

흙쌓기 설계를 위한 강도정수에 대한 일본 설계기준 고찰



| 이 성 혁 |
한국철도기술연구원
책임연구원



| 이 진 옥 |
한국철도기술연구원
책임연구원



| 최 찬 응 |
한국철도기술연구원
선임연구원

1. 서론

흙쌓기 설계에 있어서 사용되는 재료의 정확한 강도 정수 파악은 흙 구조물의 사용성 및 안정성 측면에서 매우 중요한 설계단계이다. 일반적으로 삼축압축시험 등으로 직접 설계정수를 구하는 것이 가장 좋은 방법이지만 실무적으로 전체 현장을 대상으로 모든 재료에 대하여 실내시험을 실시하는 것은 상당한 시간과 비용이 들기 때문에 적용하기에는 한계가 있다.

일반적으로 쌓기 재료로 사용하는 흙의 내부마찰각 ϕ , 점착력 c 는 기초나 흙 구조물을 설계하는데 있어서 매우 중요한 정수로서 현재 설계에서는 안전 측을 고려하여 점성토의 경우는 점착력 $c(\phi=0)$ 만을, 사질토의 경우는 내부마찰각 $\phi(c=0)$ 만을 이용하는 것이 일반적인 방법으로 되어 있다. 하지만 원래 지반은 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)의 양쪽을 모두 가지고 있으며, 설계의 합리성 측면에서 볼 때 두 가지를 적절히 가정하는 것이 바람직할 수 있다. 이러한 설계 개념을 도입하기 위해서는 먼저 신뢰성이 높은 토질 시험(혹은 재하시험 등으로부터의 역해석)에 의해서 설계정수를 면밀히 분석하여야 하며 설계정수가 구조물의 안정성, 사용성 등을 모두 고려할 때 위험한 판정이 되지 않도록 충분한 검토와 기술적 판단이 필요하다고 볼 수 있다.

본 고에서는 지반의 설계 시에 사용하고 있는 설계정수를 검토하고 최근 2007년도에 개정된 일본 “철도구조물등 설계표준동해설(흙구조물, 2007)⁴⁾, 이하 흙구조물 설계기준이라 함”에 기술된 설계정수 및 검토사항 등에 대하여 분석하여 국내 설계정수에 대한 개선방향 등에 대하여 고찰하여 보았다.

2. 국내 · 외 흙쌓기 재료별 강도정수

표 1은 국내 일반철도의 설계기준인 철도설계기준(2004)¹⁾에 기술된 흙쌓기 재료의 강도정수를 나타내었다. 표에서와 같이 흙쌓기 재료의 강도정수는 통일분류법에 의한 흙의 분류에 따라 재료의 상태별 대표적인 내부마찰각, 점착력을 적용하여 설계하도록 되어 있다. 또한, 표 2는 Hunt(1986)가 제안한 흙의 종류별 설계정수를 정리한 표이다.

일본 오오키(大木) 등(2004)⁶⁾은 일본에서 사용된 흙 쌓기 재료를 대상으로 삼축압축시험과 기존 문헌조사를 토대로 설계정수를 통계적으로 분석하였다.

전체 250개중에 분석이 적합한 시료 56종류를 대상으로 하였다. 각각의 시험자료는 $c=0$ 에서의 내부마찰각을 산출하였으며, 그 이유로는 설계에 적용하는 값이 흙쌓기와 같은 낮은 흙쌓기의 안정

계산 등에 이용되기 때문에 점착력이 저항력에 크게 기여하는 점을 고려한 안전 측의 설계 값으로 적용하기 위함이다.

표 3은 토질 분류별의 조성성분, 습윤단위체적중량, 내부마찰각 ϕ 의 평균치와 표준편차, 변동계수(표준편차/평균치)의 총괄표이다. 내부 마찰각의 평가는 CD시험 ϕ_{dpeak} , CU시험 ϕ_{dpeak}' 으로 분류하였다. 여기서 군 분류는 국내에서도 고속철도에 적용하고 있는 분류로서 지반의 적절한 다짐도를 확보하기 위하여 A군~D군으로 분류된 것을 말하여, 토질분류는 흙의 강도측면에서 세립분의 함유량에

균치의 총괄표이다. 내부 마찰각의 평가는 CD시험 ϕ_{dpeak} , CU시험 ϕ_{dpeak}' 으로 분류하였다. 여기서 군 분류는 국내에서도 고속철도에 적용하고 있는 분류로서 지반의 적절한 다짐도를 확보하기 위하여 A군~D군으로 분류된 것을 말하여, 토질분류는 흙의 강도측면에서 세립분의 함유량에

표 1. 일반철도 흙쌓기 재료의 강도정수 기준(철도설계기준, 2004)

흙의 종류(통일분류법)	재료의 상태	단위중량(kN/m ³)	내부마찰각(도)	점착력(kN/m ²)
GW, GP	다진 것	20	40	0
SW, SP	입도분포가 좋은 것	20	35	0
	입도분포가 나쁜 것	19	30	0
SM, SC	다진 것	19	25	30이하
ML, MH, CL, CH	다진 것	18	15	50이하

표 2. 사질토의 지반정수(HUNT, 1986)

재 료	다짐상태	Dr(%)	N	$\gamma_{dry}(tf/m^3)$	간극비(e)	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$
GW(입도가 양호한 자갈)	조 밀	75	90	2.21	0.22	40
	중간조밀	50	55	2.08	0.28	36
	느 슨	25	28	1.97	0.36	32
GP(입도가 불량한 자갈)	조 밀	75	70	2.04	0.33	38
	중간조밀	50	50	1.92	0.39	35
	느 슨	25	20	1.83	0.47	32
SW(입도가 양호한 모래)	조 밀	75	65	1.89	0.43	37
	중간조밀	50	35	1.79	0.49	34
	느 슨	25	15	1.70	0.57	30
SP(입도가 불량한 모래)	조 밀	75	50	1.76	0.52	36
	중간조밀	50	30	1.67	0.60	33
	느 슨	25	10	1.59	0.65	29
SM(실트질 모래)	조 밀	75	45	1.65	0.62	35
	중간조밀	50	25	1.55	0.74	32
	느 슨	25	8	1.49	0.80	29
ML(무기질 실트, 매우 세립모래)	조 밀	75	35	1.49	0.80	33
	중간조밀	50	20	1.41	0.90	31
	느 슨	25	4	1.35	1.00	27

표 3. 토질의 분류와 토질 정수의 통계분석(오오키 등(2004))

	평균치			$\gamma_t (g/cm^3)$			$\phi_{dpeak}(^{\circ})$			$\phi_{dpeak}'(^{\circ})$		
	자갈분	모래분	세립분	평균치	표준편차	변동계수	평균치	표준편차	변동계수	평균치	표준편차	변동계수
A 군	59.8%	29.4%	10.8%	2.044	0.143	0.070	49.8	6.03	12.1%	37.3	2.37	6.4%
B 군	27.0%	53.4%	19.6%	1.895	0.084	0.044	43.0	4.42	10.3%	39.5	2.24	5.7%
C 군	0.8%	29.0%	70.3%	1.709	0.102	0.059	-	-	-	32.7	2.70	8.3%
D 군	2.7%	14.0%	83.4%	1.350	0.138	0.102	-	-	-	30.7	3.60	11.7%
토질①	76.2%	20.5%	3.4%	2.096	2.096	0.026	51.4	4.20	8.2%	-	-	-
토질②	51.1%	34.9%	14.1%	2.008	2.008	0.081	50.2	5.19	10.3%	37.3	2.12	5.7%
토질③	25.9%	53.8%	20.3%	1.895	1.895	0.045	42.2	4.60	10.9%	39.8	2.27	5.7%
토질④	2.3%	16.7%	81.0%	1.415	1.415	0.135	-	-	-	31.2	3.50	11.2%

※: "-"는 대상으로 하는 시험이 없음

다른 강도변화를 고려할 수 있도록 분류한 것이다. 2007년 도에 개정된 일본 설계기준에는 오오키(大木) 등(2004)의 통계분석 결과를 토대로 토질분류에 따른 강도정수가 설계에 반영되었다.

2.1 새로 개정된 흙 구조물 설계기준(2007)⁴⁾

2.1.1 흙쌓기의 설계정수

흙쌓기 설계에 있어서 사용재료에 대한 토질 시험이나 시험 시공을 실시하여 설계정수를 산정하는 것이 가장 정확한 방법이지만 현장에서 채취된 흙을 모두 실험하기에는 시간적, 공간적으로 제약을 받기 때문에 일반적으로 대표 값으로 설계정수를 사용하고 있다. 표 4는 2007년 개정된 일본의 흙구조물 설계 기준에 명시된 흙쌓기 재료에 대한 설계정수 기준 값이다. 표에서와 같이 설계정수에 사용되는 조건으로는 일반적인 경우, 지진 시, 강우 시 등 조건을 구분하여 적용할 수 있도록 하였다.

토질 구분 및 설계용 정수 값은 현지 흙쌓기 재료를 이용한 다수의 삼축압축시험 및 문헌 조사를 바탕으로 정한 것으로 기존의 설계기준서인 「철도구조물등 설계표준·동해설 흙구조물(2002년)」에서는 토질분류를 군분류로 A군, B군 등으로 이용되어 왔으나 군분류는 시공 시에 흙쌓

기의 다짐 용이성을 감안한 분류이기 때문에 지반의 설계정수와는 반드시 일치하지 않는다. 따라서 설계정수는 흙의 전단 강도에 기초를 둔 토질 분류로 설계정수를 구분하는 것이 더 현실적이기 때문에 개정된 설계기준에는 군분류를 탈피하고 토질분류로 보다 성능중심의 설계가 될 수 있도록 제반 기준을 개정하였다. 개정된 토질분류는 군분류의 A군 혹은 B군에 속하고 있었던 흙에 대하여 세립분 함유율 15%이상의 토질로 세분화 시켜 설계정수를 구분시켰다.

2.1.2 강우에 의한 설계정수 고려

개정된 설계기준에서는 강우에 대한 포화도에 따른 안정성 평가를 고려할 수 있도록 하였다. 일반적으로 현장에서 흙을 다짐하였을 경우 투수계수는 10^{-6} cm/sec로 거의 불투수성을 가지게 된다. 그러나 현행 설계기준에서는 강우에 의한 안정성 검토 시 성토 전체가 포화된 경우로 가정하여 설계하기 때문에 안정성 측면에서는 좋을 수 있으나, 현실적으로 과도한 설계를 하게 된다. 이러한 것을 보완하고자 개정된 설계기준에서는 그림 1과 같이 흙 쌓기 단면에서 쌓기 표층부와 심부로 구분하여 설계정수를 가정하도록 하였다. 성토 단면을 구분한 이유는 쌓기 표층부 부근

표 4. 안정성의 대조조사에 이용하는 흙쌓기의 설계용값

토질 구분	지반공학회칙에 의한 공학적 분류	흙쌓기 심부(표층부)*6								
		상시, 지진시, 강우($S_r < 80\%$)			강우($80\% \leq S_r < 100\%$)			강우($S_r = 100\%$)		
		r_f (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ	r_f (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ	r_f (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ
토질 1	G, G-S, GS G-F, G-FS, GS-F ^{*1} 경암 버력(박리성약함)	18	6(3)	45(40)	19	3(1.5)	45(40)	20	0(0)	45(40)
토질 2	S, S-G, SG ^{*2} , S-F, S-FG, SG-F ^{*3} 경암버력(박리성 강함), 연암버력, 취약암 버력	17	6(3)	40(35)	18	3(1.5)	40(35)	19	0(0)	40(35)
토질 3	GF, GF-S, GFS, SF, SF-G, SFG ^{*5}	16	6(3)	35(30)	17	3(1.5)	35(30)	18	0(0)	35(30)
토질 4	ML, CL, MH, CH, OL, OH, OV, Pt, Mk, VL, VH1, VH2	14	20(10)	25(20)	15	10(5)	25(20)	16	10(5)	25(20)

*1 G-F, G-FS, GS-F는 세립분이 유기질이면 토질2의 ϕ , c 를 이용한다.
 *2 S, S-G, SG는 입도가 양호($U_c \geq 10$ 이고 $1 < U_c \leq \sqrt{U_c}$)이면 토질 1, 그 이외는 토질 2의 ϕ , c 를 이용한다.
 *3 S-F, S-FG, SG-F는 세립분이 실트질 또는 점토질이면 토질 1의 ϕ , c 를 이용한다.
 *4 취약함 버력은 점성화· r_f 이포화한 것, 풍화가 진행하고 있는 것은 토질 4의 ϕ , c 를 이용한다.
 *5 SF, SF-G, SFG는 세립분이 유기질이면 토질4의 ϕ , c 를 이용한다.
 *6 표 속의 () 내는 흙쌓기 표층부의 값이다. 다만, r_f 에 대해서는 동일한 값을 이용한다.

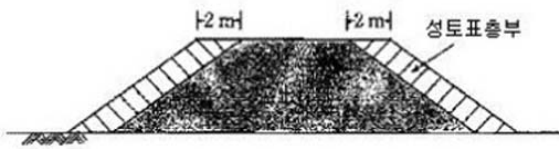


그림 1. 흙쌓기 표층부와 심부의 구분

은 다짐이 충분하지 않아 쌓기 심부에 비해 약하기 때문이다. 일반적으로 쌓기의 설계 정수는 다짐 밀도비가 90% 이상으로 관리하도록 설계되어 이 보다 더 높은 다짐 밀도를 가지게 될 경우 흙의 강도는 비약적으로 증가한다는 것을 확인한 바 있다. 다만 이 강도 증가를 설계상 고려하는 경우에는 시험시공이나 삼축압축시험을 한 다음에 적절히 판단하도록 하였다. 이러한 이유는 강우시 포화되는 영역에 대한 고려사항으로 전체 사면에 대한 강도저감이 아니라 사면표층부에서만 일부 포화되기 때문에 이를 고려할 수 있도록 강도정수를 구분한 것이다.

쌓기 표층부는 식생 등에 의해 약간의 점착 저항력이 있는 것과 불포화 상태에 있어서는 약간의 점착력을 가지는 것을 감안하여 토질 1이나 토질 2와 같은 세립분이 적은 사질토계 쌓기재라도 수위선 이하 깊이의 수심부 이외에 대해서는 약간의 점착력을 고려할 수 있도록 하였다. 그러나, 쌓기의 다짐이 불충분하고 전체에 걸쳐 완만한 상태의 경우에는 쌓기 심부에 있어서도 표층부와 동일한 설계 값을 이용하도록 하였다. 즉, 새롭게 개정된 성능중심 설계방법에서는 이러한 다양한 시공조건에 부합되는 강도정수를 고려하여 설계할 수 있는 것이 특징이라고 할 수 있다.

국내에서는 적용하고 있지 않은 성토체의 내진성 확보를 위한 층두께 관리재 등에 대해서도 성토체에 부설하게 되면 그 효과가 있기 때문에 이와 같은 경우 비탈면 표층부에 있어서도 심부와 동등한 값을 이용할 수 있도록 하였다.

2.1.3 강우에 의한 설계정수 고려

(1) 내부마찰각

일반적으로 토질 시험에서 적용하는 설계정수는 불교란 시료를 이용하여 정밀도가 높은 시험을 할 필요가 있는데 점성토에 대해서는 비압밀 비배수(UU) 삼축압축시험, 사질토에 대해서는 압밀배수(CD) 삼축압축시험을 하는 것이 일반적이다. 광범위한 지반이 균질한 것은 드물며 원위

치의 상태는 계절, 기후 기타 여러 가지 조건에 의해서 변화하기 때문에 채취된 시료 및 그 시험치가 항상 대상으로 하는 지반의 대표적 설계정수라고 말하기 어렵다. 따라서 얻어진 토질 시험치를 그대로 특성치로 하는 것은 반드시 옳다고 한정짓지 못하며 조건에 따라서는 시험치를 그대로 특성치로 하는 것이 응답치의 산정 상 적당하지 않은 경우도 있다. 이와 같은 경우에는 시험치는 특성치를 결정할 때의 참고자료로서 취급하고 지반조건이나 경험상의 판단 혹은 기타 데이터 등을 참고로 하면서 종합적인 판단에 의해서 내부마찰각이나 점착력의 특성치를 타당하게 정하는 것이 중요하다. 또한, 낮은 구속압에서의 사질토에 대한 안정성의 대조조사 등에 있어서는 약간의 점착력도 응답치에 큰 영향을 주기 때문에 고려할 경우 주의를 요하도록 하였다.

모래나 자갈 지반에서는 불교란 시료를 채취하는 것이 곤란한 경우가 많기 때문에 일반적으로는 상세한 토질시험은 하지 않고 표준관입시험 N값으로부터 내부마찰각을 구하는 것이 일반적이다. 개정된 설계기준에서는 N값으로부터 사질토의 내부마찰각을 구할 시에 식(1) 또는 식(2)에 준용하는 값을 사용하도록 하였다. 이 식은 사질토의 내부마찰각은 상대밀도와 상부하중에 의존하고 N값에도 그 영향을 반영되는 것을 고려하여 정해진 식이다.

$$\phi = 1.85 \left(\frac{N}{\sigma'_v / 100 + 0.7} \right)^{0.6} + 26 \quad (1)$$

다만, 지진시에 있어서는 다음 식을 상한으로 한다.

$$\phi = 0.5N + 24 \quad (2)$$

여기에서,

ϕ : 사질토의 내부마찰각의 특성치(도)

N: 표준관입시험의 N값(특성치)

σ'_v : 지반 조사시 해당 위치의 유효 상재압(kN/m²)

$$\sigma'_v = \gamma_t h_w + (\gamma_t - \gamma_w)(z - h_w)$$

다만, 50kN/m²을 최소치로 한다. 또한 상기 식은 지하수가 정수압 상태의 경우이며, 피압상태에 있는 경우에는 이것을 고려하는 것으로 한다.

여기에서

γ_t : 흙의 단위체적중량(kN/m³)

h_w : 지반 조사 시의 지표면으로부터 지하수위까지의 깊이(m)

γ_w : 물의 단위체적중량(kN/m³)

z : 지반 조사시의 지표면으로부터 당해 위치까지의 깊이(m)

한편, 점성토의 점착력을 일축압축강도로부터 구하는 경우에는 식(3)에 의하도록 하였다.

$$c = \frac{q_u}{2} \quad (3)$$

여기에서,

c : 점성토의 점착력도 특성치 (kN/m²)

q_u : 일축압축강도(특성치) (kN/m²)

이와 같이 N 치나 일축압축시험으로부터 토질 계수치를 간편하게 설정하는 경우에는 지금까지와 마찬가지로 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)의 양쪽을 한 번에 고려할 수는 없다.

(2) 변형계수

흙의 변형계수는 역학적 거동을 평가하는데 매우 중요한 항목이다. 현장 또는 실내에서 변형계수를 구하는 방법에는 여러 가지 방법이 있다. 지반이 등방탄성체이면 어떠한 실험방법을 이용해도 동일한 값을 얻을 수 있으나 실제 지반은 등방 탄성체가 아니고 강한 비선형성을 가지기 때문에 응답치의 산정에 이용하는 변형계수에는 변형 레벨

표 5. E_0 의 시험방법에 대한 보정계수

E_0 의 산정방법*1	보정계수 α *2
평판재하시험	1
공내수평재하시험	4
일축압축시험	4
삼축압축시험	4
표준관입시험	1
탄성파속도검층	0.125

*1 특수한 지반조건의 경우에는 작용조건에 따라서 보정하는 것으로 한다.

*2 영구작용에 대한 검토 시에 이용하는 보정계수이다. 그 이외의 검토 시에는 표 속의 값에 2를 곱한다.

의존성이나 압력 레벨 의존성을 적절히 평가할 필요가 있다. 따라서 여러 가지 시험 방법에 의해서 얻어진 변형계수를 단순히 비교하면 변형레벨이나 압력레벨, 응력 이력 등의 조건의 차이 때문에 동일 지반 일지라도 다른 값이 된다. 이러한 차이를 평가하기 위하여 다양한 실험조건에 따른 응력보정 등을 통해 보정계수를 정확히 평가하여야 한다. 그러나 아직까지 이 부분에 대한 연구가 심도있게 연구되지 않고 있기 때문에 개정된 설계기준에서도 과거의 각종 시험 방법에 의한 변형계수의 상호 관계는 단순히 측정값을 비교하여 표 5와 같은 보정계수 α 를 곱하여 평가하도록 되어 왔다. 개정된 기준에서는 현재까지는 각 시험 방법에 관한 변형계수(E_0)는 「철도구조물등설계표준·동해설기초구조물·항토압구조물 6.3 토질 계수치의 설계용값」의 해설에서 기술된 방법을 적용하도록 하였다. 그러나 장기적으로 변형계수는 지반의 역학적 거동을 예측 및 평가하는 중요한 인자로서 특히 유효요소해석 등에 입력 변수로 적용하고 있기 때문에 국내에서 사용하고 있는 다양한 변형계수 산정 실험방법에 대한 표준화에 대한 방안이 필요하다고 볼 수 있다.

3. 결론(맺음말)

이상과 같이 2007년 일본에서 최근 개정된 설계기준의 흙쌓기 재료에 대한 설계정수에 대하여 고찰하였다. 개정된 설계기준은 성능 중심형 설계개념이 도입된 최초의 설계기준이라고 할 수 있다. 그러나 현재의 설계기준과 실험 기법 등을 감안하여 성능 중심형 설계에 의할 수 없는 경우에는 적합간주 사양에 의해도 좋은 것으로 하고 있다. 각종 시설의 설계기준에 성능규정에 의한 신뢰성 설계가 본격적으로 도입되고 있는 중에 흙 구조물에서도 성능중심의 설계가 될 수 있도록 개정된 것이 가장 큰 변화라고 볼 수 있다. 특히 요구 성능에 따른 성능등급(1~3등급)과 안정성, 복구성, 사용성 측면에서의 고려사항 등에 대하여 구체적인 현실적인 설계 개념을 도입하였다고 볼 수 있다. 또한 설계기준을 Eurocode7이나 JGS4001에 준하여 개정된 것은 흙 구조물에 대한 국제적인 기준에 발맞춘 합리적인 설계 기준서로서의 평가가 가능할 것이다. 앞으로 해외 철도건설시장의 개척을 위해서라도 국내외에서 보편적이고 타당

하게 적용될 수 있는 설계기준의 개발이 필요하며, 이를 위해서는 장기적이고 지속적인 연구개발과제의 수행을 통해 단순 토공 노반의 건설에서 벗어나 안전하고 경제적인 철도 노반, 아울러 설계 자유도를 높일 수 있는 성능 중심형 설계기술로의 발전을 기대해 본다. ☺

♣ 참고 문헌

1. 철도설계기준(2004), 대한토목학회
2. EN 1997-1:2004: Eurocode 7, Geotechnical design-Par 1: General rules, 2004
3. 地盤工學會基準 JGS4001-2004, "性能設計概念に基づいた基礎構造物に関する設計原則", 2004.
4. 鐵道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 國土交通省鐵道局監修, 鐵道總合技術研究所編, 2007.
5. 鐵道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 國土交通省鐵道局監修, 鐵道總合技術研究所編, 1992.
6. 大木基裕, 館山 勝, 小島謙一, 篠田昌弘, 渡辺 健治, 盛土の設計のための強度定数に基づく土質分類の検討, 第39回地盤工学 研究發表會(新編), 2004年 7月.