

文章编号:1673-2049(2008)01-0107-04

基于双剪统一强度理论的刚性结构物 竖直土压力计算

黄亚娟^{1,2}, 赵均海¹, 田文秀^{1,3}

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 上海现代建筑设计有限公司, 上海 200041;
3. 山东电力工程咨询院, 山东 济南 250013)

摘要:采用双剪统一强度理论,考虑中间主应力的影响,对沟内埋管的竖直土压力进行计算,得到了刚性结构物的竖直土压力的统一解。该统一解具有普遍性,既适用于拉压强度不同的材料,也适用于拉压强度相同的材料。计算结果表明,当拉压比一定时,随着填土厚度的加深,竖直土压力随着中间主应力系数的增大而减小,即沟壁向上的摩阻力对管顶上土压力的卸荷作用更加明显。应用双剪统一强度理论可以得出更符合土体性质的竖直土压力,可以更好地发挥材料的强度潜能,使其在工程应用中取得显著的经济效益。

关键词:竖直土压力;双剪统一强度理论;中间主应力;刚性结构

中图分类号:TU432 **文献标志码:**A

Calculation of Vertical Earth Pressure of Rigidity Structures Based on Two Shear Unified Strength Theory

HUANG Ya-juan^{1,2}, ZHAO Jun-hai¹, TIAN Wen-xiu^{1,3}

(1. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Shanghai Xiandai Architectural Design Ltd, Shanghai 200041, China;

3. Electric Power Engineering Consulting Institute of Shandong Province, Jinan 250013, Shandong, China)

Abstract: Based on two shear unified strength theory, the vertical earth pressure for pipe groove was computed by considering the intermediate principal stress, and the unified solutions of vertical earth pressure of rigid structures were obtained. The unified solutions had the universality, which were either suitable to different materials of tension-compression strength, or suitable to same materials of tension-compression strength. The calculation results show that when tension-compression ratio is certain, with the filling thickness being deepening, the vertical earth pressure decreases with increasing of the intermediate principal stress coefficient, ie the effect of ditch wall friction of upward pressure on the pipe unloading is more obvious. The vertical earth pressure which is more suitable for soil properties is gained by using two shear unified strength theory, and brings the strength of materials into full play, as well as obtains the remarkable economic efficiency in the engineering applications.

Key words: vertical earth pressure; two shear unified strength theory; main stress in middle; rigidity structure

收稿日期:2008-02-01

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040710001);陕西省自然科学基金研究计划项目(2005E204)

作者简介:黄亚娟(1982-),女,河南商丘人,长安大学工学硕士研究生,E-mail:yajuanh@126.com。

0 引言

地下填埋式结构物(坝下埋管、给排水管、煤气管、输油管、天然气管和地铁站等)是土木工程中常见的一类结构物^[1]。进行该类结构物设计时,需要计算作用在结构物上的各种外荷载,其中,周围填土作用在结构物上的土压力是其主要荷载,而土压力的大小与结构物的埋置方法密切相关,埋置方法不同其受力特点也不相同。一般而言,结构物的埋置方法可分为沟埋式和上埋式 2 种典型形式。沟埋式系在原地基上挖沟埋管再回填,上埋式系在原地基上直接放管或用桩支撑,再回填。

关于沟埋式结构物的竖直土压力,目前是根据 Marston 和 Spangler 的理论进行计算^[2]。其考虑方法是假定把埋管顶上部分和它的周边部分区分为 2 个垂直断面,在这假想的断面上,两部分的相对位移产生摩擦力,于是,作用在埋管顶部的竖直土压力,应等于埋管上土的质量加上或减去此摩擦力。Marston 根据散体极限平衡理论提出了计算沟埋式结构物竖直土压力的计算公式,至今仍得到广泛的应用。该公式基于 Mohr-Coulomb 与 Tresca 强度准则,没有考虑中间主应力的影响。试验证明:中间主应力对土体的屈服和破坏有影响^[3-10]。由 Mohr-Coulomb 与 Tresca 强度准则推导的 Marston 公式并不能完全反映竖直土压力计算的实际情况,且所得到的结果偏于保守,不能充分发挥土体的强度潜能。笔者基于俞茂宏的双剪统一强度理论,考虑中间主应力和拉压强度比的影响,对沟埋式刚性结构物的竖直土压力进行计算,得到了沟埋式结构物竖直土压力的统一解形式。

1 理论分析

双剪统一强度理论是考虑了材料的拉压异性、抗压同性以及不同中间主应力效应的一种全新的强度理论。根据参考文献[4],在岩土力学中一般规定压应力为正,拉应力为负,则其数学表达式分别为

$$F = \frac{1 - \sin \varphi_0}{1 + \sin \varphi_0} \sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1 + b} = \frac{2c_0 \cos \varphi_0}{1 + \sin \varphi_0} \quad (1)$$

$$\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sin \varphi_0 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$$

$$F' = \frac{1 - \sin \varphi_0}{(1 + \sin \varphi_0)(1 + b)} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = \frac{2c_0 \cos \varphi_0}{1 + \sin \varphi_0} \quad (2)$$

$$\sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sin \varphi_0 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$$

式中: b 为反映中间主应力的系数, $0 \leq b \leq 1$; c_0 、 φ_0 分别为岩土的内聚力和内摩擦角。

对于平面应变问题,令中间主应力 σ_2 为

$$\sigma_2 = \frac{m(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \quad 0 \leq m \leq 1 \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)、(2)得

$$[2(1 - \sin \varphi_0)(1 + b) - bm(1 + \sin \varphi_0)]\sigma_1 - (bm + 2)(1 + \sin \varphi_0)\sigma_3 = 4c_0(1 + b)\cos \varphi_0 \quad (4)$$

$$(1 - \sin \varphi_0)(bm + 2)\sigma_1 + [bm(1 - \sin \varphi_0) - 2(1 + b)(1 + \sin \varphi_0)]\sigma_3 = 4c_0(1 + b)\cos \varphi_0 \quad (5)$$

根据文献[4],令主应力 σ_1 为

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi_t}{1 - \sin \varphi_t} \sigma_3 + \frac{2c_t \cos \varphi_t}{1 - \sin \varphi_t} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)得

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi_t &= \frac{b(m-1) + (bm+b+2)\sin \varphi_0}{2+b-b\sin \varphi_0} \\ c_t &= 2(1+b)c_0 \cos \varphi_0 \cdot \{ [2(1+b)(1 - \sin \varphi_0) - bm(1 + \sin \varphi_0)](bm+2) \cdot \\ &\quad (1 + \sin \varphi_0) \}^{-\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: φ_t 、 c_t 分别为双剪统一强度理论下的内摩擦角和内聚力。

2 公式推导

根据一点应力状态的 Mohr 圆,研究与主应力 σ_1 作用面成 α 角的面,其面上的应力为^[11]

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha, \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (8)$$

由式(6)得

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_t + c_t \cos \varphi_t \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)得

$$\tau = \frac{\sin \varphi_t \sin 2\alpha}{1 + \cos 2\alpha \sin \varphi_t} \sigma + \frac{c_t \cos \varphi_t \sin 2\alpha}{1 + \cos 2\alpha \sin \varphi_t} \quad (10)$$

为求得一点在某一平面上的最大剪切应力,根据求极值的方法,由 $\frac{\partial \tau}{\partial \alpha}$ 得

$$\cos 2\alpha = -\sin \varphi_t$$

故

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi_t}{2} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得

$$\tau = \sigma \tan \varphi_t + c_t \quad (12)$$

对于沟埋式结构物,沟槽宽度为 B ,填土在自重作用下向下沉陷,在两侧沟壁上产生向上的剪切应力,并假定它等于土的抗剪强度(图 1)。在填土面

下深度 z 处,取厚度 dz 的土层作为隔离体进行受力分析。土层质量 $d\tau w = Bd\tau z$,侧向土压力 $\sigma_h = K\sigma_z$, σ_z 为竖直土压力。由式(12)可知,沟壁抗剪强度 $\tau_t = \sigma_h \tan \varphi_t + c_t$ 。根据力的平衡条件以及图 1 得

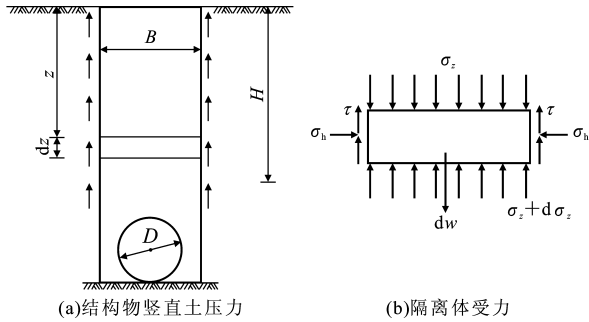


图 1 沟埋式结构物竖直土压力计算

Fig. 1 Calculation of Vertical Earth Pressure of Gutter Cover Type Structure

$$\gamma Bd\tau z - Bd\tau \sigma_z - 2(K\sigma_z \tan \varphi_t + c_t)dz = 0 \quad (13)$$

式中: γ 为填土重度; K 为土压力系数,一般介于主动土压力系数 K_a 与静止土压力系数 K_0 之间,Marston 采用主动土压力系数 K_a 。

式(13)可写成

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \gamma - \frac{2c_t}{B} - 2K\sigma_z \frac{\tan \varphi_t}{B} \quad (14)$$

根据边界条件,当 $z=0$ 时, $\sigma_z=0$,解式(14)可得结构物顶部 $z=H$ 处的土压力分布为

$$\sigma_z = B\left(\gamma - \frac{2c_t}{B}\right)\left(1 - e^{-2K\frac{H}{B}\tan \varphi_t}\right) / (2K \tan \varphi_t) \quad (15)$$

3 算例分析与比较

某输水渠道涵管如图 1 所示,外径 $D=0.8\text{ m}$,采用沟埋式施工方法,槽宽 $B=2.0\text{ m}$,回填稍湿砂土, $c_0=0$, $\varphi_0=30^\circ$, $\gamma=16.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。求当管顶填土厚度 H 分别为 $2.0, 3.0, 4.0\text{ m}$ 时,作用于管顶上的竖直土压力 σ_z 、填土柱重度 $\bar{\sigma}_z$ 。

(1) 由 Marston 公式 $\sigma_z = B\left(\gamma - \frac{2c}{B}\right)\left(1 - e^{-2K\frac{H}{B}\tan \varphi}\right) / (2K \tan \varphi)$ 可得

$$\sigma_z = \frac{B\gamma}{2K \tan \varphi_0} \left(1 - e^{-2K\frac{H}{B}\tan \varphi_0}\right)$$

采用 $K = K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}) = \tan^2 30^\circ = 0.333$,计算可得:① $H=2.0\text{ m}$ 时, $\sigma_z=27.40\text{ kPa}$,填土柱重度 $\bar{\sigma}_z = \gamma H = 33.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$;② $H=3.0\text{ m}$ 时, $\sigma_z=37.64\text{ kPa}$,填土柱重度 $\bar{\sigma}_z = \gamma H = 49.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$;③ $H=4.0\text{ m}$ 时, $\sigma_z=46.10\text{ kPa}$,填土柱重度 $\bar{\sigma}_z = \gamma H = 66.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(2) 本文中采用基于双剪统一强度理论推导的公式。根据文献[4]可知:当土体屈服时,取 $m=1$,由式(7)、(15)得

$$\sigma_z = B\left(\gamma - \frac{2c_t}{B}\right)\left(1 - e^{-2K\frac{H}{B}\tan \varphi_t}\right) / (2K \tan \varphi_t),$$

$$\varphi_t = \arcsin \frac{2(b+1)\sin \varphi_0}{2+b-b\sin \varphi_0}, c_t = 0$$

由上述计算的 $m=1$ 时的 σ_z 如表 1 所示,填土柱重度 $\bar{\sigma}_z$ 与 Marston 计算所得的相同。

表 1 不同填土厚度下的竖直土压力

Tab. 1 Vertical Earth Pressures Under Different Filling Thicknesses

H/m	不同 b 值时的土压力/kPa					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
2.0	27.39	26.40	25.38	24.32	23.15	21.86
3.0	37.61	35.66	33.71	31.71	29.61	27.34
4.0	46.04	43.00	40.03	37.07	34.03	30.86

由表 1 可以看出,随着参数 b 的增大,其竖直土压力也随之减小。这是由于参数 b 增大的同时,内摩擦角随之增大,则沟壁抗剪强度 τ_t 随之增大,从而沟壁向上的摩阻力对管顶上土压力的卸荷作用也随之增大;同时,还可以得到当 $b=0.0$ 时的计算结果与文献[1]中的结果相同。

(3) 令 $\beta = \sigma_z / \bar{\sigma}_z$,对不同 H 填土厚度下的 σ_z 与沟槽相同 H 处的填土柱重度 $\bar{\sigma}_z = \gamma H$ 进行比较,见表 2。由表 2 可以看出, β 均小于 1,从而沟埋式管顶的 σ_z 均小于 $\bar{\sigma}_z$ 。

由表 2 比较 $H=2.0, 3.0, 4.0\text{ m}$ 时的竖直土压力可知,随着 H 的加深, b 加大的同时,竖直土压力与填土柱重度的比值减小。这是由于竖直土压力逐步减小,而填土柱重度 $\bar{\sigma}_z$ 保持不变,从而其沟壁向上的摩阻力对管顶上土压力的卸荷作用更加明显。当 $b=0.0$ 时与文献[1]中所得结果相同。

表 2 不同填土厚度下的卸荷作用比较

Tab. 2 Unload Action Comparisons Under Different Filling Thicknesses

H/m	不同 b 值时的 β 值					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
2.0	0.83	0.80	0.77	0.74	0.70	0.66
3.0	0.76	0.72	0.68	0.64	0.60	0.55
4.0	0.70	0.65	0.61	0.56	0.52	0.47

4 结 语

(1) 考虑中间主应力所计算的刚性结构物的竖直土压力比 Marston 公式计算的竖直土压力要小。

(2)该统一解具有普遍性,既适用于拉压强度不同的材料,也适用于拉压强度相同的材料。

(3)应用双剪统一强度理论可以得出更符合土体性质的沟埋式结构物的竖直土压力,可以更好地发挥材料的强度潜能。

(4)本文中所推公式中土压力系数没有考虑中间主应力的影响,在工程应用中可能会带来不便,这也是今后要研究的课题。

参考文献:

References:

- [1] 王成华. 土力学原理[M]. 天津:天津大学出版社, 2002.
WANG Cheng-hua. Soil Mechanics Principle [M]. Tianjin; Tianjin University Press, 2002.
- [2] 日本土木学会. 土力学[M]. 刘成宇, 译. 北京:中国铁道出版社, 1984.
Japanese Construction Academic Society. Soil Mechanics [M]. Translated by LIU Cheng-yu. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.
- [3] 张学言, 闫澍旺. 岩土塑性力学[M]. 天津:天津大学出版社, 2004.
ZHANG Xue-yan, YAN Shu-wang. Rock and Earth Mechanics of Plasticity [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2004.
- [4] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1998.
YU Mao-hong. Twin Shear Theory and Its Applications [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [5] 俞茂宏. 岩土类材料的双剪统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1-10.
YU Mao-hong. Unified Strength Theory and Its Application of Rock and Soil Mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1-

10.

- [6] FINN W D. Applications of Limit Plasticity in Mechanics[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(5): 101-102.
- [7] DAVIS E H. Theories of Plasticity and the Failure of Soil Masses[M]. New York: Elsevier, 1968.
- [8] 俞茂宏, ODA Y, 盛 谦, 等. 统一强度理论的发展及其在土木水利等工程中的应用和经济意义[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 24-41.
YU Mao-hong, ODA Y, SHENG Qian, et al. Development of Unified Strength Theory and Its Applications in Civil Engineering and Its Economic Significance [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 24-41.
- [9] 易伟建, 杨随新. 软土地基上的土-结构动力相互作用[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 61-65.
YI Wei-jian, YANG Sui-xin. Soil-structure Dynamic Interaction Based on Soft Soil Foundation [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 61-65.
- [10] 石 坚, 武 莹, 贺建辉. 上部结构、筏板基础和地基共同作用的有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 72-75.
SHI Jian, WU Ying, HE Jian-hui. FEA on Interaction of Super Structure, Raft Foundation and Ground Base [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 72-75.
- [11] 范 文, 沈珠江, 俞茂宏. 基于统一强度理论的土压力极限上限分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1 147-1 153.
FAN Wen, SHEN Zhu-jiang, YU Mao-hong. Upper-bound Limit Analysis of Earth Pressure Based on Unified Strength Theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1 147-1 153.