

交通荷载引起的主应力轴旋转室内试验模拟探讨

王常晶^{1,2}, 温日琨², 陈云敏¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 浙江大学 城市学院, 杭州 310015)

摘要: 为了通过室内试验研究交通荷载引起的主应力轴旋转对土体循环特性的影响, 以单个移动荷载和列车荷载为例, 分析了主应力轴旋转特点。以此为基础, 结合空心圆柱仪的加载特点, 给出了室内模拟主应力轴旋转的加载方法。竖向动应力可以用具有静偏应力的正弦荷载模拟, 动剪应力可以用正弦荷载模拟, 两者的相位差为 $\pi/2$ 。为了模拟交通荷载引起的主应力差变化的特点, 两种动应力的幅值应该是不同的。当试验中施加无应力反向的竖向动应力时, 大主应力夹角在 $-\pi/2 \sim -\pi/4$ 和 $\pi/4 \sim \pi/2$ 之间变化。

关键词: 交通荷载; 主应力轴旋转; 空心圆柱仪

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

Discussion on laboratory test simulation of principal stress axes rotation induced by traffic loading

WANG Chang-jing^{1,2}, WEN Ri-kun², CHEN Yun-min¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. City College, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: In order to study the effect of principal stress axes rotation induced by traffic loading on cyclic properties of soft clay in tests, one moving load and one train load are taken as examples to analyze the characteristics of principal stress axes rotation. On the base of loading properties of hollow cylinder apparatus, loading method to simulating the principal stress axes rotation in laboratory tests is given. The vertical dynamics stress can be simplified as sine wave with static deviator stress; and dynamic shear stress can be simplified as a sine wave. The phase difference between the two waves is $\pi/2$. In order to simulate the character of principal stress difference changing continuously induced by traffic loading, the amplitudes of vertical stress and shear stress should be different. It is found that the angle of the maximum principal stress is between $-\pi/2$ and $-\pi/4$ or between $\pi/4$ and $\pi/2$ when vertical stress without stress reversal is exerted.

Keywords: traffic loading; principal stress axes rotation; hollow cylinder apparatus

1 引言

随着经济的高速发展, 交通工程建设的发展速度也越来越快, 随之而来的是日益突出的交通荷载引起地基沉降问题。国内外的很多现场实测都发现, 交通荷载的循环作用引起了可观的附加沉降^[1-3]。交通荷载引起地基中土单元的应力状态改变、应力路径变化以及主应力轴旋转, 有别于其他一些因素引起的应力路径改变和土单元应力状态^[4-8]。目前, 循环荷载作用下饱和软黏土的动

力特性主要通过室内动力试验来研究, 也有学者用主应力轴旋转对土体动力特性的影响进行了研究。Towhata 和 Ishihara^[9]曾用空心扭剪仪对波浪荷载进行模拟, 研究了主应力轴旋转对饱和砂土抗液化性能和超静孔隙水压力的影响, 发现主应力轴旋转会大大加速砂土的超静孔压发展, 使得砂土抗液化能力急剧减弱, 同时砂土的动强度也因主应力轴旋转而降低。模拟主应力轴旋转是一个动态的过程, 室内模拟主应力轴旋转的能力在很大程度上取决于所采用的仪器, 空心圆柱仪 (HCA) 是目前较为理想

的研究土体在含有主应力轴旋转的复杂应力状态性状的试验仪器, 也被称作空心圆柱扭剪仪。但它的加载存在局限性, 在循环变载条件下仅有轴力和扭矩能随时间变化, 内外围压只能预先设定一个常数, 在变载过程中保持恒定。沈杨等^[10]在分析 HCA 仪工作能力局限性的基础上, 通过数学和力学分析整理出了几种比较可行的主应力轴旋转的加载方式。但到目前为止, 针对交通荷载引起的主应力轴旋转的分析以及相应的试验室模拟还很少。

本文以单个轮轴荷载和列车荷载为例, 分析了主应力轴旋转特点。根据计算得到的结果, 结合目前空心圆柱仪的加载特点, 讨论了如何在室内试验中模拟交通移动荷载引起的主应力轴旋转的方法。

2 交通荷载引起的主应力轴旋转

2.1 单个移动荷载

本文作者曾将交通荷载简化为移动荷载, 将路堤系统简化为 Euler-Bernoulli 梁, 将地基简化为弹性半空间, 得到了交通荷载引起的地基表面接触力和地基内部动应力的解答^[8]。本文将用该解答, 以单个移动荷载和列车荷载为例, 对交通荷载引起的主应力轴旋转进行分析。

对荷载移动线下方即 $y=0$ 平面上的土单元来说, 剪应力 τ_{xy} 和 τ_{yz} 始终为 0, 可视 y 方向的动应力始终为中主应力, 如果忽略中主应力的影响, 只需要分析 $x-z$ 平面上的应力状态和主应力轴旋转即可。对图 1 中 0.5 倍路堤宽度深处的土单元进行应力状态分析, $t=0$ 时刻, 计算土单元位于荷载前方 30 m 处, 荷载速度 $V_0=30$ m/s ($\alpha_s=0.402$, α_s 为荷载速度与地基中剪切波速的比值), 其他计算参数图中已经给出。图 1 中 a 为梁的宽度的一半, b 为梁的高度。

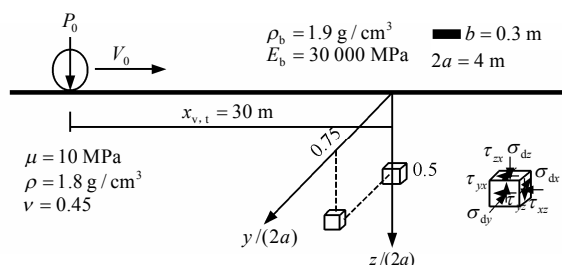


图 1 单个轮轴引起的土单元应力状态变化分析示意图
Fig.1 Diagram of stress state analysis induced by one wheel load

图 2 是土单元的动应力随时间和移动坐标的变化曲线。下部的横坐标为无量纲化的时间, $t^* = x_v/V_0$, x_v 是移动坐标, 即移动荷载到计算土单元的距离。 $t^*=0$ 时, 荷载移动到土单元正上方。可以看出, 除了剪应力 τ_{zx} 是关于 $t^*=0$ 反对称的, 其余动应力都是对称的。荷载移动到土单元正上方时, 竖向动应力 σ_{dz} 远大于其他两个方向的动应力。

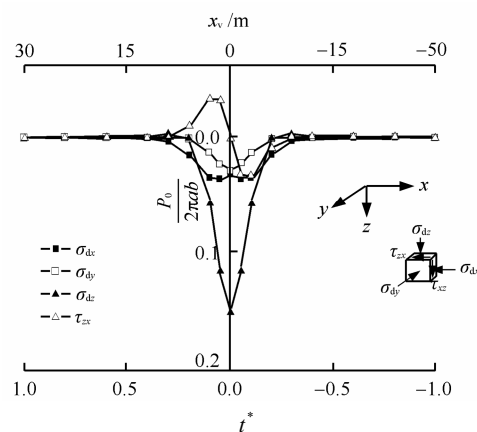
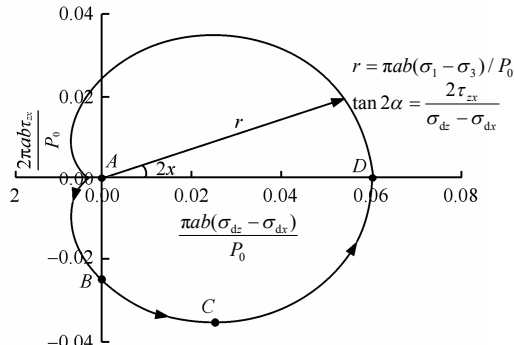
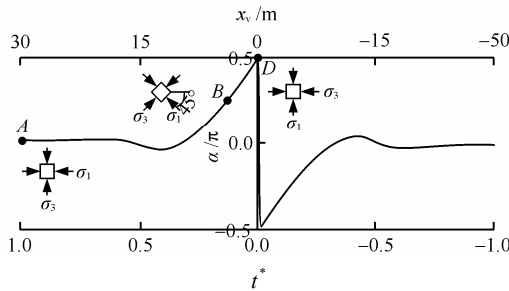


图 2 荷载移动线正下方土单元动应力
Fig.2 Stresses of soil elements under load moving line

大主应力夹角 α 定义为从 x 轴到大主应力轴所旋转的角度, 顺时针为正, 逆时针为负。主应力夹角的范围为 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 。本文中地基土单元的初始应力状态取为静水压力状态, 即三方向的主应力相等, 这样土单元应力状态的变化和主应力轴的旋转就只取决于移动荷载引起的动应力。图 3 (a) 是在图 2 所示动应力作用下, 用水平剪应力和应力分量差表示的荷载移动过程中土单元应力路径变化, 曲线上任意一点的矢量模 $r = \pi ab(\sigma_1 - \sigma_3)/P_0$, 矢量角等于最大主应力与 x 轴的夹角 α 的两倍。图 3 (a) 的曲线呈苹果形, 说明在主应力轴发生旋转的同时, 主应力差也发生连续的改变。而波浪荷载作用下的水平剪应力和应力分量差曲线是一个圆, 主应力差保持不变^[6-7]。图 3 (b) 是 α 随移动坐标和时间的变化。图 3 中的 A 点, 对应移动荷载距土单元非常远, 土单元为初始应力状态, 此时 $\alpha=0$ 。当移动荷载向土单元移动时, σ_1 顺时针旋转偏离 x 轴, 夹角为正且逐渐增大。到达 B 点时, 土单元处于纯剪切状态, 大主应力夹角 α 为 $\pi/4$ 。在 D 点, 荷载移动到土单元正上方, $x_v=0$ m, $t^*=0$, σ_1 与 z 轴重合, $\alpha=\pi/2$ 。荷载远离土单元的过程中, 主应力轴旋转的过程与上述过程相反。可以看出, 在荷载移动的整个过程中, 主应力轴旋转了 180° 。



(a) 土单元应力路径

(b) α 随移动坐标和时间的变化图 3 荷载移动线正下方土单元应力路径及
大主应力轴夹角Fig.3 Variation of stress paths and principal stress angles
of soil elements under load moving line

2.2 列车移动荷载

以单个荷载引起的土单元应力状态和应力路径变化分析为基础,选择相同的计算点,分析列车运行过程中,轨道中线正下方土体单元应力状态和应力路径的变化。图 4 是列车模型,列车共有 6 节车厢,关于列车中心对称。初始时刻,列车中心与计算点距离为 100 m,6 节车厢共有 24 个轮轴荷载,每个轮轴荷载为 160 kN,其余计算参数同图 1。图 5 是列车引起的该点的动应力曲线,列车通过引起的动应力具有循环特性,6 节车厢通过引起 7 个循环。

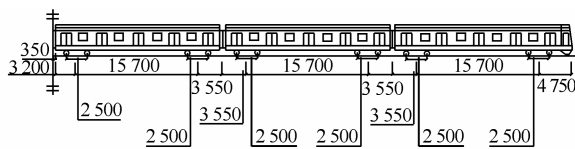


图 4 列车模型 (单位: mm)

Fig.4 Train model (unit: mm)

图 6 是在图 5 的动应力作用下,一个循环中大主应力夹角的变化。可以看出,该循环中大主应力夹角的变化与 2.1 节中单个荷载的结果相似。只是由于列车荷载的相互叠加,使大主应力轴在 z 轴附近有些摆动。

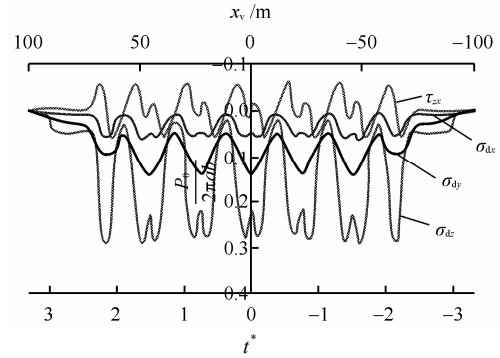


图 5 列车荷载作用下轨道中线正下方土单元的动应力

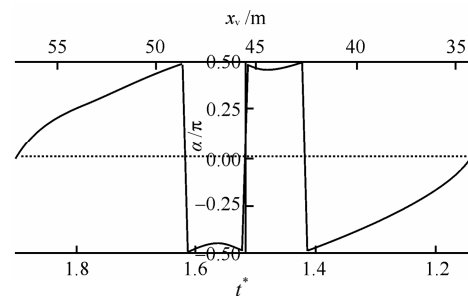
Fig.5 Stresses of soil elements under load moving line
induced by train

图 6 列车荷载引起的一个循环中大主应力夹角变化

Fig.6 Variation of principal stress angles of soil elements
under load moving line in one period induced by train

3 空心圆柱仪模拟主应力轴旋转

图 7 和图 8 分别是 HCA 仪的空心圆柱试样上的受力图和单元体的应力状态图,图 9 给出了大主应力方向的定义。加载参数和单元体的应力分量之间有如下的关系:

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_0^2 - r_i^2)} + \frac{(p_0 r_0^2 - p_i r_i^2)}{(r_0^2 - r_i^2)} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{(p_0 r_0 + p_i r_i)}{(r_0 + r_i)} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(p_0 r_0 - p_i r_i)}{(r_0 - r_i)} \quad (3)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_0^3 - r_i^3)} \quad (4)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad (5)$$

式中: σ_z , σ_r 和 σ_θ 分别为土单元的竖向应力、径向应力和切向应力; $\tau_{z\theta}$ 为土单元的剪应力; W 为

试样上的竖向荷载; p_0 和 p_i 分别为试样内壁和外壁上的径向压力; M_T 为试样上的扭矩; r_0 和 r_i 分别为空心圆柱试样的外径和内径; 大主应力方向应该根据土单元的具体应力状态判断确定, α 的范围为 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 之间。

HCA 仪所能提供的轴力、扭矩以及内外围压 4 个加载参数, 正好与平面条件下主应力轴旋转 (一般是中主应力的方向固定不变) 的问题所具备大、中、小主应力以及大 (小) 主应力轴旋转角度 4 个独立变量形成了一一映射关系。本文将结合前述的理论分析结果和 HCA 仪特点, 进一步讨论室内模拟交通移动荷载引起的包含主应力轴旋转循环应力的方法。

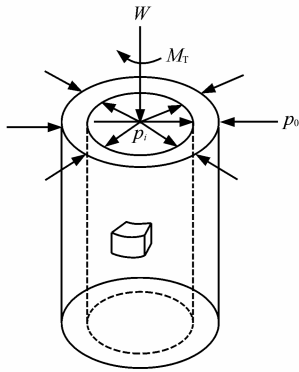


图 7 空心圆柱试样受力图

Fig.7 Force on shallow cylinder sample

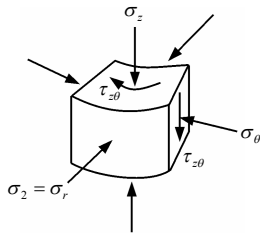


图 8 试样土单元应力状态

Fig.8 Stress states

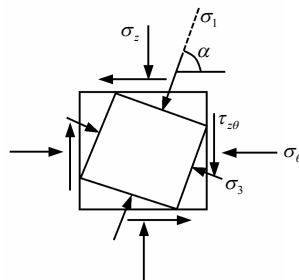


图 9 大主应力方向定义

Fig.9 Angles of principal stress angle

方向的正应力和剪应力都是循环变化的。而 HCA 仪无法施加循环变化的围压, 即式 (1) ~ (3) 中的 p_0 和 p_i 在试验中保持恒定, 意味着试样受到的与图 5 中 x 和 y 两个方向正应力对应的 σ_θ 和 σ_r 也是保持恒定的, 只有竖向正应力 σ_z 和剪应力 $\tau_{z\theta}$ 可以变化。这说明在室内试验中只能模拟图 5 中的竖向动应力 σ_{de} 和动剪应力 τ_{zx} , 来实现近似模拟交通荷载引起的主应力轴旋转, 给出列车引起的竖向动应力和动剪应力-时程曲线, 如图 10 和图 11 所示。图中实线为理论计算的应力-时程曲线, 虚线为用正弦曲线拟合的应力曲线。可以看出, 列车移动荷载引起的土单元动应力可以用正弦荷载来模拟。而图 10~12 中的动应力和动剪应力分别对应于试验中由轴力和扭矩产生的应力, 即式 (1) 中右端第 1 项和式 (4), 所以有:

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_0^2 - r_i^2)} + \frac{(p_0 r_0^2 - p_i r_i^2)}{(r_0^2 - r_i^2)} = A_0 - A_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + \frac{(p_0 r_0^2 - p_i r_i^2)}{(r_0^2 - r_i^2)} \quad (6)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_0^2 - r_i^2)} = B_1 \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (7)$$

式中: A_0 为列车引起的静偏应力, A_1 为列车引起的循环动应力的幅值, 如图 10 所示; B_1 为列车引起的动剪应力的幅值, 如图 11 所示。

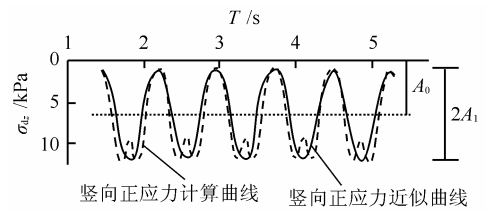


图 10 竖向正应力-时程曲线

Fig.10 Time history of vertical stress

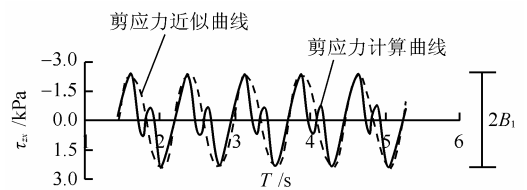


图 11 剪应力-时程曲线

Fig.11 Time history of shear stress

图 5 表明, 交通荷载作用下, 土单元受到的三

这样, 在试验中可以通过施加三角函数形式的

轴力和扭矩来模拟列车移动荷载产生的动应力, 两者的相位差为 $\pi/2$ 。图 3 (a) 表明, 交通荷载引起的动应力主应力差分量也是不断变化的, 体现在试验中的差别就是, 模拟交通荷载时, 施加的轴力和扭矩的幅值是不相等的, 而在对波浪荷载进行模拟时, 两者的幅值是相等的^[9]。

下面再讨论利用式 (6) 和式 (7) 对应力进行模拟时大主应力方向夹角的变化。图 12 是试样承受图 10 和图 11 中虚线所示的轴向应力和剪应力时大主应力方向夹角随时间 T 变化的曲线。值得注意的是, 图 10~12 中主应力夹角的变化范围要小于图 6 中的结果。分析其原因, 是试验中只能施加竖向动应力和动剪应力, 这与实际情况中土单元还受到其他两个方向动应力作用的情况不符, 而且图 10~12 给出的动应力曲线中 $A_0 > A_1$, 不存在应力反向, 使得试验中的 σ_z (式 (6)) 总是大于 σ_θ (式 (3)), 导致主应力夹角被限制在 $-\pi/2 \sim -\pi/4$ 和 $\pi/4 \sim \pi/2$ 之间。实际工程中, 只有列车车速接近地基中的 Rayleigh 波速时, 才会出现应力反向, 即 $A_0 < A_1$ 。试验中如果要想实现主应力轴在 $\pm\pi/2$ 之间连续旋转, 只需使 $A_0 > A_1$ 即可。

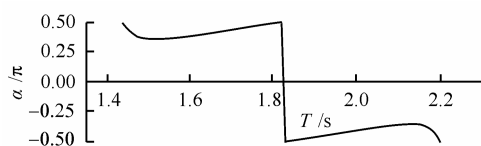


图 12 大主应力夹角曲线

Fig.12 Variation of principal stress axle angles

4 结 语

本文对移动荷载 (单个轮轴荷载和列车荷载) 引起的主应力轴旋转进行了分析, 并结合室内试验仪器的特点对室内模拟交通荷载进行了讨论, 可以发现交通移动荷载作用下, 荷载移动线正下方土单元的主应力轴连续旋转, 在一个循环中, 主应力轴旋转了 180° , 而循环次数则与荷载数量 (列车车厢数) 有关。虽然 HCA 仪不能真实地再现交通荷载引起的动应力, 但可以通过施加三角函数形式的轴力和扭矩来模拟主应力轴连续旋转和主应力差连续变化等主要特性。

参 考 文 献

[1] 陈基炜, 詹龙喜. 上海市地铁一号线隧道变形测量及规

律分析[J]. 上海地质, 2000, (2): 51—56.

CHEN Ji-wei, ZHAN Long-xi. Deformation measuring of the metro tunnel and deformation data analysis of Shanghai Metro Line No.1[J]. **Shanghai Geology**, 2000, (2): 51—56.

[2] 陈云敏, 陈仁朋, 芦森. 软土地基地铁施工及运营过程中的几个土力学问题[C]//城市地铁建设与环境岩土工程高级技术论坛论文集. 杭州: [出版者不详], 2002: 165—177.

[3] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891—895. HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behavior of soft clay in cyclic undrained tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(7): 891—895.

[4] 吴宏伟, 施群. 深基坑开挖中的应力路径[J]. 土木工程学报, 1999, 32(6): 53—58.

Ng WANG WAI CHARLES, SHI Qun. Changes of stress path caused by stress relief during excavations[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(6): 53—58.

[5] 严人觉. 动力基础半空间理论概论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.

[6] ISHIHARA K, YAMAZAKI A. Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand[J]. **Soils and Foundations**, 1984, 24(3): 85—100.

[7] ISHIHARA K. Soil Behavior in Earthquake Geotechnics[M]. New York: Oxford University Press Inc., 1996.

[8] CHEN Y M, WANG C J, CHEN Y P, et al. Characteristics of stresses and settlement of ground induced by train[C]//Environmental Vibration Prediction, Monitoring and Evaluation. London: Taylor & Francis/Balkema, 2005: 33—42.

[9] TOWHATA I, ISHIHARA K. Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes[J]. **Soils and Foundations**, 1985, 25(2): 135—147.

[10] 沈扬, 周建, 龚晓南. 空心圆柱仪 (HCA) 模拟恒定围压下主应力轴循环旋转应力路径能力分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 28(3): 281—287.

SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Analysis of ability of HCA to imitate cyclic principal stress rotation under constant confining pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 28(3): 281—287.