

淮北平原典型地基土动态变形模量特征及 与承载力相关关系研究

戴张俊, 余 飞, 陈善雄

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对淮北平原新近沉积层土质变化大、普遍发育钙质结核等地质特征, 依托在建高速公路开展大量的动态平板载荷试验, 统计分析不同土体动态变形模量 E_{vd} 的值域范围和变化规律, 探讨淮北平原不同地质区域 E_{vd} 的分布特征。在此基础上, 通过静力触探、螺旋板载荷和平板载荷对比试验, 建立动态变形模量 E_{vd} 与比贯入阻力、地基承载力的相关关系式。研究表明, 动态平板载荷试验作为一种便捷快速的原位检测方法, 测试值 E_{vd} 能很好地反映原地基土体力学特性和变化规律, 与比贯入阻力 p_s 值、地基承载力具有较好的相关性, 可在高速公路工程中作为地基承载力测定指标加以推广应用。

关键词: 土力学; 动态平板载荷试验; 动态变形模量; 地基承载力; 相关关系

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)增1-2723-07

RESEARCH ON CHARACTERISTICS OF DYNAMIC DEFORMATION MODULUS AND ITS CORRELATION WITH BEARING CAPACITY FOR TYPICAL SOIL IN HUAIBEI PLAIN

DAI Zhangjun, YU Fei, CHEN Shanxiong

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: According to geological characteristics of recently sedimentary layer in Huaibei plain, such as existence of different soil and calcareous concretions, a large number of dynamic plate loading tests are carried out relying on highways under construction. The range and variation of dynamic deformation modulus E_{vd} are analyzed for different soils, and distribution characteristics of E_{vd} are discussed for different geological area in Huaibei plain. On this basis, relationships between the E_{vd} and penetration resistance, bearing capacity of foundation are established through static cone penetration tests, screw plate tests and plate loading tests. Studies show that, dynamic plate loading test is a fast and convenient in situ test, and mechanics characteristics and regularity of foundation soil can be reflected well by E_{vd} , which has good relativity with penetration resistance of p_s value and bearing capacity of the foundation. E_{vd} can be used in highway engineering as a foundation bearing capacity determination index.

Key words: soil mechanics; dynamic plate loading test; dynamic deformation modulus; bearing capacity of foundation; correlation

1 引言

由于近代黄河南泛和沿淮河的泛滥淤积, 淮北

平原新近沉积地层以第四系黄(淮)泛滥沉积物为主。沿河洼地和近河低地、坳沟等地段广泛分布粉土和淤泥质土, 河间洼地中主要为洼地相和湖沼相黏土沉积或薄层黏土与砂土的互层, 河间阶地低平

收稿日期: 2012-04-15; **修回日期:** 2012-05-15

作者简介: 戴张俊(1986-), 男, 2009年毕业于中山大学地球信息科学与技术专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。

E-mail: daizj0078@163.com

原区普遍发育河湖相钙质结核土^[1-2]。新近沉积物多以粉砂-含砂粉土-粉土-粉质黏土呈渐变接触关系的过渡形态出现,河流多次泛滥和淤积,造成这种接触关系反复出现,使得地质土具有显著的成层性和不均匀性^[3]。而钙质结核是黄泛区黄土母质中的碳酸钙经淋溶淀积作用形成,其工程性质既不同于黏性土又有别于碎石土,具有显著的非均匀性特点和独特的工程地质性质^[4-5]。这些共同形成了现今黄淮特殊的地质单元。

由于淮北平原地质和土质条件的复杂性和变异性,在高速公路等工程建设中,常遇到如何简便、快速、准确的确定复杂地基土承载力的难题,因此,亟待寻找一种便捷可靠的原位测试技术,以服务于该地区的基础工程建设。

动态平板载荷试验操作便捷,数据稳定。目前,动态变形模量 E_{vd} 作为路基填土质量的强度指标之一^[6-7],已广泛应用于铁路路基的设计与施工中^[8-10],动态变形模量 E_{vd} 标准已成为路基压实质量控制标准的发展方向^[11-14]。但是,我国现今还缺乏针对高速公路工程的相关研究,尚未制定相关规程,而淮北平原地区开展的相关试验也较少,动态变形模量 E_{vd} 的数值特征及其与地基承载力的相关关系还未得到系统的研究。

本文以淮北平原在建的徐州—明光(徐明)、泗洪—许昌(泗许)高速公路为工程依托,广泛开展了动态平板载荷试验,对比静力触探试验、螺旋板载荷试验、平板载荷试验结果,分析区域内典型地质条件下 E_{vd} 的数值特征和变化规律,探讨 E_{vd} 与地基承载力的相关关系,为淮北平原地区采用 E_{vd} 来确定浅层地基承载力提供了理论依据。

2 动态平板载荷试验原理及特点

动态平板载荷试验是一种能快速、方便、准确得到反映路基动荷载特性的承载力指标的方法^[15]。动态变形模量测试仪主要由加载装置、荷载板和沉降测定仪 3 部分组成。试验时,一定质量的落锤由固定高度自由落下,通过阻尼装置、承载板,对土体施加冲击荷载,使土体产生变形(即荷载板的沉降值),在假定冲击力恒定,泊松比 $\mu = 0.21$ 的情况下,根据弹性各向同性半空间体上圆形局部荷载的公式计算动态变形模量 E_{vd} ^[7-8]:

$$E_{vd} = 1.5r\sigma / s \quad (1)$$

式中:1.5 为承载板形状影响系数; r 为承载板的半径(mm); σ 为路基最大动应力(MPa),是在刚性基础上,在最大冲击力和冲击时间一定的情况下标定而得; s 为承载板的沉降值(mm)。

从理论上说,路基碾压越密实,沉降值越小,路基的 E_{vd} 值越高;反之,路基的 E_{vd} 值越低。对于淮北平原而言,采用动态平板载荷试验确定地基承载力,主要优势有:(1) 测试仪器体积小,操作方便,可以人工开挖小型探槽对不同深度的土层进行检测;(2) E_{vd} 测试值稳定,能较好地反映地基土体力学性质。

本文采用德国 LFG-K 型动态变形模量 E_{vd} 测试仪(见图 1)进行动态平板载荷试验,落锤总质量为 10 kg,最大冲击力为 7.07 kN,荷载板直径为 300 mm。试验严格按照相关规程^[16]进行。



图 1 LFG-K 型动态变形模量测试仪

Fig.1 LFG-K dynamic deformation modulus tester

3 动态变形模量 E_{vd} 值域范围及分布特征

淮北平原浅表层黏性土主要为 Q_4^{al} 与 Q_3^{al} 黏土、粉质黏土(见图 2)。 Q_4^{al} 黏性土埋深较浅,基本处于可塑-硬塑状态,埋深 3.0 m 以内的粉质黏土多含钙质结核,超过 3.0 m 的黏性土主要含铁锰质氧化物,少见钙质结核, Q_3^{al} 黏性土基本处于硬塑-坚硬状态。黏性土 E_{vd} 值域范围及分布如图 3 所示。

由图 3 可见, E_{vd} 值域范围较大,为 0~50 MPa, E_{vd} 值分布集中,88%的 $E_{vd} = 10 \sim 30$ MPa,尤以 10~20 MPa 最为广泛。由于受土层中钙质结核不均匀分布等因素的影响, E_{vd} 少量数值分布于 30~50 MPa 或更高的值域区间。因此,黏土、粉质黏土层动态



图 2 黏土层和粉质黏土层剖面图

Fig.2 Profile of clay layer and silty clay layer

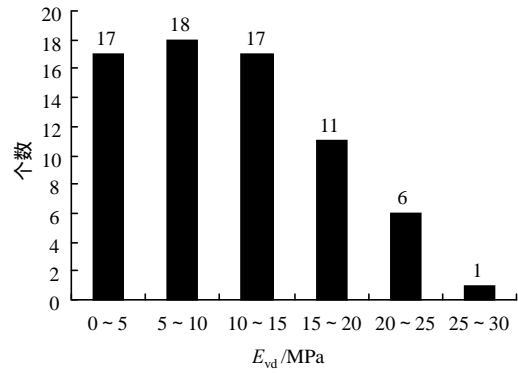


图 5 粉土 E_{vd} 值域范围及分布特征

Fig.5 Range and distribution of E_{vd} values in silt

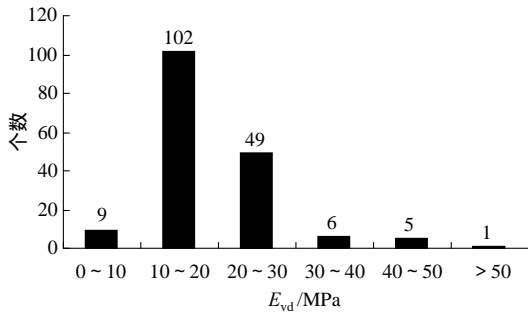


图 3 黏性土 E_{vd} 值域范围及分布特征

Fig.3 Range and distribution of E_{vd} values in clayey soil

变形模量 E_{vd} 值较为稳定，少量数据的离散性反映出不同区域钙质结核含量的差异性。

淮北平原粉土层为全新统 Q_4^{al} 粉土(见图 4)，其埋深较浅，一般处于稍密~中密状态，粉土层 E_{vd} 值域范围及分布如图 5 所示。



图 4 粉土层剖面图

Fig.4 Profile of silty layer

由图 5 可见，粉土层的动态变形模量较小，值域范围较窄，均分布为 0~30 MPa。其中，0~15 MPa 为粉土层 E_{vd} 值的主要分布区域，占到 74%，且在 0~5，5~10，10~15 MPa 三个区间内大体均等分布，而在 15~20，20~25，25~30 MPa 上的分布

递减，极个别值大于 25 MPa。粉土层动态变形模量 E_{vd} 值的差异反映出不同区域粉土的密实度不同，密实度越高， E_{vd} 值越大，密实度是影响新近沉积粉土 E_{vd} 值的主要因素。

淮北平原粉砂层(见图 6)为全新统 Q_4^{al} 粉砂与上更新统 Q_3^{al} 粉砂、细砂，埋深相对较深， Q_4^{al} 新近沉积粉砂一般处于 3.0 m 以下，为稍密~中密状态， Q_3^{al} 粉砂层埋深更大，多处于中密~密实状态。粉砂层动态变形模量 E_{vd} 值域范围宽，一般为 10~50 MPa， E_{vd} 数值较不稳定，差异性较大，于 10~40 MPa 均有大量分布，而密实程度仍是影响新近沉积粉砂层动态变形模量 E_{vd} 值的主要因素。



图 6 粉砂层钻孔取样图

Fig.6 Silty sand layer by drilling and sampling

依托徐明高速安徽段于 81 个测试点进行了 433 组动态平板载荷试验，动态变形模量 E_{vd} 平均值为 25.18 MPa，标准差为 19.93，变异系数为 0.791 6，动态变形模量 E_{vd} 区域分布特征如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，淮北平原不同地区 E_{vd} 值差异明显，反映出地质条件的差异性。灵璧县大庙乡以北的区域地表广泛被粉土所覆盖，平均厚度为

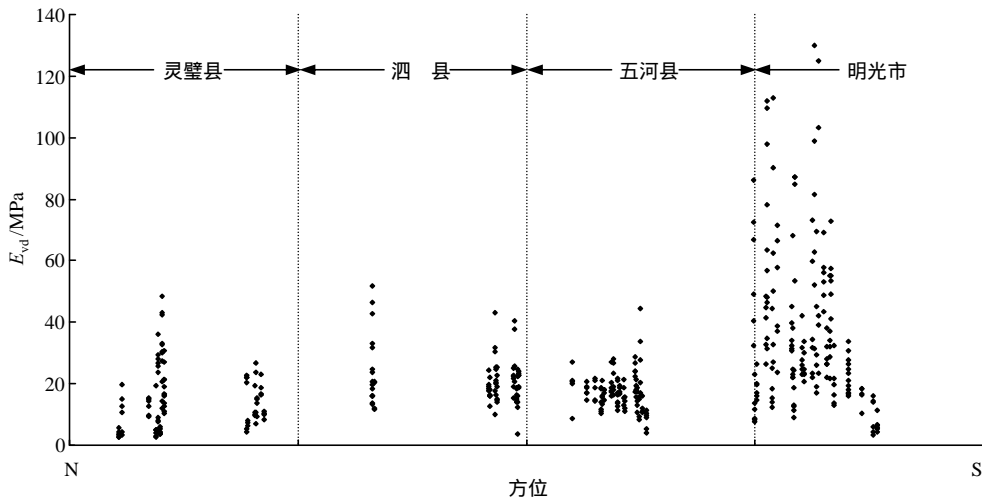


图 7 动态变形模量 E_{vd} 区域分布特征示意图

Fig.7 Sketch of regional distribution characteristics of dynamic deformation modulus E_{vd}

6 m 左右, E_{vd} 测试值较低, 约为 20 MPa 以下; 灵璧县大庙乡以南至泗县段地表多为 2~3 m 的黏土, E_{vd} 值为 16~25 MPa, 下卧厚度较大的粉砂、细砂层, E_{vd} 值较高, 为 25~50 MPa; 泗县至五河段浅表层主要为黏土和粉质黏土所覆盖, 厚度较大, E_{vd} 值较为稳定, 集中在 12~25 MPa; 五河至明光段分别有软土路基段和基岩出露段, 砂岩出露区域 E_{vd} 值较高且存在一定的离散性, 部分值高达 95~130 MPa, 平均值为 30~45 MPa。

因此, 动态变形模量 E_{vd} 的变化特征与淮北平原的地质条件、土质特征是统一的, 说明动态变形模量 E_{vd} 能够较好地反映出淮北平原各种典型地质体的地质特征与力学性能。

4 动态变形模量 E_{vd} 与比贯入阻力相关关系

动态变形模量测试仪的承载板直径为 30 cm, 测试结果影响深度约为承载板几何尺寸的 1.5~2.0 倍, 则考虑其影响深度为 40~60 cm, 因此, 将测试平面以下 40 cm 土层的静力触探比贯入阻力 p_s 值进行统计平均后, 再与 E_{vd} 测试值进行对比, 图 8 给出了淮北平原 Q_4^{al} 黏土层、 Q_4^{al} 粉质黏土层、 Q_4^{al} 粉土层和 Q_4^{al} 粉砂层的 E_{vd} 值与影响深度范围内平均 \bar{p}_s 值的相关关系。

从图 8 中可以看出, 对于淮北平原新近沉积层, 动态变形模量 E_{vd} 与影响深度范围内比贯入阻力 p_s 值总体有着较好的相关性, 采用线性回归方程进行

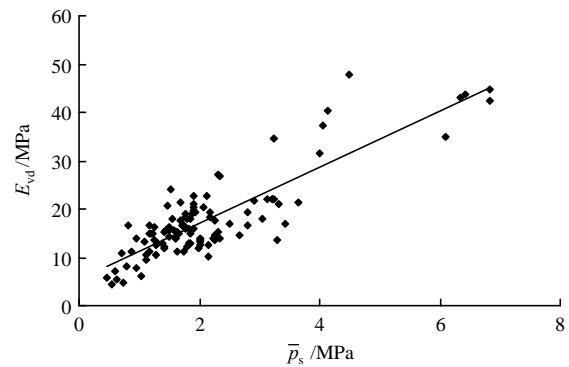


图 8 E_{vd} 值与影响深度内平均比贯入阻力相关关系

Fig.8 Correlation between E_{vd} value and average specific penetration resistance in depth affected

拟合, 相关系数 $R = 0.86$, 相关关系式为

$$E_{vd} = 5.789 8 \bar{p}_s + 5.373 5 (\bar{p}_s > 0.5) \quad (2)$$

式中: \bar{p}_s 为平均比贯入阻力值(MPa)。

上述分析表明, 动态平板载荷试验很好地反映了一定影响深度范围内土体的力学性能。式(2)是根据淮北平原典型地质单元的原位试验结果得到的, 具有一定的代表性, 可用于淮北平原地基动态变形模量和比贯入阻力的换算和检验。

另外, 从图 8 中也可以看出, 部分 E_{vd} 值表现出离散性特征, 这主要是由于淮北平原土层中钙质结核含量的差异性造成的。钙质结核含量不同的土层的 E_{vd} 测试值与比贯入阻力 p_s 值如表 1 所示, 可见钙质结核含量的提高可使 E_{vd} 测试值显著提高。此外, 由于仪器承载板面积有限, 以及钙质结核在土层中分布的非均匀性, E_{vd} 测试结果具有较明显的离散性。

表 1 含钙质结核土层 E_{vd} , p_s 值统计表

Table 1 Statistic table of E_{vd} value and p_s value in soil containing calcareous concretion

钙质结核含量/%	动态变形模量 E_{vd}/Pa	比贯入阻力 p_s 值/MPa	钙质结核含量/%	动态变形模量 E_{vd}/Pa	比贯入阻力 p_s 值/MPa
5	13.80	2.24	20	22.13	3.22
5	13.20	2.02	20	21.90	3.22
10	22.10	3.24	30	34.90	6.10
10	15.30	2.31	35	43.83	6.43
10	14.60	2.26	35	34.90	6.10
10	17.47	2.26	40	44.70	6.84
20	21.50	3.64	40	47.67	4.49

图 9 给出了各土层 E_{vd} , p_s 值与钙质结核含量关系。可以看出, E_{vd} 值随钙质结核含量的增大而增大, 采用线性回归方程进行拟合, 相关关系式为

$$E_{vd} = 0.918 8\bar{w} + 7.253 5 \quad (3)$$

式中: \bar{w} 为钙质结核平均含量(%). 相关系数 $R = 0.96$, 二者具有较好的相关性。因此, E_{vd} 值受钙质结核的影响表现出离散性的同时, 也体现出一定的规律性。式(3)表明可以通过土层中钙质结核的平均含量估算 E_{vd} 值。

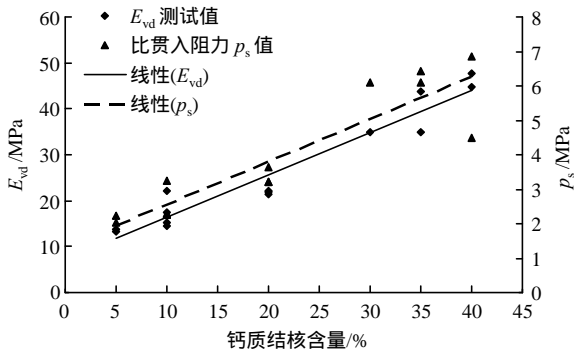


图 9 E_{vd} , p_s 值与钙质结核含量关系

Fig.9 Correlation between E_{vd} value, p_s value and the content of calcareous concretion

同时, 图 9 还对比贯入阻力与钙质结核含量进行了线性拟合, 可以看出, 比贯入阻力也随钙质结核含量的增大而增大, 且变化趋势与 E_{vd} 值随钙质结核含量的变化趋势基本相同, 曲线形态大体一致, 说明土层的力学性质与钙质结核的含量有关, 钙质结核含量越高, 土层工程性质越好, 承载力越高, 而且 E_{vd} 值与比贯入阻力一样, 均能较好地反映含钙质结核土层的力学性质及其变化特征。

5 动态变形模量 E_{vd} 与地基承载力相关关系

目前, 动态变形模量 E_{vd} 虽已作为路基质量控制的重要指标, 但由于地质条件的变异性, 其用于地基承载力的确定仍没有统一的理论公式, 通常通过各种原位试验来取得经验关系。为了建立淮北平原典型地基土 E_{vd} 值与地基承载力的相关关系, 在 E_{vd} 测试点周边同时进行了螺旋板载荷试验和平板载荷试验, 以确定地基承载力特征值。螺旋板载荷试验采用 WDL 型试验仪, 探头额定荷载为 1 500 kPa, 螺旋板面积为 200 cm²。平板载荷试验采用常规慢法, 载荷板面积为 0.5 m²。原位试验结果如表 2 所示。

表 2 动态变形模量 E_{vd} 与地基承载力特征值对比表

Table 2 Comparison table of E_{vd} and characteristic value of bearing capacity of foundation

地质类型	状态	动态变形模量 E_{vd}/MPa	地基承载力特征值 f_0/kPa	备注
Q ₄ ^{al} 黏土	可塑	19.45	150	-
	可塑	13.65	142	-
	可塑	22.10	240	含钙质结核
Q ₄ ^{al} 粉质黏土	可塑	14.00	133	-
	可塑	15.91	162	-
	可塑	13.83	181	含钙质结核
	可塑	13.01	177	含钙质结核
	硬塑	15.99	204	含钙质结核
	硬塑	15.39	190	含钙质结核
Q ₄ ^{al} 粉土	稍-中密	11.23	185	-
	稍密	6.60	130	-
	稍-中密	13.43	180	-
	稍密	11.93	160	-
	稍密	2.75	60	-
	稍密	7.31	100	-
	稍-中密	12.53	160	-
	稍密	3.79	70	-
Q ₄ ^{al} 粉砂	稍密	15.26	190	-
	稍密	15.58	220	-

E_{vd} 值和地基承载力特征值关系如图 10 所示, 从图中可以看出, 两者具有较好的相关性, 线性回归拟合相关系数 $R = 0.83$, 相关关系式为

$$f_0 = 7.810 8E_{vd} + 58.704 \quad (2.5 < E_{vd} < 50) \quad (4)$$

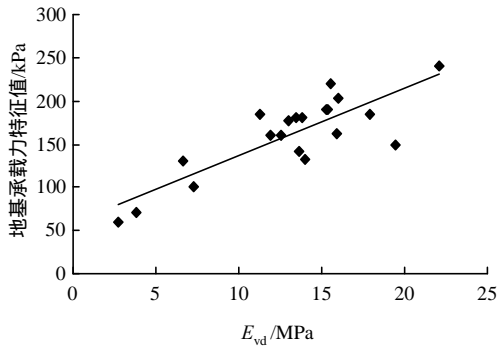


图 10 E_{vd} 与地基承载力特征值关系

Fig.10 Relationship between E_{vd} and characteristic value of bearing capacity of foundation

式(4)适用于淮北平原地区各种典型地基土层，包括黏土、粉质黏土、粉土、粉砂等($2.5 < E_{vd} < 50$)，因此，可以利用式(4)，根据 E_{vd} 值计算该地区细粒土及粉砂的地基承载力特征值，且公式同样适用于含钙质结核的黏性土层。对于细砂等粗粒土，由于试验场地及条件的限制，统计数据尚不充足，且当 $E_{vd} > 50$ 时，如风化岩出露区域，由于承载板面积的局限性与土颗粒大小的不均匀性，地基承载力变化范围较大，所以，式(4)可作为承载力范围估算的依据，其对于粗粒土的适用性还有待进一步研究。

另外，由于进行动态变形模量试验时，冲击荷载影响深度为 40 ~ 60 cm，所以，动态变形模量 E_{vd} 能很好地反映单一土层的力学性能，但对于成层地基而言，还需要考虑各土层承载力性能的组合效应和界面效应，结合其他原位测试方法进行地基承载力的综合确定。

表 3 给出了根据动态变形模量 E_{vd} 值域范围确定的淮北平原典型地基土承载力的范围。从表 3 中可以看出，淮北平原新近沉积层地基承载力平均值主要集中在 80 ~ 350 kPa 范围内。黏土与粉土的承载力相当，且普遍较低，粉质黏土中多含钙质结核，其地基承载力明显高于一般黏性土，粉砂层与含有钙质结核的粉质黏土承载力变化范围较大，而黏土与粉土的承载力相对稳定。此结果合理、准确，表明动态平板载荷试验具有较好的可靠性， E_{vd} 值能很好地反映各种典型地质体的承载力特征与力学性能，该试验可以作为淮北平原地区地基承载力测定的一种简便、快捷、直观的方法。

表 3 淮北平原各种典型土层承载力范围推荐表
Table 3 Table of recommended ranges for bearing capacity of typical soil in Huaibei plain

土质类型	动态变形模量 E_{vd} /MPa	地基承载力特征值 f_0 /kPa
Q_4^{al} 一般黏性土	5 ~ 15	95 ~ 175
Q_4^{pl} 粉质黏土 (含钙质结核)	15 ~ 30	175 ~ 290
Q_4^{cl} 粉土	3 ~ 15	80 ~ 175
Q_4^{sl} 粉砂	10 ~ 40	135 ~ 350

6 结 论

淮北平原新近沉积层土质条件多元化，空间变异性大，地基土力学性质复杂、承载力变化范围宽。本文通过大量开展动态平板载荷试验，研究了该地区典型地基土层 E_{vd} 值域特征和变化规律，及其与地基承载力相关关系，结果表明：

(1) E_{vd} 的变化特征与的地质条件、土质特征是统一的，其能够较好地反映出淮北平原各种典型地质体的地质特征与力学性能。

(2) 随着土颗粒粒径的增大， E_{vd} 的值域范围越来越大，黏性土 E_{vd} 值域范围最小，粉土较大，砂性土最大。

(3) E_{vd} 随比贯入阻力的增大而增大，二者均能较好地反映含钙质结核土层的力学性质及其变化特征，钙质结核的存在使黏性土层的 E_{vd} 值偏高。

(4) E_{vd} 与地基承载力线性相关，不同类型的地基土承载力特征显著，且相互之间具有较大的差异性。 E_{vd} 值能很好地反映淮北平原典型地基土的承载力特征，可作为高速公路工程中地基承载力测定指标。

参考文献(References)：

[1] 金 权. 安徽淮北平原第四系[M]. 北京：地质出版社，1990：1-170.(JIN Quan. Quaternary system of Huaibei plain in Anhui Province[M]. Beijing :Geological Publishing House ,1990 :1 - 170.(in Chinese))

[2] 余亚男, 余 飞, 戴张俊, 等. 淮北平原典型地质体成因规律及工程影响分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(5) : 1 001 - 1 006.(YU Yanan, YU Fei, DAI Zhangjun , et al. Study on the formation rule and engineering influence of typical geological unit in Huaibei plain[J]. Science Technology and Engineering , 2012, 12(5) : 1 001 - 1 006.(in Chinese))

- [3] 吴志海. 安徽淮北平原新近沉积粉土工程性质研究[硕士学位论文][D]. 合肥:合肥工业大学, 2006.(WU Zhihai. Study on the property of the newly-deposited silty soil in Huaibei plain, Anhui Province[M. S. Thesis][D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.(in Chinese))
- [4] 曹亚娟. 安徽淮北平原钙质结核土的分布及成因研究[硕士学位论文][D]. 合肥:合肥工业大学, 2009.(CAO Yajuan. Study on distributing and formation of the calcareous concretions soil in Huaibei plain, Anhui Province[M. S. Thesis][D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.(in Chinese))
- [5] 吴道祥, 曹亚娟, 钟轩民, 等. 安徽淮北平原钙质结核土分布及成因年代研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增 2): 434–439.(WU Daoxiang, CAO Yajuan, ZHONG Xuanmin, et al. Distribution, age and genesis of cohesive soil containing calcareous nodules in Huaibei plain of Anhui Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp.2): 434–439.(in Chinese))
- [6] 赵秀绍, 祝建农, 代裕清, 等. 既有铁路勘察评价与加固控制标准研究[J]. 铁道工程学报, 2011, (3): 11–15.(ZHAO Xiushao, ZHU Jiannong, DAI Yuqing, et al. Research on survey evaluation and reinforcement control standard for existing railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, (3): 11–15.(in Chinese))
- [7] 董秀文. E_{vd} 检测路基压实质量标准的试验研究[硕士学位论文][D]. 成都:西南交通大学, 2005.(DONG Xiuwen. Experimental study on the standard of compaction quality of subgrade by detecting of E_{vd} [M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [8] 黄大维, 杨有海, 赖国泉, 等. 高速铁路路基动态变形模量分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1 402–1 409.(HUANG Dawei, YANG Youhai, LAI Guoquan, et al. Analysis of dynamic deformation modulus for high-speed railway subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1 402–1 409.(in Chinese))
- [9] 高传伟, 郭宏昆. 高速铁路路基 A, B 料压实质量检测方法、标准的探讨[J]. 铁道工程学报, 2007, (增): 64–68.(GAO Chuanwei, GUO Hongkun. Discussion on the test method and standard for compaction quality of materials A and B for high-speed railway subgrade[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, (Supp.): 64–68.(in Chinese))
- [10] 杨有海, 赖国泉. 戈壁地区高速铁路路基填筑试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(3): 77–83.(YANG Youhai, LAI Guoquan. Research on filling test of high-speed railway subgrade in the Gobi desert[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(3): 77–83.(in Chinese))
- [11] 李怒放. 动态变形模量 E_{vd} 标准的应用与展望[J]. 铁道标准设计, 2003, (6): 37–40.(LI Nufang. Application and prospect of dynamic deformation modulus E_{vd} standard[J]. Railway Standard Design, 2003, (6): 37–40.(in Chinese))
- [12] 程远水. 路基压实参数相关关系及改良土控制指标的研究[硕士学位论文][D]. 北京:铁道科学研究院, 2007.(CHENG Yuanshui. Research of correlativity between subgrade compacting parameters and the control indexes to improved soil[M. S. Thesis][D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2007.(in Chinese))
- [13] 肖金凤, 康琳. DBM 型动态变形模量测试仪检测客运专线路基填筑质量方法研究[J]. 铁道工程学报, 2004, (增): 31–33.(XIAO Jinfeng, KANG Lin. New test method for subgrade construction quality of passenger dedicated line: DBM dynamic deformation modulus tester[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, (Supp.): 31–33.(in Chinese))
- [14] 赵文, 谢强, CHEN Yongping. 路基压实质量 E_{vd} 评价建议标准试验研究[J]. 铁道工程学报, 2009, (9): 9–13.(ZHAO Wen, XIE Qiang, CHEN Yongping. Experimental research on the proposed standard for subgrade compaction quality with E_{vd} evaluation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, (9): 9–13.(in Chinese))
- [15] 李怒放, 肖金凤, 李树峰. 动态平板载荷试验方法的研究与仪器的研制[J]. 铁道标准设计, 2002, (6): 7–8.(LI Nufang, XIAO Jinfeng, LI Shufeng. A study on dynamic plate load testing method and the development of testing device[J]. Railway Standard Design, 2002, (6): 7–8.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10102—2004 铁路工程土工试验规程[S]. 北京:中国铁道出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10102—2004 Railway engineering specification of soil test[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.(in Chinese))