

심도별 토랑환산계수와 토공량 변화에 관한 실험적 연구*

Experimental Study on the Relationships between Earthwork Volumes and Soil Conversion Factor with Depth

강기천** · 신경철*** · 윤성규****

Gichun Kang** · Kyoungchul Shin*** · Seong-kyu Yun****

Abstract

The amount of soil cutting, transported, and filling up the soil in the project area is considered to change the volume depending on the condition of the soil; the volume change rate of the soil is calculated by collecting undisturbed samples below 1 m to 2.0 m above the surface through test pits. In this study, large-scale field tests are carried out. There are areas with an excavation depth of 10m or more, but some errors have occurred in calculating the soil volume by uniformly applying the soil conversion factor for a depth of 1 to 2 m. According to the field tests, the earthwork volumes applied with the soil conversion factor for each depth increase by 3.9 to 9.4% compared to the soil volume applied uniformly with that of 2 m depth.

Keywords: Cave Surveys, Large-Scale Field Test, Excavation Depth, Soil Conversion Factor

1. 서 론

2017년도 도시계획 현황 통계발표(국토교통부, 2018)에 따르면 우리나라의 국토면적은 106,108.8 km²이고 그 중 도시지역은 17,635.9km²로 전체 면적의 약 16.6%를 차지하는 것으로 조사되었고 우리나라 총 인구 5,178만여 명 중 91.82%인 4,754만여 명이 도시지역에 거주하고 있는 것으로 나타났다. 산업화가 진행될수록 도시지역으로 집중되는 인구를 수용하기 위해 기존의 도시지역 인근 택지의 개발이 이루어지고 있으며, 우리나라 지형 특성 상 산지가 많고, 평지는 주로 농경지로 이용됨에 따라 택

지나 산업단지 개발에 적합한 토지는 한정적일 수밖에 없기 때문에 대부분의 택지개발사업은 산지와 구릉지, 농지를 포함하게 된다.

또한, 우리나라 기후 특성 상 여름철 호우가 집중되어 최근에도 집중 호우로 도심지 내 저지대의 도로와 건물이 침수되어 인명사고와 재산피해가 발생하였다. 도시를 각종 재해로부터 안전하게 조성하여 쾌적한 정주여건을 갖출 수 있도록 사업지구 내 원활한 우수배제가 기본적으로 필요하다. 따라서 하천의 홍수 계획고와 자연유하 방식의 관로경사를 고려하여 인근 지역 또는 연결되는 도로와 단절되지 않도록 단지를 계획하고 있다. 자연지형을 최대한 보

*이 논문은 2023년 석사학위논문(신경철, 2023)을 수정·보완하여 작성하였음.

**경상국립대학교 토목공학과 부교수(주저자: gkang@gnu.ac.kr)

***한국토지주택공사 국토도시개발본부 본부장(skc700@lh.or.kr)

****경상국립대학교 공학연구원 연구교수(교신저자: tjdrb330@gnu.ac.kr)

존하기 하여 원지반의 개발행위를 최소화하고 있으나, 넓은 지역을 평탄화 하기 위해 지반(흙)을 절취하고 운반하여 낮은 지역에 성토하는 과정이 필요하다. 이에 필요한 성토량을 확보하기 위해 산지나 구릉지의 토사를 절취하게 되며, 이에 따른 자연환경 훼손으로 동식물 생태계에 영향을 미칠 수밖에 없고, 개발사업의 경제성을 확보하기 위해서도 최소한의 절성토량으로 균형을 맞추는 토공계획이 매우 중요한 공정이다(신경철, 2023).

사업지구 내 절토, 운반, 성토하는 토공량은 흙의 상태에 따라 체적의 변화를 고려하고, 토량의 체적 변화율은 시험굴 조사를 통해 지표면 1.5~2.0m 이하 불교란 시료를 채취해서 산정한다(한국토지주택공사, 2021.1.27.; 한국토지주택공사, 2021.1.13). 개발사업은 대규모의 절성토가 이루어지고 굴착심도가 10m 이상 되는 구역도 있으나, 1~2m 깊이의 토량의 체적변화율을 일률적으로 적용한다. 이에 따라 토공량 산정에 오차가 발생하여 필요 이상의 절취로 인하여 자연환경의 훼손으로 생태계의 교란을 가중 시키고 절취, 운반, 잉여토량 처리를 위한 공사기간이 지연되거나 굴삭기, 덤프트럭 등 중장비 운행에 따른 비산먼지 발생, 화석연료 과다 사용은 환경오염을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 현장시험을 통해 토공량 산정에 있어 토량환산계수가 미치는 영향을 연구하였다.

2. 선행연구 검토

2.1 토질의 체적변화

토량은 본 바닥의 상태(자연상태 토량), 흐트러진 상태(운반 토량)와 다져진 상태의 토량으로 분류하며 각각의 상태에 따라 체적의 변화가 이루어진다. 압축 또는 압밀 상태로 구속되어 있는 자연 상태의 흙에 외력을 가해 절취하는 과정에서 교란이 이루어져 흐트러진 토량으로 체적이 증가하게 되고, 흐트러진 상

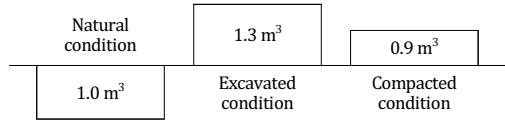


Fig. 1. Schematic Diagram for Volume Change of Soil

태로 운반된 토량을 물리적 에너지를 가해 성토하는 과정에서 다져진 상태의 토량으로 체적이 감소하게 된다. 따라서 개발사업의 토공계획은 흙의 체적 변화를 고려하여 절토량, 운반량, 성토량을 결정해야 하며 이는 필요한 토공량 확보를 위한 토취장(절취구역), 공사비, 공사기간과도 밀접한 관계를 가지고 있다.

토공작업 시 흙의 체적은 자연 상태 흙이 절취, 운반, 그리고 성토되는 일련의 과정에서 여러 가지 요인에 따라 변화한다(이승언·최병호, 2014). 토량은 자연 상태인 경우와 흐트러진 상태, 그리고 다짐을 수행한 후의 상태에 따라 흙의 체적이 변화하여 토공량이 바뀌게 되며 일반적으로 자연 상태의 토량을 기준으로 토량의 변화를 체적비로 나타낸 것을 토량 환산계수라고 한다(오세욱 외, 2017). 따라서 토량 환산계수 평가를 위하여 흐트러진 상태의 토량과 자연상태 토량의 비(L)와 다짐작업에 의한 다져진 후의 토량과 자연상태 토량의 비(C)를 적용한다(박영목, 2012). 다짐이 없이 성토되는 현장에 대하여 토량 환산계수는 자연 상태에서 흐트러진 상태로 변화되어 L 값이 중요하나, 본 연구에서는 되메움 즉, 다짐에 의해 성토되는 현장을 대상으로 하여 C에 대해서 주로 연구를 수행하였다. 일반적으로 많이 사용되고 있는 토량환산계수에 대해 표준품셈(한국건설기술연구원, 2022)에서는 다음과 같이 정의하고 있다.

$$L = \frac{\text{흐트러진 상태의 토량}(m^3)}{\text{자연 상태의 토량}(m^3)} \quad (1)$$

$$C = \frac{\text{다져진 상태의 토량}(m^3)}{\text{자연 상태의 토량}(m^3)} \quad (2)$$

2.2 토량환산계수 산정

한국토지주택공사(2021.1.27)의 기준을 살펴보면 토공사 편에서 토량환산계수는 시험굴 조사(Test Pit)를 실시하여 산정한다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 시험굴의 심도는 표토를 제거하고 토사층 1.5~2.0m 기준으로 한다. 토성시험, 다짐시험 등을 실시할 수 있도록 50Kg 이상을 채취하고 자연상태의 현장밀도시험 각 1회, 굴착되어 흐트러진 상태에서 1회의 현장밀도시험을 실시하도록 되어 있다.

한국토지주택공사(2021.1.27)의 설계지침에서 토량환산계수는 선정시험결과에 의함을 원칙으로 한다. 대단위 사업지구에서 각 단위 공종별, 토취장별로 선정시험을 실시하고 그 결과에 의한 계수를 적용한다. 소량이거나 부득이한 경우에는 Table 1을 기준으로 공사현장여건 변동에 따라 설계 변경할 수 있도록 명시되어 있다.

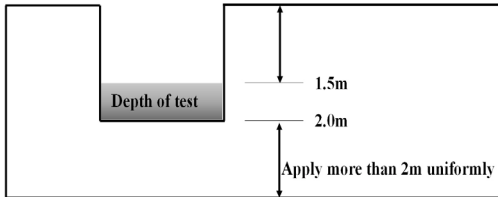


Fig. 2. Depth of Test Pit Investigation

Source: LH (2021.1.27) (in Korean)

Table 1. Soil Conversion Factors

Type of Soils	L	C
Clay	1.30	0.90
Decomposed Soil	1.25	0.875
Sand	1.15	0.90
Gravel	1.15	1.075
Weathered Rock	1.30~1.35	1.00~1.15
Soft Rock	1.30~1.50	1.00~1.30
Moderate Rock	1.55~1.70	1.20~1.40
Hard Rock	1.70~2.00	1.30~1.50

Source: LH (2021.1.27) (in Korean)

2.3 토량환산계수 적용의 한계점

토질의 체적은 흙, 물, 공기로 이루어져 있고, 장기 간에 걸쳐 상부에 하중이 가해지면 흙 속의 간극에서 물과 공기가 빠져 나가 압축이나 압밀이 이루어지면서 흙의 밀도가 조밀해 지므로 동일한 성질의 흙이라 할지라도 심도에 따라 흙의 단위중량은 달라질 수 있다. 대규모 개발사업의 경우 원지반 보다 2m 이상 깊게 굴착하는 경우가 많으나, 토량환산계수 산정방법에 따라 1~2m 심도의 시험굴 조사로 통해 얻어진 토량환산계수를 일률적으로 적용하다 보니 토공량 산정이 정확하지 않고, 토질의 변화에 따라 예측된 토공량과 실제 토공량과의 차이로 인해 토공 계획을 다시 수립해야 하는 상황이 발생하는 경우도 빈번하게 발생하고 있다. 설계에 따라 예측된 토량을 절취하였음에도 토공량이 과다하게 발생한 경우 잉여토량을 외부로 반출하여야 하고, 과소하게 발생한 경우 외부로부터 토사를 반입해야 하는 상황이 발생하게 된다. 또한, 잉여토량을 처리하기 위해 별도의 사토장을 마련하거나 부족토량을 확보하기 위해 추가 토취장을 마련하는데 시간이 소요됨에 따라 공사기간이 지연되고, 잉여토량 사토처리 또는 추가 외부 반입을 위한 토공 운반 등 소요되는 비용은 시공사에서 부담해야 하거나 필요 이상의 절취구역 확대로 인하여 자연환경 훼손이 우려되기도 하다.

3. 현장시험

3.1 시험방법

본 연구는 전남○○산업단지 조성공사 내 토사의 굴착심도에 따른 토질의 체적변화를 분석하였다. 시험 위치의 지반은 지표에서 4.8m까지가 모래질 실트의 매립토층이 그 하부에는 실트질 모래의 풍화토층이 8m까지 분포하고, 그 하부에는 암편석인 실트질 모래의 풍화암층이 분포하였다. 본 시험은 Fig. 3과 같이 원지반으로부터 1m 간격의 심도로 계단식

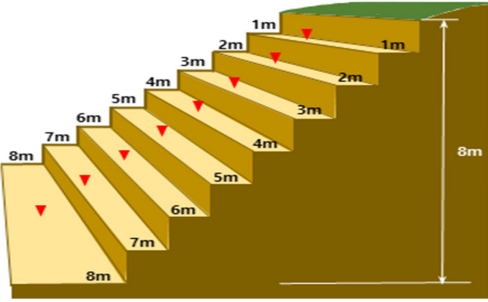


Fig. 3. Locations for Field Density Test by Depth

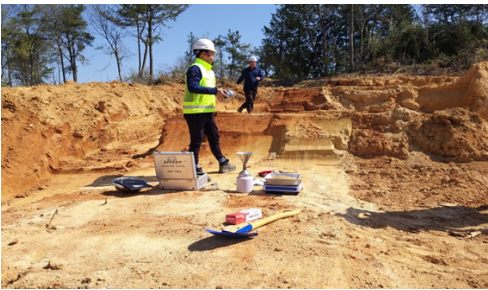


Fig. 4. Field Density Test at Depth of 1 m

으로 굴착하였으며, 모래치환법에 의한 들밀도 시험(KS F 2311, 2022)은 현장에서 자연상태의 밀도를 각 층마다 구하고(Fig. 4), 흙의 다짐시험(KS F 2312, 2022)은 실내에서 수행하였다.

3.2 시험결과

현장 들밀도 시험결과 심도 8m 깊이까지 지하수위는 나타나지 않으며, 자연상태 밀도는 Fig. 5와 같이 심도가 깊을수록 약 14.3kN/m³에서 20.3kN/m³까지 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 실내다짐시험 결과를 나타내고 있다. 최대건조단위밀도는 다짐에너지가 큰 D다짐이 A다짐보다 크게 나타났으며 각각 평균 18.8kN/m³, 17.9kN/m³으로 평가되었다. 최적함수비는 D다짐이 A다짐보다 작게 나타났으며 각각 평균 9.5%, 11.6%로 평가되었다.

심도별 토랑환산계수(C)는 A다짐 시 0.794~1.129,

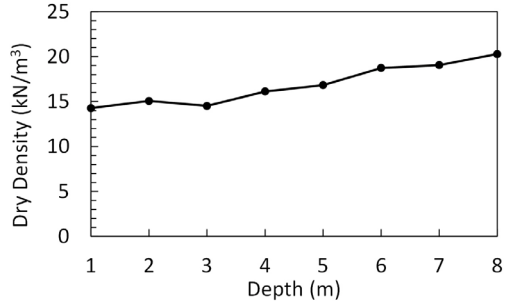
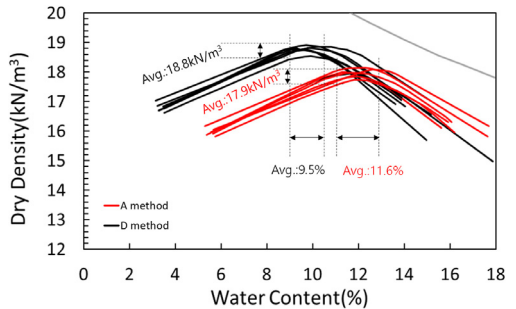
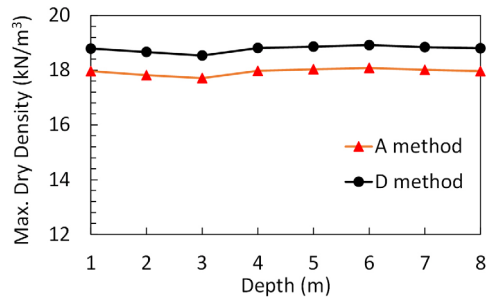


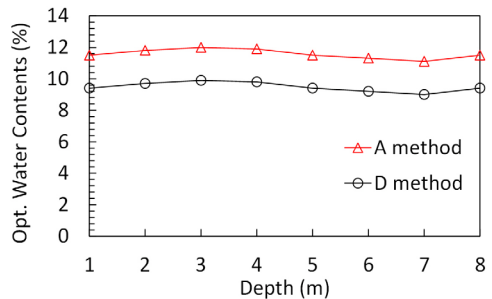
Fig. 5. Dry Density of Natural Soil by Depth



(a) Compaction Curve



(b) Max. Dry Density with Depth



(c) Opt. Water Content with Depth

Fig. 6. Compaction Curve, Maximum Dry Density and Optimum Water Content with Depth

Table 2. Soil Conversion Factors by Field Tests

Depth (m)	Soil Conversion Factor, C	
	A Method	D Method
1	0.794	0.760
2	0.846	0.808
3	0.820	0.783
4	0.897	0.858
5	0.934	0.893
6	1.036	0.991
7	1.058	1.012
8	1.129	1.079

D다짐 시 0.760~1.079로 산정되었다. 심도 4m이상의 토량환산계수(C)는 A다짐 시 0.897~1.129로 심도 2m 토량환산계수(C) 0.846 보다 6.0~33.5% 높게 나타났고, D다짐 시 0.858~1.079로 심도 2m 토량환산계수(C) 0.808 보다 6.2~33.5% 높게 나타났다(Table 2).

4. 토량환산계수에 따른 체적의 변화

4.1 평균경사도에 따른 심도별 체적

토취장으로 주로 이용되는 산지를 Fig. 7과 Fig. 8과 같이 높이 8m의 모형도로 가정하였다.

경기도 산지전용 정량적 기준 개선방안 연구보고서(옥진아, 2020)에서 경기도 산지전용 대상지의 분포현황을 보면, 평균경사도 10도 미만인 58.3%, 10~15도 구간이 23.6%, 평균 경사도가 15도 미만인 81.9%에 분포되어 있는 것으로 조사되었다. 토석 채취가 가능한 산지는 산지관리법 시행령 제36조 제1항에 의거 평균경사도가 35도 이하여야 한다.

따라서, 모형도의 평균경사도는 10도, 15도와 35도로 설정하였고, 폭(B)과 경사도(α)에 따른 심도별 체적은 Table 3과 같으며, 자연상태 토량의 체적으로 가정하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 경사도와 폭에 따라 층별 부피가 변화하는 것을 알 수 있다.

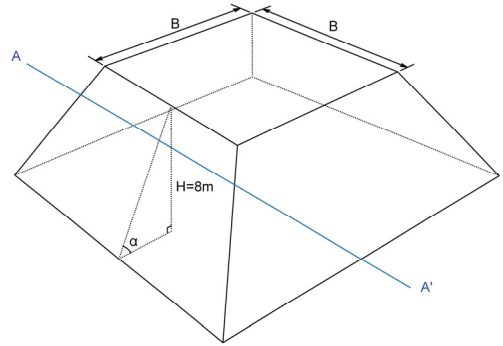


Fig. 7. Schematic Diagram for Volume of Soil

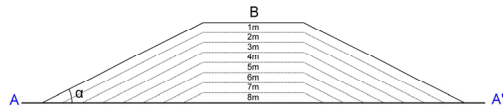


Fig. 8. Cross-Sectional Plan

4.2 경사도에 따른 체적변화 비교

상단 폭(B) 50m인 모형체의 평균경사도 10도, 15도, 35도의 체적변화는 Table 4와 같다. 심도별 토량환산계수(C)값을 적용하여 토량을 산정할 경우 기존 방식인 심도 2m의 토량환산계수(C)값을 일률 적용할 때 보다 3.9%~8.1%, 2,136m³~2,968m³의 토량이 많이 발생하는 것으로 산정된다. 상단 폭(B) 100m인 모형체의 평균경사도 10도, 15도, 35도의 체적변화는 Table 5와 같다. 심도별 토량환산계수(C)값을 적용하여 토량을 산정할 경우 기존 방식인 심도 2m의 토량환산계수(C)값을 일률 적용할 때 보다 6.1%~9.4%, 7,999m³~9,628m³의 토량이 많이 발생하는 것으로 산정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 전남○○산업단지 조성공사 내 토사의 심도별 현장 들밀도 시험과 A다짐, D다짐의 최대 건조밀도 시험을 통해 흙의 건조밀도를 산정하고 토량환산계수(C)를 실험적으로 분석하였다. 토량환

Table 3. Volume by Depth According to Average Slope

(units : m³)

Depth (m)	Width (m)		$\alpha = 10^\circ$		$\alpha = 15^\circ$		$\alpha = 35^\circ$	
	50 m	100 m	50 m	100 m	50 m	100 m		
1	21,878	37,885	12,806	25,904	5,332	14,974		
2	18,042	32,915	10,889	23,241	4,875	14,231		
3	14,592	28,331	9,140	20,745	4,442	13,513		
4	11,528	24,132	7,558	18,4717	4,034	12,819		
5	8,850	20,320	6,143	16,256	3,651	12,150		
6	6,558	16,893	4,895	14,261	3,292	11,506		
7	4,652	13,853	3,815	12,434	2,957	10,885		
8	3,131	11,199	2,901	10,774	2,647	10,290		
Total	89,232	185,528	58,148	142,033	31,229	100,369		

Table 4. Volume Change According to Average Slope (B=50 m)

(units : m³)

Depth (m)	Width (m)			$\alpha = 10^\circ$			$\alpha = 15^\circ$			$\alpha = 35^\circ$		
	Natural	Existing	This Study	Natural	Existing	This Study	Natural	Existing	This Study			
1	21,878	18,509	17,371	12,806	10,834	10,168	5,332	4,511	4,233			
2	18,042	15,264	15,264	10,889	9,212	9,212	4,875	4,124	4,124			
3	14,592	12,345	11,966	9,140	7,733	7,495	4,442	3,758	3,643			
4	11,528	9,753	10,341	7,558	6,394	6,780	4,034	3,413	3,619			
5	8,850	7,487	8,266	6,143	5,197	5,738	3,651	3,088	3,450			
6	6,558	5,548	6,794	4,895	4,141	5,072	3,292	2,785	3,410			
7	4,652	3,935	4,921	3,815	3,227	4,036	2,957	2,502	3,129			
8	3,131	2,649	3,535	2,901	2,454	3,275	2,647	2,239	2,988			
Total	89,232	75,490	78,458	58,148	49,193	51,775	31,229	26,419	28,555			

Table 5. Volume Change According to Average Slope (B=100 m)

(units : m³)

Depth (m)	Width(m)			$\alpha = 10^\circ$			$\alpha = 15^\circ$			$\alpha = 35^\circ$		
	Natural	Existing	This Study	Natural	Existing	This Study	Natural	Existing	This Study			
1	37,885	32,051	30,081	25,904	21,915	20,568	14,974	12,668	11,889			
2	32,915	27,846	27,846	23,241	19,662	19,662	14,231	12,040	12,040			
3	28,331	23,968	23,231	20,745	17,551	17,011	13,513	11,432	11,081			
4	24,132	20,416	21,647	18,417	15,581	16,520	12,819	10,845	11,499			
5	20,320	17,191	18,979	16,256	13,752	15,183	12,150	10,279	11,348			
6	16,893	14,292	17,502	14,261	12,065	14,775	11,506	9,734	11,920			
7	13,853	11,720	14,657	12,434	10,519	13,155	10,885	9,209	11,517			
8	11,199	9,474	12,643	10,774	9,115	12,164	10,290	8,705	11,617			
Total	185,528	156,956	166,585	142,033	120,160	129,038	100,369	84,912	92,911			

산계수(C)에 따른 토량의 체적변화에 대한 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 심도별 흙의 단위중량을 측정한 결과 심도가 깊을수록 흙의 단위중량은 증가하였으며, 심도 8m 토량환산계수(C)는 1.129(A다짐), 1.079(D다짐)로, 심도 2m 토량환산계수(C)인 0.846(A다짐), 0.808(D다짐) 보다 33.5% 높게 나타났다.
- (2) 일반적으로 토량환산계수(C)는 1.0보다 작으나 심도 6m 이상의 토량환산계수(C)는 1.0을 초과하여 자연상태의 흙을 다짐을 하더라도 잉여토량이 발생할 수 있다.
- (3) 토취장을 구현한 모형체를 기준으로 심도별 토량환산계수(C)를 적용한 토공량은 심도 2m 흙의 토량환산계수(C)를 일률적으로 적용한 토공량 대비 3.9~9.4% 증가한다. 따라서, 굴착 심도가 깊고 대규모 토공사의 경우 심도별 토량환산계수(C)를 적용할 경우 절토량을 줄일 수 있다.

단지의 토공계획에 따라 토공량이 산정되고, 토량환산계수는 토공량 산정에 매우 중요한 요소이다. 토공량이 과다하게 계획될 경우 절취구역은 확대되고 자연환경 파괴와 생태계의 교란은 점점 심화되며, 사업시행자 입장에서는 공사비와 공사기간이 증가하게 된다.

본 연구는 제한된 지역에서 수행된 결과의 일부이

며, 기존의 토량환산계수를 일반화 할 수 있도록 다양한 시험 등 더 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 국토교통부(2018), "2017 도시계획 현황 통계발표", 세종.
2. 박영목(2012), "암버력이 혼재된 토사의 토량환산계수 변화에 관한 실험적 연구", 「대한토목공학회 논문집」, 32(5): 193~198.
3. 신경철(2023), "심도별 토량환산계수(C)에 따른 토공의 체적변화에 대한 사례 연구", 석사학위논문, 경상국립대학교.
4. 오세욱·이봉직·김홍석(2017), "비다짐 성토지반의 합리적 토량평가를 위한 토량환산계수 추정", 「한국지반환경공학회 논문집」, 18(11): 13~18.
5. 옥진아(2020), "경기도 산지전용 정량적 기준 개선방안", 수원: 경기연구원.
6. 이승연·최병호(2014), 「살아있는 토목시공학」, 서울: 구미서관.
7. 한국건설기술연구원(2022), "건설공사 표준품셈, 경기.
8. 한국토지주택공사(2021.1.27), "설계지침(토목)". LH(2021.1.27), "Design Guideline (Civil Eng.)". (in Korean)
9. 한국토지주택공사(2021.1.13), "토질조사 시행지침".
10. KS F2311(2022), "모래 치환법에 의한 흙의 밀도 시험방법", 산업표준심의회.
11. KS F2312(2022), "흙의 실내 다짐 시험방법", 산업표준심의회.

요약

토공계획은 자연상태의 원지반 토량을 절취하여 흐트러진 상태의 토량을 운반하고 성토지반의 활용도에 따라 다짐을 하는 과정에서 토질의 체적변화를 고려하여 수립하여야 한다. 흙의 상태에 따른 체적의 변화를 구하기 위해 일반적으로 심도 2m 깊이에서 시험굴 조사를 통해 얻어진 토량환산계수를 사용하게 되며, 굴착 깊이에 따른 토질의 성질을 고려하지 않고 전체 토공량에 일률적으로 적용하다 보니 토공량 산정에 오차가 발생하고 있다. 특히 신도시 택지개발과 같이 대량의 토공량이 필요한 조성공사의 경우 작은 오차에도 토공량의 차이는 크게 발생하게 된다. 본 연구에서는 심도 2m 이상 토질의 물리적 특성을 조사하고 기존의 설계기준인 심도 2m의 토량환산계수와 비교 검토한 결과 굴착 심도가 깊고 대규모 토공사의 경우 심도별 토량환산계수(C)를 적용할 경우 절토량을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

주제어: 시험굴 조사, 대규모 현장시험, 굴착심도, 토량환산계수
