

交通荷载作用下加筋道路机理分析

Principle analysis of reinforced pavement under automobile loading

张兴强¹, 闫澍旺¹, 邓卫东²

(1. 天津大学 建工学院岩土工程研究所, 天津 300072 2. 交通部重庆公路科学研究所, 重庆 400067)

摘 要 根据所提出的土工格栅与土动力相互作用分析模型, 编制了加筋土的动力有限元分析程序 G-D, 有限元分析结果与加州大学 UCLA 加筋挡土墙实测值一致, 同时利用编制的分析程序对在路面下铺设土工格栅的道路模型和不加筋道路模型进行动力响应对比分析, 研究在交通荷载作用下土工格栅的加筋效果, 揭示了土工格栅与土动力相互作用机理, 为实际工程提供理论依据。

关键词 加筋土; 土工格栅与土动力相互作用; 非线性弹簧-阻尼延迟器-质量块; 加筋机理

中图分类号 U 416; TU 472 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4548(2001)01-0094-05

作者简介 张兴强, 男, 1970 年生, 天津大学建筑工程学院岩土专业博士生。

ZHANG Xing-qiang¹, YAN Shu-wang¹, DENG Wei-dong²

(1. Institute of Geotechnical Engineering School of Construction Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China 2. Highway Scientific Research Institute of the Ministry of Communications, Chongqing 400067, China)

Abstract Based on the interface model of geogrid-soil dynamic interaction, a procedure, named G-D, is proposed for computation of the dynamic response of reinforced soil. The FE analysis results agree well with the observed data including acceleration-time response from the UCLA reinforced-soil retaining wall at the University of California. Finally, the dynamic response contrast analysis of the road model reinforced with geogrid and the unreinforced road model is studied in order to show the reinforcement effect under the automobile loadings, and illuminate the principle of geogrid-soil dynamic interaction. Then, theoretical background is provided for engineering design and construction.

Key words reinforced soil; soil-geogrid dynamic interaction; nonlinear spring-dashpot-mass; reinforcement principle

1 引言*

路基的不均匀沉降会使路面结构破坏和引起桥头跳车, 降低道路的使用性能。一般情况下我们认为路基沉降是由于土体固结变形引起的, 但是随着经济建设的发展, 车流量和载重量的增加, 交通荷载对路基路面的受力变形特性的影响越来越大。土工合成材料以其优良的性能和应用的简便性引起了工程界的广泛关注。Fannin 等^[1]通过现场试验研究表明土工格栅可以增强路面抗不均匀沉降的能力或改善土基的不均匀沉降变形特性。但目前对交通荷载作用下加筋道路的变形特性的研究才刚刚起步, 理论还很不成熟, 大大地制约了土工合成材料在土木工程中的应用。笔者通过对土工格栅与土动力相互作用机理进行了研究, 提出模拟土工格栅与土接触面变形特性的计算模型, 编制了相应的计算程序, 验证了分析程序的正确性。对在路面下铺设土工格栅的道路模型和不加筋道路模型进行动力响应对比分析, 研究在交通荷载作用下土工格栅的加筋机理和效果。

2 交通荷载和路基土模型

本文将单个汽车荷载作用模拟成半波正弦荷

载^[2]。根据我国现行的“沥青路面设计规范”轴载换算关系, 交通荷载模型的计算参数见表 1。

表 1 交通荷载模型参数

Table 1 Parameters of automobile loadings model

轴载	轮胎压力	车速	当量圆半径	荷载频率
100 kN	0.7 MPa	100 km/h	0.213 m	100 Hz

土体采用弹塑性本构关系, 屈服函数 f 采用 Mohr-Coulomb 屈服准则, 硬化规律采用应变强化模型, 流动准则采用基于 Drucker 公设的相关联流动规则。其中

$$f = \sigma_m \sin \varphi + \bar{\sigma} \cos \theta - \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \sin \varphi \sin \theta - c \cos \varphi \quad (1)$$

式中 $\sigma_m = J_1/3$; $\bar{\sigma} = \sqrt{J_2}$; $\theta = \frac{1}{3} \arcsin(-3\sqrt{3}J_3/2\sigma^3)$ 为 Lode 角, $-\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{6}$ 。 J_1' , J_2' , J_3' 分别为第一应力不变量, 第二应力不变量和第三应力不变量; c 为粘聚力; φ 为土体的内摩擦角。

3 接触面模型

反复荷载作用下土工格栅与土之间将发生相对位移, 从整体上来说是不连续的, 用有限元计算须设置接触面单元。本文将土工格栅与土之间的接触面内设想

由无数非线性弹簧、粘滞器、质量块相联系,即构成非线性弹簧-粘滞器单元模型。采用线性杆单元模拟土工格栅。

3.1 土工格栅纵肋、横肋与土动力相互作用的模拟

利用振动台试验^[3]得到加速度与接触面滑动位移之间的滞回曲线来计算土工格栅纵肋与土相互作用的剪切刚度和接触面的阻尼比。

$$K_e = F_m / S_a \tag{2}$$

式中 K_e 为接触面的等效剪切刚度; $F_m = MA_1 = W/gA_1$ 为通过接触面传递的最大剪力; A_1 为接触面传递的最大加速度; M 和 W 分别为接触面的质量和重量; S_a 为接触面滑动位移。

根据 Desai 等^[4]提出的刚度的概念:

$$K = \frac{F_m}{A_c S_a} \tag{3}$$

式中 A_c 为土工格栅纵肋与土的接触面积。则

$$K = \frac{WA_1}{A_c g S_a} = \frac{A_1 \sigma}{g S_a} \tag{4}$$

式中 σ 为作用在接触面上的正应力, K 为接触面的剪切刚度。

$$G_e = KH_e \tag{5}$$

式中 G_e 为纵肋与土相互作用的等效剪切模量; H_e 为接触面厚度。

根据接触面加速度与滑动位移滞回曲线,接触面阻尼比可以通过下式来确定:

$$\beta_h = A_1 / 4\pi A_2 \tag{6}$$

式中 A_1 为循环荷载每作用一次所消散的能量; A_2 为弹性应变能。

横肋上各点处的变位和受力特性是不同的,变位值的大小反映横肋抗挠刚度大小。为了确切描述可将横肋看成由许多结点组成,考虑到接触面的厚度效应,可以采用四结点单元来模拟每个结点上的力和变形关系。单元由两组沿法向和切向方向的非线性弹簧、粘滞器、质量块组成。弹簧的劲度系数分别为 k_n 和 k_{st} 。 k_n 与土体的模量有关, k_{st} 可根据横肋模拟锚定板试验确定。资料表明其应力应变关系曲线接近双曲线^[5],其切线剪切劲度系数为

$$k_{st} = (1 - \frac{R_b q}{\sigma_n N_q})^2 k_1 p_a (\frac{\sigma_n}{p_a})^n \tag{7}$$

式中 R_b 为破坏比; q 为支承阻力; N_q 为支承反力系数,可表示为

$$N_q = \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2}) \exp[(\frac{\pi}{2} + \varphi') \tan \varphi'] \tag{8}$$

其中 φ' 为土工格栅孔径内与土的摩擦角。那么土工格栅横肋与土接触面的剪切模量为

$$G_{he} = k_{st} H_e \tag{9}$$

3.2 土工格栅与土接触面变形模式的模拟

在动载作用下土工格栅与土之间的接触面存在着相对运动模式,一般情况下接触面有 4 种变形模式:粘结、错动、脱离、嵌入。本文假设接触面最初均以粘结形式存在,基于动力平衡方程,已知 t 时刻的 (σ_{nn}) 、 (τ) 、 (u_n) ,要求在 $t + \Delta t$ 时刻时的 $(\sigma_{nn})^{+\Delta t}$ 、 $(\tau)^{+\Delta t}$ 、 $(u_n)^{+\Delta t}$ 和 Δt 时刻内的增加量 $\Delta\sigma_{nn}$ 、 $\Delta\tau$ 、 Δu_n 。其中 u_n 为接触面平均正向相对位移; σ_{nn} 为接触面的正应力; τ 为接触面的剪应力。

$$(\sigma_{nn})^{+\Delta t} = \{(\sigma_{nn})^t + \Delta\sigma_{nn}\} \tag{10}$$

$$F_s = (\operatorname{sgn}[(\tau)^t + \Delta\tau]) - \{c_a + [(\sigma_{nn})^t + \Delta\sigma_{nn}] \tan \delta\} \tag{11}$$

式中 c_a 为接触面的粘聚力; δ 为接触面的摩擦角。

$$\operatorname{sgn} = \begin{cases} 1 & (\tau)^t + \Delta\tau > 0 \\ -1 & (\tau)^t + \Delta\tau < 0 \end{cases} \tag{12}$$

接触面的变形可以通过表 2 进行判断。

表 2 接触面变形模式

Table 2 Deformation mode of interface		
粘结/嵌入	错动	脱离
$(\sigma_{nn})^{+\Delta t} > 0$ 并且 $F_s < 0$	$(\sigma_{nn})^{+\Delta t} > 0$ 并且 $F_s \geq 0$	$(\sigma_{nn})^{+\Delta t} < 0$

基于以上接触面动力计算模型,编制了用于计算平面应变问题的弹塑性动力加筋有限元 G-D 程序。并与 Muthucumarasamy Yogendrakumar 等^[6]报道的加州大学加筋挡土墙(UCLA)承受随机激励的试验数据和其对该试验的计算模拟结果进行对比分析。对比分析结果如图 1 所示。通过计算与实测值的比较表明:采用 G-D 程序能较好地预测加筋体的加速度的历程,G-D 程序可以很好用于加筋结构的动力计算。

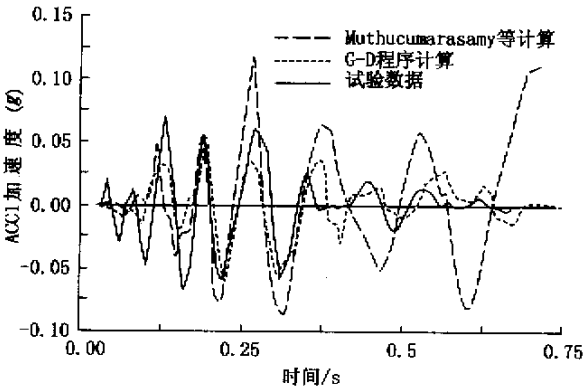


图 1 测量与计算的水平加速度比较
Fig.1 Comparison of measured and computed horizontal accelerations

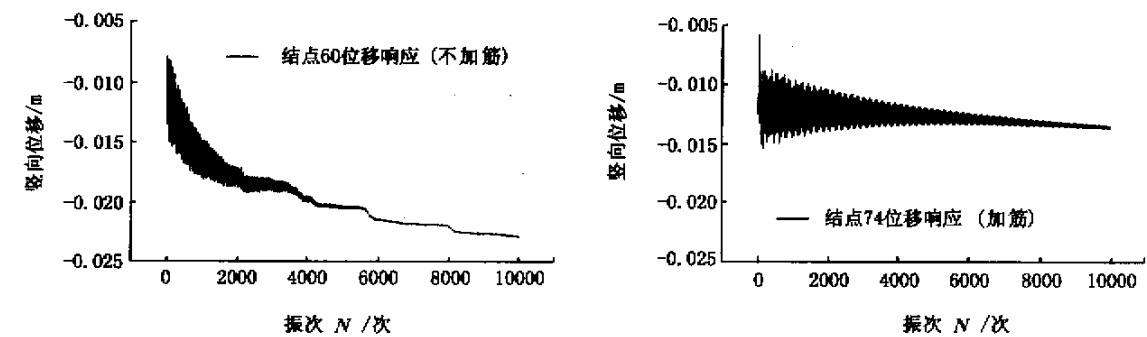


图 5 结点 60/74 位移响应对比
Fig.5 Displacement comparison of node 60/70

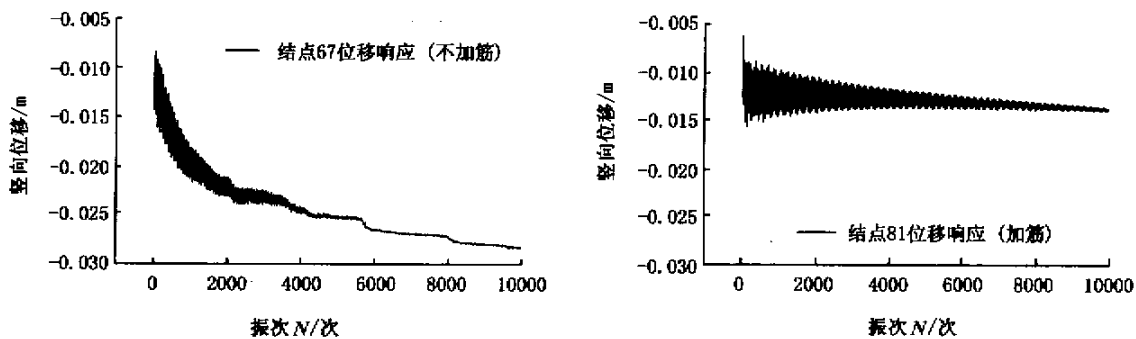


图 6 结点 67/81 位移响应对比
Fig.6 Displacement comparison of node 67/81

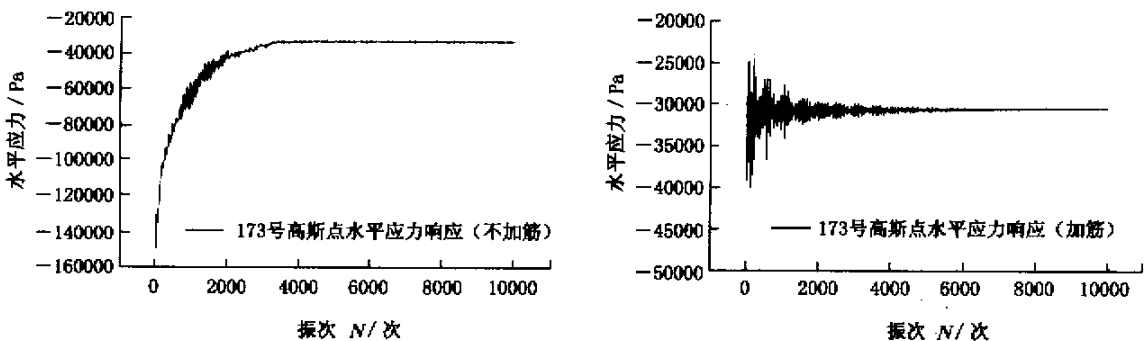


图 7 高斯点 173 水平应力响应对比
Fig.7 Horizontal stress comparison of Gauss point 173

这表明了铺设土工格栅使水平应力在路基中分布更加均匀,铺设土工格栅对减小竖向应力的大小也起到一定的作用,竖向应力大小由不加筋的 75 kPa 减小到加筋的 70 kPa,路基中铺设土工格栅对减小路基中的剪应力大小起着明显的作用,173 号高斯点的剪应力大小由不加筋的 10 kPa 减小到加筋后的 5 kPa,这表明路基加筋后,土体剪应力减小使路基中塑性屈服域也明显的减小,降低了由于交通荷载作用而产生的塑性变形。

综上所述,由于交通荷载是作用次数非常巨大的

疲劳荷载,土工格栅降低由于交通荷载反复作用而产生的累积塑性变形的机理在于有效地减小了路基中的塑性屈服区域。在路面基层下铺设土工格栅,土工格栅、路面与土体共同作用,提高了路面承受交通荷载的能力,一定程度上降低了路基中竖向应力和水平应力,使竖向应力和水平应力在路基中分布的更均匀,从而在一定程度上提高了路基的承载能力。同时有效地降低了路基中的剪应力,使路基中由于剪切破坏而产生的塑性屈服域明显降低,减小了土体的塑性变形,降低了路基沉降。

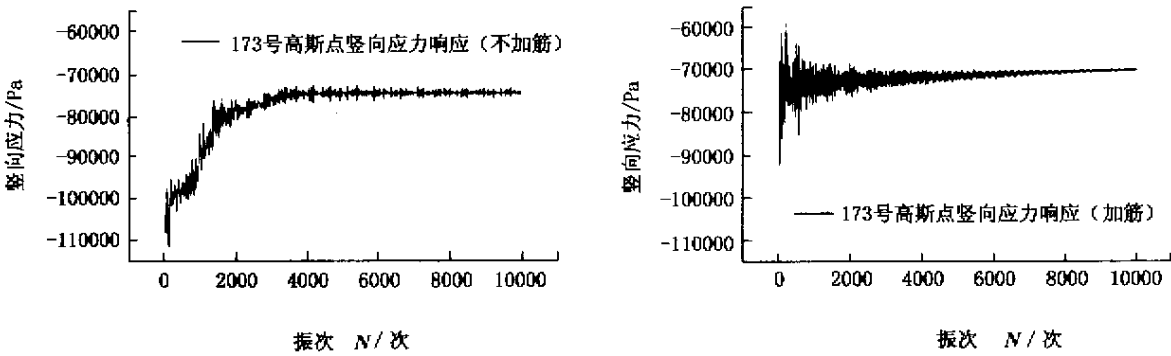


图 8 高斯点 173 竖向应力响应对比
Fig.8 Vertical stress comparison of Gauss point 173

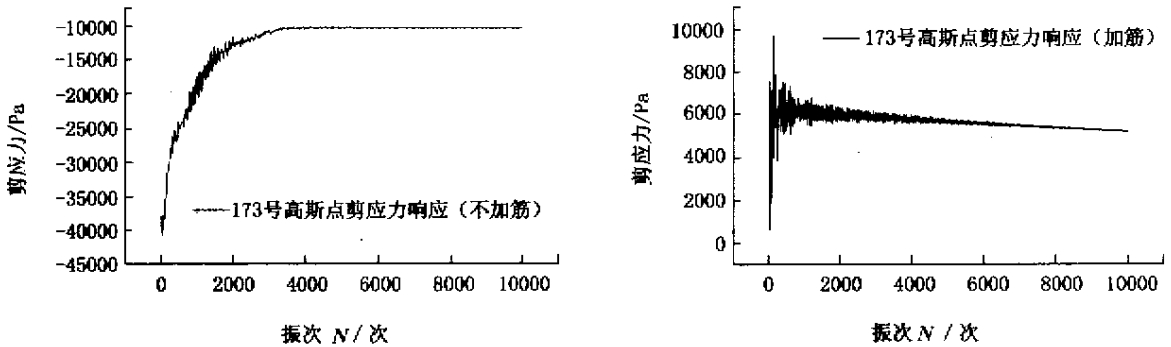


图 9 高斯点 173 剪应力响应对比
Fig.9 Shear stress comparison of Gauss point 173

5 结 论

(1)提出了平面应变问题的土工格栅与土相互作用的动力有限元分析模型,该模型采用不同的本构模型分别模拟土工格栅纵肋、横肋与土动力相互作用,可用来研究加筋土在动载作用下的变形特性,有助于理解土工格栅与土动力相互作用机理。基于该模型编制了加筋土的有限元分析程序 G-D,通过与加州大学 UCLA 加筋挡土墙实测值对比分析,表明了程序的正确性和模型的合理性。

(2)通过对加筋路基和不加筋路基算例对比分析,表明在沥青路面基层下铺设土工格栅可以有效地降低由交通荷载反复作用而产生的累积塑性变形,其作用机理在于:提高路面承受交通荷载的能力,在一定程度上降低了路基中竖向应力和水平应力,从而提高了路基的承载能力;同时有效地降低了路基中的剪应力,使路基中由于剪切破坏而产生的塑性屈服域明显降低,减小了土体的塑性变形。

参考文献:

[1] Fannin, O Sigurdsson. Field observations on stabilization of unpaved roads with geosynthetics[J]. J Geotech Eng ASCE , 1996 (7) :544 ~ 553.

[2] 邵学钧, 黄晓明, 沈伟新. 弹性层状的动力响应分析[J]. 土木工程学报, 1995 (3) :9 ~ 16.

[3] Yegian M K, Harb J N, Kadakal U. Dynamic response analysis procedure for landfills with geosynthetic liner[J]. J Geotech Eng ASCE , 1998 (10) :1027 ~ 1033.

[4] Desai C S, Drumm E C, Zaman M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. J Geotech Eng , ASCE , 1985 (6) :793 ~ 815.

[5] Wilson-Fahmy R F, Koerner R M, Sansone L J. Experimental behavior of polymeric geogrids in pullout[J]. J Geotech Eng , ASCE , 1994 (4) :661 ~ 677.

[6] Muthucumarasamy Yougendrakumar, Bathurst R J, Liam Finn W D. Dynamic response analysis of reinforced-soil retaining wall [J]. J Geotech Eng , ASCE , 1992 (8) :1158 ~ 1167.