

발간등록번호

AN01145-000145-12

도로설계요령

제2권 토공 및 배수

2020

 한국도로공사

제2권

...

토공 및 배수

제5편 토공
제6편 배수시설
제7편 암거

제5편 토 공





14. 연약지반 상의 흙쌓기

14.1 설계 기본사항

이 장에서는 연약지반 상에 흙쌓기 할 경우의 제체의 안정 및 침하에 관한 조사, 설계 및 시공의 기본 개념에 대해 기술한다. 여기서는 연약지반상의 흙쌓기에 대한 일반적인 내용을 기술하므로 제체의 형상이나 규모, 연약지반의 토성이나 지층 구성이 크게 다른 경우에는 별도로 검토하도록 한다.

(1) 연약지반의 정의

연약지반은 토층 구성이 주로 점토나 실트와 같은 미세한 입자의 흙이나 간극이 큰 유기질토 또는 이탄(泥炭), 느슨한 모래 등으로 이루어져 있으며, 지하수위가 높아 제체 및 구조물 시공시 안정과 침하에 문제가 발생하는 지반으로서, 연약지반의 개략적인 판단 기준은 표 14.1과 같다.

〈표 14.1〉 고속국도에서의 연약지반 판단 기준

구분	이탄질 및 점토질 지반		사질토 지반
층 두께(m)	10 미만	10 이상	-
N치	4 이하	6 이하	10 이하
q_u (kN/m ²)	60 이하	100 이하	-
Zq_c (kN/m ²)	800 이하	1,200 이하	4,000 이하

주) q_c 는 콘관입저항지수, q_u 는 일축압축강도

(가) 연약지반의 정의는 단순히 지반의 조건만으로 결정되는 것은 아니고, 토질의 성상 및 시공 상황 등에 따라 다르기 때문에 제체나 구조물의 종류·형식·규모, 지반 특성을 충분히 검토한 뒤에 연약지반으로 취급 유무를 판단할 필요가 있다. 토질 특성에 따른 연약지반 판정 기준은 표 14.2와 같다.

〈표 14.2〉 토질 특성에 따른 연약지반 판정기준

지반 구분	토층 및 토질 구분			토질정수			
				함수비 W _n (%)	e ₀	q _u (kN/m ²)	N치
이탄질 지 반	고유기질토 (Pt)	Peat	섬유질 고유기질토	300 이상	7.5 이상	40 이하	1 이하
		흑니	분해가 진척된 고유기질토	300 ~ 200	7.5 ~ 5.0		
점토질 지 반	세립토	유기질토	소성도 A선 이하의 유기질토	200 ~ 100	5.0 ~ 2.5	100 이하	4 이하
		화산회질 점토	소성도 A선 이상, 화산회질 2차 퇴적 점성토				
		Silt	소성도 A선 이하 Dilatancy대	100 ~ 50	2.5 ~ 1.25		
		Clay	소성도 A선위 그 부근 Dilatancy대				
사 질 지 반	사질토	SM, SC	#200번체 통과량 15 ~ 50 %	50 ~ 30	1.25 ~ 0.8	≒ 0	10 이하
		SP-SC, SW-SM	#200번체 통과량 15 % 이하	30 이하	0.8 이하		

(나) 연약지반은 퇴적 조건에 따라 흙의 성질이 다른 경우가 많으며 퇴적 조건은 지표 조사에 의해 거의 추정할 수 있다. 따라서 지형도나 항공사진에 의해 지반의 상세한 요철이나 표고의 판독, 사진에 보이는 색조의 관찰, 하천의 규모 및 경사 등을 조사하여 미리 개략적인 토성을 추정하면 노선 선정 시나 조사 위치 결정 및 조사 결과로부터 지층 종단도를 작성할 때에 효과적으로 이용할 수 있다.

〈표 14.3〉 구조물 종류에 따른 개략적인 연약지반 판정기준

구조물의 종류	지 반 상 태						판 정
	토질	두께(m)	N치	q _u (kN/m ²)	q _c (kN/m ²)	함수비 (%)	
도 로			2 이하	25 이하	125 이하	-	초연약
			2 ~ 4	25 ~ 50	125 ~ 250	-	연 약
			4 ~ 8	50 ~ 100	250 ~ 500	-	보 통
고 속 국 도	이탄층	-	4 이하	50 이하	-	-	연약지반
	점성토	-	4 이하	50 이하	-	-	
	사질토	-	10 이하	-	-	-	
철 도		2 이하	0			100 이상	연약지반
		5 이하	2 이하			50 이상	
		10 이상	4 이하			30 이상	

구조물의 종류	지 반 상 태						판 정
	토질	두께(m)	N치	q_u (kN/m ²)	q_c (kN/m ²)	함수비 (%)	
신간선 (고속철도)			2 이하	-	200 이하	-	정밀조사필요
			2~5	-	200~500	-	연약층이 두꺼우면 추가조사 필요
			5 이상	-	500 이상	-	연약지반이 아님
건 축			10 이하	-	-	-	연약지반
필 댐			20 이하	-	-	-	연약지반

(2) 연약지반의 흠쌓기 속도

연약지반 흠쌓기는 연약지반의 두께, 강도특성에 따라 쌓기 속도를 고려해야 한다. 급속한 흠을 쌓으면 지반의 측방 변형이 증가하여 활동 파괴가 발생된다. 활동이 발생되면 지반이 용기되고, 그 영향범위는 20~70 m에 이르는 경우도 있다. 활동을 발생시킨 지반내의 점성 토는 크게 교란되어 강도가 저하되기 때문에 주변부를 포함한 복구에 많은 시간과 경비를 요하게 된다. 따라서 연약지반 대책은 쌓기체의 안정 확보를 고려한 완속 흠쌓기에 의해 지반강도의 증가를 유도하면서 흠쌓기 하는 것을 원칙으로 한다.

〈표 14.4〉 연약지반의 흠쌓기 속도

지반의 종류	흠쌓기 속도
두꺼운 점토지반 및 유기질토가 두꺼운 퇴적된 이탄질 지반	30 mm/day
보통의 점토질 지반	50 mm/day
얇은 점토질 지반 및 유기질토가 거의 끼지 않은 얇은 이탄질 지반	100 mm/day

(3) 연약지반 흠쌓기시 고려사항

연약지반은 흠쌓기시 파괴에 대한 안정성 저하, 침하 또는 변형이 발생할 수 있으므로 쌓기체의 안정 및 침하, 주변 환경에 미치는 영향 등을 검토해야 한다. 연약지반 상에 흠쌓기를 하는 경우 연약지반의 두께, 특성 등에 따라 안정적인 시공이 이루어 질 수 있도록 쌓기 속도를 정하고, 비탈면의 형상이나 규모, 연약지반의 토질특성, 지층구성 등을 철저히 조사 분석하여 반영해야 한다.

- (가) 기초지반의 전단파괴에 대한 쌓기체 안정문제
- (나) 침하에 따른 쌓기체 변형, 구조물 접속부 부등침하, 장기간에 걸친 잔류침하
- (다) 흙쌓기 및 편재하중에 의한 주변지반 및 확폭 흙쌓기 구간, 구조물 등의 측방변형
- (라) 지반의 불균질 및 이방성

14.2 우리나라의 연약지반

이 절에서는 우리나라의 연약지반 특성과 실태에 대해 기술한다.

(1) 충적층의 형성

우리나라는 한반도 동쪽에 험준한 태백산맥이 남북으로 위치하고, 남서쪽으로 소맥산맥과 차령산맥이 뻗어 있어 수계는 대개 여기서부터 시작하여 서해안과 남해안으로 대하천을 이루어 물이 흐르고 있다. 수계의 시점부터 하구까지는 거리가 짧고 지형의 경사가 급하므로 유속이 빨라 수류작용에 의해 운반되는 퇴적물이 많다.

우리나라의 연안과 하구를 중심으로 내륙지방에도 비교적 규모가 큰 연약지반이 형성되어 있다. 예를 들면, 군산 점토층은 금강과 만경강의 하구를 중심으로 발달하였으며, 김해 점토층은 낙동강 하구에서 김해 일대를 덮고 있다. 하구나 하천의 하류부를 중심으로 한 연약지반은 제4기의 지질연대에 홍수의 범람으로 형성되었을 가능성이 높다. 그러나 점토층이 해수 중에서 퇴적하고, 그 이후에 육지의 확장으로 형성되거나, 지각 변동에 의해 형성될 수도 있다. 내륙지방의 하성(河性) 또는 호성점토(湖性粘土) 또는 해성점토(海性粘土)인가를 시험을 통하여 쉽게 판단할 수 있다.

(2) 지역별 지층 구조의 특성

앞서 설명한 바와 같이 충적토(沖積土)는 여러 가지 환경 조건에 의존하기 때문에 지층의 구성은 위치에 따라 다르다. 국내의 자료를 중심으로 지역별로 정리된 대표적인 지층 구조의 특징은 다음과 같다.

(가) 연안지역

(a) 동해안 연안

대단히 연약한 실트질 점토층이 상층에 놓이며, 이층 아래에는 모래층 또는 모래 섞인 자갈층이 함께 존재한다. 특히, 강릉 및 속초 지방의 실트질 점토층은 유기질을 많이 함유하고 있으며 액성한계와 함수비가 대단히 높다(표 14.5 참조). 모래층 또는 모래섞인 자갈층 해수면의 상승이 동해안의 급격한 하천의 수류작용으로 운반되어 형성된 것으로 추정된다. 이 층 아래에는 모암이 풍화되어 이루어진 풍화암층이 있다. 연약층의 두께는 조사된 지역에서 최대에 가까운 값이며, 포항지역에서 16.5 m, 강릉과 속초지역에서 대략 10.0 m로 판명되었다.

(b) 서해안 연안

서해안 중 조수간만의 차가 심한 김포, 반월, 인천, 아산 등에서는 실트질 모래 또는 모래질 실트가 풍화암 바로 위에 퇴적되어 있는 곳이 많고, 그 위에 실트질 점토층이 놓인다. 이 두 층을 합한 두께는 30 m 까지 이르는 곳이 대부분이며, 그 경계는 분명하지 않은 곳이 많고, 실트질 점토는 다른 연안의 점토에 비해 입자가 크다. 군산, 목포 등 서해안 남쪽은 조수간만의 차가 훨씬 작은 탓으로 실트질 점토층은 더욱 연약하며 그 두께는 약 20 m에 이른다. 이 점토층 아래에는 얇은 두께의 자갈층과 풍화암층이 존재한다.

(c) 남해안 연안

남해안에서는 중력 작용에 의해 퇴적되었다고 추정되는 자갈 및 전석층이 풍화암층 위에 놓이고 그 위에 실트질 점토층이 퇴적되어 있다. 이러한 지층 구조는 부산에서 마산, 남해, 여수에 이르기까지 거의 공통적이다. 실트질 점토층의 두께는 부산항에서는 15 m, 마산·여수 등지에서는 대략 10 m로 조사되었으며 자갈 및 전석층의 두께는 최대치가 2~3 m에 지나지 않는다.

(d) 남해안 하구

낙동강 하구와 광양만(섬진강 하구)의 지층 구조는 제철소 입지 선정을 위해 광범위하게 조사되었다. 이 두 하구의 지층 구조의 특징은 약 10 m 두께의 실트질 점토층 위에 10~20 m 두께의 느슨한 모래층(세사)이 퇴적되어 있다. 특히 낙동강 하구는 실트질 점토층이 퇴적되기 이전에 상당히 깊은 모래층(최대 60 m)이 존재하고 있다. 이와 같이 점토층이 모래층 사이에 샌드위치처럼 끼워서 형성된 것이 우리나라 지층 구조의 특징이다.

〈표 14.5〉 우리나라 여러 지역의 해성점토의 물리적 특성

구분 위치	W _n (%) 자연함수비	W _L (%) 액성한계	PI(%) 소성지수	e 간극비	< 2 μ m (%)	통일 분류
부산항	58 ~ 84	58 ~ 64	10 ~ 58	0.76 ~ 2.85	< 45	CH, OH
마산항	42 ~ 78	31 ~ 52	11 ~ 25	1.36 ~ 1.82	< 15	CL
마산 귀곡리	101 ~ 148	107 ~ 130	58 ~ 82	2.81 ~ 3.48	12 ~ 45	CH, OH
여수	84 ~ 111	74 ~ 97	31 ~ 65	2.47 ~ 2.99	15 ~ 30	CH, OH
속초항	83 ~ 155	62 ~ 145	29 ~ 95	2.88 ~ 3.89	10 ~ 37	CH, OH
낙동강 하구	27 ~ 55	32 ~ 53	19 ~ 27	0.75 ~ 1.45	20 ~ 35	CL
반월	24.1 ~ 57.1	27.2 ~ 45.2	11.0 ~ 25.7	1.28 ~ 1.84	-	CL
광양	18.0 ~ 92.2	22.3 ~ 87.8	8.6 ~ 63.6	0.58 ~ 3.02	-	CH
영산강 하구	47.1 ~ 68.7	32.4 ~ 55.6	16.6 ~ 2.23	1.45 ~ 2.23	-	CH, OH
명주	64 ~ 226	144 ~ 150	3.8 ~ 5.04	3.8 ~ 5.04	-	OH, CH

(나) 내륙지방

내륙지방의 연약지반은 공업단지 또는 도로 개설을 목적으로 시추조사와 실제 시공을 함에 따라 분포와 특징이 점차로 밝혀져 왔다. 우리나라의 대규모 공업단지는 울산·포항·여수·인천 등 거의 모두 연안에 분포되어 있으므로 지층 구조는 각 지역의 연안의 것과 비슷하나 다만, 부근의 하천 범람이나 토지 확장을 위한 매립 등으로 실트질 점토층에 자갈모래 등 불균질한 조립의 토층이 추가되어 있을 뿐이다. 연안의 점토층은 내륙으로 깊숙이 침입되어 있는 곳이 많다. 예를 들면 김해평야 일대는 범람으로 형성되었다고 추정되는 ML, SP, SM 등의 지표층이 상당한 두께로 존재하나 그 아래에는 연약한 해성점토층이 계속되어 있어서 남해고속도로와 김해 비행장 건설 등을 위한 연약지반처리에 많은 어려움을 경험한 바 있다. 군산에서 익산에 이르는 평탄한 내륙 지방에도 실트질 점토층이 넓게 분포되어 있다. 포항, 울산 등 내륙쪽의 지층 구조가 표층을 제외하고는 연안의 것과 비슷한 것을 보면 여기도 해성점토층이 침입되어 있는 것으로 추측된다. 경남 창원에서 가까운 진영 일대에서도 연약지층이 상당히 넓게 분포되어 있다. 내륙 지방에서의 해성점토층의 존재는 점토층의 균질성, 조개껍질의 발견 등으로 쉽게 판별할 수 있다. 한편, 대하천의 하류 부근에는 그 유역을 따라 연약지반이 비교적 넓게 분포되어 있는 곳이 많다. 예를 들면, 한강 유역의 범람으로 형성되었다고 추정되는 서울지방의 연약한 충적층은 용산을 지나 서울역까지 분포되어 있다. 하천 범람으로 인한 연약지층은 깊이에 따라 층상을 이루고 있는 것이 보통이다.

14.3 흙쌓기 시 공학적인 문제점

연약지반에서 흙쌓기 시의 문제는 파괴에 대한 안정성 및 과도한 침하 또는 변형으로 대별되므로 설계 및 시공 시에는 제체의 안정 및 침하에 대한 검토와 주변 환경에 미치는 영향을 검토해야 한다. 연약지반 상에 흙쌓기를 하는 경우 연약지반 두께, 특성 등에 따라 안정적인 시공이 이루어 질 수 있도록 쌓기 속도를 정해야 한다.

연약지반 위에 쌓기의 설계 당시에는 주어진 지반조건 및 배수조건과 관련된 설계정수들을 정확히 추정하는 것이 어려우므로 실제 시공 시 반드시 침하 및 안정성을 확인하도록 계측기 설치 및 관리 방안을 강구해야 한다.

연약지반에서 흙쌓기 시의 공학적인 문제점은 아래와 같다.

- (1) 기초지반의 전단파괴에 따른 제체 안정문제
- (2) 과도한 침하에 따른 제체변형, 구조물 접촉부 부등침하, 장기간에 걸친 잔류침하 등의 침하문제
- (3) 흙쌓기 및 편재하중에 의한 주변 지반 및 확폭 흙쌓기 구간, 구조물 등의 측방변형 발생문제
- (4) 지반의 불균질 및 이방성에 따른 설계의 불확실성 문제 등이 있다.

(1) 안정 문제

(가) 점성토 지반

연약지반 상에 급속히 흙을 쌓으면 지반의 측방 변형이 증가하여 활동 파괴가 발생된다. 일단 활동이 발생하면 주변 지반이 용기되고, 그 영향 범위는 20~70m에 이르는 경우도 있다. 또한 활동을 발생시킨 지반 내의 점성토는 크게 교란되어 강도가 저하되기 때문에 주변 부를 포함한 복구에 많은 시간과 경비를 요하게 된다.

따라서 연약지반 대책은 제체의 안정 확보를 충분히 고려한 완속 흙쌓기 시공에 의해 지반강도의 증가를 유도하면서 흙쌓기 하는 것을 원칙으로 한다. 또 완속 흙쌓기 시공이 불가한 경우의 대책공법은 시공성 및 경제성 등을 고려하여 볼 때 압성토 공법이 가장 유리하나 구체적인 공법은 현장여건을 고려하여 결정해야 하며, 안정상 특히 문제가 되는 지반은 아래와 같다.

- (a) 연약층이 경사진 경우
- (b) 이탄층 아래 예민한 점토층이 존재하는 경우
- (c) 흐트러질 때 강도저하가 현저한 점토층인 경우

(나) 사질지반

느슨한 모래나 실트와 같은 포화된 사질지반이 지진·진동 등의 동하중을 받으면 비배수

상태에서 순간적으로 체적이 감소되어 간극수압이 증대됨으로써 유효응력이 zero(0)가 되는 경우 액상화 현상이 발생되므로 액상화에 대한 검토가 필요하다. 단 아래와 같은 지반은 액상화 검토를 생략할 수 있다.

- (a) 지하수위 상부 지반
- (b) 주상도 상의 표준관입저항치(N)가 20 이상인 지반
- (c) 대상 지반심도가 20 m 이상인 지반
- (d) 소성지수(PI)가 10 이상이고, 점토 성분이 20 % 이상인 지반
- (e) 세립토 함유량이 35 % 이상인 경우
- (f) 상대밀도가 80 % 이상인 지반

(2) 침하의 문제

연약지반 상의 흙쌓기에서는 침하에 의한 흙쌓기 양의 증가, 제체의 상단 폭원 부족, 교대 접속부의 단차, 횡단구조물의 침하 문제가 발생할 수 있다. 따라서 침하량이 큰 구간에서는 제체 폭의 여유를 확보하고, 구조물 접속부나 횡단구조물부에서는 선행하중을 가하여 사전에 침하를 촉진시키는 것이 효과적인 방법이다.

일반적으로 기초지반이 모래인 경우는 시공 기간에 비해 침하 기간이 짧은 즉시침하가 주로 발생되기 때문에 시공 중에 침하가 거의 완료되나, 점성토의 경우는 즉시침하보다 압밀침하량이 훨씬 크고 장기간에 걸쳐 발생되어 많은 문제점이 야기되므로 공사 기간이 충분하지 못한 경우에는 지반대책공의 검토가 필요하다. 또한 흙쌓기 높이가 낮은 곳은 흙쌓기 하중보다 교통하중의 영향이 커서 공용 후 부등침하나 변형이 발생될 수 있으므로 낮은 흙쌓기 구간에서는 교통하중의 영향을 충분히 고려하여 침하량 계산을 수행해야 한다.

(3) 측방변형의 문제

도로 흙쌓기는 띠 모양이므로 비배수전단에 의한 측방변형이 발생한다. 지반의 변형에 의한 문제는 흙쌓기의 경사 끝에 구조물이 근접하는 경우, 교대 배면 흙쌓기의 경우 및 기존 노선에 확폭 흙쌓기를 시공하는 경우 등에 주로 발생된다.

(가) 주변 지반 및 구조물의 변형

연약지반 상에 흙쌓기 시공 시에는 흙쌓기 하중에 의해 측방변형이 발생되어 주변의 눈받이나 민가 등에 피해를 줄 우려가 있으며, 교대나 옹벽과 같은 구조물에서도 배면 흙쌓기가

하중으로 작용하여 소성변형을 일으켜 측방유동에 의한 구조물에 피해를 발생시킬 수 있다.

(나) 확폭 흠쌓기

연약지반에 흠쌓기를 확폭하면 이에 따른 침하로 기존 흠쌓기부가 확폭 흠쌓기 측으로 기울어 침하한다. 확폭 흠쌓기에서는 기존 흠쌓기부의 노면에 부등침하가 발생하는 경우가 많다. 반면, 기존 흠쌓기 하중의 압밀로 주변 지반의 강도와 변형 특성이 개선될 때도 있기 때문에 과거 자료를 유효하게 활용한 조사, 설계가 이루어져야 한다.

(4) 설계의 불확실성에 따른 문제와 동태 관측

연약지반 상에 제체를 시공할 경우에는 일반적인 경우보다도 상세한 토질조사를 수행 하고, 그 결과에 근거하여 면밀한 설계를 하는 일이 중요하다. 그럼에도 불구하고 설계 시에 예측했던 구조물이나 기초지반의 거동이 실제의 거동과 일치하지 않는 경우가 있으므로 공사 중에 구조물이나 지반의 과대한 변형이나 파괴가 발생하지 않도록 지속적인 동태관측이 필요하다.

14.4 흠쌓기 설계 및 시공 단계별 착안 사항

연약지반에 있어서 흠쌓기의 설계 및 시공은 공사의 흐름을 충분히 이해하고 각 단계에서 필요한 검토를 실시하도록 한다.

설계 및 시공의 각 단계에서의 검토 항목과 착안점은 아래와 같고, 설계 및 시공 시 이들을 충분히 고려해야 한다.

(1) 조사단계

조사는 연약지반 조건을 고려하여 최적의 설계 및 시공을 위해 수행하며, 예비조사 및 본 조사의 단계별 조사계획을 통해 해당 지역의 지반조건을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 조사 단계에서의 착안사항은 아래와 같다.

- ① 조사의 목적을 명확히 인식하기 위해 연약지반 상에 설치되는 구조물의 특성을 정확히 파악해야 한다.
- ② 설계 시 필요한 지반정수가 무엇인지 파악하고, 어떤 조사방법에 의해 획득이 가능한지 파악해야 한다.

- ③ 해당 지역에 대한 기존의 각종 자료를 충분히 활용하여 조사의 효율을 극대화 할 수 있는 합리적인 조사 계획을 수립해야 한다.
- ④ 설계, 시공의 진행단계에 따라 일관성을 가지고 필요한 지반정보를 획득할 수 있도록 단계별 조사 계획을 수립해야 한다.

(2) 설계단계

(가) 개략설계

개략설계는 노선 선정 전의 실시계획 확정을 위해 하는 것이며, 이 단계에서 개략 공사비 및 공정이 정해진다. 연약지반 대책의 기본은 대부분 이 시기에 정해지기 때문에 충분한 검토가 필요하며, 개략설계 단계에서의 착안점은 아래와 같다.

- (a) 대책공법의 선정에서 압성토 공법은 확실하고 신뢰성이 높은 공법이며, 용지비가 대단히 고가인 지역 이외에서는 경제적으로도 유리할 때가 많다. 또 용지 폭을 넓게 확보함으로써 환경시설대나 공사용 도로, 장래의 확장부지 등으로 이용할 수 있다. 압성토 폭은 제체 높이의 2배, 높이는 제체높이 1/3 정도를 기준으로 하여 해석 결과에 따라 수정하는 것이 좋다.
- (b) 잔류 침하를 줄이는 방법으로는 흠쌓기 완료 후의 충분한 방치 기간을 확보하는 것이 가장 효과적이므로 공사의 조기 발주, 흠쌓기 완료에서 공용개시까지의 충분한 방치 기간의 확보, 임시 포장의 공용 등 공정면에서의 충분한 배려가 필요하다.
- (c) 연약지반에서 교대의 측방유동에 관한 실태조사결과에 따르면, 연약지반에서 교대의 배면 제체에 의한 측방유동 방지대책으로서 충분한 선행재하(시공 높이 α , 방치기간 6개월 이상)가 효과적이다. 따라서 연약지반에서의 교대의 계획 시에는 경제성을 고려해서 선행재하가 가능한 교대 위치를 설정함과 동시에 선행재하를 하기 위한 충분한 공사 기간을 확보하도록 노력하는 것이 중요하다.

(나) 상세설계

- (a) 설계의 기본개념은 제체의 안정정보를 목표로 「안정검토」를 시행하여 흠쌓기에 의한 기초지반의 활동 파괴에 대한 안정성을 확보한 후에 「침하검토」를 한다.
- (b) 필요 시 대책공법은 공용후의 잔류침하(장기침하)가 허용범위 이내가 될 수 있도록 공법을 검토한다.

(3) 시공단계

(가) 흙쌓기

- (a) 시공에 있어서는 동태 관측이 중요하므로 계측자료로 지반의 거동을 파악하여 안정 및 침하를 관리한다. 이 단계에서의 설계 예측 침하량은 하나의 표준을 나타내는 것이므로 동태 관측 결과에 따라 시공법을 수정해야 한다.
- (b) 동태 관측에서 얻어진 침하자료는 흙쌓기 양의 확인이나 잔류침하의 예측에 사용되지만, 특히 잔류침하량이 큰 경우에는 관리단계에 있어 보수 계획의 기초 자료로 사용된다. 이 때문에 계측기의 설치 위치는 중앙분리대 등 장기 관측이 가능한 위치에 설치하고 관측 자료 및 기준점을 확실하게 준공 후에 유지관리 부서로 인계한다.

(나) 포장

과거의 경험에 의하면 침하에 의한 포장 보수 행위는 공용 후 5년 정도까지인 것이 많다. 따라서 큰 잔류침하가 예상되는 경우는 가능한 제체를 장기간 방치 한 후에 포장을 시공하던가, 임시포장으로 공용하여 침하가 거의 안정된 시점에서 수선을 하여 소정의 포장 구조로 하는 것이 좋다.

(4) 유지관리단계

장기침하에 따라 유지관리 단계에서 다양한 보수 행위가 필요하게 되기 때문에, 건설 시에 유지 보수가 용이한 포장공법을 반영하는 것이 중요하다. 또 시공으로부터 인계된 침하 계측 자료 등의 자료는 추적조사 결과에 따라 적절히 수정할 필요가 있다.

14.5 연약지반의 지반조사

14.5.1 조사 방법

(1) 예비조사

예비조사는 노선결정의 중요 항목으로서 연약지반의 규모와 정도를 파악하는 것을 목적으로 한다.

예비조사 단계에서는 보링, 사운딩 등의 현지조사 실시에 어려움이 따르므로 항공사진이나 지형도 등으로 지형을 판독하여 연약지반 유무를 파악하고, 재해 자료 및 시공 실적 등을 수집·정리한다. 이 결과와 현지답사의 결과로 지형지질도 등을 정리하고, 연약지반의 존재와 그 규모를 추정한다.

일반적으로 연약지반은 아래와 같은 곳에 분포할 가능성이 많다.

① 주변의 지형을 관측할 때 지반고가 가장 낮은 곳

② 지표면 경사가 적은 평탄한 곳

또한, 연약지반으로서 특히 조건이 나쁜 곳은 아래와 같은 경우로 사운딩을 실시하여 조기에 연약지반의 규모나 정도를 파악하여 노선선정에 활용하는 것이 중요하다.

① 삼각지, 습곡, 임해 매립지 등 연약층이 두껍게 퇴적된 곳. 특히, 연약층 두께가 10 m 이상으로 하부에 해성점토층이 두껍게 퇴적된 곳

② 연약층의 기반이 크게 경사진 곳

③ 인접한 시설이나 구조물 등에 중대한 영향을 주는 곳

(2) 개략조사

개략조사는 노선의 선정과 개략의 대책공법을 검토하기 위한 기본정보 획득을 목적으로 실시한다.

개략조사는 개략의 연약지반대책공법과 도로 노선을 비교·검토하기 위한 기본정보를 얻기 위해 실시하며, 개략조사 단계에 있어서 착안점은 아래와 같다.

① 대상이 되는 계획노선 지역의 기존 자료를 많이 수집한다. 수집할 자료의 종류는 예비조사 단계와 거의 같다.

② 지반조사는 계획단계의 조사와 노선선정의 검토결과를 토대로 실시한다. 지반조사는 안정

이 문제되는 석호성 습지(潟湖性濕地), 익곡, 매설곡(埋漑谷), 액상화 이력이 있는 곳 등을 우선으로 시추조사, 사운드, 토질시험 등을 실시한다.

(3) 상세조사

상세조사는 실시설계를 수행하기 위해 연약지반의 공학적 특성, 층 두께, 지하수위 등의 상세한 정보를 파악하는 것을 목적으로 실시한다. 특히, 중간 배수층의 유무, 기반의 경사상황, 피압지하수의 유무 등의 파악이 중요하다.

(가) 착안점

- (a) 연약층을 구성하는 지층은 균일하지 않고, 위치나 깊이에 따라 변하는 경우가 많기 때문에 처음에 사운드(전기식 정적콘관입시험, 네덜란드식 이중관 콘관입시험, 스웨덴식 사운드시험 등)으로 가능한 한 전면적인 조사를 실시한 후 대표적인 지점에서 시추조사를 시행하고 샘플을 채취하여 토질시험을 실시한다.
- (b) 시추조사 시 채취한 시료를 상세히 관찰하여 토성도에 기입한다. 특히 중간 배수층의 식별은 중요하며, 사운드 조사 결과와 대비하여 신중하게 파악해야 한다.
- (c) 기반이 현저하게 경사진 경우는 미끄럼 파괴가 발생할 위험성이 크다. 따라서 주변의 지형여건상 뚜렷한 기반의 경사가 예상되는 경우에는 사운드 및 시추조사를 주체로 기반의 경사 상황을 파악해야 한다.
- (d) 피압지하수층은 대책공의 설계, 시공에 큰 영향을 미친다. 또한 광역 지반 침하에 관한 검토가 필요하다.
- (e) 장기침하가 문제되는 지반을 식별하기 위해서는 연약층의 최대 배수거리, 중간배수층의 유무, 압밀계수(C_v), 압밀항복응력(P_c)과 흩쌓기 후 응력관계, 자연함수비(W_N) 등을 파악할 필요가 있다.
- (f) 압밀변형해석을 하는 경우 현장 조건에 부합되는 해석이 가능하도록 배수조건에 따른 삼축압축시험을 실시할 필요가 있다.

(나) 조사기준

- (a) 연약지반 예상지역에서 핸드오거보링은 200 m 간격 기준으로 현지 여건을 감안하여 시행한다.
- (b) 단면 변화 지점 및 지질 상태가 급변하는 지점에 대해서는 추가로 핸드오거보링을

실시한다.

- (c) 핸드오거 실시결과 연약지반이 발견되면 연약지반 연장이 200 m 이상의 경우 피에조 콘관입시험을 100 m간격, 피에조콘관입시험 + 간극수압소산시험을 200 m 간격으로 시행한다.
- (d) 상기 결과에 의거 연약지반 분포, 토질분류 등을 파악 후 그 결과를 이용하여 시추조사를 200 m 간격으로 피에조콘관입시험 위치에 시행한다.
- (f) 심도 5 m 및 층이 바뀔 때마다 자연시료를 채취한다.
- (g) 채취한 시료로 비중, 함수량, 삼축압축, 압밀시험 등의 토성시험 및 역학시험을 시행하여 상호 검증을 통해 지반의 안정검토 및 처리공법 등의 대책을 강구한다.
- (h) 또한, 400 m 간격으로 현장 베인시험을 시행하여 연약지반의 비배수강도에 대한 신뢰도를 확보하도록 한다.
- (i) 베인시험은 Borhole, Field vane으로 심도 5 m 및 층이 바뀔 때마다 연속적으로 수행해야 하며, 최소한 불교란 시료가 채취된 심도에 대해서는 반드시 수행하여 그 결과에 대한 비교분석이 이루어질 수 있도록 해야 한다.
- (j) 단, 연약지반의 연장이 200 m 이내 존재하는 경우는 시추조사를 현장여건 고려하여 시행하고, 표준관입시험 및 채취된 불교란 시료로 실내시험을 시행하여 지반의 안정검토 및 처리공법 등의 대책을 활용한다.

〈표 14.6〉 연약지반 조사 빈도

조사 항목	조사 빈도	심 도	비 고
핸드오거보링	300 m	3 ~ 5 m	일반구간
핸드오거보링	200 m	3 ~ 5 m	연약지반
피에조콘관입시험	100 m	필요깊이까지	
시추조사	200 m	지지층(풍화암)확인	콘관입시험 위치
베인시험	400 m	불교란시료 채취심도	시추조사위치 Borehole, Field vane식
간극수압소산시험	20 m (1회/CPTu 2회)	불교란시료 채취심도	콘관입시험과 병행 시추조사 위치

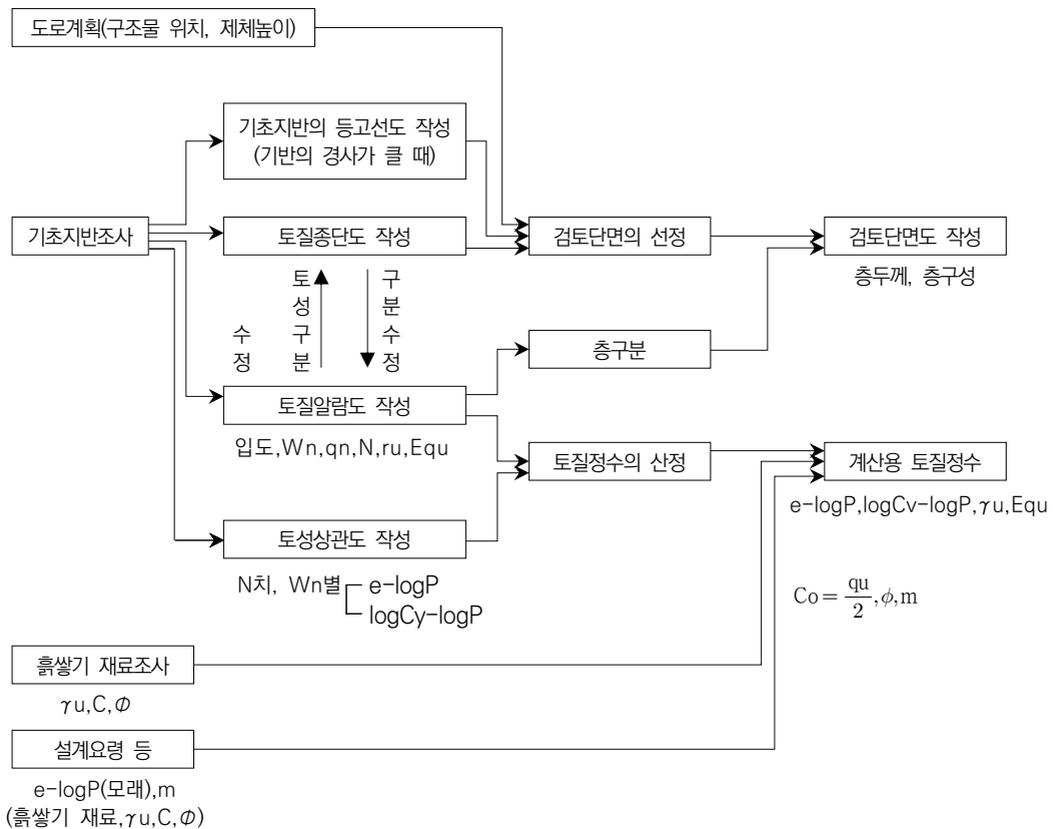
14.5.2 조사 결과의 정리

지반조사 결과를 종합적으로 판단하여 토층의 구분은 물론 지층 종단도, 토성 일람도 등으로 정리한다.

(1) 조사결과 정리

조사 결과의 정리 시 사운드링 등의 원위치시험, 시추주상도 및 토질시험 등으로 분류하여 각 조사지점마다 정리하고, 지층 종단도를 작성한다. 그리고 각각의 조사지점별 조사 결과로부터 종합적으로 토층을 구분하고 안정과 침하를 검토하기 위해 토질정수를 결정한다. 또한 토질정수의 결정에서는 자연함수비에 착안하여 토질특성을 검토하는 것이 효과적이다.

그림 14.1은 조사 결과의 정리 순서를 나타낸 것이다.



〈그림 14.1〉 조사 결과의 정리 순서

(2) 토질시험 결과 일람도 작성

설계 조건인 토층 구분과 토질정수를 결정하기 위해, 토질시험 결과를 깊이 방향으로 정리하여 토질시험결과 일람도(주상도)를 작성해 종합적으로 판단한다. 토질시험 결과 일람도에 기재한 내용은 표 14.7에 따른다.

〈표 14.7〉 토질시험 결과 일람도의 기재사항

기 재 사 항		사 용 목 적	주 의 사 항
(1) 토질주상도		층 구분의 판단	육안 판정으로 층을 구분하지만, 층 구분 시에는 얇은 모래층까지 주의하여 기입할 필요가 있다.
물리적 특성	(2) 입도	층 구분, 배수층의 판단 자료	당해 지점의 대표적인 심도의 입도시험 결과를 기입한다.
	(3) 자연함수비 콘시스턴시 [액성한계(LL), 소성한계(PL)]	층 구분 매층의 W_n 의 결정(다른 토질정수를 결정할 때의 요소로 사용)	피트층이 포함된 경우처럼 함수비의 폭이 큰 경우, 일률적으로 목표를 정하지 말고 고함수 부분의 축적을 줄여서 보기 쉽게 한다.
	(4) 단위체적중량(γ_t)	층 구분의 판단 자료, 매 층의 γ_t 의 결정	평균치가 아닌 시료마다 값을 기입하는 것이 바람직하다.
역학적 특성	(5) 일축압축강도(q_u)	층 구분의 판단자료 $C_u=q_u/2$ 로 매 층의 전단강도를 결정 강도증가를 산정 시 이용	평균치가 아닌 매 시료의 값을 기입하고, 아주 낮은 강도를 보일 경우는 시료의 교란 등에 대해 점검한다. 시험종류별 강도정수가 차이가 발생되므로 현장여건을 고려하여 적절한 강도정수를 선택하여 이용
	(6) 삼축압축 시 강도정수 (C, ϕ) 파괴 시 변형(ϵ_f)	층 구분의 판단 자료 활동에 대한 안정 검토 강도증가를 산정 시 이용	
	(7) 직접전단 시 강도정수 (C, ϕ) 파괴 시 변형(ϵ_f)	층 구분의 판단 자료 활동에 대한 안정 검토	
압밀 특성	(8) 압밀계수(C_v) 체적압축계수(mv) e-logP곡선 압축지수(C_c) 간극비(e_0) 선행압밀하중(P_c) 유효상재하중(P_0)	압밀특성 파악 지반이력판정(OCR) 압밀침하량 검토 지반의 강도 증가의 추정	초기간극비와 선행압밀하중을 유의하여 산정
(9) N치		층 구분의 판단자료 모래층의 ϕ , e-logP곡선의 결정	기반, 중간 모래층에 특히 주의해서 기입한다.

(3) 중간 배수층의 확인

배수층은 두께 약 50 mm 이상의 모래층을 대상으로 하며, 또 두께 150 mm의 모래층 토질에서도 지표면에서 10 m 이내에 있는 경우 배수층으로서 유효하다는 보고도 있었다.

배수층의 유무는 전기식 정적콘관입시험 등으로 확인할 수 있다. 시추조사로 확인이 어려운 모래층인 경우에는 전기식 정적콘을 이용한 간극수압 소산시험을 하면 배수층의 구분이 보다 명확해진다. 단, 모래층이 피압지하수를 갖는 경우는 배수층이 될 수 없으므로 소산시험 등으로 피압지하수 유무를 확인할 필요가 있다.

(4) 검토지점의 선정

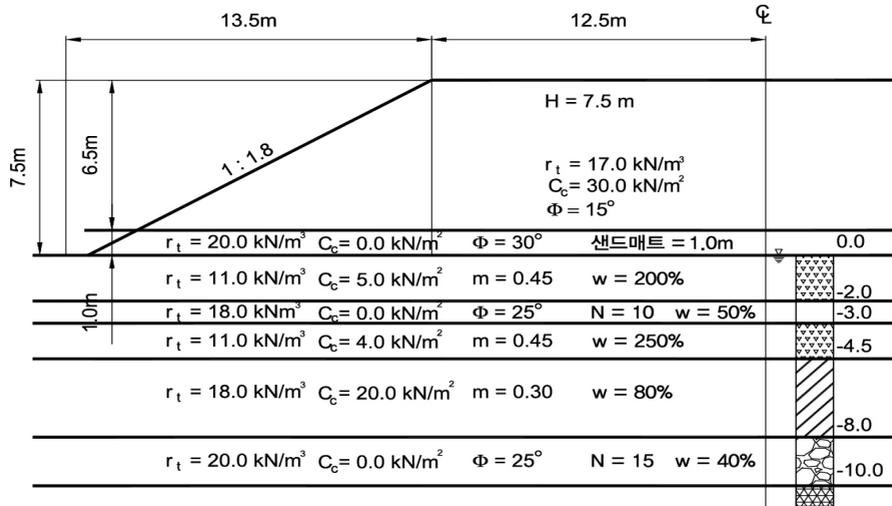
검토지점은 토층 구성, 층 두께, 기반의 상황(경사 등), 제체 높이 등에 따라서 대표적인 지점을 선정한다. 침하 및 안정에 대한 검토는 선정된 위치마다 하지는 않고 대책공법의 구분을 고려해서 몇 개의 블록으로 나누어 대표적인 지점에서 한다.

(5) 검토단면도 작성

검토지점에서는 지층단면도, 토성일람도 및 토질정수 등을 이용하여 검토단면도를 작성한다.

〈표 14.8〉 검토단면도 기재 사항

		안정 검토	침하 검토	비고
기반의 경사 小	흙쌓기부	흙쌓기 형상, 단위체적중량(γ) 점착력(c), 전단저항각(ϕ)	흙쌓기 형상 단위체적중량(γ)	지표, 기반, 층 경계는 수평인지 검토
	원지반	지층 횡(중)단면도 층두께, 층구성 단위체적중량(γ) 비배수전단강도(C_u) 강도증가율(m), 전단저항각(ϕ)	지층주상도 층 두께, 층 구성 단위체적중량(γ) N치	
기반의 경사 大	흙쌓기부	상동	흙쌓기 형상 단위체적중량(γ)	기반의 경사, 층 두께의 변화를 고려하여 검토
	원지반	상동	지층 횡(중)단면도 층 두께, 층 구성	



〈그림 14.2〉 검토 단면도의 작성 예

14.5.3 연약지반 특성분석

연약지반의 침하특성 파악을 위해 토성시험 및 압밀시험 결과로부터 선행압밀하중(σ_{vp}'), 압축 및 재압축지수(C_c , C_r), 초기간극비(e_o), 압밀계수(c_v , c_h) 등을 분석해야 한다.

(1) 침하량

연약지반의 즉시침하는 매우 작아서 무시하고 압밀침하는 간극수압의 소산으로 발생하는 1차 압밀침하량과 토립자의 재배치에 의한 2차 압밀침하량으로 구분하여 계산한다. 침하량 계산방법은 현장 계측값과는 다소의 차이가 있을 수 있으므로 시공 시 계측관리를 통하여 압밀침하를 지속적인 검층 확인이 필요하며, 허용잔류침하량은 공사 목적물에 따라 지반개량 공법의 수량 및 지반의 안정, 공사기간에 큰 영향을 미치므로 지반의 특성 및 사용목적, 중요도, 공사기간, 경제성 등을 고려하여 결정해야 한다.

(2) 압밀시간

압밀시간은 지반개량공사에 있어서 공사기간을 결정짓는 중요한 요소로 작용하며 이를 예측하기 위해서는 시간에 따른 압밀도를 면밀히 파악해야 한다.

(3) 연직배수공법의 압밀이론

연직배수공법의 적용은 Barron의 압밀이론식과 Hansbo, Youshikuni, Onoue 등의 압밀 관련 이론식을 상호 보완하여 적용한다. 주어진 기간 내에 소요의 압밀도를 달성할 수 있도록 배수재 간격을 적정하게 설계해야 한다.

(4) 전단강도 특성

전단강도 특성 분석은 전응력해석과 유효응력해석으로 구분될 수 있으며, 전응력 해석 시에는 비배수전단강도를 이용하고, 유효응력 해석 시에는 간극수압을 추정하여 해석해야 한다. 연약지반에서는 성토 직후가 가장 위험한 경우이므로 이때를 대상으로 안정성 검토를 수행해야 한다.

(5) 압밀에 의한 강도증가율

압밀에 의한 강도증가율을 산정하는 방법에는 비압밀비배수(UU : Unconsolidated Undrained), 삼축압축시험 및 일축압축시험 결과의 선형회귀분석에 의한 방법, 압밀비배수(CU : Consolidated Undrained) 삼축압축시험, 경험식을 이용하는 방법 등이 있으므로 이들을 종합하여 사용한다.

(6) 토질정수

토질정수의 선정에 있어서는 토질시험 결과를 그대로 이용하는 것이 아니라 토질시험의 타당성을 판단하고 부적당하다고 생각되는 시험 결과는 제외 혹은 보정하여 토질정수를 결정한다. 토질시험 값의 타당성 판단은 아래의 사항을 참고한다. 단, 이것은 주로 동일한 토질에 해당하는 것으로 토질이 다른 경우에는 주의를 요한다. 토질에 대한 판별은 시추 주상도의 관찰사항, 자연함수비, 밀도, 입도, 컨시스턴시 지수 등에 따라 판단한다.

① 단위체적중량(γ_t)은 보통 함수비가 높아지면 작아지는 경향을 보이므로 이러한 경향과 다를 때는 그 원인을 확실히 할 필요가 있다. 또 포화도를 계산하여 100%에 가까울 때는 일단 올바른 밀도를 얻을 수 있다고 판단해도 좋다. 이외는 반대로 지하수위 이하의 토층임에도 불구하고 포화도가 100%에 가깝지 않은 경우는 함수비, 단위체적중량(γ_t) 및 토립자의 밀도 등을 자세히 조사하고 값을 재검토 할 필요가 있다.

② 압축지수(C)는 함수비와 높은 상관성이 있는 것이 일반적이다.

- ③ 압밀계수(C_v)는 시료의 물리적 특성과 압밀 이력의 차이로 인한 압밀하중의 증가에 의해 변화하는 것과 변화하지 않는 것이 있다.
- ④ 일축압축강도는 시료 채취 및 시험시의 교란으로 인해 강도가 저하됐을 때에 파괴 변형률이 커지게 되어 변형계수가 작아지는(응력과 변형률 곡선이 완만해 짐) 경향이 있다. 또한, 일반적으로 심도가 깊은 부분의 일축압축강도는 커지지만 모래가 혼입되거나 부분적으로 건조 작용을 받은 경우는 다르다.
- ⑤ 압밀항복응력도 일반적으로는 깊이에 따라 커지며, 그렇지 않은 것은 시료의 교란 여부를 검토할 필요가 있다.

이상과 같은 검토의 결과에 따라 부적당하다고 생각되는 시험결과를 제외시키거나 보정하여 설계 토질정수를 결정해야 한다.

(가) 배수조건에 따른 강도정수

연약층의 안정 해석 시 사용되는 강도정수는 현장 여건을 표 14.9와 같이 고려하여 부합되는 배수조건으로 시험한 결과를 활용하여 강도정수를 선정해야 한다.

〈표 14.9〉 전단시험에 적용되는 배수조건과 현장조건

배수조건	직접전단시험	강도정수	현장조건과 결과이용
비압밀비배수시험 (UU시험)	급속시험	C_u, ϕ_u	포화된 점성토 지반에 흙쌓기 또는 구조물을 급속히 시공하는 경우, 시공 직후의 안전계산
압밀비배수시험 (CU시험)	압밀급속시험	C_{cu}, ϕ_{cu}	압밀에 의한 강도 증가 형태를 아는 경우, 점성토 지반에 프리로딩 공법으로 압밀하는 경우나 완속 시공하는 경우의 안전계산
압밀배수시험 (CD시험)	완속시험	C_d, ϕ_d	사질지반이나 층 사이 수압의 영향을 받지 않는 불포화 지반의 안전계산, 점성토 지반의 장기안정문제

(나) 연약층의 비배수전단강도

도로 흙쌓기와 같이 연약지반에 대규모 흙쌓기를 지반의 강도를 증가시키면서 완속으로 시공하는 경우, 흙쌓기가 소정의 높이에 도달하기까지 상당한 기간이 소요되고 그 사이에 진행되는 압밀로 인해 지반의 강도가 증가한다. 따라서 흙쌓기 전 비배수전단강도를 이용하여 안정검토를 하면 안전 측에 있기는 하지만 비경제적이다. 그러므로 압밀에 의한 강도증가를 고려한 비배수전단강도를 설계에 이용하는 것이 타당하다. 일반적으로 비배수 전단강도는 아래 식으로 구한다.

(a) 압밀에 의한 강도증가를 고려하지 않는 경우의 비배수전단강도

압밀 전 비배수전단강도(c_{u0})는 다음 식에 의해 구하는 것을 표준으로 한다.

$$c_{u0} = \frac{q_u}{2} \quad (14.1)$$

여기서, q_u : 일축압축강도

(b) 압밀에 의한 강도증가를 고려한 경우의 비배수전단강도(c_u)

압밀에 의한 강도증가를 고려한 비배수전단강도(c_u)는 다음 식에 의해 구하는 것을 표준으로 한다.

$$\begin{aligned} p_t \leq p_c \text{ 일 경우} & \quad c_u = c_{u0} \\ p_t > p_c \text{ 일 경우} & \quad c_u = m \cdot p_t = m(p_0 + U \cdot \Delta p) \end{aligned} \quad (14.2)$$

여기서, p_0 : 흩쌓기 전 유효토피응력

p_c : $p_c = c_{u0}/m$ (그림 14.3 참조)

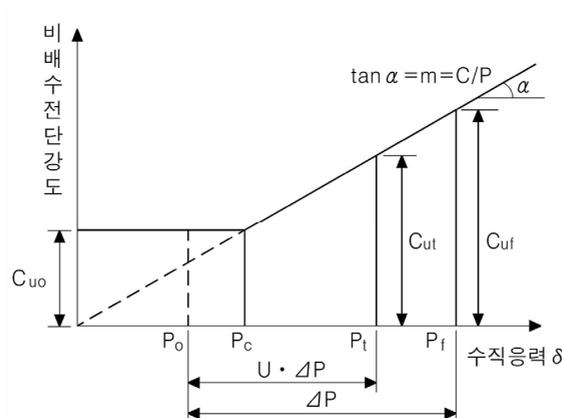
p_t : 검토 시점의 유효압밀응력($p_t = p_0 + U \cdot \Delta p$)

c_{u0} : 흩쌓기 전 지반의 비배수전단강도

Δp : 흩쌓기 하중에 의한 연직유효응력의 증가분

U : 검토시점의 평균압밀도(무차원)

m : 강도증가율(무차원)



〈그림 14.3〉 압밀에 의한 강도증가를 고려한 비배수전단강도

(c) 압밀도의 보정

이탄질 지반상의 높은 흩쌓기에 의한 하중증가율이 큰 경우 일반적인 경우보다도 강도증

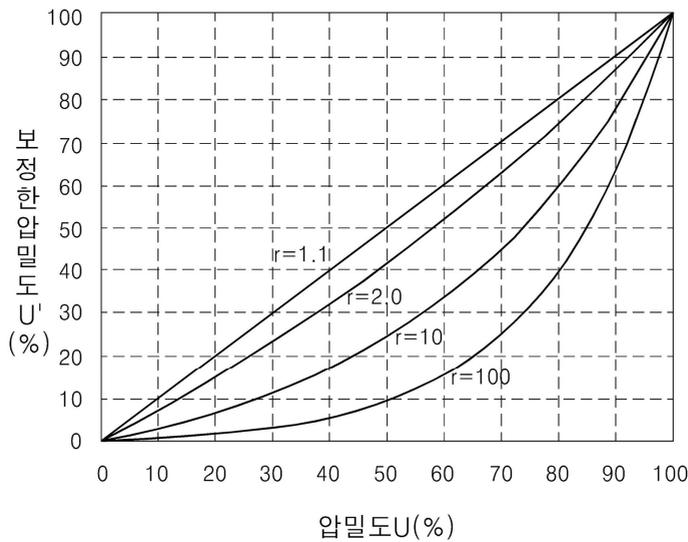
가가 늦기 때문에 압밀도가 과대평가 될 우려가 있다. 이러한 경우에는 다음 식에 의해 압밀도의 보정을 할 수 있다(그림 14.4)

$$U' = \frac{r^U - 1}{r - 1} \tag{14.3}$$

여기서, r : 하중증가율 $r = p_f/p_o$

p_o : 흠쌓기 전의 유효토피응력

p_f : 흠쌓기 하중에 의한 최종유효압밀압력



〈그림 14.4〉 압밀도의 보정

(다) 강도증가율

강도증가율(m)은 대상으로 하는 지반의 토질 등을 고려해서 표 14.10에 의해 결정할 수 있지만 아래와 같은 경우는 기존 사례, 시험 흠쌓기, 토질시험 등에서 확인하는 것이 바람직하다. 또한 강도증가율은 구속조건에 따라 크게 좌우되어 제체 중앙부의 천층부는 비교적 큰 값으로 나타나지만 심부 및 비탈끝 부근은 작은 값으로 나타나는 경향이 있기 때문에 주의해야한다.

- 계측이 용이한 완속 흠쌓기로 시공을 실시하는 경우
- 경사기반 상의 연약지반에 흠쌓기를 실시할 경우
- 예민비가 높은 점성토 지반에서 흠쌓기를 실시하는 경우

상기 이외의 경우는 다음의 방법에 의하여 강도증가율(m)을 구할 수도 있다.

(a) 소성지수를 이용하는 방법

$$m = \frac{C_u}{P} = 0.11 + 0.0037I_p \quad (14.4)$$

(b) 일축압축시험 이용 방법

$$C_u = C_{u0} + K \cdot Z \quad (14.5)$$

$$m = \frac{C_u}{P} = \frac{K}{r'} \quad (14.6)$$

(c) 삼축압축시험 이용 방법

$$m = \frac{C_u}{P} = \frac{\sin \phi_{cu}}{1 - \sin \phi_{cu}} \quad (14.7)$$

$$m = \frac{C_u}{P} = \frac{\sin \phi_{cu}}{1 + (2A_f - 1)\sin \phi_{cu}} \quad (14.8)$$

(d) 정지토압계수 이용 방법

$$m = \frac{C_u}{P} = \frac{[K_0 + A_f(1 - K_0)]\sin \phi_{cu}}{1 + (2A_f - 1)\sin \phi_{cu}} \quad (14.9)$$

(e) 액성한계 이용 방법

$$m = \frac{C_u}{P} = 0.45W_L(\%) \quad (14.10)$$

여기서, ϕ_{cu} 는 압밀 비배수 삼축압축시험에 의한 내부마찰각이다.

〈표 14.10〉 강도증가율의 범위

토질	강도증가율(m)
점성토	0.30 ~ 0.45
실트	0.25 ~ 0.40
유기질토 또는 이토	0.20 ~ 0.35
피트	0.35 ~ 0.50

토질 종류에 따른 강도증가율의 일반적인 범위는 표 14.10과 같고 물리시험(소성지수)에 의한 방법과 역학시험(삼축시험)에 의한 산출방법은 소성지수가 $30 \leq I_p \leq 60$ 범위에서 양호한 상관관계를 보인다. 그러나 소성지수 이용방법은 압축성이 큰 점성토에서 이용하는 값으로 국내 실트질 점성토에서는 적용이 곤란하므로 압밀비배수 삼축압축시험으로 강도증가율을 구하는 것이 합리적일 것이다.

14.6 제체의 안정 검토

14.6.1 안정 검토의 기본 개념

안정 계산은 안정 검토를 위한 하나의 수단이며, 많은 가정과 불확정 요소를 포함하고 있기 때문에, 설계에 있어서는 기존의 자료와 그 외의 조건을 추가하여 종합적으로 제체의 안정을 검토해야 하며, 시공 시에는 동태 관측에 따른 관리를 중시해야 한다.

연약지반 위에 시공된 제체의 안정을 확보하기 위해서는 일반적으로 흙쌓기에 의해 발생되는 기초지반의 활동 파괴에 대한 안정계산으로 얻어진 안전율로 평가하는 방법이 취해진다. 그러나 안정계산에 이용하는 모든 요소에는 많은 가정과 불확정 요소가 포함되어 있어 안전율은 토질조사 방법과 정도, 토질정수의 정리 및 안정계산의 방법 등에 따라 다르다. 따라서, 안정 검토가 안전율의 산출에 의해 종료됐다고 판단해서는 안 된다. 또한 안정 계산은 안정 검토를 위한 하나의 수단이라는 것을 항상 염두에 두고 기존의 자료 외의 조건을 참고로 한 종합적인 판단이 필요하다. 또한, 이와 같이 설계에 포함된 불확실성 때문에 설계시의 예측과 시공 시 실제 거동이 일치하지 않아 활동파괴를 일으켜 대대적인 설계 변경을 하게 되는 경우도 적지 않다. 따라서 시공에 있어서는 동태 관측에 따른 안정 관리를 중시함으로써 예측하지 못한 사태를 미연에 방지하는 데 힘쓰는 것이 중요하다.

14.6.2 안정 계산

안정 계산을 하는 경우의 활동면은 단일 활동원호로 하고, 계산식은 전 응력법에 따라 계산하는 것을 원칙으로 한다. 안정 설계를 한 경우의 활동 파괴에 대한 최소 안전율은 시공 중 1.1 ~ 1.2 정도로 관리하고, 공용 시 1.3 이상을 목표로 한다.

(1) 안정 계산 식

안정 계산은 전 응력에 따른 단일 활동원호법에 따르는 것을 원칙으로 한다. 먼저, 제체의 폭과 높이, 연약층의 깊이와 성층 상태 및 토질 등을 고려해서 파괴 시에 발생할 것으로 생각되는 수 개의 활동원을 가정한다. 이들 활동원 상에 있는 토괴를 그림 14.5와 같이 연직 축벽을 갖는 세 편으로 분할하여 토괴 전체의 활동파괴에 대한 안전율 F_s 는 다음 식으로 계산한다.

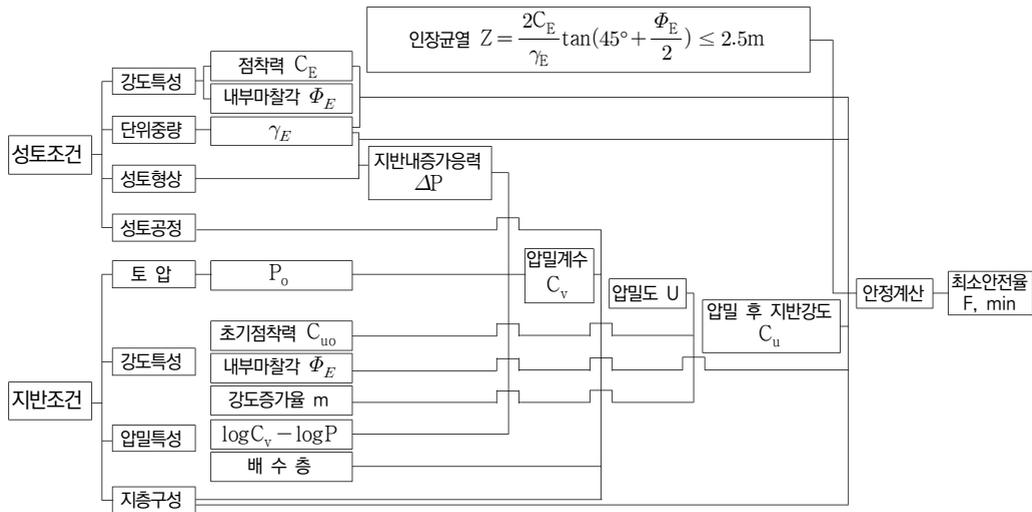
따라서 연약지반상의 흩쌓기는 지반의 강도 증가를 피하면서 서서히 시공하는 완속 시공을 하고, 동태 관측에 의해 충분한 안정관리를 하며, 안정계산에 있어서 안전율은 공용개시 시점에 기준안전율을 1.3을 확보 할 수 있도록 한다. 다만, 시공 시의 기준안전율은 1.2 정도를 설계목표로 하며, 각 조건별 기준안전율은 아래와 같다.

〈표 14.11〉 기준안전율

구 분	최소 안전율	참 조
공용 후	F.S > 1.3	지하수위 원지반 지표 포화
시공 중	F.S > 1.2	지하수위 원지반 지표 포화
지진 시	F.S > 1.1	실제 측정된 원지반 지하수위
단기	F.S > 1.0 ~ 1.1	1년 미만의 단기적인 비탈면의 안정성

(3) 안정 계산의 순서

안전 계산의 순서는 그림 14.6와 같다. 연약층의 토층 구분에 있어서 배수층의 판정은 압밀도의 계산 결과에 큰 영향을 주기 때문에 매우 중요하다. 그러나 어떠한 층이 배수층으로서



〈그림 14.6〉 안정 계산의 순서

역할을 할 것인가에 대해서는 판단하기 어렵기 때문에 주의가 필요하다. 특히, 렌즈 모양의 모래가 끼어있는 경우, 이것을 배수층이라고 판정할 것인가에 대해서는 휘일 샘플링에 따른 시료의 자세한 관찰이나 네덜란드식 이중관 콘관입시험 등을 이용한 전면적인 조사에 의한

모래층의 연속성을 확인하여 판단할 필요가 있다.

또한 안정 검토에 있어서 배수는 확실히 배수층이라고 판단될 수 있는 것으로는 두께 50 mm 이상의 연속성이 양호한 모래층을 판정의 기준으로 한다.

(4) 안정 계산에서의 유의사항

가. 아래에 제시된 지반은 안정상의 문제가 많기 때문에 특히 주의를 요한다.

(a) 연약층 아래의 기반이 경사져 있는 경우

연약층 아래의 기반이 경사진 경우 흠쌓기를 하는 경우, 연약층의 두꺼운 쪽의 침하가 많이 발생되어 활동도 그 방향으로 발생할 위험이 크다. 또한, 경사면의 지표수 유입으로 활동에 대한 저항력이 약화되고 부등침하 발생의 가능성이 크다. 이와 같은 지반에서의 안정검토방법은 아직 확립되어 있지 않지만 기반의 경사 정도에 따라 검토 구간 분할이 필요하고, 수직배수재에 의한 개량공법 시공 시에도 간격 및 심도의 조절 등을 고려할 필요가 있다. 과거의 파괴사례 중에서도 경사 기반 위에서의 파괴 사례가 특히 많아 신중한 검토를 필요로 한다.

설계 시에는 사운딩 조사 등에 의해 기반 경사의 상황을 충분히 파악하여 활동 파괴에 대해 가장 위험한 단면에 대한 안정 검토가 필요하다. 또 시공 시에 있어서 흠쌓기 시공순서는 항상 연약층의 깊은 방향에서 얇은 방향으로 시공하도록 하고, 지중변위계·경사계 등을 이용하여 안정관리를 하도록 한다.

(b) 강도 저하가 현저하고 강도 회복이 늦은 지반

표층에 피트층이 있으며, 그 바로 밑에 점성토층이 있는 지반에서는 설계안전율이 높아도 불안정하게 되는 경우가 많다. 일반적으로 이러한 유형의 지반에서 안정 설계를 하면 피트층과 점성토층의 경계를 통과하는 활동원의 안전율이 최소가 되지만, 실제로 활동이 발생하는 것은 그 밑의 점성토층인 경우가 많다. 이 점성토층은 $W_n \geq W_L$ 로 예민한 것이 많고, 이 점성토층의 강도가 떨어져서 파괴가 발생한다고 예측된다. 따라서 이와 같은 지반에서는 흠쌓기 초기에는 서서히 시공하여 측방변형이 가능한 한 발생하지 않도록 하여, 피트층의 강도를 충분히 증가시키고 점성토층의 강도저하를 막는 것이 중요하다.

또한 안정 검토 시에는 이탄층 바로 아래에 있는 점성토의 강도증가율은 하한 값에 가까운 값을 취하도록 한다. 특히 예민한 해성점성토는 지반처리에 따라 강도 저하가 현저하며, 강도 회복에 장시간을 필요로 하는 경우가 많기 때문에 특히 주의를 요한다.

(나) 제체 재료의 전단강도 및 단위체적중량은 안정 계산 결과에 미치는 영향이 크기 때문에 충분히 검토하여 적절한 값을 사용하도록 한다.

14.7 제체의 침하 검토

14.7.1 침하 검토의 기본 개념

연약지반 상에 있는 제체 시공 시에는 공용 후의 도로에 미칠 침하를 예측하여 계획, 설계 및 시공하는 것을 기본으로 하며, 침하 검토란 아래 항목에 대해서 검토하는 것을 말한다.

(1) 침하량 산정 시 고려사항

- ① 흙쌓기 하중 ② 포장 하중(노상+기층+표층)
- ③ 침하토 하중(침하 보충토) ④ 교통 하중 : 13 kN/m²

(2) 일반 제체부

- ① 침하토량 ② 토공 여분량(여성토) ③ 토공 폭원 여유

(3) 횡단 구조물

- ① 여분량 ② 단면 여유

(4) 포장 구조

침하 검토에서는 침하의 발생은 다음 식으로 고려하는 것을 원칙으로 한다.

$$S = S_i + S_c + S_s$$

여기서, S_i : 즉시 침하량, S_c : 압밀 침하량, S_s : 장기 침하량

14.7.2 침하량 예측의 문제점

연약지반 상에 흙쌓기 할 공용구간에서의 보수 실태 조사결과에 의하면, 연약지반 특유의 보수행위는 공용 후 수년 정도까지인 것이 많으며, 방치 기간을 충분히 취하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 즉, 공용 후 수년 정도 이후에는 침하 속도도 늦어지고, 노면의 마모·바퀴자국 패임 등으로 인한 통상의 덧씌우기로 거의 대처할 수 있다는 것을 말한다. 더욱이 적설 한랭지에 있어서는 스파이크 타이어, 체인 등의 사용에 따라 덧씌우기 주기가

보다 짧아지는 것을 생각한다면, 반대로 어느 정도의 침하는 계속돼도 침하에 의한 보수는 더욱 감소할 것이다. 이 같은 연약지반 특유의 보수 행위는 공용 후 수년 정도까지 있을 것을 생각하면 충분한 방치 기간의 확보, 잠정포장 공용 등이 효과적이라고 생각한다. 일반적으로 현장에서 계측에 의해 측정된 침하량과 설계 시 산정된 침하량은 상이하게 나타나므로 계측에 의한 안정 및 침하관리가 요구된다. 일반적으로 이러한 차이는 다음과 같은 이유로 판단된다.

첫째, 압밀시험법 상에 차이이다. 현장의 제체의 경우 2, 3차원 압밀 상태이나 실내시험은 1차원 압밀이고, 압밀링에 의한 마찰효과, 흙의 대표성 문제 등을 들 수 있다.

둘째, 침하량 산정에 적용된 변수의 차이이다. 즉 평균환산층후법으로 토층을 동일한 토층으로 평가하여 해석하기 때문에 그 차이가 발생한다.

셋째, 현장조건과의 불일치성이다. 현장조건은 균질한 토층이 아니고 Sand Seam이 협재되었을 수 있다. 또한 시험시료의 Sampling 지점에 대한 대표성 문제, 현장지하수와 실내 시험에 사용하는 물의 성분 차이, 시료의 응력해방에 따른 교란의 영향 등을 들 수 있다. 따라서, 일반적으로 정규압밀 점토의 경우 설계 침하량 보다 실측 침하량이 크게 산정되고, 과압밀점토의 경우는 설계침하량이 크게 산정되는 경향이 있다. 압밀속도는 실측 침하속도가 응력이력에 관계없이 설계 침하속도보다 크게 산정되는 경향이 있다.

14.7.3 잔류침하량

잔류침하량은 구조물의 사용목적, 중요도, 공사 기간, 지반의 특성, 포장 종류, 경제성 등을 고려하여 결정해야 하며, 현재 우리나라에서 도로 시공 중에 적용되는 기준은 대략 아래 표와 같다.

〈표 14.12〉 조건에 따른 허용 잔류침하량

조 건	허용 잔류침하량(mm)	비 고
포장공사 완료 후의 노면 요철	100	연약지반의 토질특성상 장기침하 발생가능
BOX CULVERT 시공 시의 더울림 시	300	
배수시설	150 ~ 300	

연약지반을 통과하는 도로는 포장의 종류, 잔류침하량의 크기 등에 따라서 다소의 차이점이 있다. 연성 포장의 경우에는 침하가 발생되면 아스팔트 등의 덧씌우기 공법 등으로 보수가 가능하다. 강성 포장의 경우에는 침하량이 커지면 치명적인 손상을 주므로 주의가 요망된다.

다. 도로의 경우 허용 침하량은 100 mm로 하나 최근에는 고품질의 도로 건설 등으로 허용 잔류침하량이 점점 감소하는 추세에 있다.

14.7.4 침하의 추정방법과 적용

연약지반의 침하량은 추정하는 시기에 따라 얻을 수 있는 정보량이나 요구되는 정도가 다르기 때문에 그 목적에 따라 추정 방법을 선택해서 이용할 필요가 있다. 또한 침하 계산에는 많은 가정이나 불확정 요소가 포함되어 있기 때문에 계산 침하량은 하나의 표준값이라 생각 하고 시공단계에서 동태 관측을 하여 예측값을 수정해 가는 것이 합리적이다.

〈표 14.13〉 침하 추정 방법의 적용

추정 목적		추정시기		추정 근거	추 정 방 법	적 용
		설계	시공			
일반 흙쌓기	침하량	○	○	토질조사 토질시험 동태관측	설계 시 : $S = S_i + S_c$ 시공 시 : 침하판에 의한 계측	• 침하량의 횡단분포는 그림 14.51 참조
	더 쌓기량		○	동태관측	$S = S_0 + \frac{t}{a+bt}$	• 포장에 인계할 때 토공계획높이 (P.H.E)를 지키는 것이 원칙
	폭원 여유	○		기존자료	$S = \alpha + \beta \log \frac{t}{t_0} (= S_s)$	• 공용 개시 후 5년간의 침하량으로 검토 • β 는 그림 14.50 참조
횡단 구조물	더 쌓기량	○	○	동태관측	$S_r = S_{r1} + S_{r2} + S_{r3}(S_s)$ $(S_{r1} : S_0 + \frac{t}{a+bt} \text{로 추정})$	• 요령 「철근콘크리트암거」 참조 • S_{r1}, S_{r2} 는 실측치
	단면 여유	○		토질조사 토질시험	$S_r = S_{r1} + S_{r2} + S_{r3}(S_s)$	• 요령 「철근콘크리트암거」 참조 • S_{r1} 은 이론치
	선행하중 제거 시기		○	기존자료 동태관측	$S = S_0 + \frac{t}{a+bt}$	• 선행하중의 방치기간은 원칙으로 6개월 이상 단, 연약층 두께가 100 mm 이하일 때는 무방.
포장 노면	계획 높이 (P.H)		○	수준측량	-	
	잠정포장	○	○	기존자료 동태관측	설계 시 : $S = \alpha + \beta \log \frac{t}{t_0}$ 시공 시 : $S = S_0 + \frac{t}{a+bt}$	공용 개시 후 5년 간의 침하량으로 검토
부속 시설	방호책, 통신관로 등의 구조	○	○	토질조사 토질시험 기존자료 동태관측	시공시기에 따라 판정하기로 한다.	

주 : () 는 설계 시에는 단면 여유 검토에만 사용한다.

- (1) 개략설계 단계에서는 토질조사도 개요밖에 파악할 수 없기 때문에 기존의 자료를 통계적으로 처리하여 구한 압밀에 관한 정수를 이용하여 침하량을 구하며 실시설계 단계에서는 압밀 시험 결과에 근거로 침하량을 산출한다.
- (2) 또한 설계단계에서는 토질조사 결과로부터 침하량을 추정하지만 시공단계에서는 실측 침하로부터 장래 침하를 추정하는 방법이 가정 신뢰도가 높은 추정 수단이다. 따라서 시공 단계에서는 동태 관측에 의해 설계시의 추정 침하량을 수정해야 한다.

(3) 침하의 추정 방법

연약지반의 침하는 하중재하 시 토립자의 입자배열 변화가 주원인으로 주로 모래지반에서 단기간에 발생하는 즉시침하와 점성토층에서 하중에 의해 유발된 과잉간극수압으로 인해 흙 입자의 간극수가 배출됨에 따라 발생하는 1차 압밀침하와 과잉간극수압 소산이후에 장기간에 걸쳐 크리프(creep) 변형 형태를 발생하는 2차 압밀침하가 있다.

점성토 지반에서는 즉시침하와 2차 압밀침하는 필요시에만 적용하며 단, 고소성점토(CH) 혹은 압축성이 큰 유기질토 등에서는 2차 압밀을 고려하는 것을 원칙으로 한다.

각 침하 형태 및 침하량을 다음 식에 의해 계산한다.

(가) 즉시 침하량 S_i

(a) 점성토

$$S_i = A \cdot \frac{1}{E_{50}} \cdot q_B \cdot H \quad (\text{일본 도로설계요령})$$

(b) 사질토

$$S_i = 0.4 \cdot \frac{p_0}{N} \cdot H \cdot \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (\text{De Beer 제안식 - N이용})$$

여기서, A : 지반의 즉시 침하계수

E_{50} : 연약층의 E_{50} 의 평균값(kN/m^2)

q_B : 흙쌓기 하중 (kN/m^2)

H : 연약층 두께(m)

N : 표준관입시험 평균치

p_0 : 유효토피응력 (kN/m^2)

Δp : 체체 하중에 따른 연직응력의 증분 (kN/m^2)

(나) 압밀 침하량 S_c

(a) 정규압밀의 경우

$$S_c = \Sigma \frac{C_c}{(1+e_0)} \cdot H \cdot \log \frac{(p_0 + \Delta p)}{p_0} = \Sigma m_v \cdot \Delta p \cdot H$$

(b) 과압밀의 경우

① $p_0 + \Delta p < p_c$ 일 경우

$$S_c = \frac{C_s}{(1+e_0)} \cdot H \cdot \log \frac{(p_0 + \Delta p)}{p_0}$$

② $p_0 < p_c < p_0 + \Delta p$ 일 경우

$$S_c = \frac{C_s}{1+e_0} \cdot H \cdot \log \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log \frac{(p_0 + \Delta p)}{p_0}$$

(다) 2차 압밀 침하량 S_s

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1+e} \cdot H_p \cdot \log \frac{t}{t_0} = C_\alpha \cdot H_p \cdot \Delta \log_{10} t$$

여기서, H : 연약층 두께(m)

C_c : 압축지수(무차원)

C_s : 팽창지수(무차원)

C_α : 2차 압밀지수

e_0 : 연약층의 초기 간극비(무차원)

e : 연약층의 초기 간극비이며, 중앙 심도의 $P_0 + \Delta P$ 에 대한 설계 $e-\log P$ 곡선으로부터 구한다.

p_0 : 유효상재응력(kN/m^2)

Δp : 체재 하중에 따른 연직응력의 증분(kN/m^2)

p_c : 선형압밀하중(kN/m^2)

H_p : 1차 압밀이 완료된 후의 연약층의 두께(cm)

t_0 : $S-\log t$ 곡선에서 침하량이 직선이 되는 시간(1차 압밀완료 시간)

t : 1차 압밀이 완료된 시간 후 목표시간까지의 시간간격(가정시간)

14.7.5 측방유동 검토

연약지반 상의 흙쌓기에 의한 지반의 측방 변형은 측방 지반의 연직 변위, 수평 변위 등을 검토한다. 설계단계에서는 현재 국내외에서 주로 사용되는 검토 방법인 사면안전율, 측방유동지수 및 측방이동 판정식 등으로 측방 유동 여부를 판정한다.

(1) 측방 유동 요인

연약지반 상에 흙쌓기 할 때 발생하는 지반의 측방 변형은 토질의 구성, 연약층의 두께, 전단 강도, 흙쌓기 형상의 규모 및 시공방법 등 많은 요인의 영향을 받는다.

(2) 측방 유동 판정법

(가) 사면안정해석에 의한 방법

주로 측방 변위가 발생하는 교대부에 사용하며, Fellenius법을 이용한 'CHAMP'나 Bishop법을 사용한 'Slope' 프로그램에 의해 말뚝 효과를 고려한 경우와 무시한 경우를 각각 해석한다. 해석결과 말뚝 효과를 고려한 경우는 사면안전율 1.8 이상, 말뚝 효과를 무시한 경우는 사면안전율 1.5 이상이면 측방 유동 가능성이 없는 것으로 판정한다.

(나) 측방유동지수(F)에 의한 판정법

일본도로공단(1989)에서 발표한 측방유동지수(F)에 의한 사면안정성을 평가하는 방법으로서, 측방유동지수(F)가 0.04 이하이면 측방 유동 가능성이 있다고 판정하고 있다.

$$F = \frac{C}{r \cdot H} \times \frac{1}{D}$$

여기서, D : 연약층 두께

r : 흙쌓기 재료의 단위중량 (t/m^3)

H : 흙쌓기 높이

C : 연약층 점성토의 비배수전단강도

(다) 안정수(N_s)에 의한 방법

Tschebotaniov가 제안한 방식으로 안정수(N_s)가 3.0 이상이면 측방 유동 현상이 발생할 우려가 있다고 판정하는 식이다.

$$N_s = \frac{rH}{C}$$

14.8 대책공법

14.8.1 대책공법의 선정

- (1) 대책공법 선정은 지반 및 구조물의 특성과 시공조건, 주변에 미치는 영향 등의 조건을 고려하여 적용 가능한 공법을 비교한 후 경제적인 공법을 선택해야 한다.
- (2) 특히, 대책공법의 선정은 공학적 판단과 시공사례 등의 경험적 판단을 종합적으로 고려하여 최종 결정해야 한다.

(1) 대책공법의 종류와 효과

연약지반 대책공법은 크게 침하에 대한 대책공법과 기초지반의 활동 파괴 방지를 목적으로 한 공법으로 구분할 수 있으며, 개량 원리에 따라 구분하면 표 14.14와 같다.

아래의 공법 중 치환공법, 진공압밀공법, 침투압밀공법 및 고결공법 등은 대규모 지반개량 구간에 적용할 경우 경제성에서 매우 불리하므로 일반적인 개량 공법이 불가능한 구간이나 구조물 기초 및 접속부와 같은 한정된 장소에 적용하는 것이 일반적이다.

〈표 14.14〉 개량 목적과 적용지반에 의한 대책공법

개량원리	공법의 명칭	개량목적	적용지반
다짐	샌드컴팩션파일 공법	• 밀도증진 및 강도증진	점성토, 사질토, 유기질토
	동다짐 공법	• 밀도증진 및 강도증진 • 액상화 방지 • 침하감소	사질토
	바이브로플로테이션 공법		
	폭파다짐, 전기충격공법		
고결	표층혼합처리 공법	• 도로의 노상, 노반의 안정처리	점성토, 사질토, 유기질토
	심층혼합처리 공법	• 활동파괴 방지 • 침하방지 및 경감 • 전단변형 방지 • 허빙 방지	사질토
	약액주입 공법		점성토, 사질토
	고압분사교반 공법		점성토, 사질토, 유기질토
	동결공법		
보강	쇄석말뚝	• 침하저감, 전단변형 방지	점성토, 유기질토
	표층피복(토목섬유, 대나무)	• 국부파괴, 국부침하 방지	

개량원리	공법의 명칭		개량목적	적용지반	
하중 조절	하중조절	과재쌓기, 선행하중	<ul style="list-style-type: none"> • 활동파괴 방지 • 잔류침하 경감 • 전단변형 방지 • 히빙 방지 	점성토, 사질토, 유기질토	
		단계쌓기 공법			
	하중균형	압성토 공법			
	경 량 화	경량성토(EPS)공법			
	하중분산	복토, 샌드매트			
치환 공법	굴착치환 공법		<ul style="list-style-type: none"> • 활동파괴방지 • 침하저감 • 지반 전단변형 억제 	점성토, 사질토, 유기질토	
	강제치환 공법				
	폭파치환 공법				
	동치환				
압밀 배수	연직배수 공법	샌드드레인 공법	<ul style="list-style-type: none"> • 압밀촉진 • 잔류침하의 감소 • 지반의 강도 증가 	점성토, 유기질토	
		plastic board drain			
		pack 드레인 공법			
	지하수위 저하공법	웰포인트 공법		사질토	
		deep well			
	진공압밀공법			<ul style="list-style-type: none"> • 압밀촉진 • 잔류침하감소 • 지반의 강도 증가 	점성토, 유기질토
	생석회 말뚝공법				
	전기침투공법				
표층 배수공법		간극수 배수	점성토, 유기질토		

(2) 대책공법 선정 시 유의사항

대책공법 선정 시 주요 고려사항으로는 지반조건, 도로조건, 시공조건, 환경조건 등이 있다.

(가) 지반조건

사질토는 중력과 입자간의 직접적인 결합에 의해 구조를 형성하므로 진동·충격과 같은 동적인 개량공법을 적용하는 것이 효과적이며, 입자와 간극수의 전기화학적 결합에 의해 구조를 형성하는 점성토는 진동 및 충격에 의해 쉽게 교란되어 강도저하가 발생하므로 정적인 공법을 적용하는 것이 효과적이다. 특히, 점토의 예민비가 클수록 교란에 의한 강도저하 현상이 현저하므로 지반 조건에 적합한 공법을 적용해야 한다. 일반적으로 완속 시공에 의해 강도 증가를 도모하는 것을 기본으로 하되 인접 구조물에 영향을 미치는 경우는 파일네트(pile net) 공법과 같은 특수한 공법의 적용을 검토해야 한다.

(나) 도로 조건

도로 조건으로는 쌓기 높이나 구조물과의 접속부와 같은 위치적인 요인을 고려해야 한다. 일반적으로 쌓기 구간은 잔류침하가 허용치 이상일 경우에도 부등침하가 크지 않다면 노면의 평탄성이 확보되므로 도로 기능의 저하는 발생하지 않는다. 그러나, 구조물과의 접속부에서 잔류침하로 인한 단차가 발생할 경우에는 도로의 기능에 큰 문제가 발생할 수 있고, 특히 말뚝을 설치한 교대에서는 측방유동이 발생할 수 있으므로 구조물과의 접속부 개량공법은 매우 중요하다. 쌓기 높이가 낮은 흙쌓기 구간에서는 잔류침하에 대해서 안전하다 할지라도 교통하중에 의해 노면이 굴곡되어 도로 기능이 저하될 수 있다. 따라서, 이러한 낮은 흙쌓기 구간에서는 차량으로 인한 충격하중을 고려하여 과재쌓기 높이를 계획하고 노상의 최소 두께를 확보할 수 있도록 치환공법의 적용을 검토해야 한다. 또한, 공사용 가도와 같은 임시 구조물은 공사 중 유지관리가 가능하므로 특수한 경우를 제외하고는 별도의 개량공법을 적용하는 것 보다 공사 중 유지관리를 시행하는 것으로 계획하는 것이 바람직하다.

(다) 시공 조건

- (a) 공사기간 : 지반개량 기간은 가능한 한 충분한 여유를 확보할 수 있도록 계획하고, 공사기간을 고려하여 대책공법을 선정한다.
- (b) 재료 : 공법에 사용하는 재료의 확보가능 여부와 경제성 등을 충분히 검토한다.
- (c) 시공심도 : 공법별로 시공 한계심도를 고려한다.

(라) 환경 조건

대책공법 선정은 공법 적용 시 주변에 미치는 영향과 진동, 소음 및 지하수 오염과 같은 환경적 요인까지 고려하여 선정해야 한다.

- (a) 강제치환 공법
 - 지반을 밀어내서 치환하므로 주변 지반에 들뜸(heaving) 현상이 발생하게 되므로 이로 인한 주변 시설물의 피해를 고려해야 한다.
- (b) 지하수위 저하공법
 - 주변 지반의 지하수위가 저하되므로 침하 영향 범위가 넓어진다.
- (c) 연직배수 공법, 다짐말뚝 공법
 - 타설방법에 따라 소음 및 진동이나 주변 지반의 변형이 문제가 된다.

(d) 고결 및 심층혼합처리

사용 재료에 따라 주변 농작물 피해나 지하수 오염이 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다.

14.8.2 주요 공법의 설계 방법

- (1) 대책공법의 설계는 공법의 목적과 특징, 원리를 충분히 이해하고 현지 조건에 적합하도록 시행해야 한다.
- (2) 실제 연약지반의 거동은 이론적인 해석 결과와 다르게 나타나는 경우가 있으므로 유사 시공사례를 분석하여 보완될 수 있도록 하는 것이 바람직하다.

(1) 표층처리공법

표층처리공법은 시공 장비의 주행성(trafficability) 확보와 압밀과정에서 발생한 간극수의 지표 배출을 목적으로 한다. 표층처리공법의 종류는 표 14.15과 같으며, PTM(Progressive Trench Method), 진공수평배수공법 및 고결공법 등은 주로 대규모 준설매립지반의 표층처리공법으로 적용된다.

〈표 14.15〉 표층처리공법의 종류

분류	공법	공법의 개요
포설공법	Sand mat	연약토 표층에 모래를 포설하여 장비 주행성 확보 및 간극수 지표배출
	토목섬유	연약토 표층에 토목섬유를 포설하여 인력 및 장비의 진입성 증진
	대나무 매트	연약층 위에 대나무를 연속 또는 격자로 묶어 포설하여 지지력 확보
배수 및 건조	P.T.M	표층에 점진적인 트렌치를 시공하여 표면배수 및 건조층 형성 촉진
	표층배수	표층에 배수로를 설치하여 지반의 수위를 저하
	진공수평배수	표층부에 수평배수재를 설치하여 진공압으로 배수 촉진
고 결	표층고화처리	원지반을 시멘트, 석회 등과 교반 처리하여 고결시켜 장비의 주행성 확보

(가) 샌드매트(sand mat)

(a) 적용

연약지반 상에 부설되는 샌드매트(sand mat)는 다음과 같은 목적으로 부설된다.

- ① 연약층의 압밀로 인해 배출되는 간극수의 원활한 배수를 위한 상부 배수층 역할
- ② 쌓기체 내로 지하수가 상승하는 것을 차단하는 지하 배수층의 역할

③ 시공 장비의 주행성(trafficability)을 확보하기 위한 지지층 역할

샌드매트 두께는 장비의 주행성(trafficability)과 배수기능을 검토하여 결정하며, 연약층이 두꺼운 경우나 제체 폭이 넓은 경우에는 샌드매트의 통수능력 부족이 발생할 수 있으므로 간극수 배출에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

(b) 장비 주행성을 고려한 샌드매트 두께

대상 지반이 연약 점토지반인 경우에는 연약지반의 비배수 전단강도를 이용하여 지반의 지지력을 산정하고 시공 장비의 접지압을 고려하여 적정 두께를 결정해야 한다.

이때 사용하는 비배수 전단강도는 지표부의 값을 적용하는 것이 바람직하다.

참고로 연약지반의 표층부 콘 지지력을 바탕으로 가정된 샌드매트 표준 두께는 표 14.16를 참고할 수 있다.

〈표 14.16〉 샌드매트의 표준 두께

표층의 콘지력(kPa)	샌드매트 두께(m)
200 이상	0.5
200 ~ 100	0.5 ~ 0.8
100 ~ 75	0.8 ~ 1.0
75 ~ 50	1.0 ~ 1.2
50 미만	1.2

(c) 배수기능을 고려한 샌드매트 두께

연약지반 상부에 부설되는 샌드매트는 연약지반의 압밀침하로 인해 배출되는 간극수의 배수로 역할을 수행하며, 간극수의 배출량을 연약지반의 압밀침하량과 같다고 가정할 경우 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q = L \cdot S = k \cdot i \cdot A = k \cdot \Delta h_w \cdot h / L$$

$$\therefore h = \frac{L^2 S}{k \cdot \Delta h_w}$$

여기서, Q : 압밀배수량(m³/sec)

L : 샌드매트의 배수 거리(m)

S : 연약층의 평균 침하속도(m/sec)

k : 샌드매트 투수계수(m/sec)

상기 식을 이용할 경우 샌드매트 두께(h)가 배출수두(Δh_w) 이상이 되도록 계획한다.

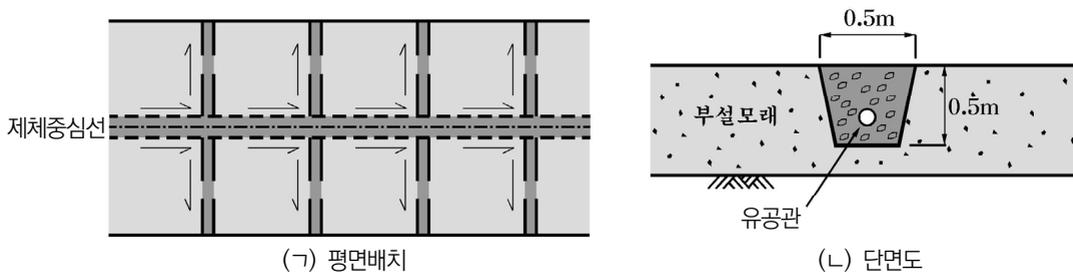
이때 침하속도(간극수 배출량)를 전 침하량(U=100%)이나 1개월 이내의 초기 침하량을

적용할 경우에는 샌드매트 두께가 과소 또는 과대하게 산정되므로 쌓기 기간 중에 발생하는 침하량을 적용하는 것이 바람직하다.

(d) 설계 및 시공

샌드매트 포설은 침하에 따른 배수기능의 유지를 고려하여 사면하단 끝에서 0.5 ~ 1.0 m 정도의 여유를 갖도록 계획해야 한다. 샌드매트 두께 결정 시 간극수 배출보다 시공 장비의 주행성이 문제가 되는 경우에는 샌드매트를 간극수 배출에 필요한 최소한의 두께로 계획하고, 시공장비의 주행성은 양질의 토사를 이용한 복토에 의해 확보하여 모래 사용량을 경감시키는 것이 바람직하다.

현장 여건상 양질의 모래 확보가 어렵거나 제체의 폭이 넓은 경우에는 유공관과 집수정을 계획하되 배수공 내에 점토 등의 세립분이 침입하여 배수 효과를 저하시키는 일이 없도록 유의해야 하며, 그림 14.7은 지하 배수공의 설치 예를 나타낸다.



〈그림 14.7〉 지하배수공의 설치 예

(나) 표층부설공법

(a) 적용

표층부설(피복)공법은 시공 장비의 주행성 확보와 쌓기 공사 시 연약지반의 국부적 파괴를 경감시키기 위하여 적용한다. 주로 연약지반 표층에 토목섬유, 로프 네트, 대나무 네트 및 부설 그물(지오텍스그리드) 등을 부설하여 표층부의 전단저항을 증가시켜 시공 장비의 주행성을 확보하고, 응력집중에 의한 국부적 침하나 변형을 방지하기 위해 적용한다.

(b) 재료

부설재로 가장 많이 적용하는 재료는 P.P mat 및 P.E.T mat 등의 토목섬유가 가장 많이 적용되나 토목섬유의 재료 선정은 연약층 두께와 강도, 쌓기 재료, 시공 조건 및 사용 장비 등을 종합적으로 고려하여 결정한다.

〈표 14.17〉 토목섬유의 부설 목적

구 분	목 적
폴리프로필렌 매트 (P.P 매트)	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 연약지반과 모래층의 혼합을 차단하여 샌드매트의 기능 유지 • 장비의 초기 진입 시 필요한 운행성의 증진
폴리에스터 매트 (P.E.T 매트)	<ul style="list-style-type: none"> • 연약지반상의 흠쓸기 시 지지력 증대 및 비탈면 안정 • 연약지반상의 흠쓸기 시 장비 주행성 확보

일반적으로 P.P Mat는 시공 장비의 일시적인 주행성 확보를 목적으로 적용하며, P.E.T Mat는 전단보강에 의한 영구적 안정성의 증진을 목적으로 적용한다.

(c) 설계 및 시공

토목섬유공법의 설계법은 판 이론에 의한 방법, 토목섬유와 지반을 안정화된 평형상태로 가정한 Terzaghi방법, 토목섬유와 지반을 강성이 다른 두개의 지층으로 가정한 Meyerhof방법 등이 있다.

① 판 이론에 의한 방법

토목섬유와 흙이 서로 부착되어 토목섬유 부근에서는 흙이 밀실한 상태가 되는 것에 주목하여 토목섬유와 주변의 흙을 강성이 있는 판으로 가정한다. 상부하중을 판의 휨 강성과 지반반력으로 지지한다는 개념에서 출발한 것으로 양단은 단순 지지된 판이고, 쌓기 하중과 지반의 반력이 일정하게 분포하다고 가정하여 구하는 방법이다.

② Terzaghi 지지력 공식에 의한 방법

토목섬유의 인장효과와 지반의 지지력이 균형을 이룬 안정화된 지반형상을 단순화시켜 Terzaghi 지지력 공식을 기본으로 지반의 변형 형상과 토목섬유의 인장효과를 고려하여 검토하는 방법이다.

③ Meyerhof의 지지력 공식에 의한 방법

토목섬유와 흙을 강도특성이 다른 두개의 지층으로 가정하여 Meyerhof 지지력 식에 토목섬유의 보강 효과를 고려한다.

상기의 방법을 적용할 때 무엇보다 중요한 것은 전단강도의 적용과 시공 장비의 중량, 제체 하중 및 재하 폭 등에 유의해야 하며, 특히 토목섬유의 인장강도는 지반과 매트의 파괴 시 소요되는 변형율이 다른 것에 유의하여 적용해야 한다.

P.P mat는 연직배수재를 타설할 경우 손상과 설계 및 시공의 불확실성을 고

려하여 제제의 안정성 검토에는 고려하지 않는 것이 바람직하다.

토목섬유의 일반적인 설계인장강도는 허용인장강도의 1/2 이나 5 % 변형 시 인장 강도에 적절한 안전율을 고려하여 결정한다.

(다) 표층혼합처리공법

(a) 적용

표층혼합처리공법은 주로 시공 장비의 주행성 확보와 원지반 불량 노상토의 지지력 증가를 목적으로 적용한다.

표층부 지반을 석회 및 시멘트 등의 재료와 교반하여 고결시키므로 전단보강 효과는 큰 편이나 적용 시 지표수의 오염 우려가 있다. 또한, 개량체의 강도와 두께가 과도할 경우에는 연직배수공 등의 후속 공정에 차질이 발생할 수 있고, 무엇보다 공사비가 고가이므로 적용이 제한적이다.

(b) 재료

표층혼합처리에 사용되는 안정재로는 석회, 보통포틀랜드 시멘트, 고로시멘트, 토질 개량용 시멘트(시멘트계 고화재) 등이 있다. 보통 포틀랜드 시멘트는 재료의 조달이 용이하고 가격이 저렴한 장점이 있으나 유기질토에는 효과가 적다.

지반개량용 시멘트는 가격은 비싼 편이나 함수비가 높은 점성토나 유기질토 등의 개량에 효과적이다. 따라서 연약지반의 종류와 개량목적, 공사규모, 주변여건 등을 종합적으로 고려하여 적용여부와 개량재의 종류를 결정해야 한다.

〈표 14.18〉 안정재의 특징 및 적용성 비교 예

구분 판정 항목 안정재	흙의 종류 · 성질								재료			혼합 · 다짐			처리효과	
	점성 토	사 질 토	함수 비가 LL 부근	함수 비가 LL의 1.5~2배	유기 물이 적음	유기 물이 많음	유류 와의 혼합 토	오니 수 등	구득 의 용이 성	취급 의 용이 성	가 격	습식 사용 가능 여부	점성 토와 의 혼합	다짐 공정	초기 강도	장기 강도
생석회	◎	△	○	△	○	△	△	○	×	보통	×	○	필요	◎	○	
보통포틀랜드 시멘트	○	○	○	△	○	×	×	×	◎	○	저가	○	△	습식 (밀크) 경우 필요 없음	△	○
고로시멘트	○	○	○	○	○	△	×	○	○	○	저가	○	△		△	○
토질개량용 시멘트	◎	○	○	◎	○	○	○	○	○	○	고가	○	△		△	○

(c) 설계 및 시공

고화처리지반의 강도(혹은 강성)와 두께는 처리 대상토의 종류, 시공 장비, 상부에 재하되는 하중규모 및 구조물 종류 등을 고려하여 결정한다.

설계방법으로는 다층계 지반에 의한 방법, 지반반력법에 의한 방법, 지반 내 응력에 의한 방법과 Punching Shear에 의한 방법 등이 있으며, 이 중 이용이 간편하고 용이한 방법은 Punching Shear에 의한 방법이다.

일반적으로 개량체의 설계강도와 두께는 각각 일축압축강도 200 ~ 600 kPa, 1 ~ 2 m를 가장 많이 적용하며, 설계강도는 실내배합시험 강도의 1/2 ~ 1/3을 적용하는 예가 많다.

표층혼합처리공법은 혼합방식에 따라 원위치 교반방식과 플랜트 혼합방식으로 구분할 수 있으며, 시공 장비와 현장 여건에 따라 공법이 다양하여 대부분 경험에 의존하여 공법을 선정하고 있는 실정이다.

원위치 혼합방식은 원지반에 분체 또는 슬러리상태의 고결재를 살포하고, 불도저·특수 백호우·스테빌라이저 등의 혼합기계를 이용하여 원지반과 교반하는 방법이다. 원위치 혼합방식은 중앙플랜트 혼합방식에 비해 혼합효율은 낮은 편이나 시공이 비교적 용이하고 경제적인 것으로 알려져 있다. 원위치 혼합방식의 1회 혼합깊이는 대상토의 물성과 시공 기계의 종류 및 성능에 따라 0.3 ~ 1.2 m 깊이까지 가능하다. 중앙플랜트 혼합방식은 일정한 장소에 혼합플랜트를 설치하고 대상토와 안정재(분체방식, 슬러리방식)를 균일하게 혼합한 후 시공 장소에 운반하여 고르게 포설하여 전압하는 방식이다. 중앙플랜트방식은 시료를 균질하게 혼합할 수 있어 안정재의 품질 관리는 용이한 편이나 현장에 플랜트 설치 부지를 확보해야 한다.

(2) 하중재하공법

연약지반에 등분포 하중을 가하여 공용 하중이나 구조물 하중이 작용하기 전에 필요한 만큼의 침하가 발생하도록 유도하는 공법을 하중재하공법이라 한다.

하중재하공법은 목적에 따라 지반의 전단파괴를 방지하기 위한 공법과 잔류침하의 경감을 목적으로 한 공법으로 구분할 수 있다.

지반의 전단파괴를 방지하기 위한 공법으로는 하중조절(단계 쌓기)공법, 경사완화공법, 압성토공법 등이 있으며 잔류침하의 경감을 목적으로는 쌓기 하중 이상의 쌓기를 시행하는 과제

하중(surcharge)공법과 구조물 시공에 앞서 미리 쌓기를 시행하는 선행하중(pre-loading) 공법이 있다. 또한, 재하중의 종류에 따라 다음과 같이 분류할 수 있으며, 일반적으로 재료 수급이 용이한 흙쌓기 공법의 적용이 보편화 되어있다.

〈표 14.19〉 재하재료에 의한 재하공법의 분류

재하 방법	재료	공법의 특징
흙쌓기공법	흙	<ul style="list-style-type: none"> • 필요한 쌓기높이 확보 가능 • 하중 크기를 자유로이 할 수 있음 • 재료비 저가 • 활동파괴 주의
대기압공법 (진공압밀공법)	대기압	<ul style="list-style-type: none"> • 하중에 한계가 있으나 흙쌓기와 병행 가능 • 진공을 위한 기압 슈트(sheet) 설치 필요 • 재료비 저렴
물하중공법	물	<ul style="list-style-type: none"> • 단위 중량이 적기 때문에 하중 단계가 있음 • 누수 방지공과 주위에 제방 필요 • 물의 침수 및 배수가 용이하지 않으면 사용을 피해야 함
기 타	콘크리트 강재	<ul style="list-style-type: none"> • 단위 체적중량이 높기 때문에 재하고를 낮게 할 수 있음 • 재료비가 고가 • 재하가 비교적 어려움 • 재하시험 등 특수한 경우 이외에는 사용하지 않음

재하중공법은 전단파괴를 방지하기 위한 공법과 잔류침하 경감을 위한 공법을 병용하는 것이 일반적이며, 중요한 것은 재하중의 크기와 재하기간 결정이다.

또한, 연약층 심도가 두꺼운 경우에는 압밀시간을 단축하기 위해 연직배수(vertical drain) 공법과 병용하여 계획한다.

(가) 과재쌓기 및 선행하중공법

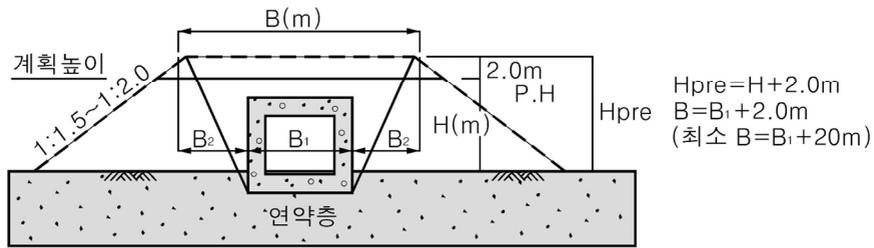
(a) 적용

연약지반에 흙쌓기 하중이나 구조물 하중 이상의 쌓기 하중을 재하하여 침하속도를 촉진시켜서 과재쌓기에 의한 침하량이 목표침하량에 도달하였을 경우 여성토를 제거하는 공법으로 다음 사항에 유의해야 한다.

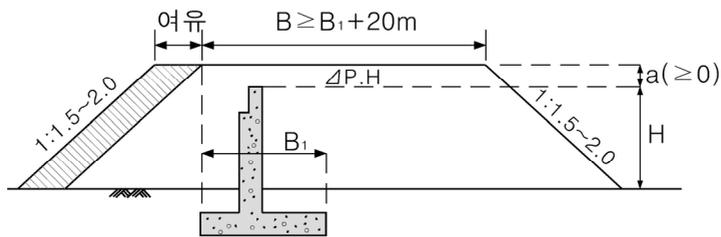
- ① 흙쌓기 높이가 높은 경우에는 체체의 안정대책과 병행하여 검토해야 한다.
- ② 연약층이 두꺼우면 재하기간이 길어지므로 연직배수공법과 병용한다.

(b) 적용 범위

그림 14.8, 그림 14.9는 과재쌓기 범위의 결정 예를 나타낸 것이며, 원칙적으로 흙쌓기 하중은 구조물 하중 이상으로 하고 과재쌓기 범위는 구조물 하중의 영향 범위를 고려하여 결정한다.



〈그림 14.8〉 암거의 선행하중

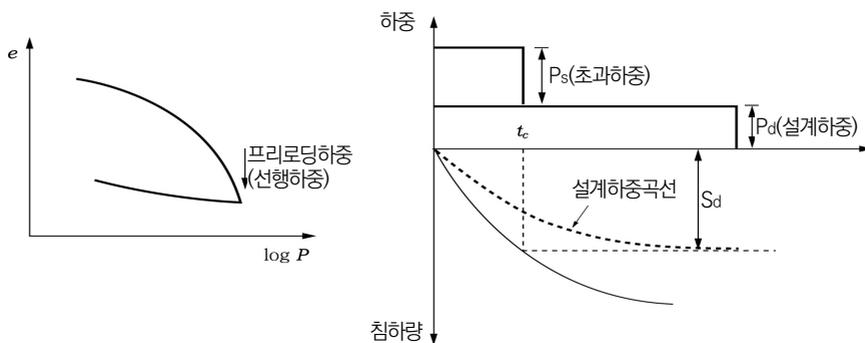


〈그림 14.9〉 교대의 선행하중

(c) 방치 기간

방치 기간의 결정은 과재쌓기 또는 선행하중에 의한 침하가 목표 침하에 도달하는 시점, 즉 잔류침하가 허용치 이내인 시점으로 한다.

그러나 실제로 지반의 침하 거동이 설계와 다른 경우가 많으므로 설계 시 방치 기간은 공사 기간 등을 고려하여 결정하는 것이 바람직하다.

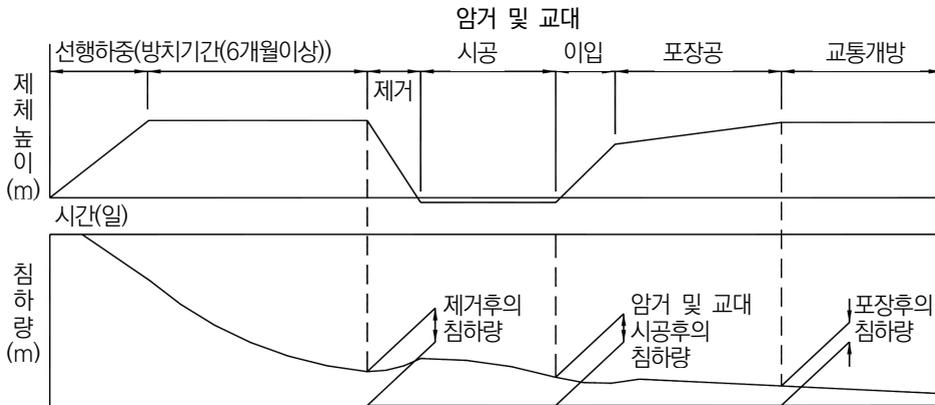


〈그림 14.10〉 선행하중(프리로딩)

(d) 시공

선행하중 공법에 의해 암거 등의 구조물을 시공할 경우의 공정에 따른 시간-침하 관계는 그림 14.10과 같이 나타낼 수 있다.

시공 시 선행하중이나 과재쌓기의 제거 시기 결정은 현장계측에 의해 판단하는 것을 원칙으로 한다.



〈그림 14.11〉 선행하중 공법의 시공 순서

(e) 선행하중 및 과재쌓기의 제거 시기 결정

① 목표 침하량 기준

실측 침하량이 설계 침하량에 도달하는 시점을 제거시점으로 하나 실측 침하량이 설계 침하량과 차이가 나는 경우에는 계측을 통해 재하기간이나 재하쌓기 높이를 조절해야 한다.

② 설계 압밀도 기준

현장계측에 의한 침하 자료로부터 최종 침하량을 예측하고, 현재 침하량과 최종 침하량의 비에 의하여 현재의 압밀도를 판단한다.

계측에 의한 압밀도가 설계 압밀도보다 크면 과재쌓기를 제거하고, 그렇지 못한 경우에는 과재쌓기를 방치한다.

이 방법은 현장의 실측 침하량이 설계 침하량 보다 큰 경우에는 잔류침하량이 허용침하량 보다 클 수 있으므로 실제 적용성이 낮다.

③ 허용 잔류침하 기준

현장계측에 의한 침하 자료로부터 최종 침하량을 예측하고, 현재 침하량과 최종 침하량을 비교하여 잔류 침하량이 허용 침하량 보다 적으면 과재쌓기를 제거한다.

이 방법은 과재쌓기 하중이 향후 추가되는 공용하중이나 구조물 하중보다 큰 경우에 적용해야 한다.

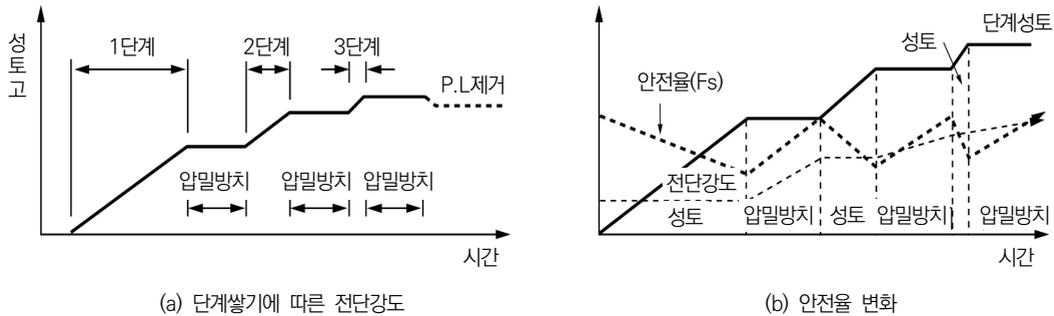
④ 압축비에 의한 기준

과재쌓기 하중이 공용하중에 비해 작은 경우에는 실측 침하량을 침하공식에 대입하여 압축비($C_c/1+e_0$)를 산정하고 공용하중에 의한 침하량과 잔류침하량을 검토하여 제거여부를 판단한다. 이 방법은 공용 시 발생하는 침하량을 현장압밀특성을 고려하여 예측할 수 있으나 이용되는 쌓기 하중이 실제와 다른 경우에는 침하량 예측에 문제가 있음에 유의해야 한다.

(나) 하중조절공법

(a) 적용

연약지반에 급속 쌓기를 할 경우 활동파괴가 발생하게 된다. 활동파괴를 방지하기 위해 지반파괴가 발생하지 않는 높이까지 쌓기를 시행하고 압밀방치를 시켜 전단강도의 증가를 유도한 후 다음 단계의 쌓기를 시행하는 공법이다. 공사기간에 여유가 있는 경우 가장 많이 이용되는 방법으로 쌓기 높이가 높은 경우에는 토목섬유공이나 다짐모래말뚝 등의 활동방지공법과 병행하여 적용한다.



〈그림 14.12〉 선행 단계 쌓기 따른 전단강도 및 안전율 변화

(b) 설계 및 시공

단계별 쌓기 높이는 지지력 공식에 의한 방법과 원호활동에 의한 검토에서 결정할 수 있다.

강성 기초를 근거로 한 지지력 공식에 방법은 개략 검토에만 이용하고, 세부 설계에서는 원호활동에 의해 쌓기 높이를 결정하는 것이 바람직하다. 쌓기 횟수는 3~4단계 이내로 하는 것이 효과적이며, 단계별 압밀도를 너무 높게 결정할 경우 현장에서 시공관리가 어려우므로 단계별 압밀도는 최종 단계를 제외하고는 90% 이하로 하는 것이 바람직하다. 시공 중 다음 단계의 시공 여부는 현장계측이나 확인 조사에 의해

결정해야 한다.

(다) 진공압밀공법

부직포를 감싼 유공관을 지중에 관입시키고 기밀한 시트로 지표를 덮은 다음 진공펌프로 대기압을 재하하여 증가된 유효응력으로 지반의 압밀을 촉진하는 공법이다.

- (a) 하중재하공법에서 나타나는 전 응력 증가에 의한 원호활동파괴가 발생하지 않으므로 초연약지반의 급속 쌓기 공사에 적합하다.
- (b) 깊은 심도까지 등방압밀응력이 작용하므로 부등침하 및 잔류침하에 감소에 유리하다.
- (c) 약 4m 정도의 쌓기 시공과 동일한 효과를 가지며, 배수저항(well resistance)이 없어 초기 압밀속도는 연직배수공법보다 2~3배 정도 빠르다.
- (d) 압밀거동은 barron의 압밀이론을 따르지만 횡방향의 압축으로 침하량이 감소한다.

(라) 압성토공법

(a) 적용

압성토공법은 쌓기 비탈면 측면부에 일정 높이만큼 소단 모양의 쌓기를 하여 활동에 저항하는 모멘트를 증가시켜 활동 파괴를 방지하는 공법이다. 압성토 부분은 공사용 도로, 부체도로 및 완충 녹지 등으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 흙쌓기에 따른 용지 외의 지반 변형을 경감시키는 효과도 있다.

압성토는 원호 활동의 원리와 시공실적을 고려할 때 제체의 활동파괴를 방지할 수 있는 가장 확실한 공법이며, 타 공법과 비교할 때 경제성 측면에서도 유리한 경우가 많기 때문에 모든 조건을 감안한 뒤 적극적으로 적용하도록 한다.

그러나 지반의 비배수강도(S_u)가 12 kPa 보다 작을 때에는 압성토의 효과가 크지 않은 것으로 알려져 있으며, 주변의 용지 확보가 어려울 경우에는 시공성과 경제성에서 불리할 수 있으므로 유의해야 한다.

(b) 고려사항

① 타당성 조사 단계에서의 방법

압성토 높이의 표준은 제체 높이의 1/2~1/3 정도이다. 높이를 결정하면 압성토 폭을 쌓기 높이의 2배 정도로 산정하고 안정계산을 하여 소요의 안전율을 얻도록 한다.

② 실시설계 단계에서의 고려사항

㉠ 압성토의 높이 결정

압성토의 개략적인 높이 h 는 일반적으로 다음 식으로 구할 수 있다.

$$h = \frac{H_{EC}}{F_S}$$

여기서, h : 압성토 높이

H_{EC} : 한계 쌓기 높이

F_S : 안전율

압성토 높이(h)와 제체 높이(H)의 관계는 $1/2H \sim 1/5H$ 범위로 평균적으로 $h=1/3H$ 가 되어 압성토 높이로서는 3 m 정도가 많다.

㉡ 압성토 폭의 결정

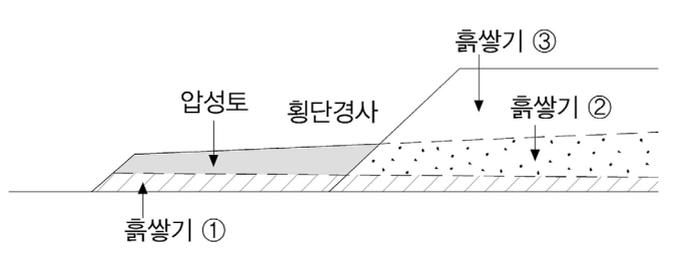
압성토의 폭은 원호활동에 대한 안정 검토를 시행하여 결정하며, 연약층 심도가 깊거나 쌓기 높이가 높은 경우에는 안정 확보에 필요한 압성토 폭이 크게 요구되므로 주변 용지 여건을 고려하여 결정해야 한다.

압성토에만 의존하여 제체의 안정을 확보할 수 없는 경우에는 토목섬유공이나 다짐모래말뚝 등의 활동방지공법과 병용하여 적용하며, 연직배수공을 설치하는 경우에는 압성토 부분까지 처리할 필요는 없다.

㉢ 시 공

압성토의 시공은 일반적으로 그림 14.13과 같이 압성토 부분을 포함한 샌드 매트(①) 및 흙쌓기(②)를 시공하고 계속해서 제체(③)를 시공한다.

흙쌓기(②)의 시공 시 압성토 부분을 선행시켜 시공하고 압성토 부분을 공사용 도로로 이용하는 것이 효과적이다.

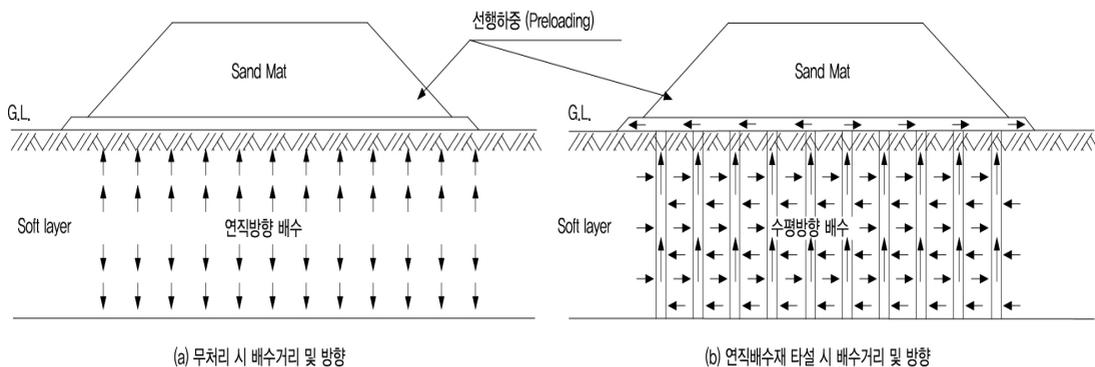


〈그림 14.13〉 압성토의 시공 순서

(3) 연직배수공법

(가) 개요 및 종류

연직배수공법(vertical drain method)은 연약층에 드레인(drain)을 설치하여 배수거리를 단축함으로써 압밀에 소요되는 시간을 단축하는 공법으로, 드레인(drain) 종류에 따라 샌드 드레인(sand drain), 팩 드레인(pack drain) 및 P.B.D(plastic board drain) 등이 있으며 공법의 원리는 모두 동일하다.



〈그림 14.14〉 무처리 시 및 연직배수재 타설 시 배수 방향 및 배수 거리

(a) 샌드 드레인(sand drain)

샌드 드레인은 직경 0.1 ~ 0.6 m 정도의 원형 모래 기둥을 연약지반에 설치하는 공법으로, 초기의 국내 연약지반 개량공사에 적용되었으나 지반변형에 의한 드레인(drain)의 절단 가능성과 공사비가 높아 근래의 시공 실적은 거의 없다.

(b) 팩 드레인(pack drain)

팩 드레인은 화학섬유로 된 팩(pack) 망에 모래를 채워 지반 변형으로 인한 모래의 절단 가능성을 감소시킨 공법으로, 일반적으로 정사각형 또는 삼각형의 배치로 4분 또는 6분을 동시에 타설한다. 일반적으로 연약층 심도가 깊고 매우 연약하여 well resistance와 드레인(drain)의 절단 가능성이 있는 지역에 적용하나 사용 장비가 커서 시공 한계 심도가 35 m 정도로 제약이 있고, 연약층 심도의 변화가 심한 구간은 타설 심도의 조절이 어려워 하부에 drain이 설치되지 않은 영역이 발생할 수 있다.

(c) P.B.D(plastic board drain)

P.B.D 공법은 초기에는 두께 3 mm, 폭 100 mm 정도의 장방형 종이를 사용하여 페이퍼 드레인(paper drain) 공법으로 불리우기도 하였으나 현재에는 종이 대신에

합성 섬유재질의 plastic board를 사용하며, 국제적으로 P.B.D 공법 또는 P.V.D (prefabricated vertical drain) 공법으로 불리고 있다.

P.D.B 공법은 필터(filter) 재료의 성능개선과 재료의 국산화로 배수 성능과 경제성이 향상되어 최근 적용 사례가 가장 많은 공법이다.

〈표 14.20〉 연직배수공법의 비교

구 분	샌드 드레인 공법	팩 드레인 공법	Plastic board drain 공법
공법 원리	직경 0.4 m 정도의 모래말뚝 설치 후 배수거리 단축을 통한 압밀 침하축진	모래말뚝대신 직경 120 mm인 섬유망에 모래를 충전하여 설치	개량 원리는 샌드 드레인과 동일하며 모래말뚝 대신 드레인 보드를 설치함
최대 시공심도(m)	50 m	50 m	33 m
평균 시공심도(m)	25 ~ 25 m	20 ~ 25 m	20 m
배수재	모래	섬유망 + 모래	드레인 보드(Drain Board)
시공 기간	중 · 장기간	장기간	보통 정도
N치 관계	N값 20 ~ 30 이상 압입 곤란	N값 10 이상 압입 곤란	N값 7 ~ 10 이상 압입 곤란
시공 실적	많음	보통	많음
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 상부에 매립층이 있을 경우 관입 저항을 극복할 수 있음 • 국내 시공사례 및 경험 풍부 • N=25정도 까지 타설 가능 • 투수효과가 확실함 	<ul style="list-style-type: none"> • 샌드 드레인 공법에 비하여 교란 영역, 배수재의 절단 가능성이 적음 • 모래 양 절감 및 배수재 타설 속도가 빠름 • 시공 여부 확인 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 교란영역, 배수재 및 샌드 심 절단 가능성이 가장 적음 • 국내 시공사례 및 경험 풍부하고 장비가 가벼움 • 공사비가 가장 저렴함 • 재료의 구입이 용이
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 모래말뚝 설치 시 교란영역이 큼 • 지반변형으로 인한 모래말뚝의 절단 가능성 내재 • 장비중량이 커서 통행성 확보가 어려움 • 타 공법에 비해 시공 속도가 느림 • 양질의 모래가 다량 필요하므로 공사비가 고가임 	<ul style="list-style-type: none"> • 철저한 품질관리 필요 • 연약지반 심도가 불규칙한 지역은 타설 심도의 조절이 곤란 • 장비중량이 커서 접지압 관리가 어려움 • 팩 망 떨어져 올라옴, 꼬임 현상에 의해 불규칙한 배수 단면이 형성될 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> • 드레인 보드 제품의 철저한 관리 요망 • 맨드릴 타입기 사용으로 주행성 확보용 복도가 필요하며 철저한 시공관리 요망
횡력에 의한 배수재 절단 유무	있음	거의 없음	거의 없음
추정 공사비 비율	약 1.8	약 1.3 ~ 1.5	1.0
배수 효과	시공관리가 잘될 경우 양호하나 절단되면 배수 효과 없음	양호	일반적으로 설계계산치 보다 드레인 효과가 지연됨
시공 관리	곤란	양호	매우 양호

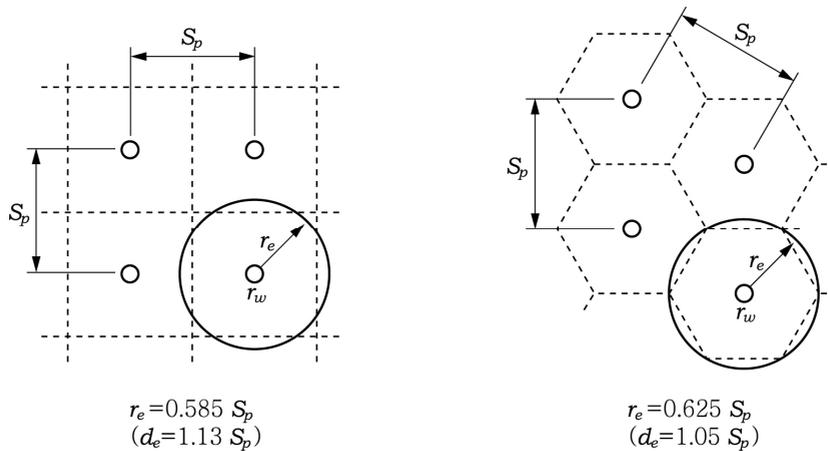
(나) 연직배수공법의 압밀이론

(a) 배수재의 영향원

지반에 배수재를 설치할 경우 간극수가 배수재내로 유입하는 유효원의 직경을 유효경이라 하며, 일반적으로 해석을 용이하게 하기 위해 배수재의 배치에 따라 등면적의 원으로 환산하여 산정한다.

$d_e = 1.05 S_p$ 정삼각형 배치 (S_p 는 중심 간 거리)

$d_e = 1.13 S_p$ 정사각형 배치



〈그림 14.15〉 배수공의 배치와 유효원의 직경

(b) 압밀이론

연직배수공법의 압밀이론은 Barron(1948), Yoshikuni(1979), Hansbo(1981), Onoue(1988) etal에 의해 제안되었다.

Barron(1948)은 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 기초를 두고 점토의 투수계수 및 체적압축계수가 압밀 중에 변화하지 않는다는 조건 하에서 증공 원주 방사형 압밀이론을 제안하였다.

배수재가 설치된 지반의 거동을 자유변형율(연성 재하) 조건과 등변형율(강성 재하) 조건으로 가정하여 수평방향 배수만을 고려한 압밀방정식을 제안하였다.

Yoshikuni(1979)는 배수저항의 영향이 무시할 정도로 작은 경우, 즉 드레인의 통수능력이 큰 경우에 대하여 배수저항을 고려하였으며, Hansbo(1981)는 연직배수재 설치 시 지반의 교란영향(smear effect) 및 배수재의 배수저항을 고려하여 압밀방정식을 제안하였다.

Onoue(1988)는 Youshikuni가 제안한 배수저항계수(L)을 사용하여 투수성에 관계 없이 교란영역과 배수저항의 효과를 고려할 수 있는 압밀방정식을 제안하였다.

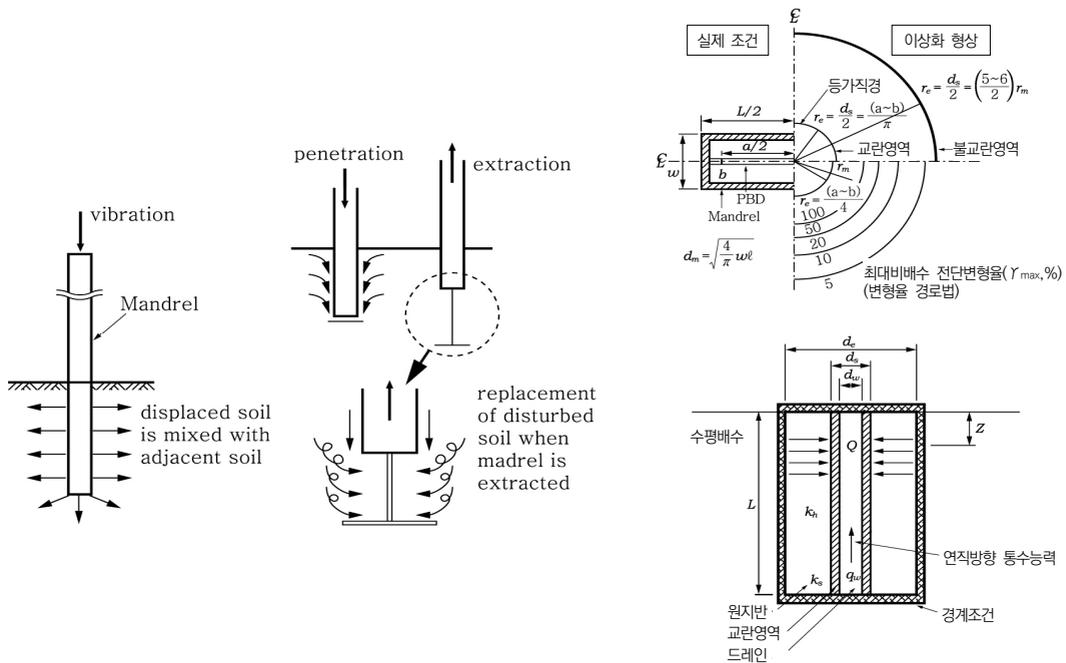
〈표 14.21〉 연직배수재의 압밀 이론

제안자	제안식	특징
Barron (1948)	$U_h(T_h) = 1 - \exp[-8T_h/F(n)], F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}$ <p>여기서, U_h : 수평방향의 평균압밀도 $n = \frac{d_e}{d_w}$, d_e: 영향원의 직경 d_w: 연직배수재의 직경 T_h(수평방향 시간계수) : $\frac{c_h \cdot t}{d_e^2}$ c_h: 수평방향 압밀계수</p>	스미어 영향과 well resistance 미 고려
Yoshikuni (1979)	$U_h(T_h) = 1 - \exp[-8T_h/F(n) + 0.8L], F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}$ $L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w}\right)^2 \text{ (배수저항계수)}$ <p>여기서, H : 배수재 길이(양면 : H/2, 일면 : H)</p>	well resistance만 고려
Hansbo (1979)	$U_h(z, T_h) = 1 - \exp(-8T_h/F), F = F(n) + F_s + F_r$ $F(n) = \ln\left(\frac{d_e}{d_w}\right) - \frac{3}{4} = \ln(n) - 0.75$: 배수재 간격에 의한 영향 $F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right) \cdot \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right)$: smear zone 영향 $F_r = \pi z(L-z) \frac{k_h}{q_w}$: well resistance의 영향 <p>여기서, d_s : 배수재 주위의 교란 영역 직경, d_m : mandrel 직경 d_w(연직배수재 직경) : $d_w = \sqrt{\frac{4 \cdot q_w}{\pi \cdot k_w}}$ (q_w: 배수재 통수 능력) k_s, k_h : smear zone 및 점토지반 각각의 수평투수계수 zk_w: 연직배수재의 투수계수 z : 임의의 심도 L : 배수재의 배수 길이(양면 : $L = H$, 일면 : $L = 2H$)</p>	스미어 영향과 well resistance 모두 고려
Onoue (1988)	$U_h(T_h) = 1 - \exp[-8T_h/F(n') + 0.8L],$ $F(n') = \frac{(n')^2}{(n')^2-1} \ln(n') - \frac{3(n')^2-1}{4(n')^2},$ $n' = nS^{\eta-1}, \eta = \frac{k_h}{k_w}, S = \frac{d_s}{d_w}$ $L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w}\right)^2 \text{ (배수저항계수)}$ <p>여기서, $n' = nS^{\eta-1}$, $\eta = k_h/k_w$, $S = d_s/d_w$, H : 배수재 길이</p>	스미어 영향과 well resistance 모두 고려

이들 식들은 가정 조건이나 이론적 배경이 실제 현장 조건과 상이하여 실제 현장압밀도와 차이가 나는 것이 일반적이므로 유사 지반의 계측 결과와 비교 검토하여 실무에 적용하는 것이 바람직하다.

(c) 교란 영향 및 배수저항

연직배수재 타설 시 mandrel의 관입으로 주변 지반의 전단변형과 변위 등에 의해 교란된 영역을 스미어 존(smear zone)이라 하며, 교란에 의해 투수성이 감소하여 압밀시간이 지연되는 현상을 교란 영향 또는 스미어 영향(effect of smear)이라 한다.



〈그림 14.16〉 mandrel 타설에 의한 smear zone 발생 개념도

교란 영향은 연직배수재의 설치 방법과 사용하는 Mandrel의 크기 및 형상에 따라 달라지며, 교란 영역은 일반적으로 Mandrel 직경의 2~4배 정도로 알려져 있다. 또한, 연직배수 압밀이론에서 배수재의 투수계수는 주변 지반에 비해 이상적으로 큰 것으로 가정한다. 그러나, 지반변형에 의한 배수재의 굴곡이나 세립자에 의해 배수재의 투수성(통수 능력)이 저하될 경우 이론치에 비해 압밀시간이 지연되게 되며, 이러한 압밀지연 현상을 배수저항(well resistance)이라 한다. 이러한 압밀지연 현상은 Hansbo, Onoue 등의 압밀식을 이용하여 고려할 수 있으나 실제 지반거동은 이론적 방법과 많은 차이가 있을 수 있음에 유의해야 한다.

(다) 설계

(a) 샌드 드레인 공법

① 공법의 개요 및 특징

샌드 드레인 설계 시 모래의 배수재 역할만을 고려하고 배수재의 전단강도는 고려하지 않는 것이 일반적이며, 사용되는 모래는 투수성계수가 $10^{-5}m/sec$ 이상인 양질의 투수성 모래를 사용하는 것이 바람직하다. 모래의 입도는 다음을 표준으로 하는 것이 일반적이다.

〈표 14.22〉 배수 채움재의 입도

모래		쇄석	
항목	표준치	체의 평균크기(mm)	체의 통과 중량 백분율(%)
74 μm (No.200)체 통과량	3% 이하	50	100
D ₈₅	1~8 mm	40	95~100
D ₁₅	0.1~0.9 mm	20	50~80
주) D ⁸⁵ , D ₁₅ 란, 각각 입도곡선에 있어서 통과 중량 백분율이 85% 및 15%에 상당하는 재료의 입경을 말한다.		5	15~40
		2.5	5~25
		0.1	0~15
		0.074	0~3

② 시공

타설 방법은 타입식, 바이브로 해머식, 워터제트식 및 오거식 등이 있으며, 타설방법과 케이싱 직경에 따라 타설 가능한 지반의 N치가 10~25까지 차이가 난다. 따라서, 설계 및 시공에 있어서는 케이싱 지름, 연약층 심도 및 강도, 지반의 교란, 채움재 종류 등을 충분히 고려하여 타설방법을 결정해야 한다.

참고로 국내의 경우에는 바이브로 해머 방식이 많이 사용되며, 이때 시공한계 심도는 사용 장비의 규모에 따라 다르나 약 35~40 m 정도이다.

(b) 팩 드레인 공법

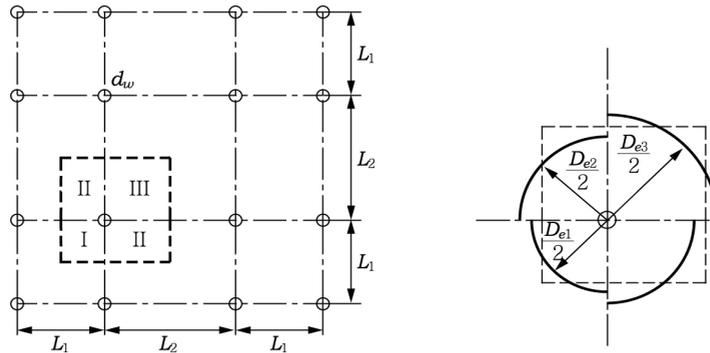
① 공법의 개요 및 특징

공법의 원리는 Sand drain공법과 동일하나 Sand drain의 단점인 배수재의 절단(necking)이나 설계 직경보다 작게 형성되는 것을 방지하기 위해 합성섬유 망(net)에 모래를 넣어 drain재를 형성하는 공법이다.

② 설계

pack drain 공법의 설계는 sand drain의 설계 방법과 거의 동일하다고 볼 수 있다.

다만, 배수재를 정방형 또는 삼각형 배치로 4~6분을 동시에 타설하므로 배수재의 간격이 일정하지 않지만, 다음과 같이 1본이 부담하는 분담면적을 고려하여 전체의 평균압밀도로 하면 이론치와 거의 근사하게 계산할 수 있다.



$$\text{유효경}(d_e) : d_{eI} = 1.128 \times L_1 (= 1.2\text{m}), d_{eII} = 1.128 \times \sqrt{L_1 \times L_2}, \\ d_{eIII} = 1.128 \times L_2$$

$$\text{시간계수}(T_h) : T_{hI} = \frac{c_h t}{d_{eI}^2}, T_{hII} = \frac{c_h t}{d_{eII}^2}, T_{hIII} = \frac{c_h t}{d_{eIII}^2}$$

$$\text{간격비}(n) : n_I = \frac{d_{eI}}{d_w (0.12\text{m})}, n_{II} = \frac{d_{eII}}{d_w (0.12\text{m})}, n_{III} = \frac{d_{eIII}}{d_w (0.12\text{m})}$$

$$\text{평균 압밀도} U = \frac{A_I U_I + 2A_{II} U_{II} + A_{III} U_{III}}{A_I + 2A_{II} + A_{III}}$$

(c) P.B.D 공법(plastic board drain)

수평방향 압밀이론은 점토층 내의 간극수가 배수재의 원형 단면으로 배수되는 것으로 가정하나 P.B.D는 폭 100 mm, 두께 3 mm의 장방형 배수재를 사용하므로 원형배수재로 환산된 등가직경 d_w 를 구하여 압밀시간을 산정한다.

$$d_w = a \cdot \frac{2(b+t)}{\pi}$$

여기서, d_w : 배수재의 등치환산원 직경, b : 배수재 폭 (보통 $b = 100$ mm)

t : 배수재 두께(보통 $t = 3$ mm), a : 형상계수(보통 $a = 0.9$: 朴, 1994)

(4) 다짐 및 치환공법

(가) 동다짐공법

(a) 적용

동다짐공법은 강재 또는 콘크리트 제품의 중량의 추를 10~25 m 높이에서 자유 낙하시켜 충격력과 진동에 의하여 지반을 개량하는 공법이다.

동다짐공법은 암버력, 자갈층, 폐기물 매립지, 불균질 사질토 지반 등에 적용성이 양호한 것으로 알려져 있으나 세립토에서는 투수성과 점착력에 따라 적용 가능성이 달라지며, 특히 포화점토에서의 개량 효과는 사질토에 비해 낮은 것으로 알려져 있다. 일반적인 개량심도는 10m 정도이나 타격에너지를 증가시키면 40 m 심도까지 가능하며, 공법의 특징은 다음과 같다.

- (가) 1타격 당 타격 에너지를 증가시켜 깊은 심도까지 개량이 가능하다.
- (나) 모래, 자갈, 세립토, 폐기물 등 광범위한 토질에 적용이 가능하다.
- (다) 지반 내에 암괴 등의 장애물이 있어도 가능하다.
- (라) 사전 지반조사에서도 파악하기 어려운 지반의 불균일성에 시공 중 유연하게 대처할 수 있고, 부지의 전역에서 확실한 개량 효과를 확보 할 수 있다.

(b) 설계 및 시공

동다짐공법의 설계는 현재까지 이론적 정립이 부족하여 기존 사례를 통한 예비설계를 시행하고 시공 중 시험시공에 의해 설계를 보완한 후 본 시공을 시행한다.

① 중추의 중량(W)과 낙하고(H) 결정

지반개량 깊이와 타격 당 에너지로 표현할 수 있는 중추의 중량(W)과 낙하고(D)의 관계는 다음과 같은 경험식으로 표현할 수 있다.

$$D = C \times \alpha \times \sqrt{W \times H}$$

여기서, D : 개량 깊이(m)

W : 추의 중량

C : 낙하 방법에 따른 계수

H : 낙하 높이(m)

α : 토질영향계수(폐기물 0.3~0.5, 사질토 0.4~0.6, 쇄석 0.5~0.7)

② 타격 간격(L)

타격 간격은 추의 무게와 크기, 낙하 높이, 지반 종류 등을 고려하여 적용한다. 타격 간격은 개량지반의 세립분 함유량이 많을수록 좁게 하는 것이 유리하며, 일반적인 범위는 0.5~1.0D 정도이다.

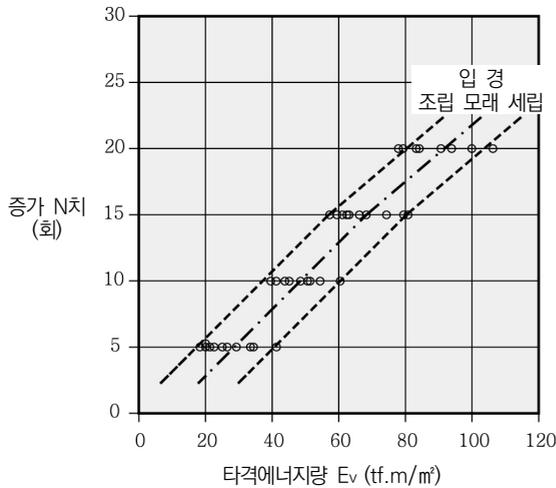
③ 타격 에너지

경험적 도표에 의해 단위체적 당 타격 에너지를 결정하고, 개량심도를 고려하여 단위 면적 당의 타격 에너지(E_A)를 결정한다.

④ 타격 횟수(N)

$$N_b = \frac{E \times L^2}{W \times H \times n}$$

여기서, N_b : 1타격점 당 타격 횟수(회) E : 타격 에너지($kN \cdot m/m^2$)
 L : 제 1시리즈의 타격점 간격(m) W : 증추의 증량(kN)
 H : 낙하 높이(m) n : 시공의 단계 수



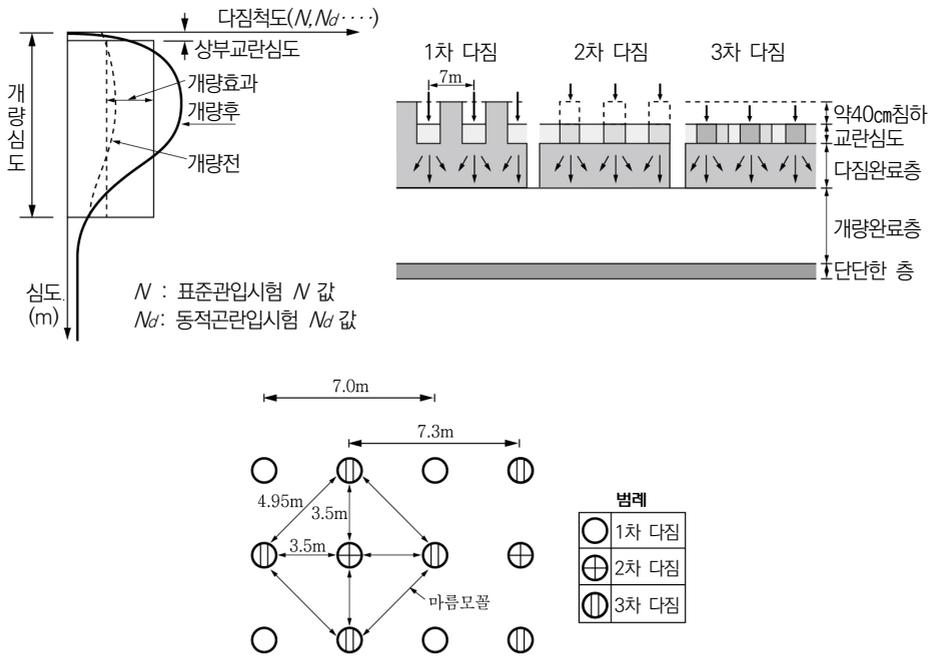
$$E_A = E_V \times D$$

여기서, E_A : 단위 면적 당 타격 에너지($kN \cdot m/m^2$)
 E_V : 단위 체적 당 타격 에너지($kN \cdot m/m^3$)
 D : 개량 깊이(m)

〈그림 14.17〉 증가 N치와 타격 에너지 량(E_v)

⑤ 시리즈 수(n), 정치 기간, 마무리 탬핑

시리즈 수(n)는 타격수를 나타내는 것으로 보통 제 1·2·3시리즈(또는 다짐)라고 부르며, 개량대상층의 세립분 함유량이 많을 경우에는 시리즈 수를 증가시켜 타격 에너지 중복에 의한 과잉간극수압의 누적을 감소시키는 것이 바람직하다. 개량대상 지반의 세립분 함유량이 많은 경우나 지하수위가 높은 경우에는 타격에 의해 발생한 과잉간극수압이 누적되어 개량효과가 저하되게 된다.



〈그림 14.18〉 다짐 개량효과 및 타격단계별 개념도.

동다짐 시 과잉간극수압이 소산되는 시간동안 대기하는 기간을 정치 기간이라 하며, 정치 기간은 지반의 투수성과 지하수위 조건을 고려하여 결정하되 설계 시에는 유사 시공 사례를 참고하여 정치 기간을 산정하고 시공 시 현장계측 결과를 근거로 최종 결정해야 한다. 구속응력이 작은 지표부는 다짐 효과가 저하되므로 최종단계에서 동다짐 에너지보다 적은 다짐 에너지로 마무리 탬핑을 시행한다.

(나) 동치환공법

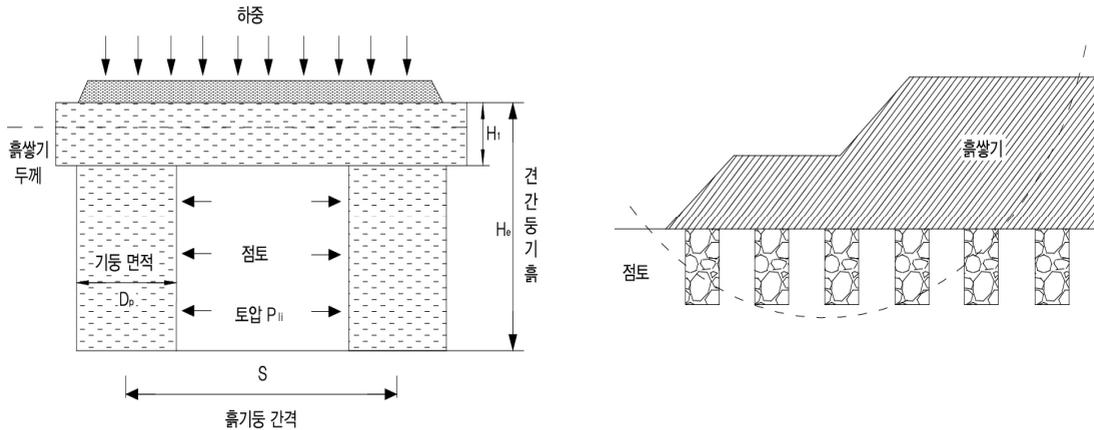
(a) 적용

동치환공법은 점성토 지반에서 동다짐공법의 적용 한계성을 극복하기 위해 개발된 공법으로 연약지반 위에 포설한 자갈, 쇄석 등의 재료를 타격 치환하여 점토층에 대구경의 쇄석 기둥을 조성하는 공법이다.

개량 심도가 깊은 경우에는 쇄석기둥이 연약층 하부까지 관입되지 않고, 구속응력이 작은 지표부에서 주변으로 확장되는 현상이 발생하므로 적정 타격에너지의 결정이 무엇보다 중요하다.

(b) 설계 및 시공

동치환공법의 설계 및 시공은 동다짐공법과 유사하나 쇄석 기둥 사이의 아치 현상을 만들기 위하여 쇄석기둥 상부에 적정 두께의 쇄석층을 설치하는 것이 무엇보다 중요하며, 쇄석층 두께는 다음과 그림과 같이 결정한다.



〈그림 14.19〉 동치환 단면도

상부에 쇄석층이 아치 현상을 발휘하기에 충분할 경우에는 하부 지반은 점토와 쇄석으로 이루어진 복합지반으로 가정할 수 있으며, 이때 지지력은 점토와 쇄석의 면적비에 따라 가중 평균된 지지력으로 적용할 수 있다.

일반적으로 동치환에 의한 개량가능 심도는 약 5~10 m 내외로 알려져 있으며, 심도가 깊을 경우에는 연직배수공을 선행하는 것이 필수적이다.

(다) 치환공법

(a) 치환공법의 종류

연약지반 상에 흡생기나 구조물 건설 시 침하와 지지력이 문제가 되는 연약층을 제거하고 양질토로 치환하는 공법을 치환공법이라고 하며, 개량 원리가 명확하기 때문에 재하중공법과 함께 오래 전부터 이용되어 왔다.

치환공법은 치환 심도에 따라 전층 치환과 부분 치환으로 나눌 수 있으며, 시공방법에 따라 굴착치환, 강제치환과 동치환 등으로 구분된다.

(b) 굴착치환공법

굴착치환공법은 연약층을 지반개량이 필요로 하지 않는 깊이까지 굴착해서 양질 토사로

되메우는 공법이다. 일반적으로 연약층 두께가 얇은 경우에 적용성이 양호한 편이나 연약층 심도가 깊은 경우에는 굴착면의 안정성이 문제가 되고 시공성이 저하되므로 적용 시 유의해야 한다.

(c) 강제치환공법

① 적용

강제치환공법은 재료의 자중에 의해 지반의 파괴를 유발하여 원지반 점토층을 주위로 배제하며 치환하는 공법이다.

치환에 사용되는 재료는 중량이 무거운 사석이 주로 이용되며, 시공이 비교적 간편한 장점이 있으나 재료의 자중에 의해 치환이 용이한 경우 즉, 지반강도가 연약한 경우에 적용이 가능하므로 주로 해상구간의 공사용 가도나 호안공사에 이용되는 사례가 많다.

② 치환심도

치환심도 산정에 많이 사용되고 있는 방법은 다음과 같으나 실제 시공 시 치환심도는 토질 조건, 시공 조건, 재료 및 시공 방법 등에 따라 크게 달라지므로 적용 시 유사한 시공사례를 참고하여 결정하는 것이 바람직하다.

㉠ 지지력 공식에 의한 방법

쌓기 하중과 지반의 극한지지력이 일치하는 심도를 치환심도로 결정하는 방법으로 계산이 간편한 편이나 지지력 공식의 재하조건이 실제 현장의 재하조건과 상이하고 쇄석 간의 마찰저항을 무시하므로 실제보다 과대 평가되는 것에 유의해야 한다.

㉡ 원호활동에 의한 방법

원호활동에 의한 방법은 원호활동에 대한 안전율이 1인 임계원을 결정하고, 임계원의 저면을 치환심도로 결정하는 방법으로, 지지력 공식에 의한 방법에 비해 합리적인 방법으로 볼 수 있다. 그러나 연약층 두께가 얇고 임계원이 제체 선단부를 통과할 경우에는 치환심도를 추정하는데 어려움이 있다.

㉢ 소성유동이론에 의한 방법

소성유동이론은 초연약 점토가 유동 상태이고 지반의 수평토압은 일정하며, 초연약 점토층의 상하 경계면에서 사면 활동이 발생하지 않은 것으로 가정하여 치환심도를 산정하는 방법이다.

(5) 다짐말뚝공법

(가) 적용

다짐말뚝공법은 충격 및 진동에 의해 지중에 모래 또는 쇄석으로 형성된 다짐말뚝을 형성하여 기초지반 지지력을 증진시키는 공법으로 모래를 이용할 경우를 샌드 콤팩션 파일 공법, 쇄석을 이용한 경우를 쇄석 콤팩션 파일 공법이라 부르고 있다.

이 공법은 모래 지반에서 액상화의 방지 및 지지력 증진, 점토 지반에서는 기초지반의 활동 파괴방지, 교대 접속부 편토압과 침하의 경감을 목적으로 적용한다.

(나) 재료

말뚝재료는 모래 또는 쇄석을 사용하며 쇄석은 모래와 같이 잘 막히지 않는 재료를 사용하되 말뚝의 재료 선정은 경제성을 충분히 검토한 후 결정하는 것이 바람직하다.

다짐말뚝공법의 설계 및 시공방법은 재료에 상관없이 거의 같다고 볼 수 있으며, 실무적으로 안정 계산에 이용하는 내부마찰각, 하중 분담비는 표 14.23를 표준으로 한다. 또한, 말뚝재료의 입도는 배수채움재의 입도 표 14.22에 따르기로 한다.

〈표 14.23〉 설계에 이용하는 정수

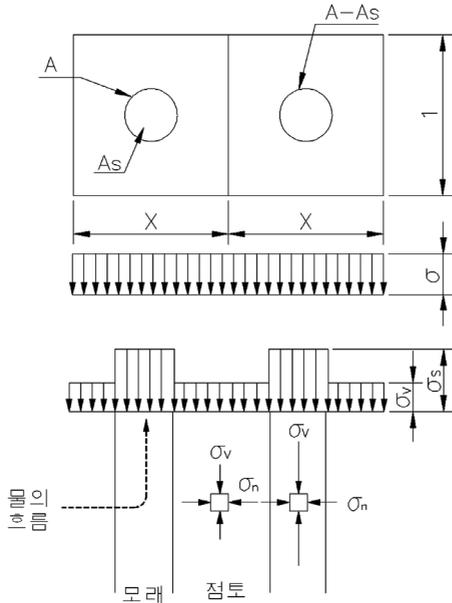
구 분	모 래	쇄 석
내부마찰각	25 ~ 30°	35°
하중분담 비	3	

(다) 점성토 지반의 설계법

(a) 복합지반 기본개념

점성토에 적용되는 다짐말뚝의 경우 점성토와 다짐말뚝으로 이루어진 복합지반 효과를 고려하여 설계할 수 있다.

다짐말뚝이 설치된 지반에 하중이 재하 될 경우에 다짐말뚝과 지반의 강성 차이에 의해 아칭(arching) 현상이 발생하게 된다. 이로 인해 다짐말뚝에는 응력이 집중되고 점성토에 작용하는 응력은 감소하여 지지력 증가 및 침하 저감 등의 효과가 발생한다.



여기서, A : 분담 면적
 As : 쇄석다짐말뚝 면적
 Ac : 점성토 면적
 σ : 상재하중
 σs : 쇄석다짐말뚝 응력
 σc : 점성토 응력
 σh : 수평응력

〈그림 14.20〉 복합지반의 기본개념

복합지반 위에 평균응력 σ 가 재하되어 지반반력으로 말뚝에 σ_s , 점성토에 σ_c 의 응력이 발생하고, 각각의 면적 A_s , A_c 의 범위 내에서 응력이 일정하다고 하면 다음 식이 얻어진다.

$$\sigma A = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c$$

응력분담 비 ($n = \sigma_s / \sigma_c$)를 이용하여 이 식을 변형하면,

$$\sigma A = n \sigma_c A_s + \sigma_c A_c = \sigma_c (n A_s + A_c)$$

이것으로,
$$\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{A}{n A_s + A_c} = \frac{1}{(n-1)a_s + 1} = \mu_c$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{n A}{n A_s + A_c} = \frac{n}{(n-1)a_s + 1} = \mu_s$$

$$a_s = \frac{A_s}{A} \quad (\text{치환율})$$

여기서, μ_c 와 μ_s 는 상재압에 의해 각각 점토층과 다짐말뚝에 발생하는 응력 비이다.

(b) 침하 및 압밀계산

지반에 설치된 다짐말뚝은 하중의 지지효과 뿐만 아니라 연직배수재로서의 역할을 하며, 이로 인한 압밀시간은 연직배수공법 설계와 동일한 방법으로 결정한다.

다만, 타설 시 진동에 의한 교란영향이 크기 때문에 계산에 의한 압밀속도에 비해 실제 압밀속도가 늦어지는 경향이 있으므로 최소 1~3개월 정도의 방치 기간을 두는 것이 바람직하다.

다짐말뚝공법을 적용한 복합지반의 침하량은 원지반의 침하량에 침하저감계수를 곱하여 산정하며, 침하저감계수(β)는 치환율에 따라 다음과 같이 적용한다.

$$\text{저치환}(a_s \text{ 50 \% 이하)인 경우 : } \beta = \mu_c = \frac{1}{1 + (n-1) \cdot a_s}$$

$$\text{고치환}(a_s \text{ 50 \% 이상)인 경우 : } \beta = 1 - a_s$$

(c) 안정 계산

다짐말뚝이 설치된 복합지반의 안정 계산은 Mohr-Coulomb의 전단강도 공식을 기본으로 복합지반의 평균 지반강도를 산정하여 적용하거나 복합지반의 점착력과 내부마찰각을 산정하여 적용할 수 있다. 두 방법의 원리는 근본적으로는 비슷하나 복합지반의 평균 지반강도의 산정은 통상 연약층 중앙부에서의 유효응력을 이용하여 전단강도를 산정하므로 전단파괴가 발생하는 심도가 이와 상이할 경우에는 개량 효과를 과대 또는 과소 평가의 우려가 있다.

따라서, 절편법에 의해 안정 해석을 시행할 경우에는 복합지반의 점착력과 내부마찰각을 각각 산정하여 적용하는 것이 바람직하며, 다짐말뚝에 의해 개량된 지반의 평균 점착력(C_m)과 평균 내부마찰각(ϕ_m)은 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$C_m = (1 - a_s) (C_0 + \Delta C)$$

$$\phi_m = \tan^{-1} (\mu_s \cdot a_s \cdot \tan \phi_s)$$

여기서, a_s : 치환율

C_0 : 원지반의 점착력

ΔC : 압밀방치에 의해 증가된 점착력 μ_s : 응력집중계수

ϕ_s : 모래의 내부마찰각

(라) 모래지반의 설계법

느슨한 사질 지반의 개량 목적은 액상화 방지, 침하량 저감, 제체의 안정성 및 지지력 증진으로 크게 구별할 수 있다.

사질 지반의 지지력, 침하량, 액상화 저항률 등은 일반적으로 N치로 추정되는 경우가 많기 때문에 사질 지반의 개량 설계나 개량 효과의 확인에서도 N치가 중요한 지표로서 이

용되고 있다. 다짐말뚝 공법으로 개량된 사질 지반의 품질은 개량 후의 말뚝 사이 N치로 평가할 수 있다.

사질 지반에서의 설계법은 N치 또는 상대밀도(D_r)와 간극비(e)의 경험적 도표로부터 다짐말뚝의 치환율(a_s)을 산정하는 小川·石堂(1965)의 방법과 치환율(a_s)와 개량 전·후 N치의 경험적 도표에 의해 치환율(a_s)을 산정하는 방법[不動建設(株)研究室, 1971] 등이 있다.

일반적으로 개량 지반의 세립분 함유율이 증가할수록 다짐 효과가 감소되고, 표층 1~2 m 부분은 구속력이 작아 충분한 다짐이 이루어지지 않음에 유의해야 한다.

(6) 고결공법

(가) 공법 개요 및 원리

고결공법은 지반을 구성하는 토립자 사이를 일체화(고결)시켜 지반을 개량하고자 하는 공법으로 개량방법 및 원리에 따라 다음과 같이 구분된다.

〈표 14.24〉 고결공법의 종류

구 분	공 법 개 요
주입공법	지반 천공 후 주입재를 지반에 충전하여 투수성과 강도특성을 개선
고압분사공법	초고압수와 에어제트(air jet)에 의해 지반을 절삭한 후 주입재를 원지반과 혼합하거나 치환
심층혼합처리공법	오거나 특수 교반장치를 이용하여 지반을 천공한 후 원지반과 고결재를 교반
압축그라우팅	비유동성 모르타르를 압력 송출하여 지반을 압축하며 개량체를 형성

(나) 주입공법

주입공법은 지반을 천공하여 지반 내에 주입관을 설치하고, 주입재를 지반에 충전시켜 지반을 고결시키는 공법으로 주로 차수 및 지반강도 증대를 목적으로 한다.

(a) 주입재에는 시멘트계와 같은 현탁액형과 물유리계 및 고분자계 등의 용액형으로 구분되며, 국내의 경우 반현탁액형의 적용이 대부분을 차지한다.

(b) 주입대상 지반에 대한 주입량은 다음 식으로 계산한다.

$$Q = V \times n \times a(1 + \beta)$$

여기서, V : 주입개량범위의 총체적

n : 지반의 간극률

a : 지반의 간극에 대한 주입재의 충전율

β : 주입의 손실계수

$a(1+\beta)$: 주입재의 손실을 고려한 충전율

$n \times a(1+\beta)$: 주입률

- (c) 주입공의 배치 방법은 단열식과 복열식으로 크게 나누며, 복열식은 장방형 배치와 정삼각형 배치로 구분된다.

주입공의 간격은 주입목적 · 지반조건 · 주입재의 종류 및 겔 타임 · 주입관의 형식 · 주입순서 등을 고려하여 결정하며, 일반적인 주입공 간격은 0.6~2.5 m 범위이다. 주입공의 배치는 개량 목적이 지수일 경우에는 개량원이 서로 중첩되도록(중첩 배치) 하고, 지반 보강이 목적인 경우에는 점점 배치를 적용한다.

(다) 심층혼합처리공법

(a) 적용

교반공법은 석회, 시멘트 등의 안정재(고결재)를 지반과 혼합하여 수화 반응, 포졸란 반응 등의 고결작용에 의해 연약층을 강화시키는 화학적 지반개량공법이다.

심층혼합처리공법은 샌드 드레인이나 모래다짐말뚝과 같은 물리적 개량 공법에 비해 개량 효과가 큰 편이나 공사비가 고가 이어서, 쌓기 시 인접 구조물의 영향이 예상되는 구간이나 측방변형을 최소화 할 필요가 있는 특수한 경우에 적용되는 경우가 많다.

(b) 설계 및 시공

교반공법에 의한 개량 방식은 개량목적에 따라 블록(전면)식, 벽식, 격자식, 말뚝식 등이 있으며, 각각의 방식별로 설계방법이 다르다.

심층혼합처리공법의 설계 방법은 원호활동검토에 의한 방법과 지지력에 의한 방법이 있으며, 설계 시에는 두 가지 방법에 의해 안정 검토를 시행하여 안정성이 확보되도록 하는 것이 바람직하다.

안정검토에 적용되는 개량체의 강도는 실내배합시험에 의한 허용강도를 적용하나 실제 개량 효과는 지반과 개량재의 종류에 따라 많은 차이를 보이므로 시험시공에 의해 최종 결정하는 것으로 한다.

(라) 고압분사공법

고압분사공법은 초고압수와 에어제트(air jet)에 의해 지반을 절삭한 후 시멘트 밀크 등의 경화재를 원지반과 교반하거나 치환하여 지중에 0.8 ~ 2.5 m 직경의 원주형 고결체를 형성하는 공법이다.

고압분사공법은 적용 토질에 대한 제약이 적고, 사용 장비가 소형인 장점이 있으나 배출되는 슬라임의 처리가 필요하고, 공사비가 고가이어서 주로 일반적인 지반개량공법의 적용이 어려운 구간에 적용한다.

(7) EPS(expanded polyester system) 공법

(가) 적용

EPS 공법은 발포폴리스틸렌의 대형 블럭을 경량 흙쌓기 재료로 토목공사에 이용하는 공법으로서, EPS의 단위체적중량이 흙의 약 1/100 정도로 가벼운 초경량성이 가장 큰 장점이다.

일반적으로 EPS 공법은 연약지반 상 쌓기 공사나 구조물 뒷채움 재료로 활용되며, 도로·철도·공원조성 등의 각종 토목공사에 적용된다.

(나) 설계

EPS 공법의 계획·설계는 대상 구조물의 종류, 규모, 중요성 등을 고려하여 다른 공법과의 종합적인 비교를 통해 EPS 공법의 장점이 최대한 발휘될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 연약지반 구간에서의 설계는 굴착 제거되는 흙 무게와 EPS를 포함한 구조물 하중이 일치하는 심도까지 EPS 블럭을 설치하여 하중증가를 “0”으로 하는 것이 일반적이다.

$$\sigma_z = \text{EPS 자중} + \text{포장 및 교통하중} < \sigma_a$$

여기서, σ_z : 굴착 제거되는 흙 무게 σ_a : EPS의 허용압하중

EPS를 설치할 경우 토공 접촉부에서 부등침하가 발생할 수 있음에 유의해야 하며, EPS 블럭은 지하수위 상부에만 설치하되 수위 변화가 심한 하천이나 해상 구간에서는 적용하지 않는 것으로 한다.

14.8.3 장기침하 대책

연약지반상의 장기침하 대책은 공용 후에 계속되는 침하에 대응할 수 있는 구조로 설계하는 것으로서, 관리 단계에서의 보수 방법·규모·난이성을 고려한 후에 경제적으로 유지 관리하기 쉬운 대책공을 검토하도록 한다.

연약층이 두꺼운 경우에는 공용 후 발생하는 잔류침하로 인하여 각종 도로시설물의 기능저하가 발생할 수 있으며, 이러한 잔류침하에 대해서는 단차 조정, 덧씌우기, 배수 불량 수정 등의 보수 작업에 의해 대처할 수 있다.

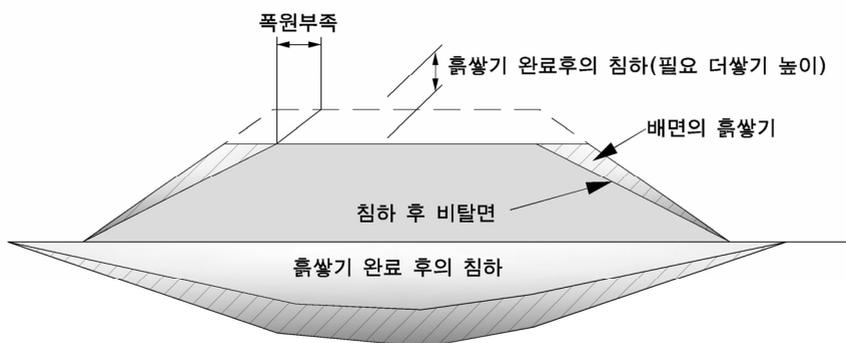
따라서, 제체의 안정성이 문제가 되지 않는 경우에는 잔류침하에 대한 별도의 공법을 적용하기 보다는 잔류침하에 대한 대응과 보수가 용이한 구조로 계획하는 것이 바람직하다.

다만, 지중 매설관의 허용 침하량을 만족하지 않는 경우나 보수가 곤란한 장소 등 특수한 경우에 대해서는 경제성이나 효과를 충분히 검토한 후 유리한 침하 대책공을 선정하도록 한다.

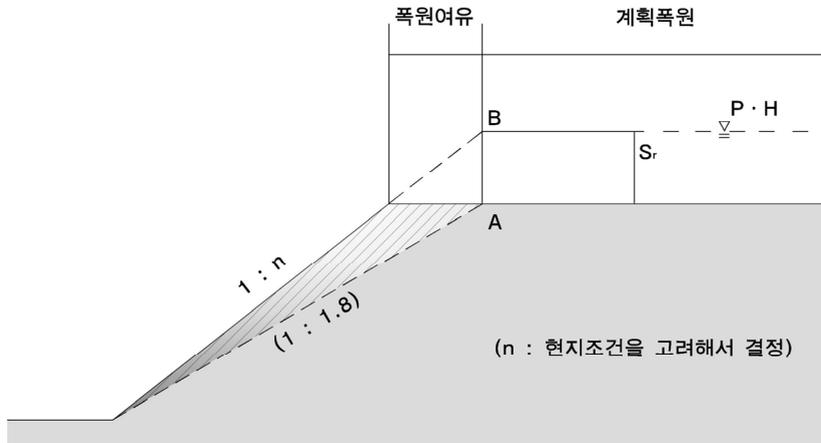
(1) 제체 구조

(가) 잔류 침하량이 큰 구간의 여유 폭의 확보

공용 후 잔류침하가 큰 구간에서는 흠쌓기 종료 시 제체 형상을 계획 단면 그대로 마무리 하면 흠쌓기 완료 후 침하에 따른 덧씌우기에 의한 폭원 부족이 생긴다(그림 14.21 참조).



〈그림 14.21〉 제체의 침하에 따른 제체 폭의 부족



〈그림 14.22〉 제체 폭의 여유를 잡는 방법

따라서, 제체의 시공 폭은 침하를 고려한 폭원의 여유를 확보하되 폭원 여유는 그림 14.22와 같이 S_r (공용 후 5년 간의 침하량)에 해당하는 폭으로 한다.

그러나 국내의 경우 대부분 허용잔류침하를 100 mm 이하로 적용하여 설계하므로 설계 시 폭원 여유의 확보 여부는 인근 지역의 유지관리 사례를 참고하여 결정하는 것이 바람직하다.

(나) 일반 제체부의 더돋기

공용 초기에는 잔류침하의 발생이 크게 되므로 더돋기에 의해 유지보수 빈도의 저감을 유도 하는 것이 바람직하며, 더돋기 양은 연약층의 규모·연장(구조물, 원지반간의 거리) 등을 고려하여 결정해야 한다. 더돋기의 추정 자료는 계측관리 결과를 이용하도록 한다.

(2) 잠정 포장

잔류 침하량이 클 것으로 예상되는 구간에서는 잠정 포장을 검토하는 것이 바람직하다. 잠정 포장은 원칙으로 계획 높이(P.H)는 변하지 않고, 노상 마무리 높이(P.H.E)는 잠정 포장과 완성 포장의 두께 차이만큼 높게 하도록 한다.

(3) 구조물

(가) 암거의 더돋기 및 여유 단면의 확보

암거 설치 후 침하에 대해서는 ‘더돋기 시공’ 및 ‘단면 여유의 확보’에 따라 대처하는 것으

로 한다.

(a) 도로 전용 암거

기본적으로 더돋기로 대처한다. 더돋기만으로 대처할 수 없는 경우에는 그 부족분을 '단면 여유'로 보충한다.

(b) 수로 암거 및 수로 병설 암거

기본적으로는 '단면 여유'로 대처하고, 가능한 범위에서 '더돋기'를 한다. 또, 토피로 인해 더돋기 시공 및 여유 단면의 확보가 곤란한 경우에는 배수 경사를 고려한 후에 접속 도로를 절단하여 늘어뜨리는 등의 대책을 세운다.

(c) 교대, 암거의 옹벽은 침하에 대응할 수 있는 구조로 한다.

(d) 조인트부의 지수 구조

암거 조인트부에는 모든 주변에 지수판을 넣고, 저판에는 슬립 바를 넣는다. 지수판은 부등침하에 대응할 수 있는 구조로 한다.

(나) 말뚝 기초를 가지는 기초 저면의 공동화 대책

말뚝 기초나 케이싱 기초를 시공한 교대의 기초 저면에는 장기 침하로 인한 공동이 생기는 경우가 있다. 이와 함께 교대 접속부의 단차 외에 노면이나 비탈면의 함몰이 생기는 경우도 있다. 현재 대책공법으로 확립되어 있는 것은 없으나 건조 모래, 발포 콘크리트 등을 채우는 방법이 사용되는 예가 있다. 따라서, 장기침하에 의한 공동화가 예상되는 구조물에는 건설 시에 충전재를 채워 넣을 수 있는 파이프 등을 설치해 두는 것도 중요하다.

(4) 부속 구조물

(가) 배수 구조물

연약지반 상의 배수 구조물은 될 수 있는 한 침하가 진행된 후에 시공하고, 다음 사항을 고려한 구조로 한다.

(a) 연약지반 상에 설치할 경우, 어느 정도의 침하에 대응할 수 있어야 하며, 보수가 용이한 구조로 한다.

(b) 중앙분리대의 배수 구조물은 증축, 재설치 등의 유지보수를 고려하여 오픈 타입으로 한다.

(c) 부등침하에 의한 노면 침수 처리를 위한 배수구의 배치 검토

침하와 함께 물이 고일 염려가 있는 교대 접속부나 암거, 땅깍기·흙쌓기 경계부 및 침하가 크게 예상되는 구간에는 미리 도랑을 배치해 둔다. 또한, 횡단관의 경사도 일반부보다

크게 하여 침하에 따라 배수 불량을 초래하지 않도록 한다.

(나) 방호책

공용 후의 부등침하에 의한 단차 조정, 종단 조정 및 덧씌우기로 소요 높이가 부족해지므로 미리 보수를 전제로 한 구조로 설치할 필요가 있다. 이때 이용되는 방호책의 부재는 증축에 견딜 수 있는 것으로 한다.

(다) 통신관로 등

땅깎기·흙쌓기 경계부, 교대 접속부 등 커다란 단차가 발생하기 쉬운 장소에서의 지하 매설관의 사용은 적극 피한다. 어쩔 수 없이 통신관로 등을 매설할 경우에는 침하 대책을 강구해 둔다.

(라) 그 외의 구조물

제체의 침하에 수반하는 방음벽이나 문형식 표지의 표주도 침하하기 때문에 부등침하가 예상되는 장소에서 지주 간격을 고려하고 증축하기 쉬운 구조로 한다.

14.9 현장 계측

14.9.1 현장 계측의 목적

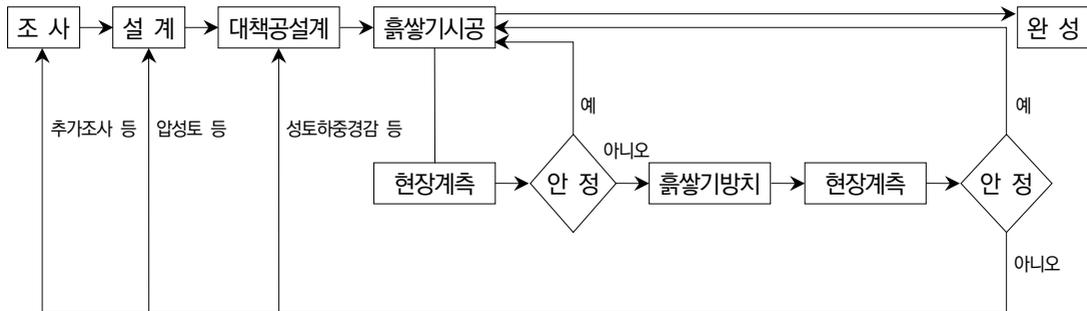
연약지반상의 흙쌓기 시공은 현장 계측에 의해 제체의 안정 및 침하 관리를 원칙으로 한다.

연약지반상의 흙쌓기 시공에 있어서는 제체 본체 및 지반의 거동과 토질 성상의 변화 예측을 포함한 현장 계측에 의한 관리가 중요한 부분을 차지한다. 연약지반 상 쌓기 시 현장 계측은 침하 및 안정관리 측면에서 수행되는데 침하의 경우는 일정간격으로 측정해야 하나 안정관리의 경우는 지반 특성과 인근의 구조물 등에 따른 zone을 구분하고 대표 단면에 대하여 중점 계측을 시행해야 하며, 그 결과를 일상구간의 시공관리의 지표로 해야 한다.

(1) 안정 관리

연약지반에 있어서 흙쌓기의 기본적인 시공법은 제체하중에 의해 지반의 압밀을 진행시켜 강도 증가를 도모하면서 단계적으로 흙쌓기 하는 공법이다. 따라서, 제체 하중이 지반의 지지

력과 균형을 갖도록 제체 하중을 시간적으로 관리하여 소정의 제체 높이까지 가능한 한 빨리 흠쌓기 하는 것이 가장 합리적인 시공법이 된다. 요컨대, 안정 관리란 현장 계측에 기초를 두고 제체 파괴의 위험성의 유무를 판단하면서 흠쌓기 속도나 시공 순서 등을 관리하는 것을 말한다. 그림 14.23에 현장 계측 결과를 활용한 시공의 기본적인 흐름을 나타내었다.



〈그림 14.23〉 현장 계측 결과를 활용한 시공방법

(2) 침하 관리

연약지반 상에 시공된 흠쌓기에서는 큰 침하가 장기간 계속되기도 하고, 예상 이상의 부등침하가 발생하는 경우도 많다. 이에 따라서 제체나 구조물에 생기는 지장을 최소화하기 위하여 장해를 제거할 필요가 있다. 장기 침하 대책을 강구함과 함께 흠쌓기 양을 파악하기 위해 실시하는 것이 침하 관리이다.

14.9.2 계측 계획

설계 시 예측되는 모든 위험 가능요소나 불확실한 지점에 다양한 종류 및 수량의 계측기를 설치해야 되며, 예측되는 상태를 계측 결과와 비교 분석한 후 적절한 시기에 조치를 취할 수 있도록 설치하고 관리해야 한다.

(1) 계측 관리 계획 시 검토사항

시공상의 안전과 품질검증을 위하여 현장 계측을 실시해야 하는 바 다음과 같은 사항에 대해 사전에 충분한 검토가 실시되어야 한다.

- (가) 지반조건 및 주변 환경조건
- (나) 계측 대상이 되는 구조물이나 지반의 계측 목적
- (다) 계측 목적에 따른 계측 범위와 계측 위치

- (라) 계측기의 종류와 수
- (마) 계기의 매설, 설치, 유지, 보호 등의 방법
- (바) 예상 변위량 및 계측 가능성
- (사) 공사 공정에 맞는 계측 기간과 계측 빈도
- (아) 안정관리기법 및 관리기준 값

(2) 계측기 매설 위치 선정

(가) 매설 위치 선정 기준

목적에 맞는 계측기를 선정 후 그 계측기를 어떻게 배치할 것인가 라는 것이 중요한 관건이 된다. 계측 위치의 선정이 측정 대상물의 규모나 주변 구조물에의 영향 정도에 좌우된다는 것은 말할 나위도 없지만 측정 개소의 지형, 지질, 토질 특성 등의 중요한 요소가 있다는 것도 간과할 수 없는 사항이다. 이러한 사항들을 파악하지 못하고 측정한다는 것은 단순히 계측한다라고 하는 요식 행위에 그쳐, 필요한 자료를 얻지 못하는 결과를 초래하게 된다. 공사에 지침이 될 수 있는 결과를 얻기 위해서는 흠뿍기 자체 및 원지 반이나 인접 구조물의 거동을 충분히 고려하고 또 유사한 조건 하에서 계측 예를 참고로 하는 것이 좋다. 일반적으로 계측기의 매설 위치 선정 기준은 아래와 같다.

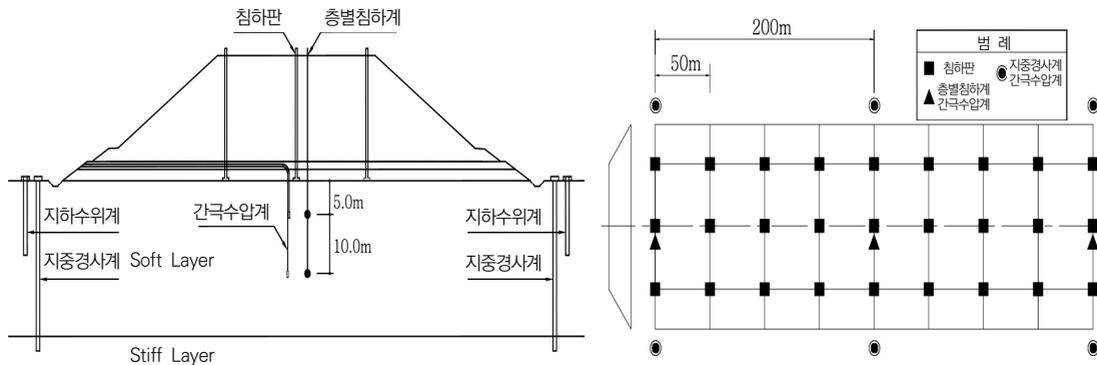
- (a) 대상 지역 전체를 대표하는 지점
- (b) 취약 지역
- (c) 지반 개량 효과 분석 및 안정 관리 대상 지역
- (d) 차량, 장비로부터 보호 및 관리가 용이한 지점
- (e) 계측기의 상호 연계를 파악할 수 있도록 통합
- (f) 사전 자료 및 시추 조사 등으로 지반 조건이 충분히 파악된 지점

(나) 계측기 배치

계측 내용에 따라 필요한 계측기를 설치해야 하겠으나, 통상의 압밀시공과 관련, 다음 사항의 계측이 수행되어야 한다. 지표면 침하, 층별 침하, 측방 변위(경사), 간극수압 등이다. 이들 측정을 위한 계측기의 배치 간격은 연약지층에 따라 달라질 것이다. 지반이 복잡하고 주요 구조물이 축조된 경우에서 집중관리의 대상으로서 보다 철저하고 많은 계측기를 설치하며, 이때 연약지반의 흠뿍기 재하 시 지반 거동을 고려해야 한다. 각 계측기의 설치 위치에 대해서는 지표면 침하계 및 층별 침하계는 도로의 중앙, 간극수압계는

흙쌓기 단면 하부에 설치한다. 높은 쌓기 구간에서는 흙쌓기 단면 비탈끝에서 용기나 측방 이동을 관측할 수 있도록 경사계나 변위말뚝을 설치해야 한다.

일반적인 흙쌓기 구간에서의 계측기 배치 예는 그림 14.24와 같다.



〈그림 14.24〉 계측기의 배치 예

계측기의 종류 및 배치 기준은 표 14.25와 같으며, 계측 빈도는 현장 여건을 고려하여 조정하도록 한다.

〈표 14.25〉 계측기의 종류 및 배치 기준

계측기명	계측 목적 및 검토사항	계측기 배치 원칙	규격
총별침하계 (agnetic probe extensometer)	<ul style="list-style-type: none"> 연약점성토의 심도별 압밀침하량 측정 및 지표면 침하량과의 비교 분석 측정된 침하량을 이용하여 지반의 총별압밀정수 추정 	<ul style="list-style-type: none"> 연약심도가 깊거나 쌓기 높이가 높은 지역에 간극수압계와 동일지점에 설치 공당 소자는 지층조건을 고려하여 계획 	<ul style="list-style-type: none"> 스파이더 마그넷(spidder magnet) 식 여굴지역은 주변지반과 유사한 재료로 채움
간극수압계 (vibrating wire type piezometer)	<ul style="list-style-type: none"> 흙쌓기 하중에 의한 지반 내 간극수압의 변화 측정 과잉간극수압의 소산정도 및 유효응력증가량 유추 압밀의 효과 확인 압밀진행 및 강도증가 상황 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 연약심도가 깊거나 높은 흙쌓기 지역에 총별 침하계와 동일지점에 설치 공당 소자는 지층조건을 고려하여 계획 	<ul style="list-style-type: none"> 진동현(vibrating wire)식 계측매설지점은 모래를 이용하여 필터를 형성하고 그 외 여굴지역은 벤토나이트로 채움
경사계 (inclinometer)	<ul style="list-style-type: none"> 흙쌓기 비탈면부의 지반내 수평방향의 변형량과 변형속도 측정 흙쌓기 중앙부의 최대침하량과 함께 분석하여 흙쌓기 비탈면의 안정 관리 측방유동토압에 의한 교대의 안정성 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 전단파괴가 우려되는 높은 쌓기지역 좌, 우 비탈면에 설치 현장상황에 따라 교대 전후면 또는 측면에 설치 	<ul style="list-style-type: none"> 수지형 가이드관 매설 여굴지역은 주변지반과 동일한 재료로 채움

계측기명	계측 목적 및 검토사항	계측기 배치 원칙	규격
지하수위계 (standpipe piezometer)	<ul style="list-style-type: none"> • 흠뻑기에 의한 지하수위의 변화 파악 • 간극수압과 비교하여 과잉간극수압의 소산정도 및 유효응력증가량 유추 	<ul style="list-style-type: none"> • 간극수압계가 설치되는 지점에서 흠뻑기에 의해 자연 지하수위가 영향을 받지 않도록 흠뻑기 비탈면에 이격하여 설치 	<ul style="list-style-type: none"> • 다공관 길이는 충분한 것 사용 • 여굴지역은 모래로 채움
지표침하판 (settlement pin)	<ul style="list-style-type: none"> • 설치지점의 전침하량 측정 • 흠뻑기 속도 조절, 프리로딩 제거 시기 판정 	<ul style="list-style-type: none"> • 연약지반 흠뻑기 시 100m 간격으로 흠뻑기 단면에 설치 	<ul style="list-style-type: none"> • 침하판 : 1.0m × 1.0m × 110mm • 침하봉 : 25.4mm • 보호관 : 152.4mm

14.9.3 제체의 안정 관리

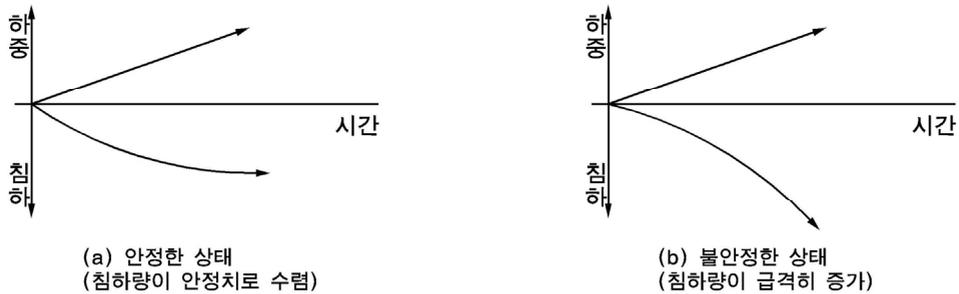
연약지반 상의 흠뻑기 시공 중에는 기초지반의 현저한 변형이나 파괴를 미연에 예측하기 위해 현장 계측을 하여 제체를 올리는 속도를 관리하고, 항상 기초 지반을 안정된 상태로 유지하면서 시공해야 한다. 이를 위해서는 계측 체제를 확립하여 계측 결과는 신속히 시공에 반영시킬 수 있어야 한다.

제체의 안정 관리란 현장 계측 결과에 기초를 두고 안정성 여부를 판단하여, 그에 따라 흠뻑기 속도를 관리하는 것이다. 일반적으로 흠뻑기 두께는 300 mm 이하를 원칙으로 하고, 그 후의 방치 기간을 조정함에 따라 흠뻑기 속도를 관리한다.

연약지반 상에 흠뻑기 할 경우, 그 거동의 안정성 여부 판단은 상당한 경험자가 아니면 어렵지만, 현장 계측에 따른 측정 결과에 근거한 판단의 예를 아래에 나타낸다.

(1) 침하량 측정에 의한 판단

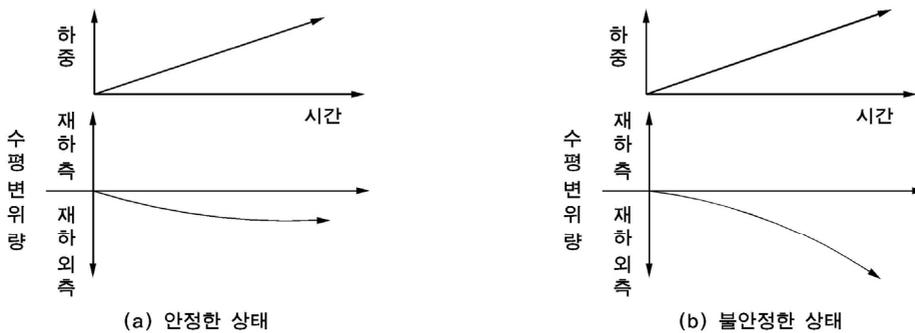
그림 14.25(a)와 같이 제체 중앙부 부근의 침하량의 시간적 변화는 연약지반이 안정되어 있는 상태에 있으면 어떤 일정치에 수렴하는 경향을 나타낸다. 기초지반이 파괴에 가까우면 침하량의 시간적 변화는 그림 14.25(b)에 나타나듯이 변화하고 침하 속도는 급격히 증가한다.



〈그림 14.25〉 침하량의 시간적 변화에 따른 기초지반의 안정

(2) 수평 변위량의 측정에 의한 판단

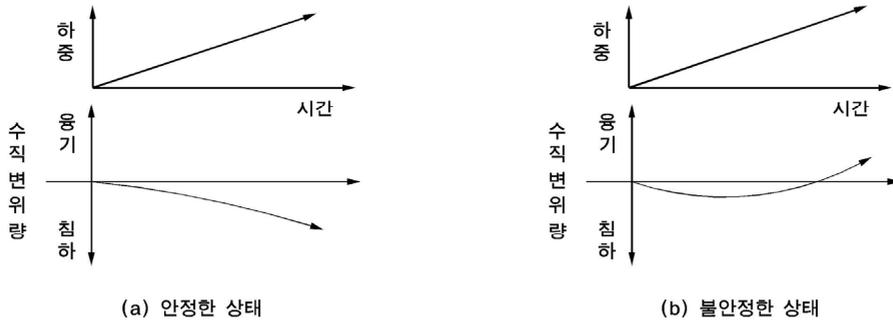
수평 변위량의 시간적 변화는 기초지반이 안정한 상태인 때는 그림 14.26(a)에 나타나듯이 변화가 거의 보이지 않든가 또는 다소 재하측으로의 변위를 나타낸다. 기초지반의 변형이 심하면 수평 변위는 급격히 증대하고, 그림 14.26(b)에 나타난 바와 같이 재하 외측을 향한다.



〈그림 14.26〉 수평 변위의 시간적 변화

(3) 수직 변위량의 측정에 의한 판단

수직 변위량의 시간적 변화는 기초지반이 안정돼 있을 때는 그림 14.27(a)와 같이 변위량은 작다. 그러나 기초지반이 불안정한 상태로 되어 변형이 심해지면 그림 14.27(b)에 나타난 것처럼 변위는 용기하는 경향이 있고, 하중을 제거해도 변형은 계속 된다.

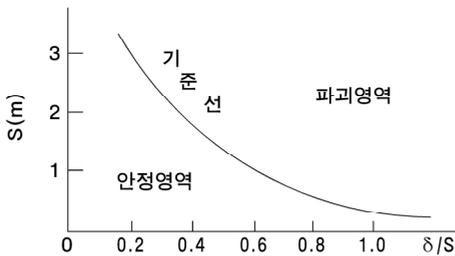


〈그림 14.27〉 수직 변위의 시간적 변화

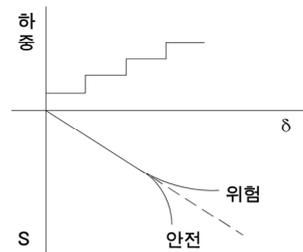
현장 계측 자료에 근거를 두고 파괴를 예측하는 방법으로는 다음과 같은 방법이 있다.

(가) 제체 비탈 끝의 수평 방향 측방 변위 δ 와 제체 중앙부 직하의 침하량 S 를 이용하여 $S \sim \delta/S$ 의 관계를 구하고, 기준선에 가까운지 어떤지를 조사하여 파괴를 예측한다(그림 14.28 참조).

(나) 제체 비탈 끝의 수평 방향 측방 변위 δ 와 제체 중앙부의 침하량 S 를 이용하여 $S \sim \delta$ 의 관계를 구하여, 상재하중이 작은 구간의 $S \sim \delta$ 관계를 이용하여 파괴에 가까운지 어떤지를 예지한다(그림 14.29 참조).



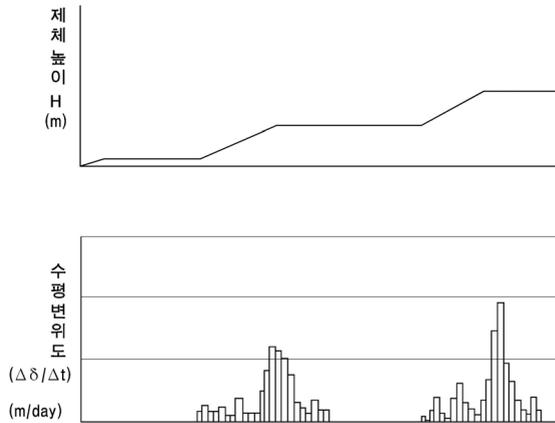
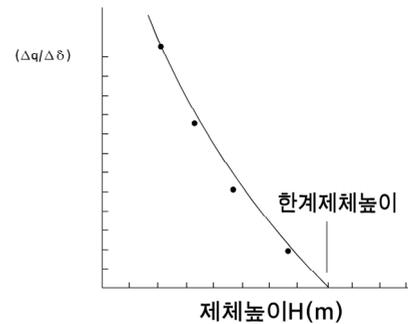
〈그림 14.28〉 파괴 예지의 예(1)



〈그림 14.29〉 파괴 예지의 예(2)

(다) δ 의 1일 변위량 즉, 수평변위 속도 $\Delta\delta/\Delta t$ 의 시간적 변화를 그래프화 하여($\Delta\delta/\Delta t \sim t$ 관리도) 안정 관리에 사용한다(그림 14.30 참조).

(라) 제체하중 q 의 증가분 Δq 와 수평 변위량 δ 의 비 $\Delta q/\Delta\delta$ 와 제체 높이 H 의 관계에서, $\Delta q/\Delta\delta$ 가 0에 가까우면 파괴에 가까운 것을 이용하여 한계 제체 높이를 추정한다(그림 14.31 참조).

〈그림 14.30〉 $\Delta\delta/\Delta t-t$ 관리도〈그림 14.31〉 $\Delta q/\Delta\delta-H$ 관리도

14.9.4 제체의 침하 관리

연약지반상의 흙쌓기 시공에서는 현장 계측 결과에 근거한 실측 침하량으로부터 설계 시에 예측되는 침하량을 수정하여 침하량의 파악, 장기 침하량의 추정 및 대책을 세워야 한다.
또, 구조물 시공 장소에 선행하중을 가할 경우, 현장 계측 결과에 근거를 두고 제거 시기를 결정하도록 한다.

(1) 침하 관리의 검토 항목은 다음과 같다.

- ① 지반 각 층의 침하량을 구하여 압밀의 진행 상황을 조사한다.
- ② 장래 침하량을 예측하여 토량이나 제체 형태의 수정, 토공 마무리 높이, 암거 등의 더둑기나 포장 구조를 결정한다.
- ③ 상재하중, 선행하중의 제거 시기를 결정한다.
- ④ 장기 침하량을 추정하여, 교대와 제체와의 접촉부의 단차 대책, 암거나 배수구조물의 침하 대책을 검토한다.

(2) 선행하중 제거의 검토

선행하중 제거 시기를 잘못 선택하면 충분한 효과를 발휘할 수 없고, 선행하중을 실시했는데도 문제를 남기게 되므로 지표면 침하계, 지중 변위계, 층별 침하계 등의 현장계측 결과에 따라 그 효과를 충분히 확인할 필요가 있다.

14.9.5 복구 대책

현장 계측에서 특이한 거동이 예측되고, 활동 파괴의 징조가 보일 때는 즉각 공사를 중단하고 그 원인을 충분히 조사하여 신속히 대책을 세우도록 한다. 이 경우, 대책 공법은 기본적으로 상재하중의 검강과 압성토로 한다.

현장 계측을 활용한 흠쌓기 시공 방법에 의해 일상적으로 안정 관리를 하고, 특이한 거동이 계측되었을 경우는 즉각 공사를 중단하고 방치 기간을 취한다. 그래도 활동 파괴의 징조가 계속될 경우, 제체의 일부를 제거하고 원인을 규명하여 설계를 변경한다. 위와 같이 매일매일 안전 관리를 하면 제체의 활동 파괴에까지 이르지 않게 대처할 수 있지만, 가끔 토질조사가 불충분하여 자료의 해석 및 판단의 잘못으로 파괴되는 경우가 있다.

(1) 복구 대책을 위해 필요한 조사

복구 대책을 위해 필요한 조사는 파괴 상황을 정확히 파악하고 그 원인을 규명할 수 있는 항목에 대해서 실시하고 단시간에 능률적으로 실시해야 한다.

(가) 파괴 상황과 범위의 파악

제체 혹은 그 주변 지반에 발생한 균열의 위치, 크기 및 변형량 등을 될 수 있는 한 자세히 관측한다. 또한, 강우 등의 외적 조건 및 파괴가 발생할 때까지의 경과 시간, 흠쌓기 시공법, 시공 높이, 적재 방법 등에 대해서도 조사·검토할 필요가 있다.

(나) 토질조사

파괴 상황과 그 범위를 파악했으면 활동면의 깊이나 그 시점의 지반, 흠쌓기 재료, 그리고 주변 지반의 토질을 명확히 파악한다.

활동면의 깊이를 추정하기 위해서는 휘일 샘플로 하여 채취한 시료의 토질시험을 실시한다. 이 경우, 일축압축시험으로 응력과 변형률 관계를 구하고, 흠쌓기 전의 관계와 비교하면 강도 저하나 현저하게 교란된 부분을 발견할 수 있는 경우가 있다. 또, 네델란드 이중관 콘관입시험의 사운드링 조사를 병용하는 것도 효율적인 방법이다.

(2) 복구 대책 공법

조건에 따라 다르지만 일반적으로는 파괴에 의해 상승한 주변 지반은 이것을 굴삭하여 원형

복구하는 것은 피하고, 그대로 압성토로 사용하던가, 그 위에 하중을 더해서 압성토로 사용하는 경우가 많다.

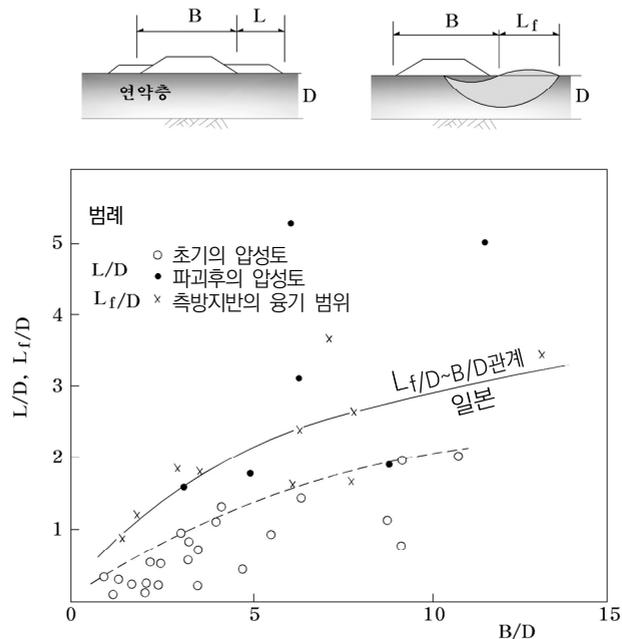
또한, 흙쌓기 일부의 제거 등 응급대책을 즉시 실시한 후에 복구 대책의 대책 공법을 검토하는 경우도 있다.

(가) 상재하중의 경감법

이 방법은 종단의 변경에 의해 제체 높이를 줄이기도 하고 단위체적중량이 작은 흙을 흙쌓기 재료로 이용하는 방법이다.

(나) 압성토공

이 방법은 활동에 저항하기 위해 측방에 흙쌓기를 하여 활동 파괴를 방지하는 방법으로, 효과도 확실하여 가장 일반적으로 채용되고 있는 방법이다. 파괴 때 활동면 부근의 흙이 교란되어 강도가 크게 저하되는 경우가 많으므로 상당히 넓은 범위에 걸친 압성토를 필요로 하는 경우가 많다. 그림 14.32는 도로 제체의 파괴 예에 대한 측방 지반의 응기 범위를 나타낸 것이다.



〈그림 14.32〉 압성토 폭과 파괴 시 측방 지반의 응기 범위

