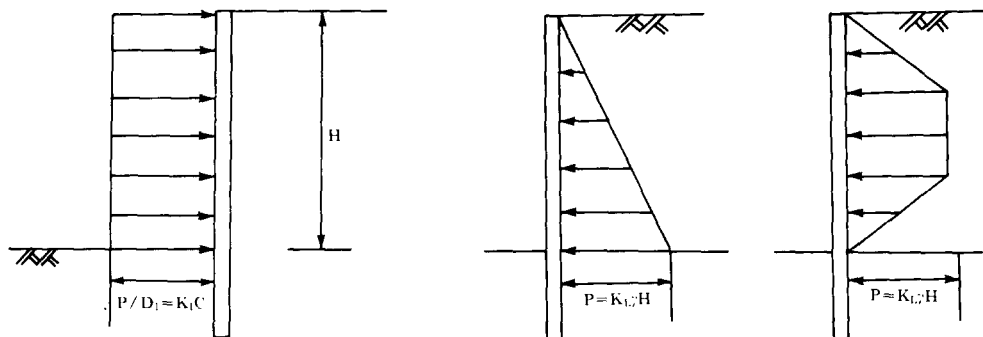
$$K_r = K_L N_s \quad (5)$$

식 (5)로 부터 말뚝의 저항력계수 K_r 은 K_L 과 N_s (즉, 지반의 점착력, 단위체적중량, 측압계수 및 굴착깊이)를 알면 결정되는 계수임을 알 수 있다. K_r 이 구하여 지면 내부마찰각 ϕ 와 K_r 로부터 그림 9.13에 의거 말뚝간격비 D_2/D_1 을 구할 수 있다. D_2/D_1 이 구하여지면 식 (6)에 의거 말뚝설치간격 D_1 을 구할 수 있다.

$$D_1 = \frac{d}{1 - \frac{D_2}{D_1}} \quad (6)$$

(2) 설계예

앞에서 제시된 주열식 흙막이말뚝의 설계법에 따라 간단한 설계예를 다루어 보고자 한다. 설계조건은 다음과 같다.



(a) 흙막이 말뚝의 저항력

(b) 흙막이벽에 작용하는 측압분포

그림 9.14 주열식 흙막이벽의 저항력과 측압분포

(가) 설계조건

그림 9.15와 같이 흙의 단위중량이 $1.8t/m^3$ 이고 흙의 비배수전단강도가 $4.0t/m^2$ 인 균질한 점토지반을 폭 10m, 굴착깊이(H) 15m가 되도록 연직굴착 하고자 한다. 이지반 점토의 배수 삼축시험 결과 유효내부마찰각 ϕ 는 41° 로 나타났다. 이때 상재하중은 작용하지 않고 주열식 흙막이벽용 현위치 원형말뚝의 휨응력은 콘크리트나 모르타르속의 H형강만이 받는 것으로 하며 지지공이나 띠장과 같은 흙막이말뚝을 위한 보조부재의 구조적인 계산은 완벽하여 굴착 저면하부에서 흙막이말뚝의 변형은 전혀 발생하지 않는 것으로 생각한다. 먼저, 지반조건으로부터 흙막이말뚝에 작용하게 될 토압과 측압계수를 결정한다. 흙막이벽의 강성에 따라 연성벽과 강성벽의 두경우를 각각 고려하기로 한다. 즉 말뚝의 측방변형이 완전히 구속되어 있는 이상적인 강성벽의 경우를 생각하면 굴착저면상부에서 측압계수는 정지토압계수 K_0 를 사용한다. 한편 연성벽의 경우는 Terzaghi-Peck 이나 Tschebotarioff식을 사용하여 각각의 경우의 최대토압을 사용한다.

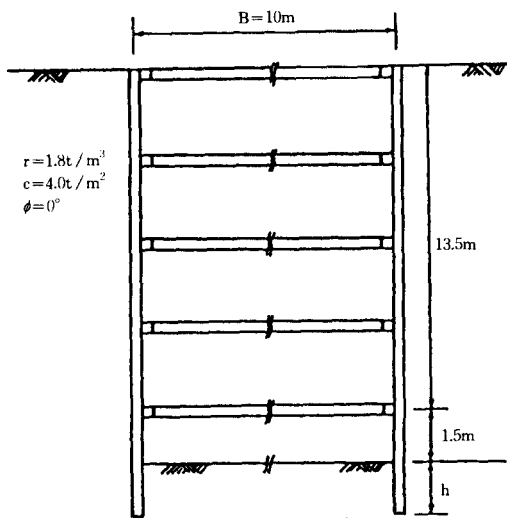


그림 9.15 흙막이벽 설계예

(나) 연성벽인 경우

본 지반은 비배수전단강도가 $4t/m^2$ 이므로 견고한 점토층에 속하므로 Terzaghi-peck의 토압식을 이용하면 최대측압계수 K_L 은 0.2~0.4이며, Tschebotarioff의 토압식을 이용하면 최대측압계수 K_L 은 0.375이다. 따라서 K_L 을 0.3으로 하기로 한다.

안정계수 N_s 는 다음과 같다.

$$N_s = \frac{\gamma H}{c} = \frac{1.8 \times 15}{4} = 6.75$$

말뚝의 저항력계수 K_r 은 식(5)로부터

$$K_r = K_L N_s = 0.3 \times 6.75 = 2.025$$

K_r 이 2.025이고 $\phi=0$ 인 경우 말뚝의 간격비 D_2/D_1 을 그림 9.13에서 구하면 0.6이 된다.

말뚝설치간격 D_1 은 식(6)에 의거

$$D_1 = \frac{0.4}{1 - 0.6} = 1.0m \text{ 이다}$$

여기서 H말뚝을 설치하기 위한 천공직경을 ϕ 400mm으로 하였다.

(다) 강성벽인 경우

굴착저부의 흙막이벽의 변형은 전혀 발생하지 않는다고 가정하여 굴착저면상부에서의 측압계수를 정지토압계수로 한다.

$K_L = 1 - \sin\phi'$ 이므로

$$K_L = 1 - \sin 41^\circ = 0.34$$

$$\text{안정계수 } N_s = \frac{\gamma H}{c} = \frac{1.8 \times 15}{4} = 6.75$$

말뚝의 저항계수 $K_r = K_L N_s$ 이므로

$$K_r = 0.34 \times 6.75 = 2.3$$

K_r 이 2.3이고 $\phi = 0$ 인 경우 말뚝의 간격비 D_2/D_1 을 그림 9.13에서 구하면 0.52가 된다. 따라서

$$D_1 = \frac{0.40}{1 - 0.52} = 0.83m \text{ 이다.}$$

9.4.2 벽체의 단면

(1) 소일시멘트벽

(가) 단면산정

소일시멘트벽 부분에 축압(토압, 수압, 상재 하중과 인접 구조물에 의한 토압증가)이 작용할때의 응력 및 단면산정은 그림 9.16과 같이 인접한 응력부담재를 지점으로 하는 수평방향재로 보고 해석을 한다. 일본 학자들이 연구한 바에 의하면 소일시멘트벽 부분에 축압 q가 작용할때의 파괴패턴은 그림 9.17과 같이 ①굴착측 플렌지부의 압축파괴 ②사인장파괴 ③압축전단파괴 ④휨파괴 등이 있는 것으로 보고되었다.

상기 연구 결과 등에 의하면 4개의 파괴형태 중에서 압축파괴와 압축전단파괴가 가장 흔한 것으로 보고되어, 본 강좌에서는 이들을 고려한 단면 설계에 대해 논의하려고 한다. 따라서, 소일시멘트 주열식벽의 설계에서는 압축파괴와 전단파괴에 대해 동시에 저항할 수 있는 소일시멘트의 설계강도를 구하여 이에 따른 배합비를 결정하게 된다.

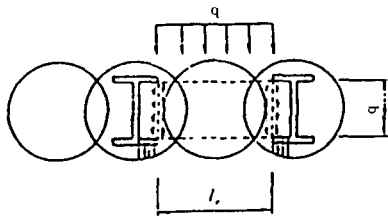


그림 9.16 계산모델

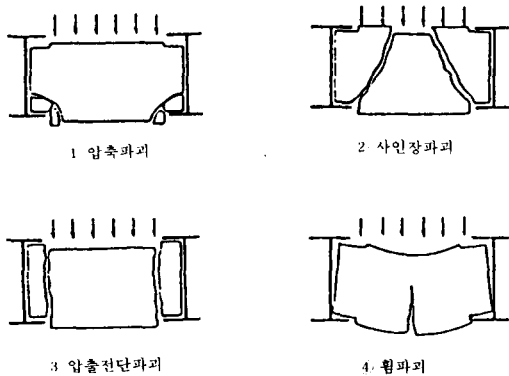


그림 9.17 파괴패턴

(A) 압축응력(축력)에 대한 검토

소일시멘트 벽에 작용하는 축력은 그림 9.18과 같이 사선아치 단면에 등분포 하중이 작용하는 것으로 보며, 이 하중에 저항하는데 필요한 응력 $\sigma_{req(A)}$ 값을 아래 같이 구하게 된다.

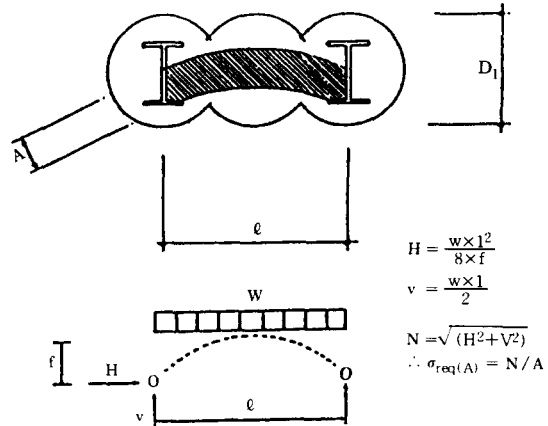


그림 9.18 축력에 대한 검토

(B) 전단력에 대한 검토

소일시멘트의 전단강도는 일축압축강도의 1/3 값을 사용하며, 전단강도를 발휘하는 면은 그림 9.19에서와 같이 플렌지 양단부를 연결한 면과 소일시멘트 기둥이 겹치는 부분을 연결한 면의 두면에 대해서 검토한다. 이 검토 결과 전단파괴에 저항할 수 있는 소요일축압축강도 $\sigma_{req(S)}$ 를 구하게 된다.

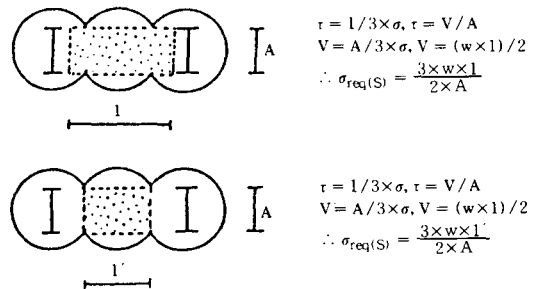


그림 9.19 전단력에 대한 검토

(C) 설계강도

소일시멘트의 설계강도는 $\sigma_{req(A)}$, $\sigma_{req(S1)}$ 와 $\sigma_{req(S2)}$ 중에서 가장 큰 값에 설계안전율을 곱한 값을 사용하며 설계안전율은 보통 2.5~5 정도를 사용하는 것으로 나타났다. 이 설계강도에 대한 배합비는 실제 시공시 현장의 토질조건에 맞추어 결정해야 하며, 배합 후에 설계강도에 미치지 못하면 응력부담재나 소일시멘트 기둥의 단면을 증가시켜야 한다.

나) 벽체재료의 허용응력

벽체재료중 소일시멘트 부의 허용응력도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{허용압축응력도} : \sigma_{ca} = \frac{1}{F_s} q_u$$

$$\text{허용전단응력도} : \tau_a = \frac{1}{F_s} I_u$$

여기서 q_u : 일축압축강도(kg/cm²)

I_u : 전단강도(kg/cm²)

F_s : 안전율

상기 식 중에 나타나는 안전율은 일본의 경우에는 공사조건에 따라 2에서 4까지의 값이 추천되고 있으나, 대체로 2를 적용하는 것으로 나타났다. 또한 소일시멘트의 일축압축강도는 원지반의 토질, 시멘트계 경화제의 배합이나 주입율, 교반 정도등 여러가지 요인에 의해 영향을 받기 때문에, 강도시험을 행하여 결정하는 것을 원칙으로 한다.

소일시멘트 벽체의 구축방법에 따른 일축압축강도의 실측범위 및 전형적인 값들은 다음과 같다.

* 교반에 의한 소일시멘트⁽⁴⁾ : 0~50kg/cm²

* 분사방식에 의한 소일시멘트⁽²⁾

점성토 : 20~40kg/cm²

사질토 : 40~150kg/cm²

사력·호박돌층 : 100~200kg/cm²

* 치환 방식에 의한 소일시멘트⁽³⁾

사질토(통상형) : 200kg/cm²

사질토(저강도형) : 160kg/cm²

점성토(통상형) : 150kg/cm²

교반에 의해 형성한 소일시멘트에 대한 일본의 여러시험 결과에 의하면 소일시멘트부의 전단강도는 일축압축강도의 약 1/3 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다. 강재의 허용응력도는 본 강재의 “흙막이 구조물(V)”을 참고하기 바란다.⁽⁴⁾

(2) 콘크리트벽

현장타설 콘크리트 주열식벽의 단면산정은 각각의 철근 콘크리트 기둥이 연직방향의 휨응력과 전단응력을 부담하는 것으로 보고 콘크리트의 압축강도와 철근의 인장응력이 결정되기 때문에 소일시멘트의 경우보다 간단하다. 휨모멘트에 대한 검토는 최대휨모멘트를 구해서 소요철근량을 산정하며, 전단력에 대한 검토는 최대전단력을 환산단면적으로 나눈 전단응력이 허용전단응력보다 작으면 된다.

벽체재료(철근콘크리트)의 허용응력도는 이미 보고된 자료가 많으므로 그것을 참조하기 바란다.

소일시멘트 벽의 설계강도를 결정하는 설계예로서 지반공학 시리즈3 “굴착 및 흙막이공법”에 수록되어 있는 사항을 참조하기로 한다.⁽⁶⁾

9.4.4 설계시 고려할 사항

(1) 설계일반

주열식흙막이벽을 사용한 가설흙막이공 설계는 다른 가설흙막이공의 설계와 동일하게 벽체의 설계, 벽체지보공(버팀대, 띠장)의 설계로 크게 구분된다. 주열식 흙막이공은 현장타설공법이므로 벽체의 설계시 토질조건, 시공조건등에 의한 흙막이벽의 연직성, 지수성등을 고려해야만 한다. 따라서 설계전에 정밀한 지반조사를 실시하고 그 결과를 설계에 반영시켜야 하는 것은 물론, 시공방법, 시공관리등의 문제점도 설계시점에서 기본적으로 고려해야만 한다. 이공법에서 띠장설치는 다른 가설흙막이공의 경우와 동일하다.

(2) 측방토압

측방토압으로서는 다른공법과 같이 토압과 수압이 고려된다. 특히, 주열식지하연속벽은 비교적 지수성이 좋은 깊은벽의 시공이 가능하기 때문에 배면에 큰 수압이 작용하는 경우가 많으므로 흙막이벽 배면에 작용하는 측압은 토압 + 100%의 물로 가정하는 경우가 많다. 이 경우, 토압공식으로서 각규준의 것을 그대로 사용하지만 지하수 이하의 흙의 단위체적중량에 대해서는 간극수압의 차를 뺀 수중단위중량으로 계산한다. 주열식 흙막이벽체 중에 소일시멘트벽체의 설계에서 굴착바닥보다 위쪽에서는 각 응력부담재 말뚝이 응력부담재 간의 거리에 작용하는 측압을 받도록 설계된다. 근입부에 대하여는 굴착측과 벽체 배면측의 지반에 둘러싸여 응력부담재와 소일시멘트가 일체로 되어있는 것으로 보아 단위폭당의 주동토압과 수동토압이 작용한다고 보고 설계한다.

(3) 가상지지점

굴착심도가 10~15m 미만으로 얕은 경우에는 벽체에 작용하는 수압 및 주동토압에 의한 활동모멘트와 근입부분의 수동토압에 의한 저항모멘트의 평형관계로부터 수동토압의 합력점을 가상지점으로 한다. 굴착심도가 깊은 연약지반인 경우에는 굴착저면이하의 근입부분에 가상지점을 설계하는 것이 아니라 근입부의 전체에 흙이 저항하는 것으로 생각하며 더우기 흙의 저항은 연속벽 근입부의 변형에 따라서 탄소성영역으로 구분하여 계산하는 경우가 많다.

(4) 벽체

주열식 흙막이벽에 발생하는 모멘트, 전단력은 다른 가설흙막이공과 동일한 경우처럼 연직방향에 대하여 계산하고 수평방향에 대해서 벽체는 각각 독립된 것으로 생각한다. 연직방향에 대해서는 띠장 부분을 지점으로한 보로 간주하고, 근입부분에 대해서는 수동측에 가상지지점을 설정하고 수동측을 스프링으로 가정하여 계

산하는 구조계로 설계하는 것이 일반적이다. 보에 대해서는 단순보로 하는가, 연속보로 하는가는 지하연속벽의 설계규준이 별도로 마련되어 있지 않기때문에 굴착심도가 얕은 경우에는 단순보로 하고, 깊은 경우에는 연속보로 취급한다. H형강을 사용한 주열식벽체의 경우 벽체의 설계상의 유효단면적은 H형강의 단면을 대상으로 한다.

참고문헌

1. 지반 공학 시리즈 3, "굴착 및 흙막이 공법", 한국지반공학회, 1992.
2. 건설부, "地下連續壁工法", 건설부, 1989.
3. SIG, "SIG工 工事費 算定에 關한 研究 報告書", 建設産業研究所, 1993.
4. SEC, "SEC 工法 技術 資料", 에스 이 씨 株式會社
5. 김 명모, 김 흥택, "흙막이 구조물(II)", 한국지반공학회지, 1992, Vol. 8, No. 1, pp.107-135.
6. 최정범, "흙막이 구조물(V)", 한국지반공학회지, Vol. 8, No. 4, 1992. pp.118-135.
7. Sowers, G.F. "Soil Mechanics and Foundations : Geotechnical Engineering, "Macmillan Publishing Co, Inc, 1979, pp.390-415.
8. Das, B.M., "Principles of Foundation Engineering," PWS-KENT Publishing Company, 1990, pp.387-421.
9. 홍원표 : "주열식 흙막이벽의 설계에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 제5권, 제2호, 1985, pp. 11-18.
10. 홍원표, 권우룡, 고정상 : "점토지반속 주열식 흙막이벽 설계법." 대한토질공학회논문집 제5권, 제3호, 1989. pp.29-38.
11. Terzaghi, K. and Peck, R. B. : "Soil Mechanics in Engineering Practice." 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1967, pp. 394-413.
12. Tschebotarioff, G. P. : "Foundaton, Retaining and Earth Structures." McGraw-Hill, New York, 1973, pp. 415-457.
13. Peck, R. B. : "Deep Excavations and Tunneling in Soft ground." State of The Art Vol. Proc., 7th ICSMFE, Mexico, 1969, pp. 225-290.