

# 一种基于土体弹性波和动态变形模量的深填方地基压实质量检测方法

金培阳

中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司

**摘要：**高效地对土石混合料深填方地基的压实质量检测是一大难点。本文结合深填方工程的施工特点以及地基土波速和压实质量间存在相关性的特性，提出一种基于土体弹性波波速和动态变形模量数据的深填方压实质量评价方法。文章给出了该方法的具体操作步骤，并对其公式原理进行推导说明。最后结合一个工程实例进行验证，结果显示本文所提方法具备良好的适用性。

**关键词：**深填方地基；压实质量；剪切波速；动态变形模量

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.23.033

## 引言

土石混合料填方地基具备就地取材，承载力高等优点，在填方质量良好的情况下是一种良好的地基处理方法。然而填方地基的压实质量检测却是一大难点，尤其是针对深填方地基整体的压实质量和均匀性检测。对于深填方地基，待检测深度通常为5~8m，这一深度情况下灌水法、灌砂法、核子密度仪法等常规浅层压实质量检测方法均无法使用。针对此种工况，常规深层土体检测方法包括探井法<sup>[1]</sup>、动力触探法、钻孔取样法<sup>[2, 3]</sup>等。然而上述方法不可避免均存在一定的局限性，例如探井法效率极低、属于大规模破坏性试验，测点数量有限。动力触探法通过建立锤击数与压实度的关系间接评价压实质量，但该方法更多是一种定性评价结果。钻孔取样法只能针对可以获取I级~II级土样的填料，对于土样不满足条件，尤其是类似土石混合料这种含有大量石块的填料基本无法使用。

因此，针对土石混合料深填方地基压实质量检测过程中现有方法检测效率和适用性受限的情况，文章提出一种基于土体弹性波波速和动态变形模量数据的深填方压实质量评价方法。

## 一、基于土体弹性波和动态变量模量的深填方地基

## 压实质量检测方法

剪切波速与土体密度间存在一定的相关关系，而相较于深填方地基一定深度处的土体密度值，剪切波速是更为容易获取的测试参数。因此大量研究尝试直接建立二者间的相关关系，从而基于测试得到的剪切波速推算压实系数<sup>[4, 5]</sup>。对于均质介质来说，基于该理论推算压实系数的方法具备一定的可行性。而对于土石混合料填方地基来说，受材料特性变异性影响，不同空间位置处的土体性质差异较大，含石量、土石种类的不同使得即使相同剪切波速情况下也会有不同的压实系数，此时仅仅依靠二者简单的相关关系评价地基压实系数就会有误差<sup>[6]</sup>。而剪切波速与压实系数之间确实存在一定的相关性，不过仅仅是通过简单建立线性关系模型的方法并不适用，还需要更多的土体参数信息以提高计算模型的准确性。

一般而言，深填方基础的施工工艺是先进行分层碾压，待填方至设计标高后再进行强夯施工，进一步提高地基承载力。在分层碾压施工过程中，可以通过各类密度检测方法评价压实质量，如灌水法、灌砂法、核子密度仪法等，均可以取得较为理想的效果。基于上述工艺情况，以及地基土波速与压实质量的相关性。在合理利用分层碾压阶段的测试数据基础上，文章提出结合动态变形模量测试数据和地基波速数据的压实系数计算方法，具体步骤如下：

(1) 在分层回填阶段，分别开展动态变形模量 ( $E_{vd}$ ) 测试试验和密度 ( $\rho$ ) 试验，并记录每个点位的GPS位置信息，随后建立此类土  $E_{vd}$  与  $\rho$  的相关关系式，记为  $\rho = f(E_{vd})$ ，大量研究表明二者具备极强的相关性，具体相关关系式建立方法在此不进行详述。

(2) 分层回填结束后，强夯开始前先进行一次场地波速测试，测点选取为步骤(1)中测点的正上方，可以通过各种物探手段获取场地不同测点、不同深度范围内的剪切波速和压缩波速，分别记为  $v_{s1}$  和  $v_{p1}$ ；强夯

结束后，再次进行场地波速测试，与强夯前测点位置相同，测试得到的剪切波速和压缩波速分别记为 $v_{s2}$ 和 $v_{p2}$ 。

(3) 根据《多道瞬态面波勘察技术规程》<sup>[7]</sup>中提供的公式：

$$E_d = 2(1 + \mu) \rho v_s^2 \quad (1)$$

衍生得到公式：

$$E_{vd} = A \rho v_s^2 / C \quad (2)$$

式中： $E_d$ 表示土体的动弹性模量， $\mu$ 表示土体的泊松比， $\rho$ 表示土体的湿密度， $v_s$ 表示土体的剪切波速， $E_{vd}$ 表示土体的动态变形模量， $A$ 表示与土体泊松比相关的系数， $C$ 表示与土体类别相关的系数，获取公式(2)的具体推到过程见后文。

(4) 根据强夯前测试得到的剪切波速 $v_{s1}$ 与压缩波速 $v_{p1}$ ，根据以下公式计算强夯前待计算压实系数点位泊松比 $\mu_1$ ：

$$\mu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (3)$$

(5) 由 $\mu_1$ 根据下式计算得到系数 $A_1$ ，系数 $A_1$ 的计算公式及推导过程见后文。随后结合第一步中测试得到的剪切波速信息 $v_{s1}$ 、湿密度 $\rho_1$ 、动态变形模量 $E_{vd1}$ 以及公式(2)，反算得到系数 $C$ ：

$$A = \frac{2(1 - 2\mu^2)(1 + \mu)}{(1 - \mu)} \quad (4)$$

(6) 结合强夯测试后的剪切波速与压缩波速，根据公式(3)计算强夯后待测点位的泊松比 $\mu_2$ ，并由 $\mu_2$ 再根据公式(4)计算得到对应的系数 $A_2$ 。对于同类别土体来说，压实前后土体种类未发生改变，系数 $C$ 可以认为是不变的量，因此就有了如下关系式：

$$E_{vd2} = A_2 \rho_2 v_{s2}^2 / C \quad (5)$$

此时，式中 $A_2$ 、 $C$ 、 $v_{s2}$ 均为已知量；

(7) 根据第(1)步中建立的 $\rho = f(E_{vd})$ 关系式，带入公式(5)中就可以强夯后的点位湿密度 $\rho_2$ 。对于通常情况来说，土体深层的含水率在短时间内变化较小，可以认为是定值。由此则可计算得到强夯后土体的干密度 $\rho_d$ 。此时再根据分层碾压检测过程中的最大干密度信息，二者做比计算得到相应测点的压实系数。基于上述过程，就可以实现对深填方地基强夯后压实系数的快速无损检测。

对于公式(4)的推导过程如下：

变形模量与压缩模量间关系可以用公式(6)<sup>[8]</sup>表达：

$$E_0 = \frac{1 - 2\mu^2}{1 - \mu} E_s \quad (6)$$

式中 $E_0$ 表示变形模量， $E_s$ 表示压缩模量。

而弹性模量与压缩模量之间同样存在一定的关系式，贾堤<sup>[9]</sup>、李圃林<sup>[10]</sup>等人的研究指出，弹性模量一般为压缩模量的数倍，该倍数只和土体类别相关，也就是前文定义的系数 $C$ 。因此有公式(7)：

$$E = CE_s \quad (7)$$

式中 $E$ 表示弹性模量。

相应的对于动力响应下的动弹性模量 $E_{vd}$ 与动态压缩模量 $E_s$ 之间也可以用类似的关系式近似表达。将公式(6)和(7)的动力学响应参数关系式做比，将其中的压缩模量项消去，即可得到动态变形模量与动弹性模量之间的相关关系式：

$$E_d = C \frac{1 - \mu}{1 - 2\mu^2} E_{vd} \quad (8)$$

将式(8)带入式(1)中，即得到：

$$E_{vd} = \frac{2(1 - 2\mu^2)(1 + \mu)}{C(1 - \mu)} \rho v_s^2 \quad (9)$$

用系数 $A$ 替代泊松比计算项，也就是公式(10)，把 $A$ 带回公式(9)，就最终推导得到公式(2)的形式。

$$A = \frac{2(1 - 2\mu^2)(1 + \mu)}{(1 - \mu)} \quad (10)$$

## 二、试验方案

为了验证上述理论的适用性，对某工程中的土石混合料填方工程进行上述步骤实践。填方土体为中风化板岩土石混合填料，填方深度6m。结合分层碾压阶段的密度数据以及强夯前后的波速信息，对强夯后的湿密度、干密度进行计算，并通过钻孔取样的方式进行验证。表1~表3所示为试夯1区强夯前后的密度及波速信息。

由表中数据可知，基于实测波速数据及部分条件假定，最终推算湿密度在不同深度点位与钻孔取样实测值相对误差均小于2.5%，干密度相对误差小于4%。表明该方法从理论层面到实际应用角度均具备一定的可行性。

表1 试夯1区强夯前密度及波速数据

点位	深度 (m)	$\rho_1$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\rho_{d1}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$v_{s1}$ (m/s)	$\mu_1$	$E_{vd1}$ (MPa)
1	0-1	2.09	16.35	1.80	235	0.37	23.5
2	1-2	2.06	13.65	1.81	235	0.37	22.4
3	2-3	2.08	12.84	1.84	240	0.39	25.6
4	3-4	2.08	16.20	1.79	240	0.39	24.8
5	4-5	2.03	14.35	1.78	265	0.35	21.9
6	5-6	2.07	16.70	1.77	265	0.35	20.5

注: w表示含水率;  $\rho_d$ 表示干密度。

表2 试夯1区强夯后密度及波速数据

点位	深度 (m)	$\rho_2$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\rho_{d2}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$v_{s2}$ (m/s)	$\mu_2$
1	0-1	2.17	14.78	1.89	350	0.31
2	1-2	2.15	11.80	1.92	350	0.31
3	2-3	2.16	15.90	1.86	342	0.33
4	3-4	2.14	14.50	1.87	342	0.33
5	4-5	2.13	12.30	1.90	362	0.30
6	5-6	2.12	16.24	1.82	362	0.30

表3 根据本文计算方法推算得到的密度及压实系数信息

点位	$A_1$	$A_2$	C	$\rho_2$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$\rho_{d2}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$E_{vd2}$ (MPa)	RE ( $\rho_2$ )	RE ( $\rho_{d2}$ )
1	3.16	3.07	15.52	2.18	16.35	1.91	52.82	0.45%	0.85%
2	3.16	3.07	16.05	2.18	13.65	1.92	51.13	1.39%	0.10%
3	3.17	3.11	14.84	2.18	12.84	1.93	53.54	0.94%	3.89%
4	3.17	3.11	15.31	2.18	16.20	1.88	51.78	1.96%	0.41%
5	3.14	3.05	20.44	2.17	14.35	1.90	42.60	2.08%	0.08%
6	3.14	3.05	21.73	2.17	16.70	1.86	40.04	2.50%	2.31%

注: RE表示相对误差。

### 三、结论

本文结合深填方地基施工工艺特点以及地基弹性波和压实质量间的相关性关系,提出一种基于地基波速和动态变形模量数据的深填方地基压实质量评价方法,并给出方法的理论推倒过程。最后结合一工程实例,验证了本文所提方法的有效性和适用性。

### 参考文献

[1]GB 50021-2001.岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.

[2]GB 51254-2017.高填方地基技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[3]JGJ 340-2015.建筑地基检测技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[4]张献民,吕耀志,董倩,张宇辉.基于弹性波理论的土石混填地基压实质量评价研究[J].岩土工程学报,2015,(11):2051-2057.

[5]张献民,庄旭瑞,张宇辉,邱鹏炼.含水量对土

石混合介质剪切波传播速度的影响分析[J].公路交通科技,2010,(12):16-20

[6]张宇辉.机场高填方土石混填地基表征压实度剪切波分析理论研究[D].南京航空航天大学,2011

[7]JGJ/T 143-2017.多道瞬态面波勘察技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[8]李广信、张丙印、于玉贞.土力学(第二版)[M].北京:清华大学出版社,2013

[9]贾堤,石峰,郑刚,等.深基坑工程数值模拟土体弹性模量取值的探讨[J].岩土工程学报,2008(S1):155-158.

[10]李圃林.土体弹性模量在基坑工程有限元计算中的应用研究[J].绿色科技,2014(10):237-239.

作者简介:金培阳(1989-),男,河南信阳人,硕士研究生,工程师,主要从事岩土工程检测与监测工作。