

흙의 室內다짐試驗結果에 대한 解析的인 算定에 관한 研究

A Study on the Interpolation Methods for the Laboratory Compaction Test Results

李 鎭 春*

Lee, Ho Choon

Abstract

The Maximum Dry Density (γ_{dmax}) and the Optimum Moisture Content (ω_{opt}) of the soil samples are determined from the compaction curve plotted with the laboratory compaction test results. But in this study three reported tests, and tests on the silty clay and the sandy silt samples are reviewed through the interpolation methods using an equation of the Moisture-Density relations induced from Lagrange's Interpolation Formula without drawing the compaction curves. As the results of the study γ_{dmax} and ω_{opt} were calculated rapidly and simply using the equation and approached to the results from the compaction curves, and also due to the differences of the γ_{dmax} and ω_{opt} calculated from the equation between the compaction curves were within $0.01g/cm^3(0.5\%)$ and 0.4% respectively the method in this study be recommended as a simple method determining γ_{dmax} and ω_{opt} during the laboratory compaction tests.

요 지

흙의 室內다짐試驗에서 最大乾燥密度와 最適含水比를 決定하기 위하여 각국의 공업규격 등에 따라 다짐曲線을 作圖하여 圖上에서 측정하고 있는 바 이에 소요되는 준비節次와 시간을 절약하고 수치계산으로 구할 수 있는 즉 Lagrange의 보간공식을 利用한 含水比-乾燥密度 관계식으로 다짐결과를 算定하는 본 연구의 방법이 다짐施工管理에 적용될 수 있는가 객관적으로 비교 檢討하기 위하여 종래의 방법으로 다짐결과가 決定되어 있는 既報告된 다짐試驗實例의 측정치에 대하여 다짐결과를 算定 및 比較考察한 결과 간편하게 적용할 수 있다고 확인 되었으나 산정값의 精度는 차이를 나타내어 함수비의 변화폭에 따른 차이 등을 확인하여 정도에 대한 문제점을 종합 고찰하고자 2종의 시료에 대하여 함수비와 변화폭을 2%정도로 유지하여 시험한 결과 두가지 방법에 의한 산정값이 더욱 접근하였으며 試驗結果를 포함한 비교에서 最大乾燥密度 및 最適含水比 算定값의 차이가 각각 $0.01g/cm^3(0.5\%)$ 및 0.4% 미만으로 나타나 일반적인 시공의 허용범위 및 다짐곡선상에서 측정할 수 있는 범위 이내라고 보아 精度에도 문제점이 없다고 판단되었다. 그러나 다짐곡선에서 視覺的으로 다짐상태를 比較할 수 있는 등의 전부를 만족할 수는 없어 종래의 방법과 병용하는 간이방법으로 활용될 수 있다고 판단된다.

* 정회원 · 明知實業專門大學 土木工學科 副教授

1. 序 論

盛土나 道路 등의 土工에 대한 다짐施工管理를 위하여 한국공업규격⁽¹⁾, ASTM⁽²⁾ 등에 규정된 흙의 다짐試驗方法에 따라 室内다짐試驗結果인 最大乾燥密度 및 最適含水比를 구하는 경우 다짐曲線을 作圖하여 圖上으로부터 測定하고 있는 바 다짐曲線의 作圖에 필요한 준비절차 및 소요시간을 다소나마 절약하고 圖表作成이나 數表 등의 활용 대신에 개인용 또는 소형계산기의 사용이 선호되고 있는 昨今の 추세에 비추어 다짐曲線을 그리지 않고 數值的으로 간편하게 다짐시험결과를 算定하여 실제에 適用할 수 있는가 檢討하기 위하여 含水比와 乾燥密度의 關係式 즉 다짐曲線에 대한 방정식을 수립 종래의 방법으로 다짐結果가 결정되어 있는 既報告된 다짐試驗實例와 粘性土 및 砂質土 試料에 대한 다짐시험을 통하여 적용가능성에 대한 확인 및 算定값의 精度에 대한 문제점이 없는가 比較考察하는 방법으로 研究하여 보고자 한다.

2. 다짐試驗結果 算定方法

2.1 圖解의 方法

한국공업규격⁽¹⁾, ASTM⁽²⁾ 등에 規定된 흙의 다짐試驗方法에 따라 산술방안지에 다짐곡선을 作圖하여 極大值를 그 다짐방법에 의한 最大乾燥密度로 하고 이에 대응하는 含水比를 그 다짐방법에 의한 最適含水比로 하는 현재의 方法으로 本 研究의 方法인 解析的 方法과 구별하기 위하여 圖解的 方法이라 부르기로 한다.

2.2 解析的 方法

Lagrange의 보간공식을 이용한 含水比-乾燥密度 關係式을 수립하여 極大값을 구하므로써 最大乾燥密度(γ_{dmax}) 및 最適含水比(ω_{opt})를 수치적으로 算定할 수 있어 本 研究에서는 解析的 方法이라 부르기로 하고 다짐시험결과 乾燥密度값이 가장 큰값과 양측의 2개 측정값을 含水比가 작은 값으로부터 각각 γ_{d1} , γ_{d2} , γ_{d3} 및 이에 해당하는 含水比를 ω_1 , ω_2 , ω_3 라 하고 다짐曲線上의 임의의 점인 含水比 ω 에 대한 乾燥密度 γ_d 에 관한 式은 보간공식을 적용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \gamma_d = & \omega^2 \left\{ \frac{\gamma_{d1}}{(\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 - \omega_3)} + \frac{\gamma_{d2}}{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 - \omega_3)} + \frac{\gamma_{d3}}{(\omega_3 - \omega_1)(\omega_3 - \omega_2)} \right\} \\ & - \omega \left\{ \frac{(\omega_2 + \omega_3)\gamma_{d1}}{(\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 - \omega_3)} + \frac{(\omega_1 + \omega_3)\gamma_{d2}}{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 - \omega_3)} + \frac{(\omega_1 + \omega_2)\gamma_{d3}}{(\omega_3 - \omega_1)(\omega_3 - \omega_2)} \right\} \\ & + \left\{ \frac{\omega_2\omega_3\gamma_{d1}}{(\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 - \omega_3)} + \frac{\omega_1\omega_3\gamma_{d2}}{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 - \omega_3)} + \frac{\omega_1\omega_2\gamma_{d3}}{(\omega_3 - \omega_1)(\omega_3 - \omega_2)} \right\} \end{aligned}$$

와 같이 나타낼 수 있으며 (1)식에서 { }안의 값은 다짐시험에 의한 側定값 즉 實數이므로 (1)식은 ω 즉 含水比에 대한 2차방정식이며 γ_d 의 極大값을 구하기 위하여 (1)식에서 導函數를 구하면

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma_d}{d\omega} = & 2\omega \left\{ \frac{\gamma_{d1}}{(\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 - \omega_3)} + \frac{\gamma_{d2}}{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 - \omega_3)} + \frac{\gamma_{d3}}{(\omega_3 - \omega_1)(\omega_3 - \omega_2)} \right\} \\ & - \left\{ \frac{(\omega_2 + \omega_3)\gamma_{d1}}{(\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 - \omega_3)} + \frac{(\omega_1 + \omega_3)\gamma_{d2}}{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 - \omega_3)} + \frac{(\omega_1 + \omega_2)\gamma_{d3}}{(\omega_3 - \omega_1)(\omega_3 - \omega_2)} \right\} \end{aligned}$$

이 되고, $\frac{d\gamma_d}{d\omega} = 0$ 으로 놓으면 極大값 즉 最大乾燥密度에 해당하는 ω 값을 얻을 수 있으며 이 값은 最適含水比와 같으므로 ω 대신에 ω_{opt} 을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \omega_{opt} = & \frac{1}{2} \times \\ & \frac{(\omega_2^2 - \omega_3^2)\gamma_{d1} + (\omega_3^2 - \omega_1^2)\gamma_{d2} + (\omega_1^2 - \omega_2^2)\gamma_{d3}}{(\omega_2 - \omega_3)\gamma_{d1} + (\omega_3 - \omega_1)\gamma_{d2} + (\omega_1 - \omega_2)\gamma_{d3}} \quad (2) \end{aligned}$$

이므로 (2)식에서 最適含水比를 구할 수 있으며 ω_{opt} 값을 (1)식에 代入하여 구한 γ_d 값은 極大값이므로 最大乾燥密度인 γ_{dmax} 을 算定할 수 있다.

$$\text{즉, } \gamma_{dmax} = f(\omega_{opt}) \quad (3)$$

3. 다짐試驗에 대한 最大乾燥密度 및 最適含水比의 算定

3.1 圖解的 方法에 의한 다짐試驗結果 決定

室内다짐試驗結果에 대하여 本 研究의 方法인 解析的으로 最大乾燥密度 및 最適含水比를 算定하는 方法이 실제에 適用될 수 있는가를 객관적으로 比較

檢證하기 위하여 종래의 圖解의 方法으로 다짐曲線을 作圖하여 다짐結果가 決定되어 있는 다짐試驗實例 즉 임병조 등(1984)⁽³⁾, Lambe(1951)⁽⁵⁾, U.S.EARTH MANUAL(1974)⁽⁷⁾에서 試驗結果 중에서 測定값과 다짐曲線 및 도해적 方法에 따라 決定된 最大乾燥密度 및 最適含水比를 발췌하였으며 그 내용은 표 1, 2, 3 및 그림 1, 2, 3과 같다. 또한 해석적인 方法에서 最大乾燥密度 算定式에 영향을 끼치는 주요인은 含水比인 관계로 試驗含水比의 변화폭에 따른 차이를 시험 精度에 대한 문제점을 검토하기 위하여 위의 既報告된 시험실예에서 보다 작게 含水比의 변화 간격을 2%정도로 유지하면서 粘性土 (CL,LL=42.6%, PL=28.2%, 비중 2.66, No.4체 통과량=100%) 및 砂質土(SM-d, 비중 2.68, 19mm이하 NO.4체 이상 조립분 함유량 12%)시료에 대하여 한국공업규격의 흙의 다짐試驗方法(KSF 2312)⁽⁴⁾중 A-1-a 方法 및 C-1-a 方法으로 시험한 結果와 다짐曲線 및 圖解의 方法으로 決定한 最大乾燥密度와 最適含水比는 표 4, 5 및 그림 4, 5와 같다.

3.2 解析的 方法에 의한 다짐試驗結果의 算定
다짐試驗實例 및 試驗의 結果인 표 1, 2, 3, 4, 5에

표 1. 다짐시험 예 1 (임병조 등, 1984)⁽³⁾

측정번호	1	2	3	4	5	6	7	8
함수비, %	55.3	67.1	71.5	75.0	79.8	85.5	91.8	98.8
건조밀도, g/cm ³	0.686	0.728	0.755	0.774	0.789	0.775	0.750	0.711

표 2. 다짐시험 예 2 (Lambe, 1951)⁽⁵⁾

측정번호	1	2	3	4	5	6	7
함수비, %	5.6	7.0	8.9	11.0	13.9	16.0	17.9
건조밀도, g/cm ³	1.770	1.803	1.840	1.913	1.883	1.817	1.761

표 3. 다짐시험 예 3 (U.S EARTH MANUAL, 1974)⁽⁷⁾

측정번호	1	2	3	4	5	6
함수비, %	8.5	10.1	12.0	14.0	16.4	18.3
건조밀도, g/cm ³	1.643	1.665	1.748	1.816	1.771	1.702

표 4. 다짐시험 1

측정번호	1	2	3	4	5	6	7	8
함수비, %	11.2	13.1	14.8	16.2	17.2	18.3	19.5	20.6
건조밀도, g/cm ³	1.610	1.642	1.674	1.690	1.696	1.701	1.687	1.653

표 5. 다짐시험 2

측정번호	1	2	3	4	5	6	7
함수비, %	5.2	6.8	8.2	9.5	10.7	11.8	13.1
건조밀도, g/cm ³	1.855	1.898	1.945	1.962	1.972	1.966	1.921

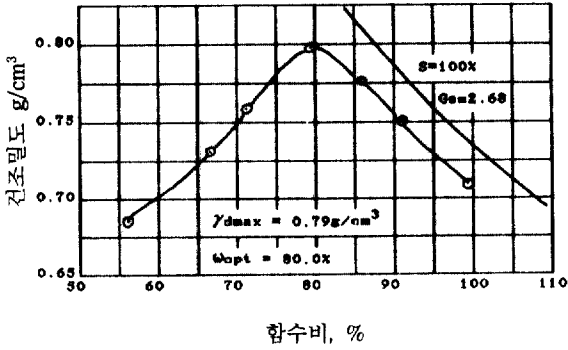


그림 1. 표 1의 다짐곡선 (임병조 등,1984)⁽³⁾

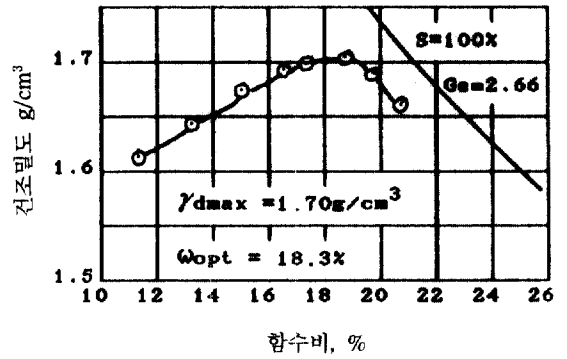


그림 4. 표 4의 다짐곡선

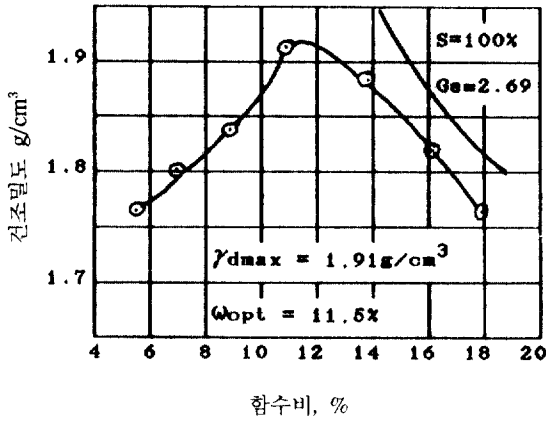


그림 2. 표 2의 다짐곡선 (Lambe,1951)⁽⁵⁾

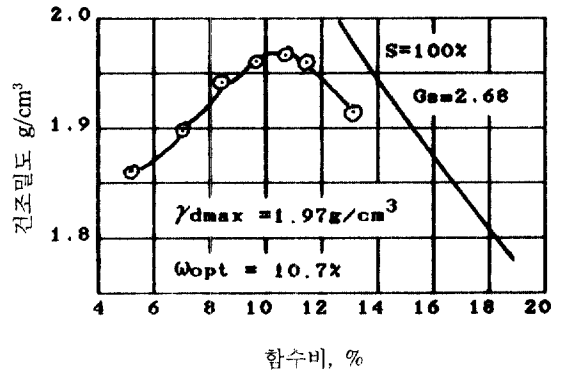


그림 5. 표 5의 다짐곡선

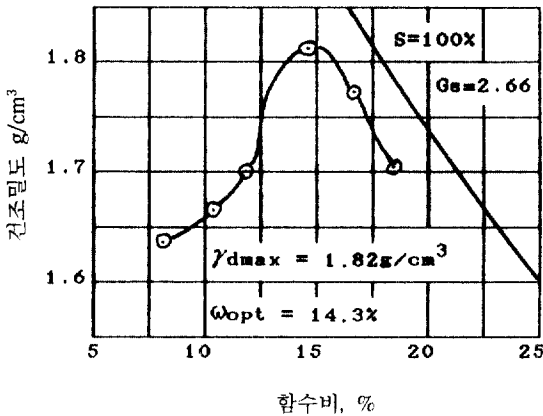


그림 3. 표 3의 다짐곡선 (U.S. EARTH MANUAL, 1974)⁽⁷⁾

표시되어 있는 測定값으로 (2)식 및 (3)식을 適用하기 위하여 각 시험의 극대값 부근에서 3개 측정값을 선정 (2), (3)식에 대입하여 解析의 方法으로 산정한 즉 소형계산기를 사용 하여 구한 最大乾燥密度 및 最適含水比는 표 6과 같으며 영공기공극곡선에 대한 판단에 참고가 될 수 있도록 영공기공극곡선 대신 最適含水比에서의 영공기공극상태 乾燥密度(γ_{dsat})를 구하여 해석적으로 구한 最大乾燥密度와의 차이를 표 6에 같이 표시하였다.

4. 比較考察

표 1, 2, 3, 4, 5의 測定값으로 作圖 및 決定한 다짐시험결과 즉 그림 1, 2, 3, 4, 5에 표시한 圖解의 方法에 의한 결정값과 표 6의 解析의 方法에 의한

표 6. 해석적 방법에 의한 다짐시험결과의 산정

다짐시험	산정에 사용한 측정값의 측정번호	산 정 값		
		$\omega_{opt}(\%)$	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	$\gamma_{dsat}-\gamma_{dmax}(g/cm^3)$
예 1	표 1의 4, 5, 6	80.340	0.78915	0.06
예 2	표 2의 3, 4, 5	11.877	1.91993	0.12
예 3	표 3의 3, 4, 5	14.418	1.81809	0.10
시험 1	표 4의 5, 6, 7	18.072	1.70137	0.10
시험 2	표 5의 4, 5, 6	10.795	1.97205	0.11

표 7. 최대건조밀도 및 최적함수비의 산정값 비교

다짐시험	도 해 법		해 석 법		차이(해석법-도해법)	
	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³ /%)
예 1	80.0	0.79	80.34	0.789	0.34	-0.001/-0.12
예 2	11.5	1.91	11.88	1.920	0.38	0.01/0.52
예 3	14.3	1.82	14.42	1.818	0.12	-0.002/-0.11
시험1	18.3	1.70	18.07	1.701	-0.23	0.001/0.06
시험2	10.7	1.97	10.80	1.972	0.10	0.002/0.10

표 8. 함수비의 변화폭에 따른 산정값의 차이 비교

다짐시험	산정에 사용한 측정값의 측정번호	산 정 값		차이(해석법-도해법)	
		$\omega_{opt}(\%)$	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	$\omega_{opt}(\%)$	$\gamma_{dmax}(g/cm^3/\%)$
시험 1	표 7의 도해법	18.3	1.70	-	-
	표 4의 5, 6, 7 (표 7의 해석법)	18.072	1.70137	-0.228	0.00137/0.081
	표 4의 4, 6, 7	17.761	1.70249	-0.539	0.00249/0.146
	표 4의 4, 6, 8	17.691	1.70320	-0.609	0.00320/0.188
	표 4의 5, 6, 8	18.054	1.70145	-0.246	0.00145/0.085
시험 2	표 7의 도해법	10.7	1.97	-	-
	표 5의 4, 5, 6 (표 7의 해석법)	10.795	1.97205	0.095	0.00205/0.104
	표 5의 3, 5, 6	10.646	1.97201	-0.054	0.00201/0.102
	표 5의 3, 5, 7	10.276	1.97318	-0.424	0.00318/0.161
	표 5의 4, 5, 7	11.485	1.97385	0.785	0.00385/0.195

算定값을 비교하여 본 결과는 표 7과 같다.

표 7에서 알 수 있는 바와 같이 다짐곡선을 그리지 않고 解析적으로 시험종료 즉시 간편하게 다짐결과를 算定할수 있었으며 이론적으로는 圖解적으로 구한 最大測定值가 含水比-乾燥密度 관계식에 包含되

는 관계로 같거나 큰 값으로 나타날 것이나 圖上에서 目측으로 測定한 값은 작도상의 오차 및 눈금의 大小에 따라 차이가 날 수 있는 점을 고려하여 해석적으로 算定한 값을 같은 자리수로 사사오입하여 비교하면 다짐곡선에서 측정가능한 근사값에 접근

하므로 실제에 적용할 수 있다고 판단된다. 한편 精度에 대한 고찰을 위하여 (1)식에서 변수인 含水比의 변화정도에 따라 圖解的 방법과 解析的 방법에 의하여 算定한 다짐결과와 차이가 다르게 나타날 것으로 보아 시험 1, 2에서는 함수비의 변화를 1%-2% 정도 유지하면서 시험한 결과 표 8에서 알 수 있는 바와 같이 함수비의 변화폭이 다른 측정값을 사용한 산정값의 차이가 다르게 나타났으며 시험 2의 측정번호 3, 5, 6에 대하여 산정한 경우를 제외하고는 변화폭의 증가에 따라 전반적으로 산정값의 차이가 크게 나타났다. 또한 함수비의 변화폭이 작은 시험 1, 2에서 既報告된 試驗例에서 보다는 最大乾燥密度와 最適含水比값의 차이가 더욱 작게 나타난 것과 일치하며 표 7에서 가장 차이가 큰 시험에 2에서 측정번호 4, 5간의 含水比로 시험이 되었다면 표 7의 시험에 2에서의 차이가 더욱 감소될 것이 예상되나 최대차이가 1%미만으로 精度面에는 문제점이 없다고 판단되므로 함수비의 변화폭을 인위적으로 조절할 필요는 없다고 본다. 표 7의 圖解的 방법으로 다짐曲線에서 구한 最大乾燥密度 및 最適含水比는 측정값중에서 최대값 또는 그에 접근하는 근사값으로 나타나며 이 값을 기준으로 하여 解析的으로 算定한 값을 비교한 차이는 표 7에서 알 수 있는 바와 같이 각각 0.01g/cm^3 (0.52%) 및 0.38% 미만으로 나타나 다짐曲線으로부터 측정가능한 범위에 속한다고 볼 수 있으며 다짐현장의 품질관리기준으로 Sherman 등(1967)⁽⁶⁾과 Bowles(1984)⁽⁴⁾가 제안한 표준편차값의 범위와 일반적으로 허용되는 다짐도와 施工含水比의 범위를 고려하면 다짐曲線을 그리지 않고 (2)식 및 (3)식으로 最大乾燥密度와 最適含水比를 해석적으로 算定하여도 精度에 있어서 충족된다고 판단된다. 또한 흙의 물리적 性質에 따른 시료의 차이, 특히 조립분이 많이 함유된 시료 등에 대하여는 乾燥密度와 含水比의 측정치를 Walker, Holts(1951)⁽⁸⁾ 등의 방법으로 算定하는 과정만 다를 뿐으로 極大값이 나타나지 않는 특별한 경우를 제외하고는 適用할 수 있다고 판단된다. 한편 다짐曲線의 作圖節次 및 시간절약면에서 종래의 방법에 비하여 시험치의 측정완료 즉시 또는 시험 도중에도 확인이 가능한 등 간편한 방법이라 할 수 있으나 종래의 방법에서 시각적으로 판단할 수 있는 다짐曲線과 영공기곡선과의 관계나 각종 시료간의 다짐

상태 比較 등의 전부를 만족하기는 어려울 것으로 보아 종래의 방법과 병용하는 간이방법으로 活用될 수 있다고 판단되며 표 6에 참고로 표시한 바와 같이 영공기곡선곡선을 最適含水比에서의 영공기곡선상태 乾燥密度(γ_{dair})와 해석적으로 算定한 最大乾燥密度와의 차이를 수치로서 比較하거나 그래프가 가능한 계산기를 사용하는 등 부분적인 보완은 가능할 것으로 본다.

5. 結 論

흙을 室内다짐試驗하여 最大乾燥密度 및 最適含水比를 구하는 경우 한국공업규격 등에 따라 다짐曲線을 作圖하여 측정한 값과 본 연구의 방법인 Lagrange의 보간공식을 이용한 含水比-乾燥密度관계식으로 算定한 값을 比較考察하여 適用可能性을 검토한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1) 다짐曲線을 作圖하지 않고 含水比-乾燥密度 관계식을 적용 最大乾燥密度와 最適含水比를 간편하게 算定하여 실제에 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

2) 解析的으로 算定한 最大乾燥密度와 最適含水比는 다짐曲線에서 구한값과의 차이가 각각 0.01g/cm^3 (0.52%) 및 0.38% 미만으로 나타나 精度面에도 충족되는 것으로 판단되었다.

3) 종래의 방법에서 시각적으로 판단할 수 있는 영공기곡선곡선과의 관계 및 다양한 시료간의 상호 비교 등의 이점을 전부 만족할 수는 없으므로 본 연구의 방법은 간이 방법으로 실제에 適用될 수 있다고 판단되며 각종 試料에 대한 檢討 등의 후속연구가 필요할 것으로 본다.

參 考 文 獻

1. 韓國工業規格, "흙의 다짐試驗方法(KSF 2312)", 상공부, 1965.
2. ANSI/ASTM, "Standard Test Methods for Moisture-Density Relations of Soils and Soil Aggregate Mixtures(D698)", ASTM, USA, 1978.
3. 林炳祚, 金泳壽, 土質試驗法, 螢雪出版社, 1984. P. 169
4. Bowles, J.E., "Physical and Geotechnical Properties of Soils", McGraw-Hill, New York, 1984. P.231

5. Lambe, T.W., "Soil Testing for Engineers" John Wiley & Sons, New York, 1951. PP.50-51
6. Sherman, G.G., Watkins, R.O., and Prysock, R.H., "A Statistical Analysis of Embankment Compaction", *HRR* No.177, 1967.
7. U.S. Dept. of the Interior Bureau of Reclamation. "Earth Manual", U.S. Government Printing Office, 1974. PP.471-475
8. Walker, F.C., Holts, W.G., "Control of Embankment Material by Laboratory Testing", *Proc., ASCE*, NO. 180. 1951.

(接受：1991. 12. 2)