

# 標準貫入試験における打撃効率と器具寸法の影響に関する研究

A Study on the Effects of Energy Transfer Ratio and the Size of Apparatus in Standard Penetration Test

大野睦雄 Mutsuo OHNO\*

## 要 旨

標準貫入試験は、試験方法の簡便性・汎用性や試験結果の豊富さなどから、地盤調査法の基本的・標準的方法として、また、地盤特性の評価および土木建築構造物の設計・施工上の実務に必要な指標である  $N$  値を求める方法として、広く用いられている。

標準貫入試験から得られる  $N$  値は、ドライブハンマー、ノッキングブロック、ロッドなどの器具の寸法やドライブハンマーの落下方法の影響を受けることが多くの研究者により指摘されているにもかかわらず、実務においては測定された  $N$  値をそのまま設計や施工に利用しているのが実情である。このため、以前から、 $N$  値を規格化することの必要性が求められてきた。我が国では、2001 年に従来規格の見直しが行われ、標準貫入試験結果における測定誤差の要因の一つである器具に対する規格の不統一をなくすために、許容差を規定して器具寸法の規格化が図られた。また、試験者による測定誤差の発生防止と試験の作業環境を改善するために、自動化した試験装置と試験方法の採用が組み入れられたが、ドライブハンマーの自動落下方法を規格化するまでには至らなかった。

国際的には 1950 年後半から  $N$  値の規格化の動きが始まった。標準貫入試験は、1989 年の第 12 回国際土質工学会議において、国際基準試験方法として承認されたが、ロッド寸法、ドライブハンマーの形状、落下方法に対する規格化は行われなかった。また、これらの要因が  $N$  値に及ぼす影響については、打撃エネルギーを測定して補正する方法が提案されたが、その方法にも問題あることが指摘されてきた。

建設工事の国際化が進展する中で、標準貫入試験における打撃効率と器具寸法の影響を考慮した  $N$  値の合理的な補正方法の確立が強く望まれている。

本論文は、標準貫入試験における打撃効率と器具寸法の影響について、実験と理論の両面から考察し、国際的にも適用できる  $N$  値の補正方法を提案したものである。

本論文の主な内容は以下のとおりである。

第 1 章では、標準貫入試験方法の規格化の経緯を総括し、 $N$  値の適用方法と試験装置上の課題を明確にするとともに、打撃効率と器具寸法の影響を考慮した  $N$  値の合理的な補正法を確立することの必要性を指摘した。

第 2 章では、打撃効率を考慮した  $N$  値の補正方法を導くために、新しい実験装置を開発して室内標準貫入試験を行い、打撃効率を測定する方法として、2 点ゲージ法が適していることを確認した。次いで、砂地盤について試験を行い、2 点ゲージ法を用いて、ハンマー打撃によってロッドに伝達されるエネルギー、動的貫入抵抗、打撃効率、ロッドの貫入量を測定した。その結果の考察から、ロッドの貫入量  $S'$  と地盤の動的貫入抵抗  $R'_d$  の関係は、 $\log S'$  と  $\log R'_d$  を両軸とする座標において直線関係として近似できること、また、その関係は、土被り圧、地盤の密度、飽和度、砂の種類の影響を受けないことを明らかにした。さらに、打撃効率  $e$ 、ドライブハンマーの質量  $W$ 、ドライブハンマーの落下高  $H$  と  $S'$ 、 $R'_d$  との間には、 $eWH = R'_d S'$  の関係が成立し、打撃効率の値は  $e = 0.8 \sim 1.0$  であることを示した。

打撃効率の補正について、国際基準試験方法では、 $N$  値は打撃効率  $e$  に反比例する、すなわち、地盤の貫入抵抗

\* 技術・環境本部

「九州大学学位論文 2008.1」の要旨を掲載

$R'_d$  は一定であるとして、打撃効率の影響は貫入量  $S'$  に対してのみ補正するとしている。この方法の妥当性を検証するために、ハンマー落下高を変化させることによって打撃効率を変える実験を行い、その結果から、打撃効率が変わると、貫入量、動的貫入抵抗がともに変化することを明らかにし、貫入量と動的貫入抵抗を補正する新たな方法として、打撃効率  $e$  の平方根で補正する方法を提案した。この  $\sqrt{e}$  補正法は、エネルギーに関する基本式  $eWH = R'_d S'$  を満足するように、貫入量  $S'$  と動的貫入抵抗  $R'_d$  を打撃効率  $e$  の平方根で除するものであり、 $N$  値は測定値に  $\sqrt{e}$  を乗ずることによって補正される。そして、実験結果との比較から、国際基準試験方法による補正法よりも、提案した  $\sqrt{e}$  補正法の方が妥当であることを示した。

第3章では、先ず、ドライブハンマーの打撃によって生ずるロッドの最大圧縮応力度について、棒中を伝播する縦波に関する一次元波動方程式に基づき、器具寸法を考慮できる形で導き出した。次に、ロッドの最大圧縮応力度に及ぼすハンマー寸法の影響を調べるために、ハンマー長を変化させた室内実験を行い、2点ゲージ方法計測に基づき、ロッドの貫入量  $S'$ 、動的貫入抵抗  $R'_d$ 、打撃効率  $e$ 、最大圧縮応力度  $\sigma'_R$  を求め、ハンマー長の相違にかかわらず、 $\sigma_R^2 S$  ( $\sigma_R = \sigma'_R / \sqrt{e}$ ,  $S = S' / \sqrt{e}$ ) が一定値を示すことを確かめた。この  $\sigma_R^2 S =$  一定の関係を利用して、ロッド寸法、ノッキングブロック、ハンマー形状の異なる国内外における  $N$  値の実測値を検証し、 $\sigma_R^2 S$  を指標として用いることによって、器具寸法の違いによる  $N$  値の補正を実用的に十分な精度で行うことができることを明らかにした。

第4章では、以上の成果を踏まえ、打撃効率と器具寸法を考慮した新たな補正方法を提案した。すなわち、先ず、 $\sqrt{e}$  による実測沈下量  $S'$  の補正值  $S_1 = S' / \sqrt{e}$  と使用した器具の寸法からロッドの最大圧縮応力度  $\sigma_{R1}$  を求め、次いで器具寸法の異なる標準貫入試験から  $\sigma_{R2}$  を求め、 $\sigma_R^2 S =$  一定の関係から、 $S_2 = \sigma_{R1}^2 S_1 / \sigma_{R2}^2$  を算定することによって、 $S_2$  に相当する  $N$  値 ( $=30\text{cm} / S_2$ ) を算定する新たな方法を示した。また、標準貫入試験の精度の向上させるための今後の課題を整理し、全体の総括とした。

キーワード：標準貫入試験、 $N$  値の補正方法、打撃効率、器具寸法

## Summary

Standard penetration test (SPT) having advantages in testing simplicity and generality, as well as abundance of practice data, has become the most fundamental and standard exploration method among field test methods for soil investigation nowadays. On the other hand, methods used for obtaining the standard soil index parameter ( $N$ -value) from SPT, which is practically indispensable in evaluating ground conditions for design and construction of civil and architectural engineering structures, vary widely.

According to many researchers, at present the situation is that measured  $N$ -values are used without restriction in design and construction despite of the fact that the measured  $N$ -value can largely vary due to differences in the size of apparatus in SPT such as a drive-hammer, a knocking-block, a rod etc., or in hammer dropping methods. Therefore, the need for standardized  $N$ -value has been required for some time. From comprehensive re-evaluation of all standardized materials in Japan in 2001, it was understood that one of the reasons of measuring error occurred in SPT test data is the lack of consistent standardization of the apparatus of SPT. Together with standardizing the size of apparatus by regulating allowable difference, automatic and standardized testing equipments for preventing labor measuring error and improving operation environment were adopted. However, the drive hammer dropping method has not been standardized yet.

International standardization movement of  $N$ -value has been initiated since the second half of 1950s'. Since 1989, the SPT method has been acknowledged as international standard testing method in the 12<sup>th</sup> International Soil Engineering Conference. However, internationally it has not been "standardized" in terms of

the rod dimension, drive-hammer shape, and hammer dropping method. A method to correct the influences of those factors on SPT  $N$ -value through measurement of driving energy was suggested. However, such correction method has its own problems to be clarified.

Concerning with globalization of construction work, a worldwide applicable correction method for  $N$ -value regarding the size of apparatus in SPT and energy transfer ratio, which has not been available so far, is necessary.

In this paper, a worldwide applicable correction method for  $N$ -value based on energy transfer ratio and the size of apparatus in SPT is proposed based on both of laboratory tests and kinematic wave theory.

The paper consists of following 4 main chapters.

#### Chapter 1:

Summarizing background of standardization of the standard penetration test method, the use of  $N$ -value and influence factors such as the size of apparatus in SPT and energy transfer ratio on  $N$ -value were clarified, from that the necessity of introducing a correction method for such influences was addressed.

#### Chapter 2:

To correct the  $N$ -value regarding the energy transfer ratio, laboratory standard penetration test was carried out using new developed testing equipment. From test results, it was confirmed that using of the two-point strain measurement method was suitable for estimation of energy transfer ratio. By using the two-point strain measurement, transmitted energy from the rod due to hammer driving, dynamic penetration resistance, energy transfer ratio, and rod penetration interval were obtained. From a consideration of test results, a relationship between penetration per blow  $S'$  and dynamic resistance  $R'_d$  were plotted in a  $\log S' - \log R'_d$  graph, which indicates an almost unique straight line irrespective of overburden pressure, relative density of ground, saturation ratio of sand, and sand type. The relationship has been established as  $eWH = R'_d S'$  (where  $e$ : energy transfer ratio,  $W$ : drive-hammer weight,  $H$ : drive-hammer dropping height, in which the energy transfer ratio  $e = 0.8 \sim 1.0$ ).

According to the international standard testing method, correction of  $N$ -value is in inverse proportion to energy transfer ratio ( $e$ ), i.e., the penetration per blow  $S'$  is proportional to  $e$ , assuming  $R'_d$  is fixed, therefore only the penetration per blow is subjected to correction. For examination of validity of the international correction method, laboratory tests were conducted in which the energy transfer ratio is varied due to altered hammer dropping height.

Looking at the relationship among penetration per blow, dynamic resistance, and energy transfer ratio, it was understood that both the penetration per blow and the dynamic resistance varied with the variation of energy transfer ratio. Therefore,  $\sqrt{e}$  technique is suggested as a method that can correct both the penetration per blow and the dynamic resistance. In correction by the  $\sqrt{e}$  technique, in order to satisfy the basic energy-related equation  $eWH = R'_d S'$ , the penetration per blow  $S'$  and the dynamic resistance  $R'_d$  are divided by  $\sqrt{e}$ , thus  $N$ -value is corrected by multiplying by  $\sqrt{e}$ .

Considering that the experiment was carried out with identical density ground condition, the  $\sqrt{e}$  technique is more proper even compared to the correction method based on international standard testing methods.

#### Chapter 3:

Based on the theory of one-dimensional elastic wave propagation, which relates the maximum compression stress intensity to the longitudinal wave one-dimensionally propagating along the rod due to blow of the drive-hammer, the maximum compression stress intensity was evaluated considering the size of apparatus in SPT. Next, in order to examine the effect of hammer dimension on the intensity of the maximum compression stress in the rod, laboratory model tests with varied hammer length were carried out. Based on the two-point strain measurement technique, rod penetration per blow  $S'$ , dynamic resistance  $R'_d$ , energy transfer ratio  $e$ , and the maximum compression stress in rod  $\sigma'_R$  were obtained. As the results, regardless of variation in hammer length (or variation in hammer cross section area) it was found that a quantity of  $\sigma'_R{}^2 S$  showed a fixed value

---

(where  $\sigma_R = \sigma'_R / \sqrt{e}$ , and  $S = S' / \sqrt{e}$ ). Using the fixed value of the quantity  $\sigma_R'^2 S$ , examination on measured  $N$ -values obtained by foreign researchers utilizing common rod dimension and hammer shape was conducted. From the results it was understood that from engineering point of view, utilizing the index  $\sigma_R'^2 S$  in correction of  $N$ -value for the size of apparatus in SPT is quite possible with adequate preciseness.

From the above mentioned results, an internationally applicable correction method of  $N$ -value considering energy transfer ratio and the size of apparatus in SPT is proposed.

#### **Chapter 4:**

For the proposed correction method of  $N$ -value considering energy transfer ratio and the size of apparatus in SPT, conclusions were made from the results of all chapters and the problems left so far were adjusted and summarized as a whole.