한국농림기상학회지, 제2권 제4호(2000)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 2, No. 4, (2000), pp. 156~166

중성자 수분측정기를 이용한 고속도로 포장의 계절별 함수량 변화 측정에 관한 연구

송관철[1] · 이상모[2] · 류순호[2] · 류관식[3] · 박무언[1]
[1]농촌진흥청 농업과학기술원, [2]서울대학교 농업생명과학대학, [3]대구대학교 자연자원대학
(2000년 8월 22일 접수)

A Study on Seasonal Variation of Water Content under Highway Asphalt Pavements Using Neutron Moisture Meter

Kwan-Cheol Song[1], Sang-Mo Lee[2], Sun-Ho Yoo[2], Kwan-Sik Ryu[3] and Moo-Eon Park[1]
[1]Rural Development Administration, National Institute of Agricultural Science and Technology
[2]College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University
[3]College of Natural Resources, Taegu University
(Manuscript received 22 August 2000)

ABSTRACT

This study was carried out to provide the information on seasonal variations of water content under highway asphalt pavements which influence on the dynamic behaviour and durability of pavements, and to assess the correlation between water content and soil or meteorological factors. Total eight sites for water content measurement which included fives sites in Kyungbu, two sites in Honam, and one site in Youngdong Highway were selected considering the variations in geology, topology and meteorology factors over all the country. Water contents under asphalt pavements were measured up to 170 cm depth every two week for total 13 months of August 1992 through September 1993 using neutron moisture meter(CPN-503DR). The range of water content (θ_w) at the upper soils of above 50 cm depth was 7~12% and was not quite different regardless of sites, except for Iseo site. However, soil water contents below 60 or 70 cm depth were significantly different between the measurement sites, that is, the lowest water content was 5% at Kyungsan site and the highest water content was 20% at Iseo site. For all the sites, seasonal variations in water content during the experimental period were little, their range was within only 1 to 4%. Seasonal variations of water content in original or cutting area, which were 4% more or less, were slightly larger than in bedding areas, which were below 2%. Water contents under asphalt pavements had statistically significant positive correlations with silt and clay content in soil, but there were little correlations between water content and meteorological factors such as precipitation, relative humidity, mean air temperature, and wind velocity.

Key words : **asphalt pavements, water content, neutron moisture meter, bulk density, γ-density meter**

I. 서 언

노상토는 원지반이 그대로 이용되거나 미사질과 점토질을 많이 함유하고 있는 재료로 충진 건설되는 경우가 많기 때문에 노상토의 공학적 특성은 함수량의 변화에 상당히 민감한 반응을 보이고 있다. 따라서 포장 아래의 쇄석층을 통한 함수량의 이동 상황과 이에 따른 노상토의 함수량 변화를 측정하는 것은 포장의 거동 및 내구성 결정에 대단히 중요하다(Young, 1982). 노상토 하부의 기층 및 보조기층 자체는 함수량의 변화에 따른 공학적 특성의 변동이 심각하지 않은 다짐 쇄석층으로 된 경우가 대부분이기 때문에 기층 및 보

Corresponding Author : Sang-Mo Lee(smlee@nicem.snu.ac.kr)

조기층의 함수량 변화 자체가 심각한 문제가 되는 경우는 거의 없다. 다만 이들은 높은 공극율을 가지므로 포장 하부층을 통한 수분의 이동에 대단히 큰 통로를 제공함으로서 노상토의 함수량 변화량의 크기 및 속도를 결정하는 요인이 될 수 있으므로 노상토의 함수량 변화 연구는 노상토의 공학적 매질 특성을 규정 짓는 데 유용한 연구결과를 추출할 수 있다(Han, 1989).

야외에서 토양수분함량을 비파괴적으로 측정하고자 할 때 중성자 수분 측정기법(Visvalingam and Tandy, 1972) 또는 Psychrometer법(Rawlins, 1966) 등을 사용한다. 중성자 수분 측정기를 사용하는 중성자 수분 측정기법은 기기의 neutron probe(중성자원과 열중성자 감지기) 직경이 약 5 cm에 불과하여 직경 5 cm 정도의 구멍을 뚫을 수 있는 곳이면 어디에나 측정할 수 있으며, 원하는 깊이까지 구멍을 뚫어 투입관을 한 번 설치하면 그 투입관의 깊이 내에서는 깊이별 함수량을 언제나 반복적으로 그리고 비파괴적으로 측정할 수 있는 방법이다(Haverkamp 등, 1984; Vauclin 등, 1984).

포장에서 노상토층은 포장의 동탄성 거동에 커다란 영향을 주고 포장 표층의 영구 변형량의 크기에 큰 영향을 주므로 노상토층의 공학적인 특성의 계절별 변화에 대한 연구가 외국에서는 상당히 진척되어 포장 설계법에도 반영되어 있으며, 포장의 파괴 정도의 예측에도 입력변수로서 이용되고 있다(Pihlajavaara, 1982). 반면에 국내에서는 도로 전반에 대한 연구실적이 많지 않은 실정이기 때문에 노상토의 함수량 측정과 관련된 자료는 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 노상토의 함수량 변화를 측정하기 위한 연구로서 함수량 측정방법들 중 중성자 수분 측정기를 이용한 함수량의 측정방법을 제시하며, 포장의 역학적 거동 및 내구성에 결정적인 영향을 미치는 노상토의 함수량을 측정함으로써 국내 도로 포장의 계절별 함수량의 변동상황을 파악하고, 이를 토대로 노상토의 계절별 함수량 변화와 토양인자 및 기상인자들과의 상관 관계를 밝히려고 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 함수량 측정지점 선정

고속도로 노상토의 함수량에 영향을 주는 인자로서 고려될 수 있는 것들은 기상, 지형, 지질, 토양, 토지이용 양식, 식생 등이며 성토 혹은 절토에 의한 변형도 중요한 인자로서 생각할 수 있다. 우선 조사 연구 대상지역을 경부고속도로, 호남고속도로, 영동고속도로의 3개권으로 크게 구분하고 문헌에 의한 사전 조사로써 얻은 지질과 토양에 관한 자료 및 기상 자료를 얻을 수 있는 기상관측소의 위치 등을 고려하여 대상 후보지역을 선정하였다. 이를 토대로 하여 1992년 7월 1일부터 7월 4일까지 4일간 영동고속도로와 경부고속도로 및 호남고속도로를 현장 답사하여 경부고속도로를 다시 추풍령 이북과 이남 지역으로 구분한 2개 지역과, 영동고속도로와 호남고속도로의 4개 지역에서 노상토의 함수량에 영향을 줄 수 있는 인자 중 지형, 지질과 토양, 성토 혹은 절토 여부 등의 인자 및 기상 관측소와의 거리를 고려하여 함수량 측정 대상지로 8개소를 선정하였다.

확정된 8개 지점은 영동고속도로의 신갈기점 58 km에 위치한 적금, 경부고속도로의 서울기점 29 km에 위치한 신갈, 35 km에 위치한 기흥, 215 km에 위치한 추풍령, 220 km에 위치한 봉산 및 316 km에 위치한 경산, 그리고 호남고속도로의 회덕기점 50 km에 위치한 논산과 86 km에 위치한 이서이다. 함수량 측정지점의 지형 및 환경요인은 Table 1에 나타내었다.

2.2. 함수량 측정을 위한 투입관(Neutron probe access tube) 설치

중성자 수분측정기를 이용하여 토양단면에서 깊이별

Table 1. Descriptions of eight sites for water content measurement

Site	Topography	Area	Meteorological station
Youngdong Hwy.			
Jukkeum	local valley	bedding	Wonju
Kyungbu Hwy.			
Singal	diluvial terrace	original	Suwon
Kiheung	local valley	bedding	Suwon
Chupoongryung	local valley	cutting	Chupoongryung
Bongsan	local valley	bedding	Chupoongryung
Kyungsan	diluvial terrace	bedding	Youngchun
Honam Hwy.			
Nonsan	alluvial plain	bedding	Buyeo
Iseo	alluvial plain	bedding	Jeonju

로 함수량을 측정하고자 할 때 측정기의 탐지부분인 neutron probe를 원하는 깊이에 쉽게 투입되도록 하기 위한 투입관의 설치를 필요로 한다. 투입관으로는 중성자가 투과하기 쉬운 알루미늄관을 많이 사용하지만 이것은 자갈 또는 치밀한 토양이 있는 단면에서는 투입관을 삽입할 때 혹은 설치 후 외부로부터의 심한 압력과 충격에 의하여 변형이 되기 쉽다. 따라서 본 연구에서는 노상토의 특성과 고속도로라는 점을 고려하여 강철관(내경 50 mm, 외경 54 mm)을 사용하였다. 노상토의 함수량 측정지점으로 선정한 8개 지점에 대한 투입관 설치는 1992년 7월 13일부터 7월 22일까지의 10일간의 작업으로 완료하였다.

투입관 설치는 우선 130 mm bit로 아스콘층을 10 cm 정도 boring을 한 다음, 50 mm bit로 약 2 m 깊이까지의 노상토를 boring하였다. 여기에 내경 60 mm의 파이프형 drill을 hammer로 2 m까지 삽입 한 후 60 mm의 파이프형 drill 내부를 다시 50 mm bit로서 210 cm까지 boring하였다. 60 mm의 파이프형 drill 내부로 길이 2 m 강철관을 노상토의 아스콘층으로 부터 50 cm 하부까지 삽입 한 다음 파이프형 drill을 역 Hammering 방식으로 뽑아 내었다. 이때에 내경 60 mm의 파이프형 drill은 노상토를 원형 그대로 보호하면서 함수량 측정 강철관을 설치하기 위한 하나의 보호장치로 사용하였다. 강철관이 원하는 깊이까지 삽입되었다고 판단되면 고운 모래로 강철관과 노상토 사이의 공간(약 5 mm)을 메웠으며, 약 3 cm의 두께로 강철관과 아스콘 사이를 초조강 시멘트로 막음으로써 외부로부터 노상토의 함수량 변화에 영향을 미칠 수 있는 물의 유입을 차단하였다. 강철관은 실리콘 고무마개(직경 55 mm)로 막았으며, 투입관을 외부압력으로부터 보호하기 위하여 원형 강판(직경 197 mm, 두께 5 mm)을 덮개로 사용하였다. 노상토의 함수량 측정을 위하여 설치한 중성자 수분 측정기의 투입관 설치 단면은 Fig. 1과 같다.

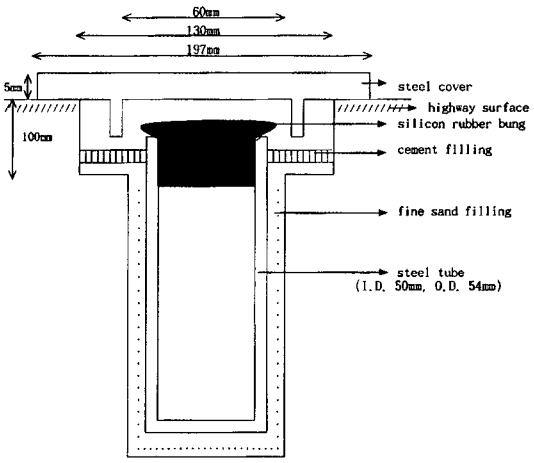

Fig. 1. Schematic diagram of access tube for neutron moisture meter.

2.3. 토양시료의 채취 및 이화학성 분석

측정지점의 토양에 대한 이화학성 분석을 위하여 함수량 측정 인근 지점에서 토양 시료를 채취하였다. 채취한 토양시료에 대하여 함수량 및 역학적 성질 그리고 물의 이동에 크게 영향을 주는 주요 물리성 중 토성(pipette법), 액성한계 및 소성한계를 구하였으며 화학성 중에는 유기물 함량(Walkley-Black 법)과 양이온 치환 용량(1 N 초산암모늄법)을 정량하였다.

2.4. 함수량 및 전용적 밀도 측정

측정지점 8개소에 대하여 1992년 8월부터 1993년 9월까지 13개월간 2주에 1회 주기적으로 현지에서 중성자 수분 측정기(neutron moisture meter, CPN-503 DR)를 이용하여 깊이 170 cm까지 10 cm 간격으로 함수량을 측정하였다. 중성자법을 이용하여 측정한 노상토의 함수량은 부피기준이므로 이것을 실제로 직접 활용 가능한 중량기준의 함수량으로 바꾸어 주기 위하여 토양의 전용적 밀도(soil bulk density)를 측정하는 것이 필요하다(Ward and Deventer, 1993). 이미 포장된 도로에서 아스콘층, 보조기층, 기층을 관통하여 coring으로 노상토의 비교란 시료(undisturbed soil core)를 채취하는 것은 거의 불가능하여 감마선 밀도 측정기(γ-density meter, Troxler-1351)를 이용하여 투입관이 설치된 지점에서 중성자 수분 측정기의 경우처럼 현지에서 깊이별 전용적 밀도를 측정하였다(Rawls and Brooks, 1975). 현장에서 측정한 토양밀도는 습토의 전용적밀도(D_{bw})이므로 다음의 식을 이용하여 건토의 전용적밀도(D_b)를 구하였다.

$$D_b = D_{bw} - (d_w * \theta_v)$$

여기서 d_w는 측정 지점 토양수의 밀도이며, θ_v는 용

적기준 함수량이다.

중성자법으로 측정된 용적기준 함수량(θ_v)은 $\theta_w = \theta_v / D_b$ 식을 사용하여 중량기준 함수량(θ_w)으로 환산하였다.

2.5. 중성자 수분 측정기 및 감마선 밀도측정기의 보정

2.5.1. 중성자 수분 측정기의 보정

노상토의 함수량은 측정기 보정에 의하여 계측과 동시에 중성자 수분측정기의 계수치로부터 바로 산출이 된다(Halvorson, 1986). 중성자 수분 측정기 보정은 시료 용기로서 200 *l* 드럼통(직경 57 cm, 높이 85 cm)을 이용하였다. 현지에서 채취한 노상토를 200 *l* 드럼통에 105°C 건조토양 기준으로 300 kg 충진한 후, 중량기준 함수량을 풍건상태(0.9%), 노상토 채취시 상태(8.7%) 및 포화상태(18.4%)의 3개 수준으로 만들어 중성자 수분 측정기의 보정작업을 하였다. 노상토의 전용적 밀도를 구한 후 계산한 용적기준 함수량은 풍건상태; 1.5%, 시료 채취시 상태; 13.6%, 포화상태; 30.5%이었다. 보정작업 결과 용적 기준 함수량(θ_V)은 계수율 R(토양의 측정 계수치/표준 시료의 측정 계수치)과 직선적인 관계가 있어 다음과 같이 1차식으로 나타낼 수 있었다.

$$\theta_V = 24.32R - 3.02 \quad (r = 0.99^{**})$$

2.5.2. 감마선 밀도 측정기의 보정

감마선 밀도 측정기의 보정도 중성자 수분 측정기 보정시 사용한 200 *l* 드럼통을 이용하였다. 200 *l* 드럼통에 용적밀도를 1.443, 1.771, 1.925 및 1.932 g cm^{-3}의 4수준으로 다르게 되도록 노상토를 충진하여 보정작업을 하였다. 습토의 전용적밀도(D_{bw})와 감마선 밀도 측정기의 계수율 R(토양의 측정계수치/표준시료의 계수치)과의 관계식은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있었다.

$$D_{bw} = \ln [10.185/(R + 0.449)] \quad (r = 0.99^{**})$$

III. 결과 및 고찰

3.1. 토양의 이화학적 특성

노상토의 함수량 및 역학적 성질에 영향을 미치는 토양의 주요 이화학적 특성을 Table 2에 나타내었다. 중성자 수분 측정기를 이용하여 노상토의 함수량을 측정하는 대부분의 지역에서 토양의 유기물 함량은 0.07 ~1.26%, 양이온 치환 용량은 3.2~10.0 $cmol^{+}\ kg^{-1}$의 범위로서 매우 낮은 편이였다.

일반적으로 토양의 함수량이나 역학적 성질 또는 물의 이동에 특히 중요한 인자는 토성(입경 분포)이다. 신갈의 노상토는 점토함량이 10%에 미사함량이 40%인 양토이나, 추풍령의 노상토는 점토함량 2%에 모래함량이 87%인 사토였다. 그 외의 노상토는 점토함량이 6~12%이고, 모래 함량이 53~73%인 사양토였다. 우리 나라 142개 대표 토양의 평균 액성한계(liquid limit)는 49.0%, 평균 소성한계(plastic limit)는 30.9%으로, 평균 소성지수(plastic index)는 18.1%로 알려져 있는데 본 연구의 함수량 측정지점들의 토양의 소성지수는 2.7~9.7%로 매우 낮았다. 이는 토양의 점토함량과 유기물함량이 낮은데 기인한다고 생각된다.

Table 2. Physicochemical properties of soils at eight sites

Site	O.M. (%)	CEC $cmol^{+}\ kg^{-1}$	Sand ---	Silt (%)	Clay ---	Texture	L.L.[a] ---	P.L.[b] (%)	P.I.[c] ---
Jukkeum	0.26	5.4	70.0	22.0	8.0	SL	26.7	20.5	6.1
Singal	0.14	8.4	49.8	40.2	10.0	L	31.5	25.4	6.1
Kiheung	0.14	5.7	70.4	17.6	12.0	SL	26.5	22.3	4.2
Chupoongryung	0.14	3.2	87.3	10.7	2.0	S	24.4	21.7	2.7
Bongsan	0.71	10.0	70.8	22.2	7.0	SL	23.5	19.1	4.4
Kyungsan	1.26	8.3	64.8	26.2	9.0	SL	29.2	19.5	9.7
Nonsan	0.07	6.1	73.3	20.8	6.0	SL	39.5	31.6	7.9
Iseo	0.19	4.7	53.4	38.6	8.0	SL	41.1	34.0	7.0

a, b, and c are referenced to Liquid Limit, Plastic Limit, and Plastic Index, respectively.

Table 3. Changes in water content and bulk density at each site with soil depths for 13 months (August, 1992 - September, 1993)

Depth (cm)	*Youngdong Hwy.*						*Kyungbu Hwy.*						*Honam Hwy.*			
	Jukkeum		Singal		Kiheung		Chupoongryung		Bongsan		Kyungsan		Nonsan		Iseo	
	θ_w[a]	D_b[b]	θ_w	D_b	θ_w	D_b	θ_w	D_b	θ_w	D_b	θ_w	D_b	θ_w	D_b	θ_w	D_b
10	9.3-11.2	1.56	8.4-10.8	1.67	7.2-8.9	1.86	7.3-11.8	1.62	7.7-9.6	1.79	7.0-9.6	1.60	7.9-9.8	1.75	7.5-9.0	1.70
20	7.5-9.2	1.82	8.0-11.5	1.71	7.6-9.4	1.73	7.7-12.3	1.67	7.1-8.4	1.85	6.7-8.6	1.70	7.9-10.5	1.68	7.7-9.2	1.70
30	7.3-9.4	1.66	8.1-11.3	1.64	8.1-9.8	1.54	7.2-11.4	1.70	7.1-7.9	1.84	6.0-8.7	1.43	7.0-10.0	1.63	9.3-11.3	1.59
40	7.4-10.2	1.56	8.1-11.2	1.59	7.5-9.8	1.55	7.0-11.4	1.66	7.4-8.6	1.84	7.0-9.0	1.39	6.2-8.1	1.62	10.1-12.9	1.58
50	7.2-9.9	1.61	8.4-11.8	1.56	7.5-9.7	1.63	7.4-11.3	1.59	7.9-8.8	1.87	6.2-8.4	1.53	8.4-10.2	1.61	10.7-13.2	1.55
60	9.6-10.8	1.61	8.9-16.1	1.54	8.1-10.2	1.60	8.1-11.6	1.57	8.1-9.3	1.87	6.0-7.5	1.57	12.3-13.4	1.60	9.7-12.0	1.61
70	9.8-10.9	1.61	9.5-19.1	1.56	10.1-12.7	1.57	8.3-11.1	1.61	10.3-11.5	1.92	5.6-7.3	1.60	13.6-15.5	1.58	13.2-14.8	1.61
80	10.4-11.4	1.65	10.0-18.7	1.64	11.2-13.1	1.55	7.8-9.5	1.67	10.2-11.3	1.98	5.1-6.6	1.57	14.2-15.9	1.56	17.4-19.3	1.56
90	10.4-12.1	1.65	9.4-17.3	1.68	11.5-13.4	1.57	8.2-10.2	1.63	9.7-10.7	1.97	4.8-6.3	1.55	13.1-14.7	1.61	17.3-19.2	1.57
100	11.2-13.0	1.62	8.9-18.5	1.65	11.9-13.4	1.58	7.8-9.4	1.68	9.9-10.9	1.95	4.9-6.4	1.58	14.5-16.6	1.59	17.6-19.3	1.56
110	12.1-14.1	1.60	8.9-18.3	1.64	12.0-13.3	1.55	7.3-8.4	1.75	9.7-11.0	1.97	5.0-6.6	1.62	15.6-17.6	1.59	18.3-20.5	1.56
120	10.8-12.5	1.62	8.2-18.6	1.67	12.1-13.7	1.52	6.8-7.6	1.84	8.7-10.0	2.01	5.0-6.4	1.58	15.4-17.3	1.64	18.4-20.5	1.53
130	10.4-11.4	1.63	7.9-17.5	1.69	13.1-14.5	1.55	6.6-7.6	1.88	9.0-10.1	2.04	4.6-5.9	1.59	15.1-16.9	1.67	16.5-18.5	1.55
140	10.4-11.4	1.62	8.0-17.5	1.74	12.7-14.3	1.62	6.7-7.8	1.87	9.6-10.5	2.06	4.7-6.0	1.52	16.3-18.3	1.52	16.0-17.7	1.59
150	10.6-12.1	1.58	8.4-16.3	1.77	13.0-14.5	1.61	6.6-7.4	1.94	9.1-10.2	2.14	4.5-5.8	1.58	20.0-22.3	1.39	15.9-18.2	1.56
160	10.7-12.0	1.59	10.7-15.7	1.76	13.3-15.0	1.58	6.3-7.4	2.01	9.5-10.8	2.14	4.8-5.6	1.59	18.9-20.7	1.43	16.1-19.1	1.55
170	10.2-11.6	1.60	16.9-19.1	1.69	13.4-15.2	1.59	6.3-8.0	2.04	9.3-10.6	2.14	4.5-5.3	1.69	17.1-18.8	1.53	20.8-23.0	1.49

a: Mass-based water content, %

b: Soil bulk dry density, g cm^{-3}

3.2. 깊이별, 측정시기별 함수량 변화 및 함수량과 기상인자와의 상관관계

측정지점 8개소에서 1992년 8월부터 1993년 9월까지 측정한 깊이별 함수량과, 측정시기 동안의 최대, 최소값을 중량기준 함수량으로 Table 3에 나타내었다. 기층과 보조기층에 대한 함수량은 아스콘, 모래 및 자갈로 이루어져 보정작업을 수행하지 못하였다. 따라서 노상토에 대한 보정식을 기층과 보조기층에 직접 적용하는 데에는 문제점이 수반되나, 노상토의 함수량과 비교하기 위하여 노상토의 보정식을 기층과 보조기층에 적용하여 함수량으로 표시하였는데, 이는 함수량의 절대치가 아니라 함수량에 해당하는(equivalent) 값이다.

Table 4는 함수량 측정장소의 인근 기상대 또는 기상관측소에서의 연간 주요 기상자료로서 1992년 8월에서 1993년 7월까지 1년간의 총강수량, 평균기온, 상대습도 및 풍속의 1년 평균값과 1961년부터 1990년까지의 30년간의 평균값과 비교하여 나타낸 것이다. 강우량, 평균기온, 상대습도, 풍속 등과 같은 기상인자는 토양의 함수량에 영향을 끼치는 주요 기상인자들이다. 원주, 수원, 추풍령, 영천, 부여 및 전주 등 함수량 측정지점의 인근 기상대 또는 기상관측소에서 1992년 8월부터 1993년 9월까지의 일별 기상자료를 수집하여 1992년 8월부터 1993년 9월까지 측정한 깊이별 함수량과 각 기상인자들과의 상관관계 통계분석결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 강수량은 각 함수량 측정일 전 5일 및 10일 동안의 총강수량이며, 평균온도, 상대습도와 풍속은 함수량 측정일 전 5일 및 10일 동안의 평균값이다.

3.2.1. 적 금

깊이별 함수량은 10 cm 깊이에서 9~12%이었고, 20~50 cm 깊이에서 7~10%로 낮았다. 60 cm 깊이에서부터 함수량이 서서히 증가하기 시작하여 110 cm 깊이에서 12~14%로 최대값을 보이고, 120 cm 이하

Table 4. Meteorological data of eight sites for water content measurement

Site(meteorological sta.)*	Mean air temp.(°C)	Relative humidity(%)	Wind velocity(m sec^{-1})	Precipitation(mm)
Jukkeum(Wonju)				
1 year[a]	10.9	74	1.1	1392.8
30 years[b]	10.5	71	1.2	1287.0
Singal, Kiheung(Suwon)				
1 year	11.6	73	1.6	1159.6
30 years	11.6	73	1.6	1307.0
Chupoongryung, Bongsan(Chupoongryung)				
1 year	11.4	69	2.6	1336.7
30 years	11.5	70	3.0	1149.1
Kyungsan(Youngchun)				
1 year	11.5	68	1.9	1233.5
30 years	12.2	67	1.6	982.1
Nonsan(Buyeo)				
1 year	11.5	68	0.8	1511.7
30 years	11.8	78	1.3	1310.8
Iseo(Jeonju)				
1 year	12.7	71	1.3	1570.3
30 years	12.9	73	1.2	1296.2

*Meteorological station in parenthesis means local meteorological station adjacent to water content measurement site

a: Averaged value of mean air temperature, relative humidity, wind velocity, and total precipitation for 1 year (August, 1992-July, 1993)

b: Averaged value of mean air temperature, relative humidity, wind velocity, and total annual precipitation for 30 years (1961-1990)

Table 5. Linear correlation coefficients between water content and meteorological factors at eight sites for water content measurement

Site	Depth (cm)	Meteorological factor							
		Precipitation		Mean air temp.		Relative humidity		Wind velocity	
		5day[a]	10day[b]	5day	10day	5day	10day	5day	10day
Jukkeum	20	0.14	0.07	-0.05	-0.03	0.017	0.24	-0.07	-0.27
	40	0.01	0.15	-0.39	-0.40	0.03	0.10	-0.01	-0.08
	80	0.11	0.25	0.14	0.15	0.34	0.20	0.12	0.20
	100	0.11	0.26	0.19	0.20	0.39	0.18	0.14	0.20
	120	-0.10	-0.04	0.05	0.04	0.14	-0.13	0.39	0.33
	160	0.05	0.09	0.15	0.15	0.17	-0.02	0.25	0.33
Singal	20	0.19	0.06	-0.17	-0.25	0.17	0.07	-0.31	-0.20
	40	0.33	0.32	0.46	0.11	0.46*	0.21	-0.20	-0.04
	80	0.63**	0.84**	0.66**	0.67**	0.73**	0.69**	-0.14	-0.03
	100	0.49**	0.70**	0.60**	0.65**	0.68**	0.70**	-0.23	-0.14
	120	0.27	0.41*	0.48*	0.53**	0.45*	0.57**	-0.03	-0.05
	160	0.22	0.27	0.31	0.36	0.48*	0.45*	-0.18	-0.10
Kiheung	20	0.25	0.05	0.09	0.05	0.16	0.03	-0.31	-0.20
	40	0.29	0.23	0.04	0.05	0.33	0.21	-0.20	-0.04
	80	0.16	0.13	0.12	0.12	0.22	0.21	-0.14	-0.03
	100	0.01	0.03	0.01	0.01	0.15	0.12	-0.23	-0.14
	120	0.19	0.37	0.34	0.37	0.26	0.33	-0.03	-0.05
	160	0.14	0.14	0.05	0.06	0.13	0.12	-0.18	-0.10
Chupoongryung	20	0.44**	0.49**	0.29	0.30	0.46*	0.47*	-0.36	-0.43*
	40	0.52**	0.64**	0.41	0.42	0.44*	0.44*	-0.42*	-0.48*
	80	0.37	0.56**	0.62**	0.61	0.36	0.41*	-0.45*	-0.51*
	100	0.24	0.35	0.54**	0.54	0.23	0.24	-0.32	-0.40*
	120	0.07	0.12	0.25	0.24	0.16	0.14	-0.13	-0.13
	160	0.09	0.05	0.21	0.20	0.03	0.04	-0.09	-0.09
Bongsan	20	0.39	0.38	-0.25	-0.30	-0.28	-0.29	0.17	0.22
	40	0.36	0.37	-0.02	-0.01	-0.31	-0.31	0.01	0.03
	80	0.35	0.39	-0.06	-0.10	-0.30	-0.27	0.19	0.19
	100	0.30	0.38	-0.02	-0.06	-0.15	-0.12	-0.03	-0.03
	120	0.27	0.17	-0.04	-0.01	-0.31	-0.32	-0.15	-0.20
	160	0.35	0.20	0.13	-0.10	-0.34	-0.29	-0.07	-0.08
Kyungsan	20	0.33	0.25	0.32	0.27	0.16	0.07	-0.05	-0.10
	40	0.33	0.35	0.34	0.27	0.17	0.06	-0.10	-0.03
	80	0.13	0.14	-0.05	-0.09	0.01	0.06	0.17	0.24
	100	0.29	0.40*	0.42*	0.38	-0.10	-0.14	-0.01	-0.18
	120	0.27	0.41*	0.49*	0.49*	0.01	0.02	-0.03	-0.02
	160	0.09	0.25	0.12	0.08	0.08	0.03	-0.37	-0.22
Nonsan	20	0.16	0.25	0.31	0.32	0.40*	0.47*	0.30	0.23
	40	0.09	0.19	0.35	0.34	0.21	0.26	0.33	0.35
	80	0.06	0.08	0.33	0.29	-0.08	-0.06	0.36	0.36
	100	0.05	0.09	0.48*	0.45*	0.03	0.08	0.35	0.32
	120	0.05	0.03	0.34	0.32	0.0.4	0.07	0.30	0.34
	160	0.15	0.08	0.21	0.19	0.05	0.09	0.34	0.39
Iseo	20	0.05	0.02	-0.01	-0.05	-0.12	-0.11	0.34	0.30
	40	0.13	0.05	-0.09	-0.14	-0.17	-0.18	0.26	0.37
	80	0.23	0.22	0.33	0.29	-0.12	-0.12	0.23	0.34
	100	0.12	0.13	0.24	0.21	-0.06	-0.01	0.21	0.24
	120	0.17	0.13	0.06	0.06	-0.09	-0.06	0.33	0.27
	160	0.15	0.25	0.34	0.33	-0.32	-0.30	0.06	0.27

a: Averaged value of each meteorological factor for 5 days before each water content measurement

b: Averaged value of each meteorological factor for 10 days before each water content measurement

*statistically significant at p = 0.05

**statistically significant at p = 0.01

깊이에서는 10~12%로 비교적 균일한 값을 보이고 있다. 전용적 밀도는 전 깊이를 통하여 약 1.60 g cm^{-3}으로 비교적 균일한 값을 보이고 있다. 측정 시기별 함수량 변화를 보면 50 cm 깊이까지는 가을과 봄인 9, 10월 및 3, 4월에 낮고, 60 cm 이하 깊이에서는 겨울인 1, 2월에 낮은 경향이었다. 그러나 함수량 변화폭은 전 측정기간을 통하여 1~2% 미만으로 매우 낮았다. Table 5에서 보는 바와 같이 적금에서의 깊이별 함수량 변화는 강수량, 평균기온, 상대습도, 풍속 등과 같은 기상인자의 영향을 거의 받지 않았다.

3.2.2. 신 갈

깊이별 함수량은 50 cm 깊이까지는 8~11%로 낮았으며, 측정시기에 따른 함수량 변화가 적었다. 그러나 60 cm 이하 깊이에서는 증가하기 시작하여 170 cm 깊이에서는 16~19%로 최대였으며, 측정시기에 따라 함수량 변화가 매우 심했다. 전용적밀도는 60 cm 깊이에서 1.54 g cm^{-3}이고 160 cm 깊이에서 1.76 g cm^{-3}으로 깊이가 증가할 수록 증가하는 경향이었다. 측정 시기별 함수량 변화를 보면 1992년 8월부터 1993년 1월까지는 70 cm 깊이부터 160 cm까지 감소하였으나, 1993년 2월 이후부터는 전토층에 걸쳐 함수량이 증가하는 경향이었다.

신갈에서의 깊이별 함수량과 기상인자와의 상관관계를 보면 10일간 강수량과 80 cm 깊이에서의 함수량 사이에 상관계수 r = 0.84의 고도의 유의성 있는 정상관관계가 있었다. 100 및 120 cm 깊이에서의 함수량도 강수량과 유의성 있는 정상관관계가 있으나 80 cm 깊이에 비하여 상관관계가 적었는데, 이는 80 cm 이하 깊이에서는 깊이가 깊어질수록 함수량이 적어지는 기간이 오래 걸리기 때문이라고 생각된다. 상대습도와 함수량 사이에는 40~160 cm 깊이에서 정상관관계가 있었으며, 평균기온과 함수량 사이에도 80~120 cm 깊이에서 유의성 있는 정상관관계가 있었다. 그러나 함수량과 풍속 사이에는 유의성 있는 상관관계가 없었다. 신갈에서의 노상토 함수량이 계절에 따라 많이 변하고 강수량, 상대습도와 평균기온 등과 같은 기상인자와 유의성 있는 상관관계가 있는 것은 신갈의 함수량 측정지점이 다른 지역의 함수량 측정지점과는 달리 인근의 노출지와 가깝고 또 노출지 보다 낮은 위치에 있어 노출지의 함수량 변화에 따른 영향을 직접적으로 받기 때문이라고 생각된다.

3.2.3. 기 흥

깊이별 함수량은 60 cm 깊이까지 함수량이 8% 내외로 낮고, 70 cm 깊이에서 약 11%로 증가하기 시작하여 130~170 cm 깊이에서 약 14%였다. 전용적 밀도는 20 cm 깊이까지만 높았을 뿐 그 외의 깊이에서는 약 1.60 g cm^{-3} 내외로 균일한 편이었다. 측정시기에 따른 함수량 변화는 약 200 mm의 강우가 있었던 1992년 8월에 측정한 함수량이 20~80 cm 깊이에서 1~2% 높았을 뿐 연중 함수량 변화가 거의 없었다. 함수량과 기상인자들 사이에는 상관관계가 없었다.

3.2.4. 추 풍 령

깊이별 함수량 변화를 보면 10~100 cm 깊이에서는 함수량이 8~11%였으며, 110 cm 이하 깊이에서는 서서히 감소하는 경향으로서 상층에 비하여 약 2% 정도 낮았다. 이는 기층이나 보조기층의 재료로서 화강암이 풍화가 진전되어 외형으로는 사암(sand stone)과 구별하기 어려운 정도의 풍화토를 사용했기 때문이라고 생각된다. 전용적 밀도는 90 cm 깊이까지는 1.65 g cm^{-3}으로 균일한 편이나 100 cm 깊이부터 증가하여 170 cm 깊이에서는 2.04 g cm^{-3}이나 되었다. 측정시기별 함수량 변화를 보면 1992년 8월 이후 함수량이 감소하기 시작하여 겨울인 1993년 1, 2월에 가장 낮았으며, 다시 1993년 3월 이후에는 점차 증가하여 여름인 1993년 7, 8월에 가장 높았다. 깊이별로 보면 10~70 cm 깊이에서는 측정시기에 따른 함수량 변화폭은 약 4%였으나, 80 cm 이하 깊이에서는 깊어질수록 측정시기에 따른 함수량 변화폭이 작아지는 경향이었다.

깊이별 함수량과 기상인자와의 상관관계를 보면 20~100 cm 깊이의 함수량과 강수량, 상대습도 및 평균기온과는 유의성 있는 정상관관계가 있었으며, 풍속과는 유의성 있는 역상관관계가 있었다.

3.2.5. 봉 산

깊이별 함수량은 60 cm 깊이까지는 8% 내외이고, 70~80 cm 깊이에서 약 11%로 가장 높았으며, 90 cm 깊이 이하에서는 10% 내외로 깊이에 따른 함수량 차이가 거의 없었다. 전용적 밀도는 10 cm 깊이에서 1.79 g cm^{-3}이고 170 cm 깊이에서 2.10 g cm^{-3}으로 깊이가 증가할 수록 증가하는 경향이었다. 측정시기별 함수량 변화는 전토층에서 함수량 변화폭이 1% 내외로 매우 작았다. 함수량과 기상인자들 사이에는 유의성 있는

상관관계가 없었다.

3.2.6. 경 산

깊이별 함수량은 50 cm 깊이까지 8% 내외이고, 60 ~ 80 cm 깊이에서 6% 내외, 그리고 100 cm 이하 깊이에서는 5% 내외로 깊이에 따라 서서히 낮아지는 경향으로서 8개 측정지점 중 함수량이 가장 낮았다. 노상토의 함수량 측정 지점 중 대부분의 지역에서 깊이가 깊어질수록 함수량이 높아지는 경향이나 경산에서는 오히려 낮아지는 것이 특이하였다. 이는 측정지점이 성토지로서 측정지점 주변에 광범위하게 분포하고 있는 혈암에서 유래되고 자갈함량이 50~85%나 되는 역질계 암쇄토인 대구통의 토양을 성토의 재료로 사용한 결과라 생각된다. 깊이별 전용적 밀도는 약 1.55 g cm^{-3}으로 균일한 편이었으나 다른 측정지점에 비하여 낮은 값을 나타내었다. 측정시기별 함수량 변화는 10~50 cm 깊이에서 함수량의 연중 변화폭이 2% 정도였고 60 cm 깊이 이하에서는 그 변화폭이 더욱 작아 대부분의 깊이에서 1% 미만이었다. 함수량은 강수량과 평균기온과 부분적으로 유의성 있는 상관관계가 있었으나, 상대습도 및 풍속과는 상관관계가 없었다.

3.2.7. 논 산

깊이별 함수량은 하층부로 내려갈수록 증가하는 경향이었다. 50 cm 깊이까지 약 8%로 낮았으며, 60 cm 깊이에서부터 약 13%로 증가하기 시작하여 150 cm 깊이 이하에서는 18% 내외였다. 깊이별 전용적 밀도는 대체적으로 1.60 g cm^{-3} 내외이나 150 및 160 cm 깊이에서는 1.39 및 1.43 g cm^{-3}으로 낮았다. 따라서 이들 깊이에서 용적기준 함수량이 인근 토층과 비슷한데도 중량기준 함수량이 높게 나타났다. 측정시기별 함수량 변화를 보면 1992년 8, 9월과 1993년 1, 2월이 낮았으며, 1993년 3월부터 8월까지 증가하는 경향이었으나 함수량 변화폭은 전토층을 통하여 2% 정도로 작은 편이었다. 함수량과 기상인자들 사이에는 유의성 있는 상관관계가 없었다.

3.2.8. 이 서

깊이별 함수량은 10~20 cm 깊이에서 8%, 30~60 cm 깊이에서의 함수량은 12% 내외로서 다른 지점에 비하여 높았다. 70 cm 깊이에서부터 함수량이 증가하기 시작하여 80~120 cm 깊이에서 18% 내외였고, 170 cm 깊이에서는 20% 내외로 측정지점 중 가장 높았다. 전용적 밀도는 10~20 cm 깊이에서만 1.70 g cm^{-3} 이상이고, 그 외의 깊이에서는 1.55 g cm^{-3} 내외로 비교적 낮은 편이었다. 측정시기별 함수량 변화를 보면 논산의 경우처럼 1992년 8, 9월과 1993년 1, 2월에 함수량이 낮고, 1993년 3월에서 8월까지 증가하는 경향이었다. 연중 함수량 변화폭은 전토층에 걸쳐 2% 정도로 낮은 편이어서 함수량과 기상인자들 사이에는 유의성 있는 상관관계가 없었다.

8개 함수량 측정지점에서의 함수량 측정결과를 종합적으로 보면 고속도로의 단면구조에 따라 60 또는 70 cm 깊이에서 함수량 변화가 현저하였다. 50 또는 60 cm 깊이까지는 호남 고속도로의 이서에서만 함수량이 높을 뿐 그 외의 지점에서는 8% 내외로 측정지점 간에 차이가 거의 없었다. 그러나 60 또는 70 cm 이하 깊이에서는 함수량 측정지점 간에 함수량 차이가 컸다. 경부고속도로의 경산과 추풍령 이외의 측정지점에서는 60 또는 70 cm 이하 깊이에서의 하층부의 함수량이 상층부보다 높았다. 경산에서는 70 cm 이하 깊이에서 함수량이 약 5%로 측정지점 중 가장 낮았으며, 추풍령에서도 하층부에서의 함수량이 7% 내외로 상층부보다 낮았다. 60 또는 70 cm 이하 깊이에서의 함수량은 봉산 10% 내외, 적금 11% 내외, 기흥 13% 내외, 신갈 15% 내외, 논산 16% 내외였으며, 특히 이서에서 약 20%로 높아 경산의 함수량 약 5%에 비교하여 4배 이상이나 되었다.

지질이 혈암인 경산의 노상토의 함수량이 가장 낮았으며, 외형상으로 사암과 구분할 수 없을 정도로 풍화가 진행된 화강암에서 유래한 토양을 노상토로 사용한 추풍령에서 경산 다음으로 낮았다. 봉산과 적금에서처럼 함수량 측정지점 주위의 토양이 사질계인 경우 노상토의 함수량이 낮은 편이었으며, 논산과 이서에서처럼 주위 토양이 식질계인 경우 노상토의 함수량이 특히 높은 결과를 볼 때, 지역에 따른 함수량 차이는 토양, 지형, 식생, 기후조건 등 여러 가지 인자들이 복합적으로 작용하지만 일차적으로는 도로건설에 사용한 노상토의 토양특성에 가장 크게 기인되는 것으로 생각된다.

노상토의 계절별 함수량 변화폭은 약 1~4%로 대체로 작았다. 함수량 연중 변화폭은 신갈, 추풍령 등 원지형 또는 절토지 지형이 성토지 지형에 비하여 약간 큰 경향이었다. 따라서 신갈과 추풍령에서만 깊이별

Table 6. Linear correlation coefficients between water content and soil properties or meteorological factors at the different soil depths

Soil property or meteorological factor	Soil depth					
	20 cm	40 cm	80 cm	100 cm	120 cm	160 cm
Soil property						
Clay content	0.64*	0.75**	0.94**	0.91**	0.94**	0.93**
Silt content	0.53	0.58*	0.82**	0.88**	0.92**	0.90**
Sand content	-0.58*	-0.65*	-0.88**	-0.91**	-0.95**	-0.92**
Bulk density	-0.46	-0.20	-0.61*	-0.57*	-0.63*	-0.68*
Meteorological factor						
Precipitation	0.57	0.39	0.66*	0.69*	0.62*	0.56
Mean air temperature	0.49	0.68*	0.66*	0.66*	0.67*	0.52
Relative humidity	-0.18	0.39	0.24	0.28	0.30	0.23
Wind velocity	-0.36	-0.13	-0.53	-0.65*	-0.69*	-0.53

*statistically significant at p = 0.05
**statistically significant at p = 0.01

함수량과 강수량, 평균기온, 상대습도, 풍속 등과 같은 기상인자 사이에 유의성 있는 상관관계가 있었고, 그 이외의 6개 지역에서는 함수량과 기상인자 사이에 유의성 있는 상관관계가 없었다.

함수량을 예측할 수 있는 관계식을 도출하고자 전체 8개 측정지점의 깊이별 함수량과 토양특성 및 기상인자와의 상관관계를 분석하여 Table 6에 나타내었다. 정밀토양도를 이용하여 함수량 측정지점의 성질을 대표할 수 있는 토양을 선택하여 (적금-삼각통, 신갈-지산통, 기흥-사촌통, 봉산-상주통, 경산-대구통, 논산-예천통, 이서-용지통, 추풍령-노변토양 채취분석) 토양특성을 발췌하였고, 기상인자는 수집한 연간 자료를 이용하였다. 고속도로 포장의 경우 유기물 함량이 매우 낮으며, 인위적으로 다지기 때문에 토양구조의 영향은 별로 크지 않다고 생각되므로 함수량에 가장 영향을 주리라고 생각되는 모래, 미사 및 점토함량과 그리고 용적밀도와 깊이별 함수량과의 상관관계를 구하였다. 깊이별 함수량은 토양특성 중 미사, 특히 점토 함량과 매우 높은 유의성의 정의 상관관계가 있었으며, 모래 함량과 용적밀도와는 역의 상관관계가 있었다. 그러나 깊이별 함수량과 강수량, 평균기온, 상대습도 및 풍속 등과 같은 기상인자와는 상관관계가 없었다.

고속도로 포장의 깊이별 중량기준 함수량(θ_w)과 노상토로 사용한 토양의 점토함량(X) 사이에 고도로 유의성 있는 정의 상관관계가 있었으므로, 이를 이용하여 다음과 같이 점토함량과 깊이별 함수량간의 관계식을 도출하였다.

40 cm 깊이 ; $\theta_w = 0.219X + 6.858$ ($r = 0.748^{**}$)
80 cm 깊이 ; $\theta_w = 0.491X + 5.465$ ($r = 0.943^{**}$)
100 cm 깊이 ; $\theta_w = 0.418X + 6.409$ ($r = 0.907^{**}$)
120 cm 깊이 ; $\theta_w = 0.467X + 5.933$ ($r = 0.937^{**}$)
160 cm 깊이 ; $\theta_w = 0.480X + 6.399$ ($r = 0.884^{**}$)

고속도로 포장의 깊이별 함수량과 노상토로 사용한 토양의 점토함량 사이에 유의성이 높은 정의 상관관계가 있다는 것은 고속도로 포장 공사시 절토지에서는 물론이고 성토지에서 조차 고속도로 포장 공사 인근 지역의 토양을 노상토로 이용하였기 때문이라고 생각된다. 도출된 관계식의 검증 및 더욱 정확한 함수량 예측식의 개발을 위하여 보다 많은 지역에서의 함수량 측정 연구가 필요하다.

IV. 적 요

포장의 토양 역학적 거동 및 내구성에 영향을 주는 노상토의 함수량을 측정함으로써 국내 고속도로 포장의 계절별 함수량의 변동상황에 관한 자료를 제공하고, 노상토의 계절별 함수량 변화와 토양인자 및 기상인자들과의 상관 관계를 밝히려고 연구를 수행하였다. 포장

의 함수량에 영향을 줄 수 있는 인자 중 지형, 지질과 토양, 성토 혹은 절토 여부 등의 인자와, 기상자료를 얻을 수 있는 기상 관측소와의 거리를 고려하여 경부, 영동 및 호남고속도로의 8개 측정지점을 선정하여 중성자 수분 측정기로 1992년 8월부터 1993년 9월까지 2주마다 함수량을 측정하였다. 50 cm 이상 깊이의 토양단면 상층부의 함수량(θ_w)은 호남고속도로의 이서 지역을 제외하고는 7~12% 범위로 측정지점간에 차이가 크지 않았다. 그러나 60 또는 70 cm 이하 깊이의 하층부의 함수량은 측정지점에 따른 차이가 매우 컸다. 원지형(신갈) 또는 절토지(추풍령)에서의 함수량 연중 변화폭은 약 4% 정도로서 성토지(신갈, 추풍령 이외의 6개 지역) 에서의 연중 변화폭인 약 2% 보다 약간 큰 경향이었다. 함수량 측정지점의 계절별 함수량 변화폭은 토양 전층을 통하여 1~4%로 매우 작았다. 고속도로 포장의 깊이별 함수량은 점토, 미사 및 모래함량 등과 같은 토양특성과 통계적으로 유의성이 높은 정의 상관관계가 있었으나, 강수량, 상대습도, 평균기온 및 풍속 등과 같은 기상인자와는 상관관계가 거의 없었다. 이와 같은 결과는 지역에 따른 함수량 차이가 지형이나 기상조건과 같은 요인에 의한 차이보다 큰 경향을 보이고 있었는데, 이는 주로 노상토로 사용한 토양의 특성에 기인한 것으로 생각된다.

인용문헌

Halvorson, G. A., 1986: Neutron moisture meter calibration for mine soils containing coal. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50**, 496-498.

Han, M. Y., 1989: Permeability and dimensional change of plain and polypropylene fiber concrete. Texas Transportation Institute Report, 1-69.

Haverkamp, R., M. Vauclin and G. Vachaud, 1984: Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. Local standpoint. *Soil Sci.*, **137** (2), 78-90.

Pihlajavaara, S. E., 1982: Estimation of drying of concrete at different relative humidities and temperatures of ambient air with special discussion about fundamental features of drying and shrinkage. In: Z. P. Bazant and F. H. Wittmann(eds.), *Creep and shrinkage in concrete structures*. John Wiley & Sons, 87-107.

Rawlins, S. L., 1966: Theory for thermocouple psychrometers used to measure water potential in soil and plant samples, *Journal of Agronomy and Meteology* **3**, 292-310.

Rawls, W. J. and R. H. Brooks, 1975: Gamma probe dry bulk densities. *Soil Sci.*, **120**(1), 68-70.

Vauclin, M., R. Haverkamp and G. Vachaud, 1984: Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 2. Spatial standpoint. *Soil Sci.*, **137** (3), 141-148.

Visvalingam, M. and J. D. Tandy. 1972: The neutron method for measuring soil moisture content: A review. *J. Soil Sci.*, **23**(4), 499-510.

Ward, A. D. and P. V. Deventer, 1993: Calibration and use of a single-probe gamma density depth gauge. *Soil Sci.*, **155**(1), 23-30.

Young, J. F., 1982: The microstructure of hardened portland cement paste. In: Z. P. Bazant and F. H. Wittmann (eds.), *Creep and shrinkage in concrete structures*. John Wiley & Sons, 3-22.