



## I. 緒 論

1960年代 이후 지난 30여년동안 우리의 建設施工은 量的으로 크게 發展하여 왔으나 최근 UR協商이 타결됨에 따라 建設市場 開放이 임박하여 外國의 先進技術과 競爭해야하는 실정에서 이에따른 土木工事의 不實施工 追放을 위한 施工管理 특히 品質管理의 必要性이 절실한 課題로 대두되었다. 現場密度 및 含水量을 精確하고 신속하게 測定하는 것은 道路나 댐등 土工의 다짐管理에 必須的이며, 아스팔트 및 시멘트 콘크리트 鋪裝의 持續性과 品質管理를 改善시켜 效率的인 鋪裝裝備와 材料를 이용할 수 있게 해준다.

기존의 모래치환법이나 爐 乾燥試驗은 同一地點이나 隣接地點에서 反復하여 試驗할수 없고 時間과 經費가 많이 소요되어 現場 品質管理에 效率的으로 대처하기가 어렵다. 또한 AC鋪裝의 경우 코어샘플과정이 精確한 반면 그 측정비가 비싸고, 直徑 10cm의 구멍을 鋪裝내에 뚫어 시험한 후 다시 補修해야하는 점과 코어샘플에 대한 試驗結果를 얻을 때까지 時間이 많이 소요되는 短點이 있다. 그러므로 토공현장 및 아스팔트 콘크리트 鋪裝의 현장 밀도를 迅速하고 精確하게 측정하고 반복성을 갖는 새로운 非破壞試驗法이 필요하게 되었다.

既存의 密度 測定試驗에 비해 放射線測定法(nuclear density meter)에 의한 測定은 쉽고 빠르기 때문에 동일한 地點에서 많은 시험을 실시할 수 있음으로서 그 精度 및 信賴性을 높일 수 있는 長點이 있으나, 많은 技術者들은 기존 測定法에 비하여 精度가 높다는 확신도 없이 放射能 源에 대한 知識부족과 두려움으로 인해 放射線 測定器를 쉽게 선택하지 못하고 있다. 放射線測定器에 의한 密度 및 含水量 測定時 放射線測定器의 反復性과 迅速성이 그 필요성을 높게할 것은 分明하며 放射線測定法은 실제적이고 商業性이 있는 唯一한 非破壞試驗方法이다. 그러나 放射線測定器의

精度에 影響을 주는 要素는 放射能 放出과 吸水 光電子 吸收 및 探知, 土壤의 化學的 鑛物學的 成分의 變化, 測定器와 土壤사이의 接觸性 및 기타등을 들수있으나 이러한 限界에도 불구하고 歐美에서는 지난 40여년 동안 꾸준히 研究되어 왔으며 精確한 放射線測定器의 사용으로 인하여 1%이내의 精度를 얻을 수있고 放射線 測定器를 120°回轉시켜 3회 平均判讀值를 얻음으로서 그 精度를 높힐 수있다고 알려져 있다.<sup>9)</sup> 放射線測定器의 다른 문제점은  $\gamma$ 線을 이용한 密度測定器의 불완전한 補正(calibration)法, 中性子를 이용한 含水量測定器의 불완전한 보정법등이다. 이러한 問題를 풀기위해 土壤成分내 變化에 대해 測定器를 補正해주는 二重的인 計測法이 발견되고 이 原則에 의해 現在의 補正모델을 이용한 “空間差 方法(air-gap method)”이 활용되는 추세이며 앞으로 다른 二重的 計測方法들이 改良되어야 할 것이다. 현재 外國의 경우 靜的 放射線測定器(static nuclear gauge)는 路床, 基層, 補助基層 및 道路와 댐등의 밀도 및 함수량 결정을 위해 直接照射法으로 많이 이용되고 있으며, 後方散亂法으로 AC의 表層, 基層 및 2.5~5.0cm 두께의 薄層密度결정에 활용되고 있다. 또한 로올러에 裝着하여 사용할 수 있는 動的 放射線測定器(dynamic nuclear gauge)와 박층의 밀도만을 측정할 수 있는 薄層用 測定器도 사용되고 있으며 기존의 방법들은 건설현장에서 문제가 발생시 기존 방법과 병행되어 사용되고 있다. 本 研究는 工事現場에서 施工의 效率的인 品質管理를 위해 美國의 ASTM이나 AASHTO에서 밀도 및 함수량측정 목적으로 사용법이 규정되어 있는 放射線 測定器(Nuclear density meter)를 우리나라 建設現場에서 實用化하여 迅速하고 精確하게 현장밀도와 함수비를 결정하려는 데 목적이 있으며 이를위해 實驗室과 道路現場에서 기존의 密度 및 含水量을 決定하는 方法과 放射線測定器의 測定 結果와의 精密度를 比較

分析함으로서 이들 兩者간의 相關性を 검토하고 이를 統計處理하여 密度 및 含水比 測定의 基準를 제공하고자 하였다. 또한 두께 2.5~5.0cm의 얇은 아스팔트 박층의 密度를 調節하기 위해 全層形(full-type) 靜的 放射線測定器(static nuclear gauge)를 利用하고자 시도하였다.

## II. 材料 및 試驗方法

### 1. 放射線測定器의 特徵

中性子線 照射에 의한 水分測定과  $\gamma$ 선 照射에 의한 密度, 孔隙率을 측정하기 위해 美國 Humboldt Scientific社의 5001P Compaction Control Gage를 사용하였다. 物質의 密度와 含水量 測定을 위한 放射線 照射線은  $^{137}\text{Cs}$ 와  $^{241}\text{Am}$ 의 두가지이며 이 放射性 核種은 放射線測定器에 내장되어 있다.<sup>2)</sup>

#### 가. $^{137}\text{Cs}$

Compaction Control Gage안에 내장된  $^{137}\text{Cs}$ 의 양은 10mCi(1989年 9月 29日) 이하이다.  $^{137}\text{Cs}$ 는 中間範圍의 밀도를 갖는 材料들의 密度 測定을 위한 放射線 核種으로서 가장널리 사용되며 半減期는 30年이다.  $^{137}\text{Cs}$ 는 최초로  $^{137}\text{Ba}$ 로  $\beta$ 입자를 放出한 후 0.662 MeV의  $\gamma$ 선을 放出한다(Fig 1).

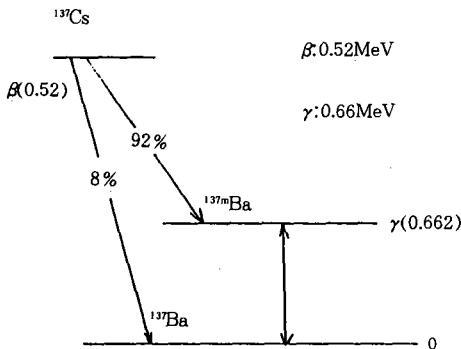


Fig. 1. The decay mode of  $^{137}\text{Cs}$

#### 나. $^{241}\text{Am}$

함수량 측정을 위한 中性子源으로서  $\alpha$  粒子源으로  $^{241}\text{Am}$ 을 사용하여  $^9\text{Be}$ 와 혼합시키면

$^{12}\text{C}$ 와 中性子를 發生하는데 이 核反應은  $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ 反應이다. 이 실험에 사용한  $^{241}\text{Am}$ 의 放射能은 40mCi(1989年 8月 3日)이며 458年의 半減期를 가지며  $\alpha$ 선과  $\gamma$ 선을 방출한다.

#### 다. 放射線測定器의 特徵

放射線測定法은 直接照射法(Direct transmission method)과 後方散亂法(Back scatter method)으로 구분된다. 直接照射法은 토양속에 삽입된 線源에서 放出되는  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線型을 檢出器로 直接 測定한다. 放射能 線型(Source)으로부터 약간 떨어진 檢出器(Detector)에 도달하는 放射線이 中間物質에 의해서 破衰되는 원리로 측정된다. 直接照射形 測定器는 土壤에 작은 구멍을 뚫은 후 그속에 放射能 線源을 설치하기가 상대적으로 용이하므로 필요시 다져진 材料의 密度를 측정하기 위해 사용된다. 後方散亂法은  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線源을 測定材料 表面위에 놓는다. 이때  $\gamma$ 線이 物質사이를 통과하면 콤펄톤(Compton)산란에 의해서 방출되는 콤펄톤原자를 檢出器에서 測定하게 된다.  $\gamma$ 線이 物質사이를 통과할때 生成되는 電子密度와 物質의 密度와는 比例한다는 사실을 이용하여 물질의 밀도측정이 가능하다. 이러한 放射線測定器의 정확성은 土壤 密度에 대한 敏感性, 土壤成分에 대한 敏感性 및 不完全한 보정법에 영향을 받은 것으로 알려져 있다. 이러한 오차들은 토양 밀도측정만큼 함수량측정에서는 심각하지 않았다. 이러한 3가지 오차가 없어지거나 감소된다면 放射線測定器에 의한 측정은 어떤 다른 방법보다도 정확할 것이다.<sup>6) 20)</sup>

## 2. 室內試驗方法

### 가. 송판블럭 및 다짐봉 製作

本 實驗은 放射線測定器의 精度를 究明하기 위하여 精確한 密度를 알고있는 材料가 필요하나 이것은 密度決定에 精確한 方法이 아니므로 道路工事 現場에서 實施될 수 없다. 그

리므로 그들의 重量과 體積을 알고있을 경우 밀도를 決定할 수 있는 아스팔트 콘크리트, 조립토와 세립토의 試料를 이용하여 시험을 실시하기 위한 나무블록을 製作할 필요가 있음이 立證되었다.

本 實驗에 사용된 放射線測定器의 補正은 ASTM(American Society for Testing and Materials)試驗法 D2922에 설명된 과정에 의해서 수행하였다. 아스팔트 콘크리트, 花崗土 및 粘土의 블록密度 및 含水量을 測定할 수 있도록 2개의 송관블록을 제작하였고 블록의 크기는 65cm×50cm×45.5cm이며 放射線測定器 測定에 影響을 주지않는 範圍의 크기이다.<sup>3) 6)</sup>

각 공시체는 대략 10cm의 토층두께로 5층 다짐을 실시하였고 다짐기구는 12cm×12cm×3cm인 램머重量 4.5kg의 정사각형 다짐봉을 製作하여 200회씩 송관블록내에서 다졌다. 각 송관블록은 강철볼트와 너트를 이용하여 密度 및 含水量측정후 解體가 가능하도록 組立式으로 製作되었다. 放射線測定器의 直接照射形 測定值 측정구멍은 다짐즉시 공시체에 垂直으로 뚫어졌으며 密度 및 含水量測定の 精度를 위해 4회 測定の 平均值를 얻어 既知의 블록密度와 노건조 含水量과 비교하였다. 또한 直接照射 및 後方散亂을 이용하여 다짐한 공시체의 30cm, 25cm, 15cm, 10cm, 5cm 및 土壤表面까지 深度別로 밀도 및 含수량을 측정한 후 既知의 블록 密度 및 含水量을 比較 分析함으로서 放射線測定器의 精度를 檢定

하고자 하였다.

#### 나. 粗粒土와 細粒土 공시체시험

조립토와 세립토 공시체의 경우 공시체의 무거운 重量으로인해 직접적인 乾燥單位重量 ( $\gamma_d$ )測定이 곤란함으로 다음 式을 이용하여  $\gamma_d$ 를 間接測定하였다.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_i}{1 + w/100} \dots\dots\dots (1)$$

$\gamma_d$ : 乾燥 密度(g/cm<sup>3</sup>)

$\gamma_i$ : 濕潤 密度(g/cm<sup>3</sup>)

w: 含水比(%)

乾燥密度의 오차를 최소화하기 위해 각 공시체내에 8개 標本을 任意抽出法에의 해 추출 후 얻어진 含水量(%)을 (1)식에 대입하여 건조밀도를 구하였다.

濕潤密度 測定은 각 공시체의 무거운 比重으로 인한 측정의 난이함때문에 용기에 몇회 나누어 重量을 측정한 후 블록내에 부어졌으며 각 공시체의 重量이 결정되면 각 블록의 濕潤密度를 계산할 수있었고 이 전과정을 화장질 조립토 및 점토에 대해 각각 10회씩 反復하였다. 放射線測定器 측정시 4분, 1분, 1/4분 측정을 실시하여 측정시간별 精度를 比較하였다.

#### 다. 아스팔트 콘크리트 공시체 試驗

아스팔트 콘크리트의 다짐정도를 결정하는 가장 信賴性있는 方法은 실제 道路에서 채취한 코어(core)密度와 實驗室 標準方法에의해 다져진 同一材料의 密度를 직접 비교하는 것이다. KS F 2353에 의하면 現場 아스팔트 콘크리트 鋪裝에서 採取한 코어코어의 假比重을 決定하는 2가지의 方法이 規定되어 있으며 方法 B는 시험코어를 파라핀(paraffin)으로 코팅하여 水分吸收로 인한 오차를 除去함으로서 두 方法중 信賴性이 있는 것으로 알려졌으며 方法 A는 코팅을 하지 않음으로서 시험시간이 적게 걸리나 시험코어의 空隙으로 인해 誤差가 발생될 수 있다. 本 試驗은 두가지 方法의 精度 및 信賴性에 대한 평가와 放射線測定

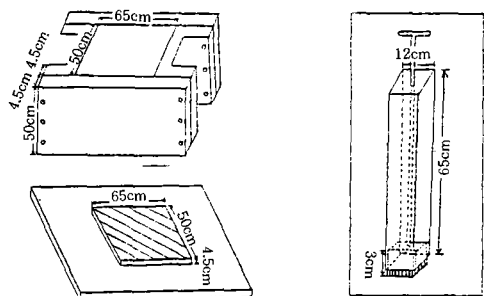


Fig. 2. Figure of wooden block and demension of the special steel compactor

器에 의한 측정과 비교하기 위해서 준비된 승관블록내에서 다져진 아스팔트 공시체를 石材用 自動切斷機로 10cm×10cm의 정사각형으로全體두께 및 다짐層別 두께에 따라 각각 2개씩 切斷하여 공시체를 제작하였다. 또한 파라핀을 使用한 方法 B와 사용하지 않은 方法 A에 의해 決定된 밀도를 전체 블록밀도 및 放射線測定器에 의한 밀도와 比較 分析하였다.

또한 아스팔트 콘크리트 공시체위에서 放射線測定器에 의한 측정 모습은 Photo-1과 같으며 아스팔트 콘크리트 공시체의 比重은 아스콘회사에 설치된 트럭용 重量計로 측정하였으며 코어 밀도를 測定하기 위해서 Photo-2와 같이 대형 石材切斷機로 아스팔트 콘크리트 공시체를 切斷하여 파라핀 코팅한 方法 A 및 코팅하지 않는 方法 B에 의한 밀도를 測定하였다.

후방산란형 放射線測定器에 의해 결정된 현장밀도는 일반적으로 표면에서 대략 76mm 이내 에 있는 재료의 상태를 나타낸다. 따라서

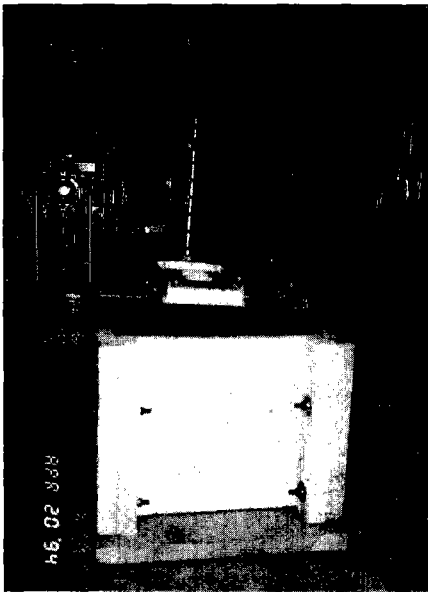


Photo-1. Measurement by nuclear density meter on AC mould



Photo-2. Cutting figure of AC Samples by rock cutting machine

아스팔트 콘크리트가 60~120mm층 내에서 포설될때 후방산란형 放射線測定器를 사용하여 아스팔트 콘크리트의 밀도를 결정하는 것이 가능하다.<sup>1, 11, 14)</sup>

### 3. 現場試驗

#### 가. 道路工事 現場의 路床試驗

도로공사현상에서 既存의 모래치환법과 放射線測定器에 의한 密度 및 含水量을 比較 檢討함으로서 建設市場에서의 적절한 다짐管理를 위한 基礎資料를 제공하고자 하였다. 우리나라에서 道路建設과 관련된 다져진 土工의 現場密度는 주로 모래치환법에 의해서 결정되어 왔으나 최근에 放射線測定器의 導入으로 既存方法과의 精度 比較에 대한 基礎資料의 필요성 시급한 現實이다. 道路의 토공기간에 실시한 현장시험은 두 種類 試驗의 精度를 比較하고 評價하기위한 시험이다.<sup>19)</sup> 放射線測

定器에 의한 密度測定의 精度는 시험과정의 비파괴특성으로 인해 쉽게 얻을 수 있었다. 放射線測定器 1대와 들밀도測定器 2대를 이용하여 현장밀도 및 함수량 측정을 同一現場, 同一場所에서 시행되었다. 路床에서의 現場試驗은 일죽-장호원간 15km 國道 新設工事 區間에서 시행되었다. 이 地域의 土壤은 砂質 성토구간이었고 각각 총 31개 測定地點에서 시행되었다. Photo-3과 같이 모래치환법 시험이 끝난직후 放射線測定器로 모래치환 구멍 주변에서 4回反復, 1分測定을 實施하였고 30cm 깊이에서 直接照射 形態 및 토양표면위에서 後方散亂 形態로 밀도 및 함수량 측정후 결과를 비교하였다. 路床에서의 放射線測定器에 의한 측정모습은 Photo-3과 같다.

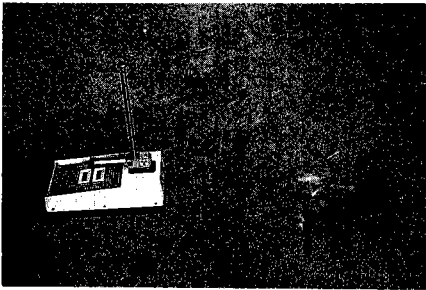


Photo-3. Measurement by nuclear density meter on a road subgrade

#### 나. 아스팔트 콘크리트 表層試驗

아스팔트 콘크리트 포장에서 코어밀도와 放射線밀도를 비교하기위해서 放射線測定器 1대와 코어샘플기계 1대가 이용되었으며 作業의 精度를 높이기 위해서 코어샘플을 얻은 즉시 放射線測定器 측정이 이루어졌으며 測定形態는 後方散亂 形態로 4回 反復, 1分測定이 실시되었다. AC表層위에서 放射線測定器 측정모습은 Photo-4와 같으며 코어샘플은 室內試驗을 위해 즉시 옮겨 졌다.<sup>17)</sup>

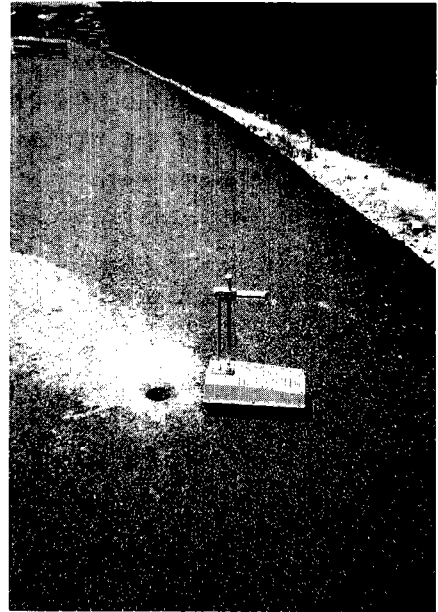


Photo-4. Figure of measurement by nuclear density meter on AC pavement

#### 다. 아스팔트 콘크리트 薄層試驗

박층측정은 양수-덕평 도로신설구간에서 Humboldt 5001P 방사선측정기를 이용하여 시행되었고 도로공사의 AC포장은 평균두께 4.8cm의 박층, 5.2cm의 표층, 11.1cm의 기층의 3가지층으로 구성되어 있었다. 표면의 실제두께는 4.1~5.3cm까지 변했으며 박층과 표층사이의 밀도변화는 0.01~0.12(g/cm<sup>3</sup>)까지 변화하였다. 13개지점에서 코어샘플방법과 방사선측정이 시행되었고 코어샘플은 잘라져서 KSF 2353의 다져진 아스팔트 혼합물의 겉보기 비중 결정법에 의해 실험실내에서 밀도가 결정되었다. 코어샘플들은 박층과 표층을 구분하는 경계선을 따라 절단되었고 시험결과는 Table-1과 같다.<sup>4)5)16)</sup>

### III. 實驗結果 및 考察

#### 1. 室內實驗

본 연구에 사용된 실내시험 재료는 일반적으로 路床에 사용되는 성토재료인 조립토 및 댐의 코어에 사용되는 세립토로서 토성시험 결과는 Fig. 6과 같다.

Table - 1. Physical properties of fine and coarse grained soils

Sample name	Curve No.	Nature	MC %	LL	PI	GS	USCS
Fine	①	Silty sand with gravel		16	3	2.70	SM
Coarse	②	Sandy silt		36	11	2.69	ML

REMARKS

Percent by weight passing #200 sieve of

① : 50%                      ② : 13%

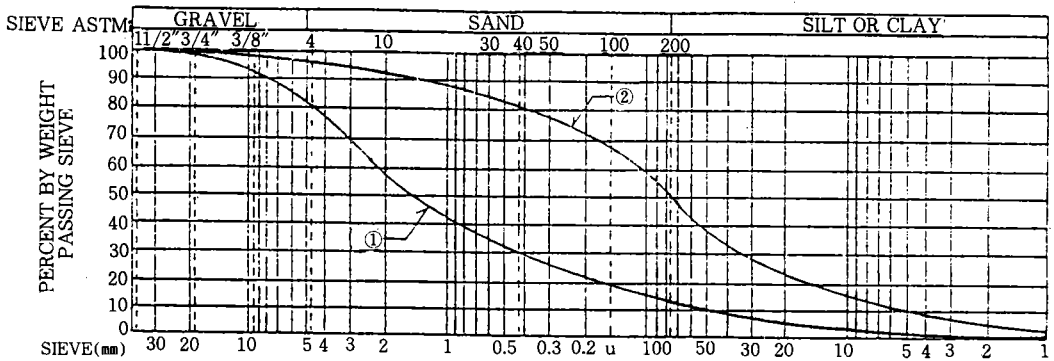


Fig. 3. Grain-size distribution curve for fine and coarse grained soil

#### 나. 粗粒土 공시체 試驗結果

##### 1) 송관블록 試驗

조립토 시료의 총중량( $W$ )은 218.9kg이며 모울드의 체적( $V$ )은  $65\text{cm} \times 50.6\text{cm} \times 35.8\text{cm} = 117,746.2\text{cm}^3$ 으로서 송관블록의 습윤밀도는  $\gamma_s = W/V = 1.859\text{g/cm}^3$ 와 같이 결정되었다. 또한 송관블록내 다져진 조립토 공시체에서 試料를 抽出하여 노건조 含水量을 구하였고 間接的으로 구한 공시체의 乾燥密度는 Table-2와 같다.

Table-2. Measurement of dry density and moisture content(%) by the oven dry moisture for coarse grained soil

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mean
$\gamma_s$	1.690	1.700	1.723	1.721	1.788	1.718	1.726	1.793	1.574	1.715
$w(\%)$	10.0	9.3	7.9	8.0	4.0	8.2	7.7	3.7	18.1	8.54

##### 2) 放射線測定器 試驗

Table-3. Test result for granite mould by nuclear density meter

STAT test : 0.958

Mode	Depth (cm)	$\gamma_t$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$\gamma_d$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$W$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$W_w$ (%)
Back Scatter Method	Soil surface	1.803	1.668	0.135	8.07
	5	1.741	1.603	0.139	8.699
Direct Transmission Method	10	1.759	1.620	0.139	8.565
	15	1.699	1.568	0.131	8.374
	20	1.646	1.517	0.129	8.468
	25	1.644	1.512	0.133	8.797
	30	1.834	1.698	0.136	8.010
Mean		1.732	1.598	0.136	8.426

Table-2와 3에서 보는 바와 같이 블록 平均 濕潤密度와 放射線 平均 濕潤密度의 차이는 약  $0.127\text{g/cm}^3$  정도 블록밀도가 높았고 블록 平均 乾燥密度와 放射線 平均 乾燥密度의

차이는 약 0.177g/cm<sup>3</sup> 정도 블록밀도가 높게 나타났다. 또한 含水比의 경우 노건조 함수비가 放射線 함수비보다 약 0.114%정도 높았다.

放射線測定器의 측정깊이별 습윤밀도, 건조 밀도를 비교한 결과 30cm깊이에서의 직접조사형 측정에서 블록밀도에 가장 가까웠고 함수비(%)의 경우 土壤表面에 가까울수록 노건조 함수비에 가까운 경향을 보여 주었다. 한편 후방산란형 측정시 습윤밀도는 블록밀도와 다소 큰차이를 보여 道路 路床의 密度決定에

적합치 않는것으로 나타났다.

다. 細粒土 공시체의 試驗

1) 송관블록試驗

세립토 공시체의 重量(W)은 233kg이었고 세립토 몰드의 體積(V)은 65cm×50.6cm×35.8cm으로서 세립토 공시체의 濕潤密度는  $\gamma_s = W/V = 233\text{kg}/65\text{cm} \times 50.6\text{cm} \times 35.8\text{cm} = 1.979\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 결정되었다.

노건조 함수비로부터 간접적으로 구한 다짐 공시체의 건조밀도는 Table-4와 같다.

Table-4. Test result of dry density and moisture content(%) by the oven dry test for clay

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mean
$r_d$	1.671	1.673	1.662	1.608	1.649	1.645	1.649	1.659	1.648	1.652
w(%)	18.4	18.3	19.1	21.3	20.0	20.3	20.0	19.3	20.1	20.14

Table-4와 5에서 볼 수 있듯이 블록 平均 濕潤密度와 放射線 平均 濕潤密度的 차이는 약 0.105g/cm<sup>3</sup>정도 블록밀도가 높은 것으로 나타났고 블록 平均 乾燥密度와 放射線 平均

乾燥密度的 차이는 약 0.075kg/cm<sup>3</sup>정도 블록 밀도가 높았다. 平均含水比의 경우 약 1.38% 정도 노건조 含水比가 높았다. 측정깊이별 放射線밀도와 블록밀도를 비교한 결과 30cm깊

Table-5. Test result on clay mould by nuclear density meter

STAT시험 : 0.912

Mode	Depth (cm)	Count time (min)	$r_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	$r_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)
Back Scatter Method	Soil surface	1	1.862	1.567	0.295	18.84
		1/4	1.834	1.549	0.285	18.40
		4	1.839	1.542	0.298	19.30
Direct Transmission Method	5	1	1.876	1.583	0.294	18.54
		1/4	1.885	1.588	0.297	18.71
		4	1.882	1.585	0.297	18.74
	10	1	1.902	1.606	0.296	18.44
		1/4	1.922	1.623	0.298	18.38
		4	1.904	1.609	0.295	18.36
	15	1	1.867	1.573	0.294	18.72
		1/4	1.868	1.575	0.294	18.63
		4	1.867	1.575	0.293	18.58
20	1	1.865	1.572	0.293	18.62	
	1/4	1.867	1.561	0.306	19.60	
	4	1.861	1.569	0.292	18.61	
25	1	1.871	1.571	0.300	19.11	
	1/4	1.881	1.573	0.308	19.59	
	4	1.871	1.576	0.295	18.71	
30	1	1.882	1.586	0.296	18.66	
	1/4	1.874	1.575	0.299	19.00	
	4	1.875	1.584	0.292	18.42	
Mean			1.874	1.577	18.96	



이에서 직접조사형 측정시 블록 습윤밀도와 건조밀도에 가까웠고 함수비의 경우 토양표면에 가까울수록 노조건 함수비에 가깝다고 결론지을 수 있었다. 또한 1분, 1/4분, 4분등의 測定時間別로 밀도 및 함수비를 측정한 결과 긴 측정시간이 정도에 기여하는 효과를 얻을 수 없으므로 밀도 및 함수비를 결정할때 1분 測定을 이용해도 무방한 것으로 판단된다.

2) 放射線測定器 試驗

라. 아스팔트 콘크리트 공시체 試驗

1) 아스콘의 송판 블록試驗

아스콘 공시체의 純粹重量은 265kg이었고 아스콘 공시체의 體積은  $V=65.2\text{cm} \times 50.2\text{cm} \times 38.5\text{cm}$ 로서 습윤단위중량( $\gamma_t$ )은  $W/V=265\text{kg}/65.2\text{cm} \times 50.2\text{cm} \times 38.5\text{cm} = 2.063\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 決定되었다.

2) 放射線測定器 試驗

Table-6과 같이 블록 密度와 放射線測定器 測定密度를 비교한 결과 약  $0.03\text{g}/\text{cm}^3$  송판 블록의 측정결과가 높다.

이는 블록의 上部層에 다짐봉의 다짐효과가 적었음을 보여주며 아스콘 공시체의 표면거칠기가 密度測定 結果에 影響을 미친것으로 판단된다.

4) 코어密度 試驗

아스콘 공시체를  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 의 정사격형으로 절단하여 코어샘플 밀도와 파라핀 코팅한 코어밀도를 결정한 결과는 Table-7, 8과

같이 나타났으며 Table-8에서 파라핀의 比重은  $25^\circ\text{C}$ 에서 측정된 보통 파라핀의 비중인  $0.95\text{g}/\text{cm}^3$ 을 적용하였다. 위 Table-8에서 볼 수 있듯이 코어밀도와 放射線密度간의 平均濕潤密度는 약  $0.132\text{g}/\text{cm}^3$  정도 平均 코어밀도가 높았고 파라핀을 코팅한 平均 코어밀도는 放射線 平均 습윤밀도보다 약  $0.097\text{g}/\text{cm}^3$  정도 높아 파라핀 코팅에 의한 코어밀도가 放射線 밀도와의 차이가 적음을 보여주었다.

2. 現場 試驗結果 및 考察

가. 道路 工事現場의 路床試驗

이 試驗은 目的은 도로의 路床에서 現場密度를 정확히 결정할 수 있는가를 구명하기 위한 것이며 연구목적을 위해 放射線測定器에 의

Table-6. Test result on AC mould by nuclear density meter

Mode	Depth (cm)	$\gamma_t$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\gamma_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Back Scatter Method	Soil surface	1.937	1.771
Direct Transmission Method	5	2.030	1.938
	10	2.051	1.958
	15	2.060	1.964
	20	2.065	1.975
	25	2.060	1.964
	30	2.034	1.960
Mean		2.034	1.933

Table-7. Result of density measurement by core sample method(method A)

compaction layer	thickness (cm)	weight of sample in air(g) (A)	weight of sample in water(g) (C)	wet density( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) $\gamma_t = \frac{A}{A-C}$
1	7.0	1626	992	2.565
2	6.3	1400	850	2.546
3	7.3	1562	950	2.552
4	7.4	1610	935	2.385
5	6.8	1450	738	2.037
total layer	38.5	8320	4479	2.166
Mean				2.375

Table-8. Result of density measurement by paraffin coating method(method B)

compaction layer	thickness of sample (cm)	weight in air(g) (A)	weight in air of paraffin coating sample(D)	weight in water(g) (E)	wet
					density(g/cm <sup>3</sup> ) $\gamma_t = \frac{A}{D-E-\left(\frac{D-A}{F}\right)}$
1	6.5	1490	1610	790	2.147
2	6.3	1382	1470	740	2.168
3	7.4	1582	1660	845	2.188
4	7.8	1580	1672	835	2.135
5	6.8	1371	1447	710	2.087
total layer	38.7	8517	8715	4390	2.069
Mean					2.132

한 密度 및 含水比 측정후 즉시 모래치환법에 의한 밀도 및 함수비 측정이 이루어졌다. 함수비는 實驗室內 노 건조시험으로 결정되어 放射線측정과 비교되었다. 두 방법의 상관관계를 결정하기 위해 回歸分析이 이루어졌으며 모래치환법과 放射線 측정과의 차이가 분석되었다. 분석목적은 放射線測定器로 모래치환법에 의한 밀도 및 함수비를 정확히 측정할 수 있는 정도를 결정하기 위한 것이었다. 현장시험은 일죽-장호원간 국도확장 및 신설공사구간(15km)의 성토구간중 31개 地點에서 실시되어 實驗結果를 回歸分析하여 Fig 7, 8, 9의

分散點을 통해 나타내었다.

Fig 7~Fig 9는 放射線 密度 및 含水比 測定結果와 모래치환법에 의해 측정된 결과와의 관계를 나타낸다.

Fig 7~Fig 9에서 一致線 위 아래에 대부분의 분산점이 나타났으며 건조밀도, 습윤밀도, 함수비에 대한 변동계수  $R^2=0.75\sim 0.98$ 까지 변하며 回歸方程式이후 측정된 모래치환 밀도 및 함수비와 예측된 밀도 및 함수비의 차이는 크게 改善되었다. 따라서 充分한 數의 모래치환법 및 放射線 測定器에 의한 측정에 근거하여 적절한 回歸線을 결정하는 것이 가능한 것

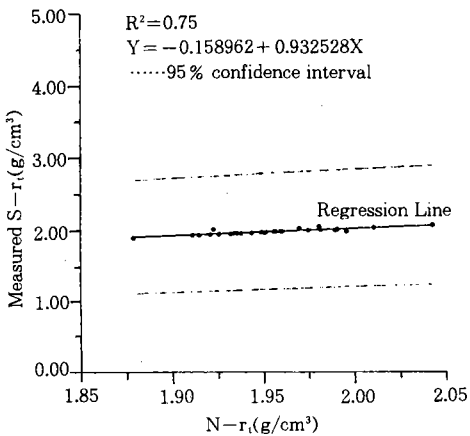


Fig. 7. Result of regression analysis between wet density by sand replacement method and wet density by nuclear density meter for road subgrade

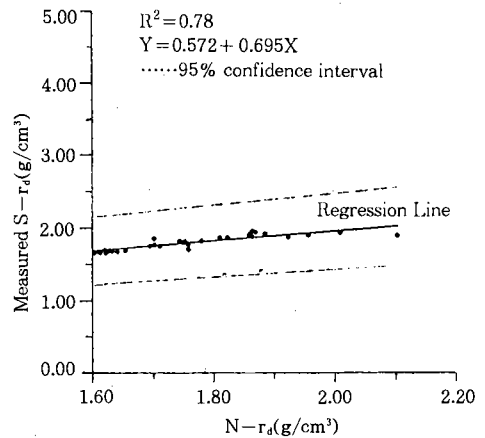
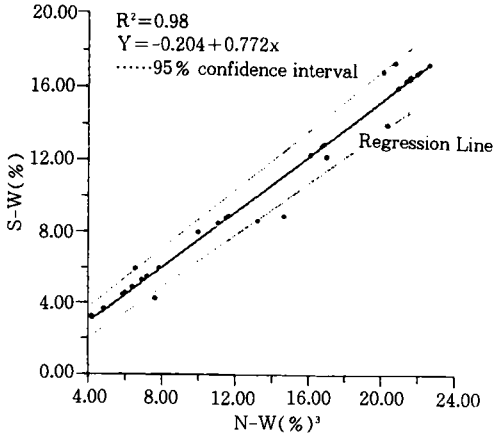


Fig. 8. Result of regression analysis between dry densities by sand replacement method and by nuclear density meter for road subgrade



**Fig. 9. Result of regression analysis between moisture content by sand replacement method and moisture content by nuclear density meter on road subgrade**

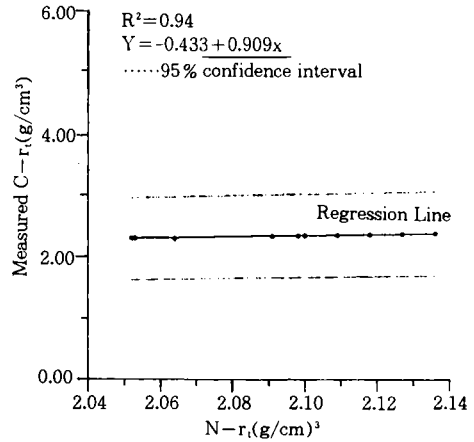
으로 보인다.

**나. 아스팔트 콘크리트 포장의 밀도결정**

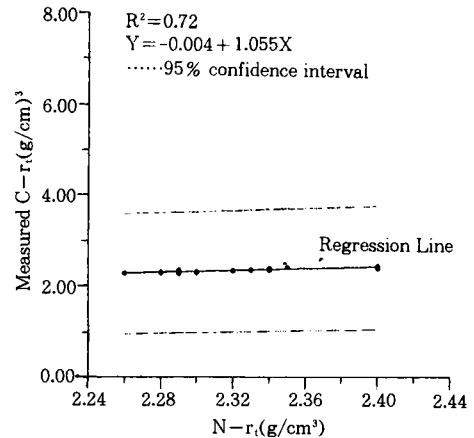
이 試驗의 目的은 아스콘 鋪裝의 現場密度를 정확히 결정할 수 있는 가를 구명하는데 있다. 이 목적을 위해 새롭게 鋪裝된 가남~장호원간 및 양수~덕평구간의 國道 확장 및 新設공사구간에서 시험된 放射線測定器와 코어샘플 시험에의해 放射線밀도가 측정되었고 각 위치에서 코어들이 채취되어 코어 및 放射線 밀도사이의 관계가 분석되었다. Humbolt 5001P 放射線測定器로 측정된 放射線밀도와 코어밀도를 比較하여 두 방법간의 상관관계를 결정하기위해 회귀분석이 이루어졌다. 분석목적은 放射線測定器의 밀도측정으로 코어밀도를 정확히 측정할 수 있는 精度를 설정하기위한 것이다. 실험은 2개 지역의 國道 擴張工事 및 新設工事 區間에서 수행되었고 두 방법에 의한 측정이 이루어졌다. 放射線測定이 끝난 후 각 위치에서 코어들이 즉시 採取되어 번호를 매긴후 실험실로 옮겨졌다.

모든 코어들은 밀도 측정전에 室內溫度에서 충분히 乾燥되었으며 그 결과를 회귀분석하여 Fig 10~Fig 11까지의 分산점을 통해 나타내었다.

Fig 10~Fig 11에서 放射線 밀도는 측정된 코어밀도보다 일정하게 낮은 경향을 나타냈으며 2개 地域에 대한 變動係數는  $R^2=0.72\sim 0.94$ 까지 변하며 회귀방정식 적용이후 측정된 코어 밀도와 예측된 코어밀도사이의 차이는 크게 개선되었다.



**Fig. 10. Result of regression analysis between wet-density by core sample method and wet density by nuclear density meter on AC pavement (Kanam-Ganghoweon sector)**



**Fig. 11. Result of regression analysis between wet-density by core sample method and wet density by nuclear density meter on AC pavement (Yangsu-Dukpyeong sector)**

그러므로 충분한 수의 코어 및 放射線 측정  
에 근거하여 적절한 回歸線을 결정하는 것이  
가능한 것으로 보인다.

다. 아스팔트 콘크리트의 薄層試驗

1) 靜的 薄層測定器 結果

박층측정은 양수-덕평 도로신설구간에서 Hu-  
mboldt 5001P 방사선측정기를 이용하여 시행  
되었고 시험결과는 Table-9와 같다.

특정 두께의 薄層材料의 密度를 정확히 측  
정하기위해 내부에 장입된 測定器의 능력은  
다음과정에 따라 결정된다. 純粹한 薄層用測  
定器란 단지 最上部層 密度를 측정할 수 있고  
나타내야한다. 이러한 測定은 下部層 密度와  
成分에 독립적 이어야 한다.<sup>15, 16)</sup>

정확하고 정밀한 밀도 측정을 위해 많은 數  
의 測定을 하는 것이 중요하며 박층측정의 경

Table-9. Measured density of thin overlay test

Core No.	Base $r_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	OL thick (cm)	Response ratio (%)	N- $r_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	Calc.OL $r_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	Core.OL $r_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	Diff $r_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	Error (%)
1	2.376	5.3	0.800	2.374	2.374	2.304	0.070	0.03
2	2.299	4.4	0.721	2.440	2.494	2.289	0.205	0.09
3	2.360	4.5	0.731	2.496	2.546	2.310	0.236	0.10
4	2.360	4.9	0.769	2.508	2.552	2.313	0.239	0.10
5	2.349	4.3	0.711	2.473	2.524	2.285	0.239	0.10
6	2.352	4.8	0.759	2.373	2.380	2.307	0.073	0.03
7	2.360	4.7	0.750	2.368	2.371	2.297	0.074	0.03
8	2.372	5.1	0.785	2.397	2.404	2.331	0.073	0.03
9	2.376	5.3	0.800	2.418	2.429	2.355	0.074	0.03
10	2.390	5.3	0.800	2.428	2.438	2.364	0.074	0.03
11	2.406	5.1	0.785	2.404	2.404	2.330	0.074	0.03
12	2.373	4.1	0.711	2.406	2.419	2.315	0.104	0.05
13	2.381	5.1	0.785	2.420	2.431	2.317	0.114	0.05
Mean	2.366	4.8	0.762	2.423	2.444	2.327	0.127	0.06

\*OL : Overlay Layer

우 박층두께 및 下部材料의 密度를 정확히 과  
악하는 것이 必需的이다. 따라서 박층측정이  
시행되기 전에 表層密度와 薄層두께가 결정되  
었고 이 값들이 박층밀도 계산에 사용되었다.  
코어지점에서 박층의 실제 두께는 4.1~5.3cm  
까지 변했으며 바닥밀도는 2.299~2.406g/cm<sup>3</sup>  
까지 변하였다. 시험결과 박층시험시 방사선  
시험기의 측정오차는 0.8%로 나타났고 평균  
값에 의한 편차보정이 이루어진다면 측정오차  
는 감소되어 방사선측정기와 코어밀도와의 양  
호한 상관관계를 이룰 것으로 기대된다.  
2.5cm보다 얇은 박층의 밀도를 결정할 때 이

러한 얇은 측정깊이는 상대적으로 부정확할  
수 있다. 이러한 박층들의 밀도가 후방산란형  
放射線測定器에 의해 결정될 때 그 결과는 밀  
에 놓여진 재료의 밀도에 크게 영향을 받는다.  
이러한 영향의 정도는 上部層의 두께 및  
두 層간의 密度차이에 달려있다. 덧씌우기층  
(thin-lift)의 설치 전후에 밀도측정이 이루어  
진다면 AC 박층의 밀도가 결정될 수 있다.  
또한 上部層 밀도는 全體層 및 下部層의 밀도  
로부터 計算될 수 있고 측정된 全體層密度와  
下部層의 密度로부터 上部層 密度를 계산하기  
위한 式은 다음과 같다. Table-11의 박층밀도

를 계산하기 위해 사용된 (2)식은 一般的으로 비장입형 시험기의 薄層密度를 計算하기위해 사용되며 장입형 시험기의 알고리즘에도 같은 방정식이 사용된다.<sup>17)</sup>

$$O_s = \frac{T_s - B_s}{R} + B_s \dots\dots\dots (2)$$

$O_s$ : 上部層의 未知密度

$T_s$ : 全體密度

$B_s$ : 下部材料의 密度

$R$ : 보정계수 (혹은 反應比)

보정계수  $R$ 은 반응비와 같다.

#### IV. 結 論

本 研究은 工事現場에서 施工의 效率의인 品質管理를 위해 美國의 ASTM이나 AASHTO에서 밀도 및 함수량측정 목적으로 사용법이 규정되어있는 放射線 測定器(Nuclear density meter)를 우리나라 建設現場에서 實用化하여 신속하고 정확하게 현장밀도와 함수비를 결정하려는 데 목적이 있으며 이를위해 實驗室과 道路現場에서 기존의 密度 및 含水量을 決定하는 方法과 放射線測定器의 測定 結果와의 精密度를 比較 分析함으로서 이들 兩者간의 相關性을 검토하고 이를 統計處理하여 密度 및 含水比 測定の 基準을 제공하고자 하였다. 또한 두께 2.5~5.0cm의 얇은 아스팔트 박층의 密度를 調節하기위해 全層形(fulltype) 靜的 放射線測程器(static nuclear gauge)를 利用하고자 시도하였다. 路床 및 아스콘 鋪裝 위에서 放射線測程器의 精度 및 적절한 利用 方法을 규명하기위해 실내시험과 현장시험을 통해 최소한 4회 측정의 平均으로 각각의 密度를 구하였다. 보통 1분측정이 이용되었으며 室內 및 現場試驗을 통해 測定器는 製造業者의 規定에 따라 시험하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 粗粒土 및 細粒土 공시체에 대한 실내 블록試驗結果 30cm깊이의 直接投射 測定時 블록밀도에 가장 가까운 값을 보였으며 含水

比의 경우 土壤表面에 가까울 수록 노건조 含水比에 가까운 것으로 나타났다. 또한 後方散亂 測定時 濕潤密度 및 乾燥密度가 약간 작게 나오는 경향이 있었다. 全體적으로 블록密度가 放射線密度보다 높았으며 含水比의 경우도 同一하였다.

2. 아스콘 공시체의 室內 송관블록 試驗 結果 아스콘 블록의 코어 平均密度와 放射線 平均密度의 차이는 약 0.143g/cm<sup>3</sup>정도 코어밀도가 높았으며 파라핀(paraffin) 코팅 처리한 코어 平均密度와 放射線 平均密度의 차이는 약 0.097g/cm<sup>3</sup>정도로 파라핀 코팅한 코어밀도가 放射線 밀도에 가까웠다.

3. 道路現場의 路床에서 모래치환법에 의한 平均 濕潤密度와 放射線 平均 濕潤密度의 차이는 약 0.024g/cm<sup>3</sup>정도 및 모래치환 平均 乾燥密度와 放射線 平均 乾燥密度의 차이는 약 0.046g/cm<sup>3</sup>정도 높았으며 平均含水比의 경우 노건조 함수비가 약 1.48%정도 높은 것으로 나타났다.

4. 道路工事 現場의 아스콘 表層에서 코어 平均밀도와 放射線 平均밀도의 차이는 약 0.130g/cm<sup>3</sup>정도 코어 平均密度가 높은 것으로 나타났다.

5. 도로공사 현장의 路床 및 아스콘 表層에 대한 측정데이터를 回歸分析한 결과 노상의 경우 密度에 대한 決定係數 R<sup>2</sup>=0.75~0.98 및 아스콘 鋪裝의 決定係數 R<sup>2</sup>=0.72~0.94임을 보여주었다.

6. 路床 및 아스콘 表層의 다짐도 決定을 위해 放射線測定器를 이용하는 것은 가장 效果의이고 實際의인 方法이며 後方散亂形 測定器는 4.6cm두께 이상인 鋪裝의 다짐도를 결정하는데 有效한 수단이라고 판단된다.

7. 모든 靜的 放射線測定器들은 아스콘의 薄層密度를 결정하기위한 매우 有用한 도구이며, 또한 放射線 密度測定을 확인하기 위해서 코어샘플 測定이 週期的으로 이루어져야 한다고 판단된다.

參 考 文 獻

1. Belt G. Santelli N. and Mansen M. 1991. Evaluation of new nuclear density gauges on asphalt concrete. Scientex Corp. Final Report.
2. Berry, R. L. 1986. Instruction and radiation safety manual. Humboldt Scientific, Inc.
3. Boldt, C. M. K. 1985. Compaction criteria for metal and nonmetal tailings. Bureau of Mines Report of Investigations.
4. Dept. of Enviroment and Transport, London. 1982. Nuclear gages for measuring the density of road base Macadam : report of a working party. TRRL Supplementary Report 754.
5. Eaton, R. A and Berg, R. L. 1980. Field cooling rates of asphalt concrete overlays at low temperatures. CRREL Report 80 ~30.
6. Gardner, R. P. and Roberts, K. F. 1967. Density and moisture content measurements by nuclear methods. National Cooperative Research Program Report 43.
7. Hamory, G. I. and Duncan, P. R. 1992. The use of nuclear moisture/density meters on materials with well-defined density gradients. Road and Transport Research. Vol 1, No 4 pp14~29.
8. Hughes, C. S. 1987. Investigation of improved compaction by rubber-tire rollers. Virginia transportation research council. Final Report.
9. Ishai I. and Livneth M. 1983. Comparative accuracy of in-situ nuclear density testing. Geotechnical Engineering. Vol. 14.
10. Kennedy. T. W, Tahmoressi M, and Anagnos, J. N. 1986. A Summary of the field compaction of asphalt mixturess in texas. The University of Texas. Rearch Report 317-2F.
11. MasaruUchida, Yoshihiro TANAKA and Tomonori TAKADA. 1992. A study on management system for RCCP(The quality control of RCCP density by riscattering-type gauge). セメントル. コンクリート論文集. No.46
12. McKeown, J. D. and Matheson, D. S. Use of glacial till and outwash silty sand as construction material for dam cores at long spruce generating station. Canada. Geotech. J., Vol. 16, pp363~378.
13. Mamlouk, M. S. 1988. Nuclear density testing of granular materials. Arizona. Department of Transportation. Final Report.
14. 中丸貢. 1988. ○壓ソクリートの薄層-ハレイ工法への適用性に関する検討. 舗装 Vol. 23, No. 4, pp8~14.
15. Parikh J. 1990. Compaction control of bituminous concrete using nuclear density gauges. Maryland State Highway Administration. Final Report.
16. Raymond A., Forsyth, P. E. 1982. Asphalt concrete compaction study. California State Dept. of Transportation. Interim Report.
17. Raymond A., Forsyth, P. E. 1985. Control of AC(Asphalt concrete) compaction using an end-result specification. California State Dept. of Transportation Sacramento.