

# 复杂应力状态下钙质砂的动强度

虞海珍<sup>1</sup> 赵文光<sup>1</sup> 汪 稔<sup>2</sup> 李建国<sup>2</sup> 许成顺<sup>3</sup>

(1 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074;

2 中科院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430070; 3 大连理工大学 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 利用土工静力-动力液压三轴-扭剪多功能剪切仪模拟海洋波浪的加载形式, 对相对密度为 30% 的钙质砂进行了扭转和竖向耦合循环剪切试验, 着重研究了复杂应力状态下初始主应力方向角  $\alpha_0$  和中主应力系数  $b$  对钙质砂动强度特性的影响。研究表明: 初始主应力方向对钙质砂的动强度具有显著的影响, 随着初始主应力方向角  $\alpha_0$  的增大, 动强度明显降低, 且降低的程度随破坏振动次数的增加而增加;  $b$  值对动强度也有影响, 影响程度与  $\alpha_0$  相比要小。

**关键词:** 波浪荷载; 耦合剪切试验; 钙质砂; 动强度; 初始主应力方向; 中主应力系数

**中图分类号:** TU 411. 8; TU 447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7037(2005)01-0040-04

钙质砂是海洋生物成因含  $\text{CaCO}_3$  超过 50% 的特殊岩土介质, 具有独特的力学和工程性质<sup>[1,2]</sup>。在我国的南海海域, 钙质砂有着广泛的分布, 且其  $\text{CaCO}_3$  的含量多在 90% 以上。钙质砂作为海床和近海、离岸建筑物的地基, 往往处于复杂的初始固结应力状态和复杂的循环加载条件。作为海床地基的钙质砂所承受的经常性荷载主要是波浪荷载, 波浪荷载作用下海床中土单元应力状态有两个特征<sup>[3]</sup>: 动主应力轴连续旋转; 动偏差应力幅值保持为常数(图 1(a))。

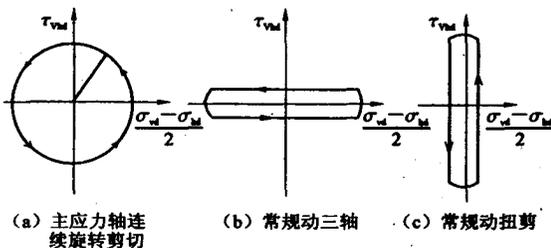


图 1 不同试验条件下的循环剪切应力路径

目前在土动力学研究中, 普遍采用的是循环三轴试验与循环扭剪试验(图 1(b), (c))。从图 1 所示的应力路径可看出这两种常规土工动力试验中, 土单元体上的主应力轴都只可能随循环加载方向的变化而发生 90° 的突然变化, 无法模拟循环荷载作用过程中主应力轴的连续变化。循环三轴试验仅能够模拟均压固结和两向偏压固结等简单固结应力条件, 无法模拟复杂的初始固结应力状态; 而且只能在固定初始主应力方向上施加循

环的偏差正应力来模拟循环剪切荷载, 无法考虑主应力方向  $\alpha_0$  和中主应力  $\sigma_2$  (或中主应力系数  $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ) 的影响。

关于初始主应力方向角  $\alpha_0$  及  $b$  值对土的动力特性的影响, 国内外自 80 年代开始进行了一些研究工作。法国的 Symes<sup>[4]</sup> 用空心圆柱动扭剪仪对 Ham 河砂的等压固结试样研究表明,  $\alpha_0$  对动强度有显著的影响, 但  $b$  值对动强度的影响并不明显。日本东京大学的 Towhata<sup>[5]</sup> 及 Ishihara<sup>[6]</sup> 对日本标准砂 Toyoura 砂的研究也说明  $\alpha_0$  对动强度有较大的影响。国内沈瑞福、王洪瑾及付磊等<sup>[3,7,8]</sup> 利用清华大学在原拟静扭剪共振柱仪基础上改造后的设备, 分别针对砂土、瀑布沟粘土心墙土料及密云砂砾料进行了动扭剪试验, 以此探讨了  $\alpha_0$  与  $b$  值对液化强度、残余应变和残余孔压的影响。研究表明  $\alpha_0$  对土的动力特性具有不容忽视的影响。大连理工大学郭莹等<sup>[9]</sup> 利用最新研制的土工静力-动力液压三轴-扭剪多功能剪切仪同时进行了竖向与扭转双向耦合循环剪切试验和循环扭剪试验, 通过对比着重探讨了  $\alpha_0$  对福建标准砂动强度特性的影响, 两种类型的循环剪切试验结果一致表明:  $\alpha_0$  对松砂的动强度具有非常显著的影响。

为了给钙质砂的土工数值计算以及进行波浪荷载动力响应分析提供可靠的动力参数, 保证计算及分析正确, 必须清楚  $\alpha_0$  及  $b$  值对特殊岩土介质的钙质砂强度的影响。作者针对相对密度为

30% 的钙质砂做竖向与扭转双向耦合循环剪切试验, 对上述问题进行研究

## 1 复杂应力状态试验

### 1.1 试验仪器及初始应力状态的模拟

试验用的土工静力-动力液压三轴-扭剪多功能剪切仪, 既能独立施加垂直与水平向的静、动应力, 又能独立施加试样内、外室压力, 因而不仅能够实现三向压力不等的任意固结条件, 任意地控制  $\alpha_0$  及  $b$  值, 实现多种复杂的初始固结应力状态, 而且还可以在剪切过程中实现主应力方向的不同变化方式, 研究各种复杂应力条件下土体的动力反应

双向耦合循环剪切试验采用空心圆柱状试样, 试样外径为 100 mm, 内径为 60 mm, 高度为 150 mm (图 2(a)). 图 2(b) 为空心圆柱状试样柱壁上任一土体单元的应力状态, 其上有 4 个独立的应力分量: 即由扭矩  $M_T$  所产生的剪应力  $\tau_{\theta z}$ , 由内侧压力  $p_i$  和外侧压力  $p_o$  所产生的径向应力  $\sigma_r$  和环向应力  $\sigma_{\theta}$ , 由竖向力  $W$  及内外侧压力  $p_i$  和  $p_o$  共同产生的轴向应力  $\sigma_z$ . 一般地, 由于试样内外室压力是由水通过柔软橡皮膜施加在试样的内外壁面上, 故在内外壁面上无剪应力, 径向应力  $\sigma_r$  总是一个主应力, 即  $\sigma_r = \sigma_2$ , 其应力状态也可用图 2(c) 所示的  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  及主应力方向相对于竖向的方向角  $\alpha$  表示. 作用于土单元上的 4 个应力变量等价于试验中控制的参数  $\alpha_0$  和  $b$ , 平均主应力

$$p_{m0} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3,$$

广义剪应力

$$q_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

故在给定土单元的初始应力状态参数  $p_{m0}$ ,  $q_0$ ,  $\alpha_0$  和  $b$  后, 采用王洪瑾及付磊等<sup>[7,8]</sup> 给出的公式, 反算出需要施加于试样上的竖向荷载  $W_0$ , 扭矩  $M_{T0}$  和内室与外室侧向压力  $p_{i0}$  和  $p_{o0}$ , 在仪器上实现对土单元初始应力状态的模拟

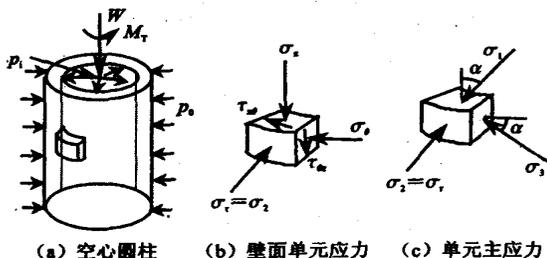


图 2 空心圆柱试样中土的应力状态

### 1.2 试验土料及试验制备

试验土料为我国南沙群岛的钙质砂, 主要的物性指标: 颗粒比重  $G_s = 2.73$ ; 最大干密度  $\rho_{dmax} = 1.44 \text{ g/cm}^3$ ; 最小干密度  $\rho_{dmin} = 1.13 \text{ g/cm}^3$ ; 最大孔隙比  $e_{max} = 1.423$ ; 最小孔隙比  $e_{min} = 0.896$

空心圆柱试样的制作采用分层干装法, 并联合利用通  $\text{CO}_2$ , 通无气水与施加反压等方法使试样饱和, 试验中的砂样饱和后孔压系数  $B$  值均达到 0.98 以上

### 1.3 试验方法与试验内容

当研究  $\alpha_0$  对土的动强度影响时, 固定中主应力系数为  $b_0 = 0.5$ , 初始平均有效应力为  $p_{m0} = 100 \text{ kPa}$ , 初始偏剪应力比为  $\eta_0 = q_0/p_{m0} = 0.43$ , 相当于固结应力比  $K_c = \sigma_1/\sigma_3 = 1.66$ , 改变  $\alpha_0$  进行耦合循环剪切试验, 在耦合试验中考虑  $\alpha_0$  分别为  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  和  $90^\circ$  等情况. 当研究  $b$  值对土的动强度影响时, 固定  $\alpha_0 = 0^\circ$ ,  $p_{m0} = 100 \text{ kPa}$ ,  $\eta_0 = q_0/p_{m0}$ , 改变  $b$  值使它分别等于 0, 0.5 和 1.0 进行研究

试验中分别控制不同  $p_{i0}$ ,  $p_{o0}$ ,  $W_0$  和  $M_{T0}$  对试样进行初始固结, 表 1 为所施加荷载的大小. 全部初始固结荷载施加完毕后, 再继续排水固结约 30 min

表 1 固结阶段所施加的荷载大小及其组合

$\alpha_0$	$p_i/\text{kPa}$	$p_o/\text{kPa}$	$W_0/\text{kN}$	$M_{T0}/\text{N} \cdot \text{m}$
$0^\circ$	108.75	95.03	0.19	0.00
$30^\circ$	104.14	97.52	0.01	4.41
$45^\circ$	100.00	100.00	0.00	5.13
$60^\circ$	95.83	102.50	-0.01	4.43
$90^\circ$	91.72	104.97	-0.19	0.00
$b$	$p_i/\text{kPa}$	$p_o/\text{kPa}$	$W_0/\text{kN}$	$M_{T0}/\text{N} \cdot \text{m}$
0	85.57	85.57	0.22	0.00
0.5	108.75	95.03	0.19	0.00
1.0	128.87	105.77	0.11	0.00

固结完成后即可对试样进行不排水条件下的动力试验, 试验中采用应力控制方式施加循环剪切荷载, 振动频率采用 0.1 Hz. 循环耦合试验中的轴向荷载  $W$  和扭矩  $M_T$  均采用简谐荷载, 为模拟海洋波浪荷载在无限厚度弹性海床中所形成的主应力轴连续旋转的应力条件, 试验中控制循环扭矩  $M_T$  比循环轴力  $W$  的相位滞后  $90^\circ$ ; 且控制循环轴向应力幅值之半  $\alpha_0/2$  与循环扭转剪应力幅值  $\tau_0$  保持相等, 以使耦合循环剪切试验中的应力路径保持为圆形 (图 3), 圆心坐标表示试样上所施加的初始固结应力状态

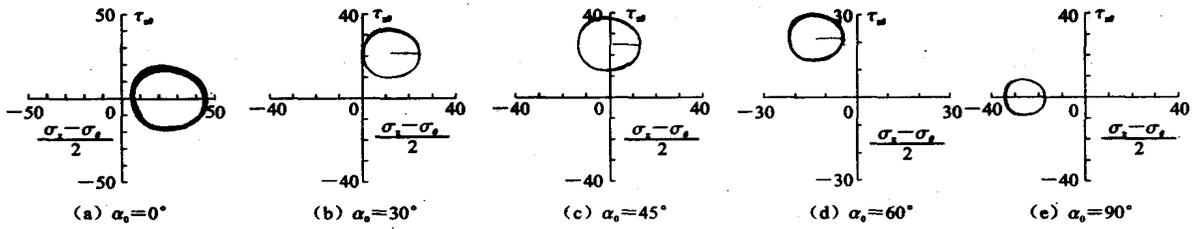


图3 不同  $\alpha_0$  的试验应力路径/kPa

### 1.4 破坏标准

在三向非均等固结条件下,对于不同的  $\alpha_0$  及  $b$  值情况,试样中的孔隙水压力增长表现出不同的变化模式,或持续增长,或出现峰值以后降低,但孔隙水压力始终不能达到  $p_{m0}$ ,因此无法统一采用孔隙水压力作为试验的破坏标准。同时,试样既产生径向截面的剪应变  $\epsilon_r$ ,又产生环向截面的剪应变  $\epsilon_\theta$ ,因此不能采用单一的变形值作为破坏标准,需要综合考虑两者共同作用效果。作者采用同时包含两种应变的广义剪应变  $\gamma_g$  达到 5% 作为统一的破坏标准。广义剪应变定义为

$$\gamma_g = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_r - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_\theta - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_r)^2}$$

## 2 试验结果

### 2.1 $\alpha_0$ 对钙质砂动强度的影响

以广义剪应变  $\gamma_g$  达到 5% 时作为破坏标准,图 4 给出了由耦合循环剪切试验所确定不同初始主应力方向角的动强度曲线。由于这里的循环耦合荷载是复杂应力路径,应同时考虑偏差正应力

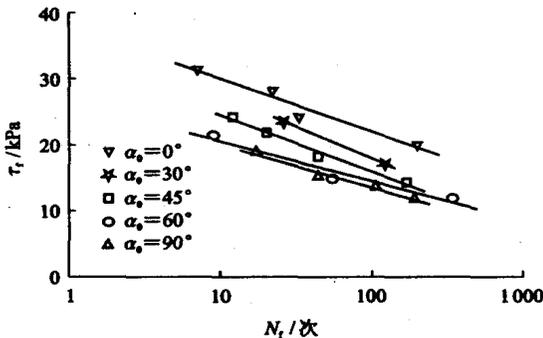


图4 不同初始主应力方向角  $\alpha_0$  下的动强度曲线

与剪应力的共同作用,所以动强度应采用下式所给出的最大剪应力幅值

$$\tau_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{2}\right)^2 + \tau_d^2}$$

从图 4 可见,  $\alpha_0$  对钙质砂的动强度特性具有显著影响,当初始固结状态条件下的最大主应力作用方向垂直于荷载作用面,此时在最大主应力面上继续施加竖向与扭转耦合循环剪切荷载,钙质砂将发挥其最大动强度。改变静力荷载组合,使  $\alpha_0$  变化,随着  $\alpha_0$  的增加,动强度逐渐降低。当  $\alpha_0 = 90^\circ$  即最小主应力作用在水平面上,最大主应力作用方向与荷载作用面平行,此时在最小主应力作用面上施加耦合循环剪切荷载,钙质砂表现出的动强度最低。

针对不同的循环荷载破坏振次  $N_r$ ,表 2 列出了动强度的对比结果,并给出了不同  $\alpha_0$  情况下的动强度降低的百分数  $a$  值。由表 2 及图 5 可见,耦合循环剪切条件下动强度的降低程度不仅依赖于初始主应力方向角,还与破坏循环作用次数有关。动强度随着初始主应力方向角的增加而降低,其降低程度随着循环作用次数的增加而增加。当  $\alpha_0 = 90^\circ$  时动强度降低至最低点,当破坏循环作用次数  $N_r = 100$  时,强度的相对降低可达到 38% 以上;当  $N_r = 300$  时,强度的相对降低可达到 42% 以上。这比标准石英砂的降低程度小<sup>[9]</sup>,其降低规律也不相同。从图 4、图 5 及表 2 还可看出,当  $\alpha_0$  大于  $45^\circ$  以后,其对强度的影响逐渐减小,如  $\alpha_0 = 60^\circ$  的强度与  $90^\circ$  的强度十分接近(图 4),图 5 上  $\alpha_0 = 60^\circ \sim 90^\circ$  部分的曲线近于水平。鉴于初始主应力方向对动强度具有不容忽略的显著影响,因此必须在海工建筑及土工抗震设计中将主应力方向变化作为一个重要因素加以合理考虑。

表2 初始主应力方向角对动强度的影响

$N_r$ /次	$\alpha_0 = 0^\circ$		$\alpha_0 = 30^\circ$		$\alpha_0 = 45^\circ$		$\alpha_0 = 60^\circ$		$\alpha_0 = 90^\circ$	
	$\tau_r$ /kPa	$a$ / (%)	$\tau_r$ /kPa	$a$ / (%)	$\tau_r$ /kPa	$a$ / (%)	$\tau_r$ /kPa	$a$ / (%)	$\tau_r$ /kPa	$a$ / (%)
10	29.905	0.9	27.486	11.8	24.407	0.2	20.529	9.7	20.050	33.3
30	26.107	2.5	22.892	6.8	20.336	0.8	17.633	5.5	16.925	9.9
60	23.711	0.8	19.994	5.4	17.767	6.0	15.806	12.2	14.954	7.5
100	21.945	1.8	17.858	7.2	15.874	7.2	14.459	3.6	13.502	0.1
300	18.147	3.4	13.265	2.9	11.803	7.8	11.562	9.4	10.377	6.7

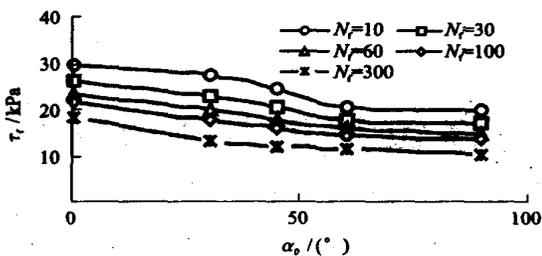


图 5 初始主应力方向变化对动强度的影响

### 2.2 b 值对钙质砂动强度的影响

由图 6 可见 b 值对动强度也有影响, 但其影响程度要比初始主应力小得多. b = 0.5 时的强度最大, b = 1 时的强度最小, b = 0 时的强度居中

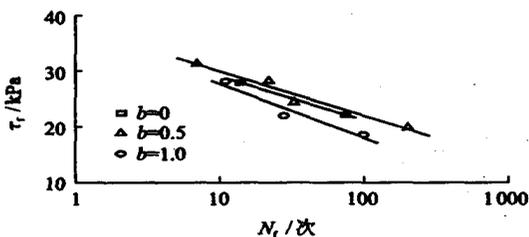


图 6 不同 b 值的动强度曲线

表 3 列出了不同 b 值下钙质砂动强度的试验结果, 并给出了 b = 0.5 及 b = 1.0 的动强度相对于 b = 0 时的动强度降低的百分数 a 值. 从表 3 可知, 当 b = 0~0.5 时, 动强度随 b 值的增加而增加. 当 b = 1.0 时, 动强度反而减小, 但增加的幅度小于减小的幅度. N\_f = 100 时, b = 0.5 的强度增加 3.9%, b = 1.0 的强度减小 15%; N\_f = 300 时, b = 0.5 的强度增加 4.8%, b = 1.0 的强度减小 23%, 均小于相同破坏振次下 alpha\_0 的影响 (N\_f = 100 时为 38%, N\_f = 300 时为 42%).

表 3 中主应力系数 b 值对动强度的影响

N_f / 次	b = 0		b = 0.5		b = 1.0	
	tau_r / kPa	a / (%)	tau_r / kPa	a / (%)	tau_r / kPa	a / (%)
10	29.10	-	29.91	2.76	24.74	4.69
30	25.29	-	26.11	3.22	23.06	8.82
60	22.89	-	23.71	3.59	20.11	12.13
100	21.12	-	21.95	3.92	17.09	15.06
300	17.31	-	18.15	4.84	13.26	23.38

## 3 结 论

a 试验中控制循环扭矩 M\_T 比循环轴力 W 的相位滞后 90°; 且控制循环轴向应力幅值之半 alpha\_0/2 与循环扭转剪应力幅值 tau\_d 保持相等, 以使耦合循环剪切试验中的应力路径保持为圆形, 较理想地模拟了波浪荷载条件下主应力方向连续旋转的应力路径

b 耦合循环剪切试验结果说明: alpha\_0 对钙质砂的动强度影响显著. 随着初始主应力与竖向的夹角增加, 动强度降低, 当 alpha\_0 = 0 时强度最高, 而当 alpha\_0 = 90 时强度最低, 强度的降低程度与破坏振动的次数有关. 波浪荷载是一种长期荷载, 因此这两点在分析海床在波浪荷载作用下的稳定性时应予以高度的重视. 在不具备能够实现复杂应力状态的试验设备时, 应对普通动三轴试验或动扭剪试验的结果加以修正

c 钙质砂的动强度随 alpha\_0 的增大而降低的规律均是非线性的, 当 alpha\_0 在 30°~45° 范围强度降低最显著, 45° 以后动强度基本稳定并接近于 alpha\_0 = 90° 的最低动强度

d b 值对钙质砂的动强度也有影响, 但其影响程度远小于初始主应力方向角 alpha\_0

致谢: 大连理工大学栾茂田教授对研究工作给予了特别的帮助与支持, 何杨博士协助完成试验, 在此表示衷心感谢

### 参 考 文 献

- [1] 刘崇权, 汪 稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998, 19(1), 33-37.
- [2] 虞海珍, 汪 稔. 钙质砂动强度试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(4), 6-11.
- [3] 沈瑞福, 王洪瑾, 周景星. 动主应力轴连续旋转下砂土的动强度[J]. 水利学报, 1996, (1): 27-33.
- [4] Symes M J P R, Gens A, Hight D W. Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand[J]. Geotechnique, 1984, 34(1): 11-27.
- [5] Towhata I, Ishihara K. Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes [J]. Soils and Foundations, 1985, 25(2): 135-147.
- [6] Ishihara K, Towhata I. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads [J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 11-26.
- [7] 王洪瑾, 马奇国, 周景星, 等. 土在复杂应力状态下的动力特性研究[J]. 水利学报, 1996, (4): 57-72.
- [8] 付 磊, 王洪瑾, 周景星. 主应力偏转角对砂砾料动力特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, (4): 435-440.
- [9] 郭 莹, 栾茂田, 许成顺, 等. 主应力方向变化对松砂不排水动强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, (6): 666-670.

结构加速度和低估隔震层滑移位移. 特别对滑移位移, 反应的误差相当大, 对于滑移支承的设计, 低估滑移位移是一个较为严重的问题, 而要对滑移结构进行有效设计, 应该考虑这一效应

参 考 文 献

[1] 樊 剑, 唐家祥 带限位装置的摩擦隔震结构动力特性及地震反应分析[J] 建筑结构学报, 2001, 22(1): 20-25

[2] 张文芳, 程文灏 基础隔震结构设置摩擦阻尼器的地震反应研究[J] 土木工程学报, 2001, 34(5): 1-9

[3] 熊仲明, 俞茂宏 基础滑移隔震体系的地震响应计算[J] 应用力学学报, 2002, 19(4): 139-142

[4] 朱玉华, 吕西林 滑移摩擦隔震系统在多向地面运动作用下的试验研究[J] 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 77-84

[5] Jangid R S 纯摩擦结构对双向谐和地面运动的反应[J] 毕霜玉译 世界地震工程, 1997, 13(4): 77-85

[6] Jangid R S Seismic response of sliding structures to bidirectional earthquake excitation [J] Earthquake Eng Struct Dyn , 1996, 25: 1 301-1 306

Effect of Bidirectional Interaction of Friction on the Response of Sliding Displacement

FAN Ai-wu<sup>1</sup> LI Li<sup>1</sup> YANG Jun<sup>1</sup> ZHANG Hang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Eng. & Mechanics, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract Transient dynamic analysis is used to study the response of sliding displacement of sliding structure to bidirectional ground motion. Circular interaction between the frictional forces is considered. Important parameters are changed to investigate the effect of interaction between the frictional forces. Numerical results show that the response of sliding displacement is influenced significantly by the interaction of frictional forces, but the acceleration of superstructure is different. So the sliding displacement may be underestimated and the acceleration of superstructure may be overrated if the bidirectional interaction of frictional forces is neglected.

Key words: sliding displacement; frictional force; bidirectional interaction

(上接第 43 页)

Dynamic Strength of Carbonate Sand in Complex Stress State

YU Hai-zhen<sup>1</sup> ZHAO Wen-guang<sup>1</sup> WANG Ren<sup>2</sup> LI Jian-guo<sup>2</sup> XU Cheng-shun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Eng. & Mechanics, HUST, Wuhan 430074, China;

2. Inst of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430070, China;

3. Inst of Rock & Soil, Dalian Univ. of Tech., Dalian 116024, China)

Abstract The soil static and dynamic universal triaxial and torsional shear apparatus which can simulate the cyclic stress characteristic of sand on seabed is used to perform experimental tests of loose carbonate sands with a relative density of 30% subjected to vertical-and-torsional coupling cyclic shear with the rotation of principal stress axes induced by ocean wave. The tests are carried out to investigate the effect of initial orientation of principle stress axes and the parameter of intermediate principal stress *b* on dynamic strength of carbonate sand under anisotropic consolidation condition. The results of the tests show that the rotation angle of initial principal stress  $\alpha$  affects dynamic strength of carbonate sand significantly. With the increase of  $\alpha$ , dynamic strength decreases obviously, and the degree of strength lowering increases with the increment of the number of cycles. The value of *b* has some influence on the dynamic strength of carbonate sand.

Key words: wave loads; triaxial-and-torsional coupling cyclic shear tests; carbonate sand; dynamic strength; initial orientation of principal stress; parameter of intermediate principal stress