

文章编号: 1000-7598-(2003) 06-0877-05

单桶负压下沉过程中土体与桶形基础的相互作用

王庚荪¹, 孔令伟¹, 杨家岭¹, 孙东昌², 王 泉²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 胜利油田管理局钻井工艺研究院 海洋工程技术研究所, 山东 东营 257017)

摘 要: 从理论上分析了单桶负压下沉过程中土体与桶形基础的相互作用。建立了桶在下沉过程中力传递的微分方程式, 求得了桶在自重下沉时所能达到的最大深度与桶体自重、所受垂直载荷、桶体几何要素、土体的力学参数以及桶-土之间的摩擦强度之间的关系。考虑了负压下沉过程中渗流的影响, 确立了桶内土柱顶部所需压力与下沉深度之间的对应关系。

关 键 词: 桶形基础; 负压下沉; 土体与基础相互作用; 土弹簧模型

中图分类号: P 751

文献标识码: A

Interaction between soil mass and bucket foundation in suction sinking process of single bucket

WANG Geng-sun¹, KONG Ling-wei¹, YANG Jia-ling¹, SUN Dong-chang², WANG Quan²

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Offshore Engineering and Technology Research Division of Drilling Technology Research Institute,
Shengli Petroleum Administration Bureau, Dongying 257017, China)

Abstract: The interaction between the soil mass and bucket foundation during the sinking process of a single bucket driven by negative pressure is analyzed. The differential equation for the stress transfer in the sinking process of a bucket is established. The relation of the greatest sinking depth of the bucket by itself weight with the weight of bucket, the vertical load, the geometric parameters of the bucket, and the mechanical properties as well as the frictional strength between soil and bucket is obtained. The effect of percolation during the sinking process is also considered, and the sinking depth and the negative pressure required are determined.

Key words: bucket foundation; sunk by negative pressure; interaction of soil mass and foundation; soil spring model

1 引 言

桶形基础平台是近年来发展起来的一种新型海洋工程平台, 由于它采用负压下沉施工技术, 具有便于运输安装和可重复使用、造价低等优点, 在浅海石油天然气资源的开采工程中有广泛的应用前景。最先采用这种基础的是挪威国家石油公司的Europipe 16/11-E 大型导管架平台^[1], 挪威土工研究所对这种基础进行了试验和理论研究。我国最近也开始了这方面的研究工作^[2~8]。施晓春等^[3] (1999 年) 对桶水平承载力进行了试验研究, 杨树耕等^[4] (1999 年)、何生厚等^[5] (2000 年) 进行了桶形基础平台的负压沉贯数值计算研究。由于这项技术是

最近才发展起来的, 目前, 对桶形基础的研究还很不充分, 特别是土体与桶形基础的相互作用机理还需进行深入研究。

土体与桶形基础相互作用主要应考虑两种最基本的情况: (1) 在垂直载荷和负压作用下, 桶下沉过程中土体与桶体的相互作用; (2) 在水平载荷 (包括风载荷, 波浪载荷, 海流载荷, 冰载荷等) 作用下土体与桶形基础的相互作用。本文主要讨论前者。

2 受力分析及力传递的微分方程

海洋工程平台的桶形基础, 一般是由几个桶联合构成一整体沉入泥土中的。由于桶的间距通常比桶的直径大很多, 并且在垂直载荷作用下, 桶与桶

收稿日期: 2002-09-06

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (编号: 820-10-01)。

作者简介: 王庚荪, 男, 1950 年生, 博士, 副研究员, 现从事岩土力学的工作。

的相互影响较小, 因此, 研究单桶的下沉过程, 就可以大致反映整个桶形基础下沉的基本情况。

桶形基础如图 1 所示, 图中, 工作水深为 H_w ; 单桶的外直径为 D ; 壁厚为 b ; 高度为 H ; 入泥深度为 L ; 桶内土柱高度为 L' 。

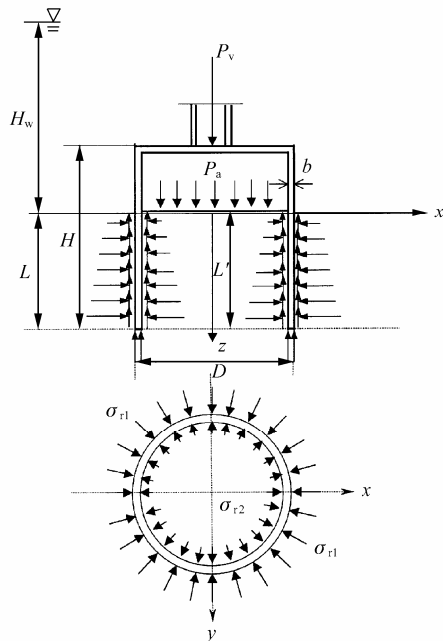


图 1 单桶在垂直载荷作用下土对桶的作用力分布

Fig. 1 The distribution of the forces on the bucket applied by soil when the single bucket is under the vertical load

将导管架对桶形基础的作用简化为一垂直载荷 P_v 。如图 1 所示。在桶下沉过程中, 土体对桶裙壁作用径向压力和向上的摩擦力。由于桶内外的垂直压力和所受的径向挤压程度不同, 因此, 桶裙外侧和内侧所受的径向压力和摩擦力也有所不同。

首先分析桶壁所受的径向压力。该压力由三部分构成。一部分是静水压力, 与所研究的点在水下深度及水面上施加的压力有关; 一部分是由于土的浮重度产生的压力, 与在土面下的埋深有关; 第三部分则是由于桶下沉时桶体挤压周边土体发生位移而导致的反力。即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} &= \gamma_w(H_w + z) + k_0 \gamma' z + f_1 \\ \sigma_{r2} &= p_a + \gamma_w(L' - L + z) + k_0 \gamma'(L' - L + z) + f_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 σ_{r1} , σ_{r2} 分别是桶外侧和内侧的径向压力; p_a 为桶内土柱顶面所受压力; γ_w 为水的重度; γ' 为土的浮重度; z 为计算点相对于泥面的埋藏深度; k_0 为土的侧压力系数; f_1 , f_2 均为土受挤压产生的单位面积反力, $f_1 = k_{1n} u_1$, $f_2 = k_{2n} u_2$, 其中 k_{1n} , k_{2n}

分别为桶外侧和桶内侧的土体的径向弹簧刚度系数; u_1 , u_2 分别为由于桶沉入泥中而使桶外侧和内侧土体产生的径向位移。通常桶裙端部是外侧削尖, 可以近似认为 $u_1 = b$, $u_2 = 0$ 。土弹簧刚度系数可近似按平面应变条件下径向压应力与径向位移的关系求出:

$$\left. \begin{aligned} k_{1n} &= \frac{E_0}{(1+\nu)} \frac{D}{2} = \frac{4}{D} G_s \\ k_{2n} &= \frac{E_0}{(1-\nu)} \frac{D-2b}{2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{4}{D-2b} G_s = \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$(1+2k_0) \frac{4}{D-2b} G_s$$

式中 E_0 为土的弹性模量; G_s 为土的抗剪模量; ν 为泊松比。通常实验室测得的是有侧限的压缩模量 E_s , 它们之间的换算关系如下:

$$G_s = \frac{E_0}{2(1+\nu)}; \quad E_0 = (1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}) E_s; \quad G_s = \frac{1-k_0}{2} E_s \quad (3)$$

考虑到侧限压缩模量是固结稳定后对应的模量, 而桶在下沉过程中时间较短, 变形体不能达到稳定变形状态, 因此, 实际应用中应考虑乘以一适当系数。

由于静水压力不产生摩擦力, 因此, 桶外侧土体对桶壁的单位面积上的摩擦力为

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= \eta c'_0 + \tan \delta (k_0 \gamma' z + \frac{4}{D} G_s b) \\ \tau_2 &= \eta c'_0 + \tan \delta k_0 \gamma'(L' - L + z) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 δ 为泥土与桶壁之间的摩擦角; c'_0 为土的有效凝聚力; η 为土和钢之间的吸附力系数。

桶裙端部单位面积上的阻力为裙端处土的抗压强度值, 这是因为桶在下沉时, 桶端的土体受到破坏。由于桶的下部薄裙很薄, 只有 8 mm, 桶径又很大, 桶裙端部土体沿环向可近似看作平面应变状态, 故应用地基的临塑压力公式来估计端部阻力是可行的。

$$p_c(L) = \frac{\pi(c'_0 \cot \phi' + \gamma' L)}{\cot \phi' - \frac{\pi}{2} + \phi'} + \gamma' L \quad (5)$$

在最初阶段, 桶依靠自重下沉的过程中, 由于桶内的水通过导管自由排出水面, 故桶内土柱顶部的压力 $p_a = \gamma_w H_w$, 并且, 可以认为 $L' = L$ 。于是, $\tau_2 = \eta c'_0 + \tan \delta k_0 \gamma' z$ 。

在桶上截取微元长度为 dz 的桶环, P 为桶环上表面所受的总的垂直荷载。该微元体的自重为

$$dW = \gamma'_{st} \pi b(D-b)dz \quad (6)$$

式中 γ'_{st} 为钢桶的浮重度。由该微元体力的平衡可以得到桶的平衡微分方程式:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{dW}{dz} - [\tau_1 \pi D + \tau_2 \pi (D-2b)] = A - Bz \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} A &= \gamma'_{st} \pi b(D-b) - \eta c'_0 [2\pi (D-b)] - \tan \delta (4\pi G_s b) \\ B &= \tan \delta k_0 \gamma' [2\pi (D-b)] \end{aligned} \quad (8)$$

根据端部条件, 应有

$$P|_{z=L} = p_c(L) [\pi b(D-b)] \quad (9)$$

于是, 可解得

$$\begin{aligned} P(z) &= A(z-L) - \frac{1}{2} B(z^2 - L^2) + \\ &\left[\frac{\pi c'_0 \cot \phi'}{\cot \phi' - \frac{\pi}{2} + \phi'} + \left(1 + \frac{\pi}{\cot \phi' - \frac{\pi}{2} + \phi'} \right) \gamma' L \right] \pi b(D-b) \end{aligned} \quad (10)$$

当 $z=0$ 时, 应有

$$P = P_v + \gamma'_{st} \left(\frac{\pi}{4} D^2 b + \pi b(D-b)(H-L) \right) - F \quad (11)$$

式中 P_v 是平台垂直荷载; 第二项是土面以上部分桶体的自重; F 是在自重下沉时为保证平稳下沉所施加的吊拉力 (否则, 由于力不平衡会产生下沉加速度)。由此, 可以得到桶自重下沉时下沉深度和吊拉力之间的关系:

$$A'L^2 + B'L + C' + \frac{F}{\pi D} = 0 \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{式中 } A' &= \tan \delta k_0 \gamma' (1 - \frac{b}{D}) \\ B' &= \left(1 + \frac{\pi}{\cot \phi' - \frac{\pi}{2} + \phi'} \right) \gamma' b (1 - \frac{b}{D}) + \\ &\quad 2\eta c'_0 (-\frac{b}{D}) + \tan \delta \frac{4}{D} G_s b \\ C' &= -\frac{P_0}{\pi D} - \gamma'_{st} \left[\frac{Db}{4} + bH(1 - \frac{b}{D}) \right] + \\ &\quad \frac{\pi c'_0 \cot \phi'}{\cot \phi' - \frac{\pi}{2} + \phi'} b (1 - \frac{b}{D}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当依靠自重下沉到最大深度 L_0 时, 应有吊拉力 $F=0$, 于是, 得

$$L_0 = \frac{-B' + \sqrt{B'^2 - 4A'C'}}{2A'} \quad (14)$$

由此可见, 自重下沉最大深度随桶体自重和垂直载荷的增加而增加, 随土体抗剪模量和抗剪强度的增加而减小。

根据委托方所提供的数据, $\gamma' = 9.7 \text{ kN/m}^3$, $c'_0 = 6.23 \text{ kPa}$, $\phi' = 35.3^\circ$, $k_0 = 1 - \sin \phi' = 0.422$, $D = 4 \text{ m}$, $b = 0.018 \text{ m}$, $H = 4.4 \text{ m}$, $\gamma_{st} = 76.44 \text{ kN/m}^3$, $\gamma'_{st} = 66.64 \text{ kN/m}^3$, $P_v = 980 \text{ kN}$, $G_s = 3394 \text{ kPa}$ 。由《基础工程手册》^[9]可知, 潮湿粉土与钢之间的摩擦角为 20° , 饱和粉土则更低一点, 可设为 $\delta = 18^\circ \sim 20^\circ$ 。土和钢之间的吸附力系数 η 可取为 $0.6 \sim 0.9$ 。计算可得 $L_0 = 2.001 \sim 2.362 \text{ m}$ 。自重下沉深度随吸附力系数和摩擦角的变化见表 1。

表 1 桶体自重下沉所能达到的深度
Table 1 The sinking depth of a bucket by its weight

η	$\delta / (^\circ)$	L_0 / m
0.6	16	2.571
	18	2.362
	20	2.182
0.75	16	2.442
	18	2.252
	20	2.088
0.9	16	2.324
	18	2.152
	20	2.001

3 负压下沉时渗流的影响

当桶体依靠自重下沉达到稳定后, 要再使之下沉就必须采用负压下沉技术。所谓负压技术, 就是通过桶相连的导管抽取桶内的水与空气, 使桶内外产生压力差。桶内顶部流体压力相对于桶外同一高度的流体压力的差值就是负压。由于负压下沉时伴有渗流场作用, 使其周围土体中的有效应力发生变化, 而有效应力又影响着摩阻力的变化。因此, 在负压下沉时应该考虑渗流场的作用。

顺着渗流方向, 单位体积土体所受的渗透力 $f = -\gamma_w \frac{dh}{dl} = \gamma_w J$, 其中 J 为水力坡降。沿着桶裙壁的外侧和内侧显然为一根流线。上水头为 H_w , 下水头为 $\frac{p_a}{\gamma_w}$, 其中 p_a 为桶内土塞上方的绝对压力。流线全长 $L_f = L + b + L'$, 其中 L 为桶的入泥深度; L' 为桶内土塞的高度; b 为桶壁厚度。因此, 在该

流线全长上的平均坡降为

$$\bar{J} = \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{L + b + L'} \quad (15)$$

由于在桶外, 渗透方向与坐标 z 的方向相同, 故渗透力使有效应力增加, 而在桶内, 渗流方向与坐标 z 的方向相反, 故渗透力使有效应力减小, 于是

$$\sigma'_{z1} = \left(\gamma' + \gamma_w \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{L + b + L'} \right) z \quad (16)$$

$$\sigma'_{z2} = \left(\gamma' - \gamma_w \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{L + b + L'} \right) (z + L' - L) \quad (17)$$

$$\tau_1 = \eta C'_0 + \tan \delta k_0 \left(\gamma' + \gamma_w \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{L + b + L'} \right) z \quad (18)$$

$$\tau_2 = \eta C'_0 + \tan \delta k_0 \left(\gamma' - \gamma_w \frac{H_w - \frac{p_a}{\gamma_w}}{L + b + L'} \right) (z + L' - L) \quad (19)$$

可见, 负压下沉时, 渗流将导致桶外侧单位面积摩阻力加大, 桶内侧单位面积摩阻力减小。

4 压力大小与下沉深度的关系

与自重下沉时类似, 可建立桶的平衡微分方程, 应用端部条件 (此时桶顶的吊拉力 $F=0$), 并

忽略 L' 与 L 的差别, 最后可求得桶内土柱顶部所需的压力 p_a 与下沉深度 L ($L > L_0$) 的关系:

$$p_a = \gamma_w H_w - G \quad (20)$$

式中

$$G = \frac{4}{D(1 - \frac{2b}{D})^2} \left\{ \tan \delta k_0 \gamma' (1 - \frac{b}{D}) L^2 + \left[\tan \delta \frac{4}{D} G_s b + 2\eta C'_0 (1 - \frac{b}{D}) + (1 + \frac{\pi}{\cot \phi' - \frac{\pi}{2} + \phi'}) \gamma' b (1 - \frac{b}{D}) \right] L + \frac{\pi C'_0 \cot \phi'}{\cot \phi' - \frac{\pi}{2} + \phi'} b (1 - \frac{b}{D}) - \frac{P_v}{\pi D} - \gamma'_{st} \left[\frac{Db}{4} + Hb (1 - \frac{b}{D}) \right] \right\} \quad (21)$$

由式(21)可以看出, 桶内顶端的压力愈小, 亦即负压力值愈高 (桶内外压差愈大), 则所能达到的下沉深度也愈大, 负压下沉过程中所需维持的负压随下沉深度成抛物线增长。

5 实例

胜利油田 CB20B 桶形基础平台为一四桶基础平台, 单桶体外径为 4 m, 高度为 4.4 m, 壁厚 18 mm; 四桶体呈正方形分布, 桶体中心距为 13.6 m; 设计桶体入泥深度为 4 m, 工作水深 8.9 m, 平台材料均为型钢, 桶内土柱顶部所需的压力 p_a 与下沉深度 L ($L > L_0$) 的关系可见表 2。

由表 2 可见, 当 $\eta=0.6 \sim 0.9$, $\delta=16^\circ \sim 20^\circ$ 时, 要达到 4 m 的入泥深度, 桶内土柱上方所需要达到的压力在 33.217 8 ~ -9.678 kPa 之间。

表 2 下沉时入泥深度 L 与桶内土柱上方所需压力 p_a 的对应关系 (单位: kPa)
Table 2 The pressure p_a needed above the soil column inside the bucket versus the depth L of bucket inserting in mud (unit: kPa)

η	$\delta / (^\circ)$	L / m											
		2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4
0.6	16	/	/	86.156 8	78.879 6	71.507 3	64.039 8	56.477 0	48.819 1	41.066 1	33.217 8	25.274 3	17.235 7
	18	/	85.719 6	77.820 3	69.813 2	61.698 2	53.475 4	45.144 7	36.706 1	28.159 7	19.505 4	10.743 3	1.873 3
	20	86.437 8	77.925 5	69.292 5	60.538 6	51.664 0	42.668 5	33.552 2	24.315 0	14.957 1	5.478 3	-4.121 3	-13.841 7
0.75	16	/	/	72.894 5	73.574 9	65.823 7	57.977 2	50.035 6	41.998 8	33.866 8	25.639 6	17.317 3	8.899 7
	18	/	81.172 7	64.366 7	64.508 5	56.014 6	47.412 8	38.703 2	29.885 8	20.960 4	11.927 3	2.786 2	-6.462 7
	20	82.269 8	73.378 7	76.305 2	55.233 9	45.980 4	36.605 9	27.110 7	17.494 7	7.757 8	-2.099 9	-12.078 4	-22.177 7
0.9	16	/	84.245 0	76.305 2	68.270 2	60.140 1	51.914 7	43.594 2	35.178 5	26.667 6	18.061 5	9.360 2	0.563 8
	18	85.175 1	76.625 8	67.968 7	59.203 8	50.331 0	41.350 3	32.261 8	23.065 4	13.761 2	4.349 1	-5.170 8	-14.798 6
	20	78.101 8	68.831 8	59.440 9	49.929 2	40.296 7	30.543 4	20.669 3	10.674 3	0.558 6	-9.678	-20.035 4	-30.513 6

6 结 论

(1) 桶体可依靠自重下沉到一定深度,该深度随桶体自重和垂直载荷的增加而增加,随土体抗剪模量和抗剪强度的增加而减小。

(2) 负压下沉时,桶外侧渗透力使有效应力增加,桶内侧渗透力使有效应力减小,导致桶外侧单位面积摩阻力加大,桶内侧单位面积摩阻力减小。

(3) 负压值愈高(即桶内外压差愈大),则所能达到的下沉深度也愈大,负压下沉过程中所需维持的负压随下沉深度呈抛物线增长。

参 考 文 献

- [1] Aldridge T R. Current and future developments in offshore platform foundations[J]. *Structural Engineer*, 1997, 75(5): 78—85.
- [2] Hongyan Ding, Lan Qi, Jizu Xu. Bucket foundation

platforms installed in shallow and ice-drifting area[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2001, 15(4): 211—218.

- [3] 施晓春,陈国祥.桶形基础单桶水平承载力的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(6): 723—726.
- [4] 杨树耕,孟昭瑛.海上筒基平台负压沉贯阻力的数值计算研究[J]. *海洋学报*, 1999, 21(6): 94—101.
- [5] 刘振纹,袁中立.负压桶形基础地基水平承载力研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(6): 691—695.
- [6] 孟昭瑛,刘孟家.浅海桶形基础平台水平承载力与抗滑稳定性分析[J]. *黄渤海海洋*, 2000, 18(4): 36—41.
- [7] 何生厚,孙东昌.桶形基础采油平台负压沉贯阻力计算分析[J]. *中国海洋平台*, 2000, 15(1): 16—23.
- [8] 梁钟琪.土力学及路基[M].北京:中国铁道出版社, 1982.
- [9] 温特科恩 H F,方晓阳主编.钱鸿缙,叶书麟译.基础工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社, 1983.

会 讯

中国科学院岩土力学与工程学术研讨会、 全球华人中青年学者岩土力学与工程学术论坛 在武汉胜利召开

由中国科学院、中国工程院土木水利与建筑工程学部、国家自然科学基金委员会主办,中国科学院武汉岩土力学研究所、中国岩土工程研究中心、中国岩石力学与工程学会岩体物理数学模拟专业委员会承办的“中国科学院岩土力学与工程学术研讨会”、“全球华人中青年学者岩土力学与工程学术论坛”,于2003年10月28~30日在中国科学院武汉岩土力学所新装修的科研大楼内召开。来自中国、日本、法国、瑞典、英国、澳大利亚以及香港地区的260多名代表出席了会议,其中包括中国科学院院士9人,海外华人学者15人,各大专院校、科研院所的校长、院长、系主任、所长60多人。湖北省副省长王少阶、武汉市副市长袁善腊以及省科协领导到会祝贺并讲了话,中科院武汉分院党组书记陈平平代表会议主办单位致开幕词,中科院人教局副局长李和风也到会讲话。

本次会议一大特点是大多数会议代表年龄不足40岁,但均已挂有教授、研究员、博导等头衔,这标志着我国岩土力学与工程界人才济济,梯队结构已经形成。这些年轻学者将对我国经济建设、特别是对我国经济建设的大发展发挥重要作用。与会代表在三天的会期内,围绕“21世纪的岩土力学与岩土工程”这一主题,展开了热烈讨论,大会共有6位两院院士、3位知名学者作了特邀报告,12名海外学者与8名知名学者作了大会专题报告。

本次会议另一大特点是会议形式与国际接轨,改变以往学术交流时,论文作者在台上念报告、代表在台下听报告的形式,大会鼓励与会代表就自己所关心的课题,积极提问发言。大会依据“面向国际学科前沿,面向国家战略需求”的原则,安排了半天时间专门就“西部大开发及灾害环境下的重大工程安全性问题”等三个热门话题展开了自由形式发言、讨论。热门话题首先由会议召集人作专题引导发言,再由论文作者简要报告自己的研究成果,结合热门课题谈自己的看法与意见,这种会议形式的特点是与会代表可以解放思想,会议气氛活跃、代表们对成熟或不成熟的研究结果,都可以讲出来,这样讨论话题较为深入、启发性大,对与会者来说参与性强,收效也更大。

本次会议共录用论文163篇,以《岩土力学》增刊的形式发表。大会特邀报告与专题报告也于会前汇编成书出版。本次大会正值中国科学院武汉岩土力学所成立45周年的日子,该所科技人员以“面向学科前沿、面向国家需求”为题,专门编写出版近80万字的该所科研进展专著,以这样的形式来庆祝研究所已取得的辉煌成就。

会议期间同时还召开了“海外华人为国服务座谈会”、“中国岩土力学与岩土工程学科建设研讨会”、“中国岩石力学与工程学会岩体物理数学模拟专业委员会换届会议”、“中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会换届会议”。

(中国科学院武汉岩土力学研究所 黄理兴 供稿)