

DOI: 10.11779/CJGE2019S1031

刚柔性法向接触对混凝土防渗墙应力的影响研究

徐 畅, 潘家军, 江泊洧, 谭 凡, 杨昕光

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为在深厚覆盖层上高土质心墙堆石坝的设计中准确预测混凝土防渗墙的应力, 开展了防渗墙刺入黏土的模型试验, 利用 CT 断层扫描获得了防渗墙顶端土体的变形性状; 提出在防渗墙顶端与土体的法向接触模拟中, 应采用柔性法向接触本构模型; 建立了有限元模型, 研究了刚柔性法向接触对混凝土防渗墙应力的影响。结果表明: 防渗墙顶端切削周边土体, 发生了明显的刺入位移; 刚性法向接触本构模型不允许接触面发生嵌入, 因而防渗墙顶端周边土体对防渗墙的约束效应过于强烈, 导致防渗墙顶端较高的压应力; 柔性法向接触本构模型允许一定程度的接触面嵌入, 接触面嵌入位移可理解为实际刺入位移, 可较好地模拟实际工程中防渗墙刺入黏土的冲切破坏现象。

关键词: 混凝土防渗墙; 刚柔性法向接触; 数值模拟; CT 断层扫描

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0121-04

作者简介: 徐 畅(1978—), 男, 教高, 博士, 主要从事岩土工程数值分析方法研究。E-mail: mechanics007@aliyun.com。

Influences of rigid and flexible normal contacts on stress of concrete cut-off walls

XU Han, PAN Jia-jun, JIANG Ji-wei, TAN Fan, YANG Xin-guang

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: In the design of high rockfill dams with clay core wall on deep overburden, how to accurately predict the stress of concrete cut-off walls is the key scientific problem to be solved. An experimental study on the penetration of a cut-off wall into clay is carried out, and the deformation behavior of the clay at the top of the cut-off wall is obtained by means of the computed tomography. It is proposed that the flexible normal contact constitutive model should be adopted in the simulation of the normal contact between the top of the cut-off wall and the clay, and the finite element model is established to study the stress of the concrete cut-off wall under the rigid and flexible normal contacts. The results show that the top of the cut-off wall cuts the surrounding soil, and obvious penetration into soil displacement occurs. The normal hard contact constitutive model does not allow the contact surface to be embedded, so the restriction effect of the clay around the top of the cut-off wall is too strong, which leads to the high compressive stress at the top of the cut-off wall. The flexible normal contact constitutive model allows a certain degree of contact surface to be embedded and the embedding displacement of the contact surface can be interpreted as the actual penetration displacement. It can well simulate the punching failure phenomenon of cut-off walls penetrating into clay in practical engineering.

Key words: concrete cut-off wall; rigid-flexible normal contact; numerical simulation; computed tomography

0 引言

在深厚覆盖层上高土质心墙堆石坝设计中, 刚性的防渗墙常伸入黏土心墙内数米, 改变了黏土的受力条件, 制约了正常的土体变形规律, 而受约束的黏土反作用于防渗墙引起复杂的防渗墙压应力^[1], 因而在实际工程中如何准确预测防渗墙的应力是亟待解决的关键科学问题^[2]。

传统的数值计算方法仅关注于接触面的剪切变形特性^[3], 将防渗墙与土体的法向作用默认为刚性接触, 计算得到的防渗墙压应力值远高于实际监测值^[4]。若

防渗墙压应力计算值过大, 则会对坝体的选型与设计造成极大的困扰, 以致干扰最终的建坝决策, 需要进一步研究刚性接触算法的适用性。

1 防渗墙顶端土体的变形性状

采用创新性的试验方法, 研制了防渗墙刺入黏土

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404804); 国家自然科学基金-雅砻江联合基金重点项目(U1765203); 长江科学院创新团队项目(CKSF2015051/YT)

收稿日期: 2019-04-29

的模型试验设备，可对土体施加一等效上覆压力，实现防渗墙土体自重应力场的模拟。采用对防渗墙施加主动作用力的方式，开展了防渗墙刺入黏土的试验研究，其模型试验示意图见图1所示。

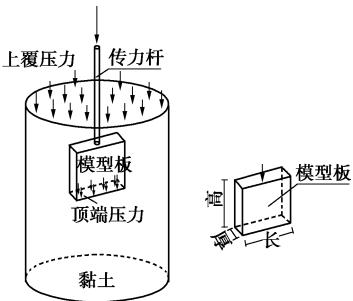


图1 防渗墙刺入黏土模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of penetration tests on cut-off wall

不同上覆压力（坝体自重应力）的防渗墙顶端土压力 - 刺入土体位移曲线见图2所示，为双曲线形状。

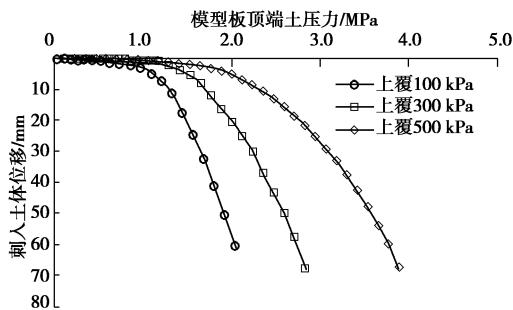


图2 防渗墙顶端土压力 - 刺入土体位移曲线

Fig. 2 Curves of earth pressure on top of cut-off wall with displacement penetrating into soil

试验过程典型CT断层扫描图像见图3所示，可将混凝土防渗墙顶端刺入黏土的变形分为三个阶段：

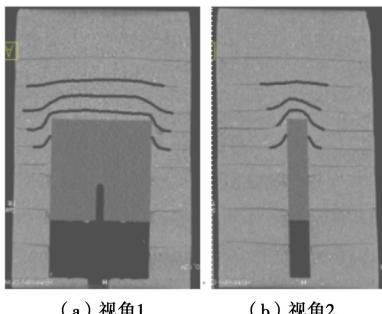


图3 典型CT断层扫描图像

Fig. 3 Typical images of computed tomography

(1) 剪切滑移阶段：在试验初始，防渗墙顶端土体处于挤压变形状态，周边土体隆起，并沿着 45° 角扩散，该阶段可称为剪切滑移阶段。

(2) 冲切破坏阶段：随着防渗墙受到的主动作用

力逐步增大，防渗墙顶端切削周边土体，发生了较为明显的冲切破坏，可称为冲切破坏阶段。

(3) 土压力稳定阶段：当防渗墙刺入土体位移达到一定程度后，防渗墙顶端土压力逐步达到一个极限值，此时刺入位移虽然有所增加，但土压力变化较小，该阶段可称为土压力稳定阶段。

由于在冲切破坏阶段防渗墙切削周边土体，发生了明显的冲切破坏，即使在有限元计算中采用土体大变形分析技术^[5]，也很难模拟这种防渗墙直接切削土体的现象。通过CT断层扫描获得了防渗墙顶端土体的变形性状后，本文提出在防渗墙顶端与土体的法向接触模拟中，应该采用柔性法向接触本构模型^[6]。

2 刚性与柔性法向接触区别

2.1 刚性法向接触

接触面之间的相互作用包含两个部分：一是接触面的法向作用，二是接触面的切向作用。两个表面之间脱开距离称为间隙，嵌入距离称为嵌入量。刚性法向接触接触表面之间能够传递的接触压力大小没有任何限制，因而在计算中限制了可能发生的接触面嵌入现象，其接触压力 - 嵌入量曲线关系见图4(a)所示。

2.2 柔性法向接触

柔性法向接触实质是接触压力随接触两个表面之间嵌入量变化而变化，其接触压力 - 嵌入量曲线关系见图4(b)所示，可以设定为非线性关系，也可以设定为线性关系。

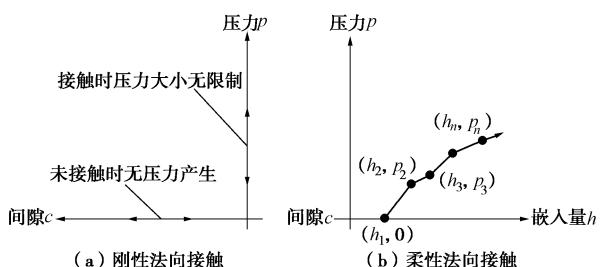


图4 刚柔法向接触压力 - 嵌入量关系曲线

Fig. 4 Curves of rigid and flexible normal contact pressures with penetration displacement

3 计算模型与计算参数

设定了图5所示心墙坝算例，覆盖层厚约100 m，坝高223 m，1 m厚防渗墙伸入黏土心墙的深度为10 m。覆盖层及坝料的Duncan-Chang E-B模型参数见表1所示，参照国内已建堆石坝工程试验参数选取。

表1中， c 为黏聚力， φ 为内摩擦角， K ， n 分别为初始弹性模量基数和弹性模量指数， K_b ， m 分别为初始体积模量基数和体积模量指数， R_f 为破坏比， φ_0

表 1 覆盖层及坝料的 Duncan-Chang E-B 模型参数

Table 1 Duncan-Chang E-B model parameters for overburden and dam materials

材料	干密度 /(g·cm ⁻³)	φ_0 /(°)	$\Delta\varphi$ /(°)	c /kPa	φ /(°)	K	n	R_f	K_b	m
覆盖层	2.23	52.0	9.5	—	—	1300	0.30	0.86	755	0.13
堆石 I	2.22	46.7	5.7	—	—	1450	0.27	0.89	530	0.30
堆石 II	2.20	47.8	6.0	—	—	1600	0.29	0.89	575	0.38
反滤层	2.16	42.0	2.0	—	—	700	0.45	0.73	350	0.18
过渡层	2.10	42.7	3.8	—	—	900	0.32	0.79	450	0.24
心墙	1.97	—	—	35	31	400	0.34	0.88	240	0.30

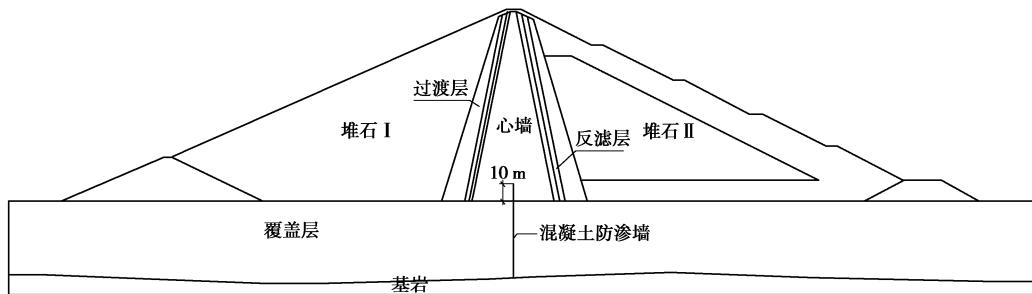


图 5 心墙坝横断面设计图

Fig. 5 Cross-section design of dam body

为一个标准大气压时的摩擦角 φ 值, $\Delta\varphi$ 为围压增加一个对数周期时摩擦角 φ 的减小量。

C30 混凝土防渗墙采用线弹性本构模型, 其弹性模量为 30 GPa, 泊松比为 0.167。考虑防渗墙周边泥皮的影响, 覆盖层与防渗墙之间的切向摩擦角设定为 11°。

对于防渗墙两侧边、底边与周边土体的接触部分, 其法向仍设定为刚性接触模型, 而对于防渗墙伸入黏土的顶端, 分别设置刚性与柔性法向接触模型进行了对比分析。

对于柔性法向接触模型, 法向劲度系数与防渗墙顶上覆压力、接触面周边的材料模量有关, 假定设置为 50, 100, 250, 500, 750, 1000, 5000 MPa/m 等 7 种情况进行了计算。

4 防渗墙竖向应力的分布规律对比

法向劲度系数敏感性分析结果见表 2 所示, 其中应力以受压为正, 可知法向劲度系数取值对计算结果影响较大。

表 2 法向劲度系数敏感性分析结果

Table 2 Sensitivity analysis results of normal stiffness coefficient

工况	法向劲度系数/(MPa·m ⁻¹)	墙顶部压应力/MPa	墙底部压应力/MPa	接触嵌入位移/cm
1	50	11.8	53.1	46.1
2	100	14.6	54.9	34.8
3	250	13.8	55.9	21.2
4	500	16.4	57.5	15.3
5	750	19.5	61.4	9.9
6	1000	19.7	62.8	3.4
7	5000	20.3	63.5	1.2
8	刚性	20.3	63.7	0.0

图 6 为防渗墙最大竖向压应力与法向劲度系数的关系曲线, 当法向劲度系数大于 1000 MPa/m 后, 其值的增加对防渗墙的压应力再无明显的影响。

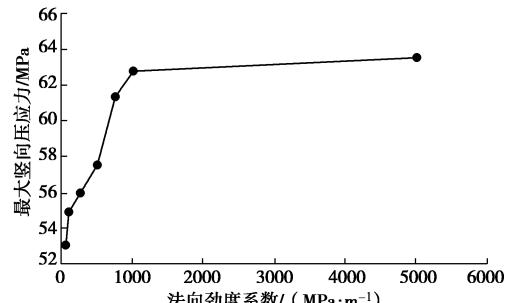


图 6 防渗墙最大竖向压应力与法向劲度系数关系

Fig. 6 Relationship between maximum vertical compressive stress and normal stiffness coefficient of cut-off wall

图 7 为法向劲度系数为 50 MPa/m 时计算获得的防渗墙竖向应力分布曲线, 其中竖向坐标 0 m 高程为防渗墙顶端。可知与刚性相比, 顶端压应力差异高达 8.5 MPa, 而其余高程数值大小的差异均是由防渗墙顶端压应力的不同引起的。

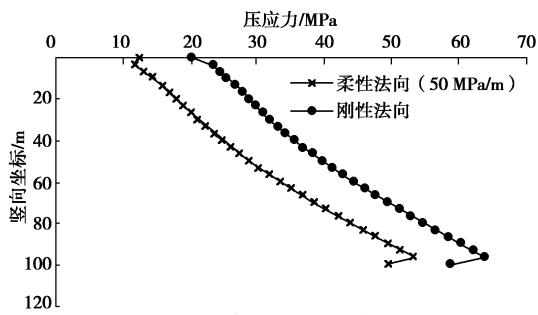


图 7 防渗墙竖向应力分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of vertical stress of cut-off wall

图 8 为防渗墙顶端土体的变形性状计算云图, 其中竖向与水平坐标单位为 m, 云图单位为 cm。可知在刚性法向接触中, 防渗墙顶端对土体起到了强烈的顶托作用(见图 8(a)), 引起了防渗墙较高的压应力。而在柔性法向接触中, 工况 1 计算得到的接触面嵌入位移为 46.1 cm, 防渗墙顶端周边的土体已经沉陷下去(见图 8(b)), 仅在墙顶端对小范围土体有顶托作用。

比较图 8(b) 计算云图与图 3(b) 典型 CT 断层扫描图, 可知土体的变形性状基本吻合。柔性法向接触本构模型允许一定程度的接触面嵌入, 这种接触面嵌入位移可理解为实际刺入位移。

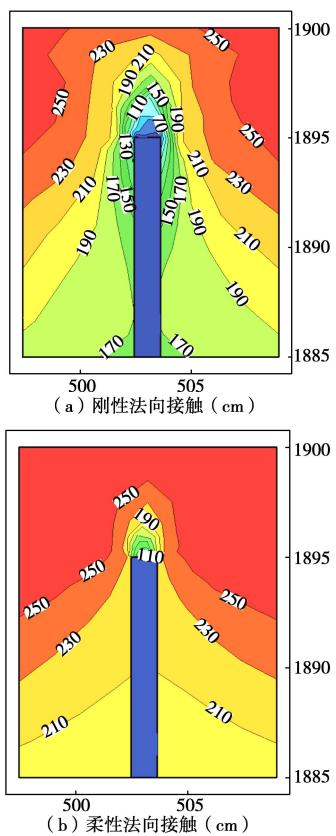


图 8 防渗墙顶端土体变形性状云图

Fig. 8 Contours of deformation characteristics of soil at top of cut-off wall

5 结 论

(1) 可将防渗墙顶端与土体的接触变形分为剪切滑移、冲切破坏、土压力稳定三个阶段, 在冲切破坏阶段防渗墙顶端切削周边土体, 明显刺入了土体内, 该效应在有限元计算中必须合理考虑。

(2) 刚性法向接触本构模型不允许接触面发生嵌

入, 与实际工程中防渗墙顶端土体发生切削情况不符, 导致防渗墙顶端较高的压应力。

(3) 柔性法向接触本构模型允许一定程度的接触面嵌入, 这种接触面嵌入位移可理解为实际刺入位移, 计算得到的防渗墙顶端土体的变形性状与 CT 断层扫描图基本吻合, 表明柔性法向接触本构模型可较好地模拟实际工程中防渗墙刺入黏土的冲切破坏现象。

参 考 文 献:

- [1] 余翔, 孔宪京, 邹德高. 混凝土防渗墙变形与应力分布特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(9): 1704 - 1711. (YU Xiang, KONG Xian-jing, ZOU De-gao. Deformation and stress distribution characteristics of concrete cut-off wall [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(9): 1704 - 1711. (in Chinese))
- [2] 丁艳辉, 张其光, 张丙印. 高心墙堆石坝防渗墙应力变形特性有限元分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 162 - 167. (DING Yan-hui, ZHANG Qi-guang, ZHANG Bing-yin. FEM analysis of stress-deformation characteristics of cut-off walls in high core rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 162 - 167. (in Chinese))
- [3] 朱俊高, SHAKIR R R, 杨有莲, 等. 土-混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 692 - 696. (ZHU Jun-gao, SHAKIR R R, YANG You-lian, et al. Comparison of behaviors of clay-concrete interface from ring-shear and simple shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 692 - 696. (in Chinese))
- [4] 程展林. 三峡二期围堰垂直防渗墙的应变形态[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(6): 34 - 37. (CHENG Zhan-lin. Strain status of vertical impervious wall in TGP stage-2 upstream cofferdam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(6): 34 - 37. (in Chinese))
- [5] YU X, ZOU D G, KONG X J, et al. Large-deformation finite element analysis of the interaction between concrete cut-off walls and high plasticity clay in an earth core dam[J]. Engineering Computations, 2017, 34(4): 1126 - 1148.
- [6] ZHANG Q L, WU H G. Using softened contact relationship describing compressible membrane in FEA of spiral case structure[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013, 13(4): 506 - 517.

(责编: 明经平)