

粉土动弹性模量与压实度关系研究^{*}

罗登贵^{1,2)} 林松^{1,2)}

(1)中国地震局地震研究所(地震预警湖北省重点实验室),武汉 430071
(2)武汉地震工程研究院,武汉 430071

摘 要 提出用有效的纵横波速度来获取动弹性模量,并用动弹性模量衡量软土路基的密实性。

关键词 粉土;路基;弹性模量;干密度;波速

中图分类号:TU18

文献标识码:A

STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN COMPACTION DEGREE AND DYNAMIC ELASTIC MODULUS OF SILTY SOIL

Luo Denggui^{1,2)} and Lin Song^{1,2)}

(1)Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071
(2)Wuhan Institute of Earthquake Engineering, Wuhan 430071

Abstract This paper tries to use the effective vertical and horizontal velocity to obtain the dynamic elastic modulus, and then we can use the dynamic elastic modulus to measure the soft subgrade compactedness.

Key words: silty soil; subgrade; elastic modulus; dry density; wave velocity

1 引言

目前高速公路发展迅速,在粉土地区修建高速公路时,由于粉土以粉粒含量为主,粒径较均匀,干燥时呈粉状,只有在一定含水量条件下才能成型,水稳性差,采用常规方法往往难以压实,其 CBR 值也不能满足设计、施工规范所规定的要求。由于粉土的特殊性质,很难通过实施获取有效的最大干密度和最佳含水量,因此,如何用简单有效的方法来衡量软路基的密实度是重要的研究课题。理论研究表明,动弹性模量与粉土压实度存在相关关系。由此本文将利用浅层地震反射获取的纵横波速度,研究动弹性模量与粉土压实度的关系。

2 基本原理

理论研究表明,动弹性模量越高,内部致密度越

高^[1-3],其纵横波速度也越高。反之亦然。因此,可用动弹性模量来表征粉土的密实度。然而,动弹性模量的获取必须要根据有效的纵横波速度 V_p 及 V_s 来计算。

根据弹性波理论,固体的弹性参数与波速的关系为:

$$\text{纵波速度 } V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{1-v}{(1+v)(1-2v)}} \quad (1)$$

$$\text{横波速度 } V_s = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{1}{2(1+v)}} \quad (2)$$

联立解式(1)和(2)得泊松比为:

$$v = \frac{\frac{V_p^2}{2} - V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (3)$$

联立式(1)~(3),动弹性模量为:

* 收稿日期:2012-08-02

基金项目:交通运输行业联合科技攻关计划:淮北地区粉性土路基设计施工技术研究

作者简介:罗登贵,男,1970年生,高级工程师,主要研究方向为工程地震、工程物探. E-mail: ldg725@yahoo.com.cn

$$E_d=\frac{\rho(3V_p^2-4V_s^2)}{\frac{V_p^2}{V_s^2}-1}$$

(4)

式中, E_d 为动弹性模量, ν 为泊松比, ρ 为粉土的密度, V_p 为纵波波速, V_s 为横波波速。

路基的压实度可表示为^[4]:

$$P=\frac{\rho_d}{\rho_{\max}}$$

(5)

式中 P 为压实度, ρ_d 为路基粉土干密度, ρ_{\max} 为路基粉土最大干密度。

3 纵横波速度的获取

试验地点为某在建高速公路,试验范围 10×20 m,分 3 个靶区进行试验,靶区内的路基完全由粉土组成。

为获取可靠的纵横波速度,在所建立的 3 个靶区范围内进行了纵横波速度的采集;试验所选用仪器为美国所生产的 GEOMETRICS SmartSeis SE 高分辨率地震仪以及三分量检波器,设计观测系统如图 1 所示。图中 S_1 为激发点, S_2 为检波点(分别采用纵横波检波器或者三分量检波器进行接收),依次向前平移,直到 S_n 为激发点, S_{n+1} 为检波点,覆盖整条测线为止。 X_0 为偏移距,根据路基检测深度而定, X_0 为道间距,一般选择一道接收。由于所选路基厚度约为 30 cm,经过试验,道间距 X_0 选择为 1 m。

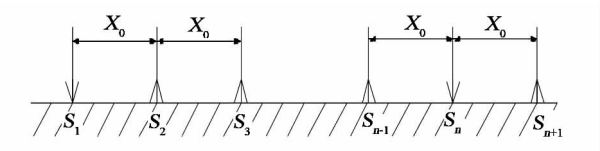


图 1 观测系统布设示意图
Fig. 1 Sketch of observation system

4 资料处理及结果分析

根据实测纵横波速度,利用

$$E_d=\frac{\rho(3V_p^2-4V_s^2)}{\frac{V_p^2}{V_s^2}-1}$$

计算出动弹性模量^[5]。

利用

$$\rho_d=\frac{\rho}{1+0.01\omega}$$

计算出路基的干密度^[6]。

利用计算出的数据建立干密度与动弹模量的关系曲线:

1) 对所建立的三个靶区分别在 90 区间以下、93

区间、94 区间、95 区间、96 区间测试密度、含水量、动弹模量。经过测试统计得到的各参数的平均值如表 1 ~ 3 所示。

2) 对表 1 ~ 3 以动弹模量为横坐标,干密度为纵坐标绘制动弹模量与干密度的散点图,利用回归分析法建立干密度和动弹模量的关系曲线如图 2 ~ 4 所示。

根据图 2 ~ 4 的线性拟合可分别得到近似关系式为: $y = 0.0027x + 0.2829$ 、 $y = 0.0028x + 0.2047$ 、 $y = 0.0025x + 0.3744$,式中: y 代表平均干密度, x 代表平均动弹性模量。三个靶区的试验结果一致表明,干密度与动弹性模量为线性关系。三个关系式取平均值可得经验公式: $y = 0.00267x + 0.2882$ 。

根据压实度和平均最大干密度的关系,按照 $y = 0.00267x + 0.2882$ 反算出弹模量值(表 4)。

表 1 1 号靶区各区间参数平均值

Tab. 1 Average parameters of each interval zone in No. 1 target

区间	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	湿密度 (g/cm ³)	平均干密度 (g/cm ³)	最大干密度 (g/cm ³)	动弹模量 (MPa)
90 以下	505.597 8	311.531 6	1.796 945	1.347 854	1.587 55	416.457 1
90	497.110 4	309.690 0	1.693 837	1.439 729	1.583 95	438.182 0
93	496.950 1	323.867 1	1.822 250	1.551 514	1.664 32	455.680 6
94	525.946 4	328.928 5	1.851 284	1.576 917	1.667 85	477.262 1
95	567.914 8	318.608 7	1.892 463	1.589 468	1.673 21	490.829 0
96	619.163 4	321.557 9	1.939 780	1.652 389	1.669 41	527.639 0

表 2 2 号靶区各区间参数平均值

Tab. 2 Average parameters of each interval zone in No. 2 target

区间	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	湿密度 (g/cm ³)	平均干密度 (g/cm ³)	最大干密度 (g/cm ³)	动弹模量 (MPa)
90 以下	549.523	335.262 4	1.594 698	1.413 782	1.597 55	431.457 5
90	562.953 7	387.882 1	1.363 757	1.435 519	1.582 95	439.558 4
93	590.435 2	307.692 3	1.867 714	1.556 941	1.664 89	464.550 4
94	602.232 6	338.357 1	1.655 591	1.567 921	1.666 85	481.194 8
95	545.297	328.576 3	1.871 504	1.598 913	1.674 44	490.973 6
96	553.530 9	330.626 6	1.924 794	1.643 523	1.667 62	514.516 1

表 3 3 号靶区各区间参数平均值

Tab. 3 Average parameters of each interval zone in No. 3 target

区间	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	湿密度 (g/cm ³)	平均干密度 (g/cm ³)	最大干密度 (g/cm ³)	动弹模量 (MPa)
90 以下	492.275 6	318.123 5	1.785 311	1.357 854	1.567 55	412.474 6
90	474.610 3	299.753 8	1.751 134	1.437 451	1.586 95	438.182 0
93	596.022 1	301.517 1	1.907 335	1.551 514	1.658 74	460.563 3
94	617.845 7	347.632 6	1.588 404	1.576 917	1.669 68	486.949 7
95	552.261 9	338.610 1	1.789 025	1.592 312	1.666 53	491.807 2
96	561.880 7	331.000 6	1.962 253	1.643 841	1.679 54	530.702 8

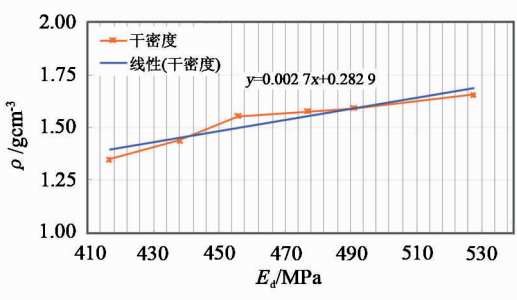


图 2 1 号靶区 Ed-干密度曲线

Fig. 2 Dry density curve of No. 1 target area

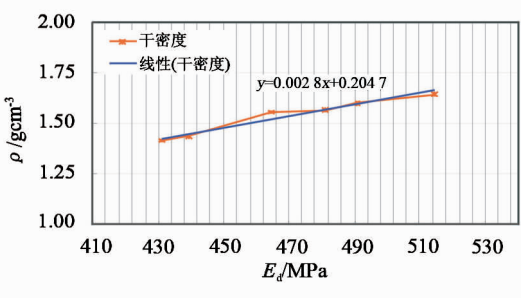


图 3 2 号靶区 Ed-干密度曲线

Fig. 3 Dry density curve of No. 2 target area

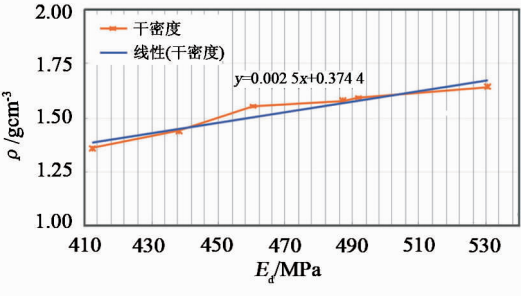


图 4 3 号靶区 Ed-干密度曲线

Fig. 4 Dry density curve of No. 3 target area

表 4 各靶区最小动弹模量值 (Ed0) 反算结果

Tab. 4 Backward-calculation results of minional hynamic elastic modulus Ed0 of each target

1 号靶区		2 号靶区		3 号靶区	
平均 干密度	动弹性 模量	平均 干密度	动弹性 模量	平均 干密度	动弹性 模量
1.347 854	396.874 2	1.4137 82	421.566 3	1.357 854	400.619 5
1.439 729	431.284 3	1.435 519	429.707 5	1.437 451	430.431 1
1.551 514	473.151 3	1.556 941	475.183 9	1.551 514	473.151 3
1.576 917	482.665 5	1.567 921	479.296 3	1.576 917	482.665 5
1.589 468	487.366 3	1.598 913	490.903 7	1.592 312	488.431 5
1.652 389	510.932 2	1.643 523	507.611 6	1.643 841	507.730 7

实验发现,最小动弹模量值 (Ed0) 越大,粉土的压实度越高,由此可近视地用各压实度区的最小动

弹模量值 (Ed0) 作为粉土压实度的控制指标,即动弹弹性模量小于 431 MPa 的判定粉土的压实度小于 90,动弹弹性模量值为 474 ~ 482 MPa 的判定为 93,动弹弹性模量值为 482 ~ 489 MPa 的判定为 94,动弹弹性模量值为 489 ~ 508 MPa 的判定为 95,当动弹弹性模量大于等于 508 MPa 时,判定粉土的压实度为 96 (表 5)。

表 5 各压实度区的小动弹模量取值范围

Tab. 5 Range of elastic modulus of each compaction zone

压实度	90 以下	93	94	95	96
Ed0 (Mpa)	< 431	474 ~ 482	482 ~ 489	489 ~ 508	≥ 508

5 结论

从理论上提出了用动弹弹性模量衡量来粉土的压实度,并通过实验建立了粉土区动弹模量与压实度的关系,划出了粉土各区压实度相应的动弹弹性模量范围,解决了击实试验很难取得一个有效的最大干密度和最佳含水量等难题。

参 考 文 献

1 孙丛涛,等. 混凝土动弹弹性模量与超声声速及抗压强度的关系研究[J]. 混凝土,2004,246(4):14-16. (Sun Congtao,et al. Study on relation between dynamic modulus of elasticity and velocity of ultrasonic sound and compressive strength for concrete[J]. Concrete, 2004,246(4):14-16)

2 罗骐先. 用纵波超声换能器测量混凝土表面波速和动弹弹性模量[J]. 水利水运科学研究,1996,21(3):264-269. (Luo Qixian. Compressional wave ultrasonic transducer to measure the concrete surface wave velocity and dynamic elastic modulus[J]. Hydraulic Research, 1996,21(3):264-269)

3 Bungey J H. The testing of concrete in structure[M]. Blackie, Glasgow, 1989.

4 BS 1881:Part 209:1990. Testing concrete. Recommendation for the measurement of dynamic modulus of elasticity[S].

5 BS 1881:Part 203:1086. Testing concrete. Recommendation for the measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete[S].

6 张超,等. 路基路面试验检测技术[M]. 北京:人民交通出版社,2004. (Zhang Chao,et al. Subgrade and pavement test for detection technology [M]. Beijing: Communications Press,2004)