

各向异性非线性强度条件下的边坡稳定性¹⁾

王建锋

陈祖煜

(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

张基泰

(国立金乌工科大学, 韩国大邱)

摘要 解释了土体强度各向异性、非线性的物理本质, 结合常规直剪试验、三轴试验结果, 在前人工作基础上建立了边坡稳定性分析中强度各向异性、非线性的描述方法, 其中特别提出了一个各向异性函数. 基于 Janbu 普遍条分法 (GPS), 运用 SPREADSHEET 模板程序, 提出了一个能将各向异性、非线性强度准则逐点等效到 Mohr-Coulomb 直线强度准则处理上的迭代方法, 准确方便地获得了非线性强度下的边坡稳定性分析. 最后的算例展示了方法的使用过程.

关键词 各向异性, 非线性, 抗剪强度, 边坡稳定性, 迭代

目前, 边坡稳定性分析主要使用 Mohr-Coulomb 强度准则, 极少考虑强度的各向异性和非线性特征. 然而, 已有研究表明^[1,2], 由于自然沉积过程主要呈现一维固结特征, 土体强度多表现出强烈的各向异性; 并且由于复杂的剪胀效应, 对于几乎所有土类, 其剪切破坏包络线均呈现不同程度的非线性^[3]. 考虑到边坡稳定问题涉及较宽阔的应力范围, 以及滑动面可以不同角度切穿层面, 因此边坡稳定分析中合理的做法应当是耦合广泛存在的各向异性和非线性特征. 虽然有少量研究工作探讨过两方面的问题, 但都限于极其简单的圆弧滑动分析^[4], 尚不能达到广泛的应用, 尤其是如何在通用的“精确”条分法中, 耦合各向异性和非线性强度特征仍然是尚未解决的问题. 为此, 本文在各向异性和非线性强度合理描述基础上, 建立一个能够同时耦合各向异性和非线性的新的强度准则, 并提出了一个能将此准则逐点等效到 Mohr-Coulomb 直线强度准则处理上的迭代方法, 以期获得更为广泛意义下的边坡稳定性分析.

1 各向异性、非线性强度准则

1.1 各向异性

研究表明, 土体的内摩擦角 ϕ 仅表现出极为有限的各向异性, 并且独立于外荷载方向; 但是, 土体的不排水强度和内聚力 c 则强烈地依赖于应力路径, 以及测定强度参数所采用的试验类型. 为了简化, 这里仅考虑内聚力 c 对应力路径的依赖性.

早在 20 世纪 40 年代, Casagrande 和 Carillo 就提出了如下任意方向上土体内聚力的表达式^[5], 后来 Bishop 对此有所发展^[1], 但基本形式未变.

$$c_i = c_h + (c_v - c_h) \cos^2 i \quad (1)$$

2003-05-28 收到第 1 稿, 2004-07-28 收到修改稿.

1) 中科院知识创新工程重要方向项目 (KJCX2-SW-L1) 和国家自然科学基金项目 (40372126, 50179039) 资助.

式中, c_v, c_h 分别是垂直压缩方向上 (一维固结方向)、平行压缩方向上的内聚力强度值, 也可以理解为垂直层面、平行层面方向上的内聚力, i 是一维固结方向与主应力方向的夹角, 在条分法中也可理解为侧面推力作用方向与垂向方向间的夹角, 如图 1 所示. 式 (1) 还可表示为

$$c_i = c_h + (c_v - c_h) \sin^2 \beta \quad (2)$$

如果定义土的各向异性比为 $K = c_h/c_v$, 那么

$$c_i = c_v [K + (1 - K) \sin^2 \beta] \quad (3)$$

当然, 也可以采用 $c_i = c_h \cos^2 \beta + c_v \sin^2 \beta$, $\varphi = \varphi_h \cos^2 \beta + \varphi_v \sin^2 \beta$ 来同时考虑滑面抗剪强度的各向异性.

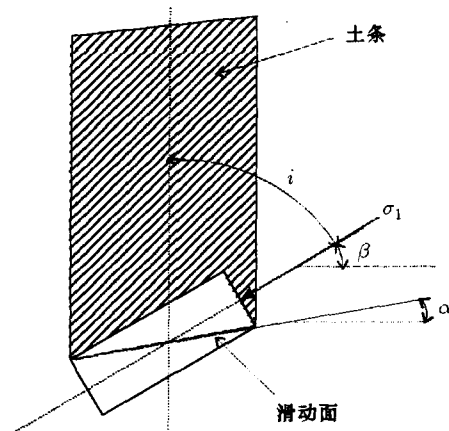


图 1 内聚力随剪切带方向变化模型

对一维固结压力下形成的土样进行剪切试验时, 测出的土样的垂直内聚力 c_v 往往大于水平向的内聚力 c_h . 工程实际中, 要求试验室测得的 c 值通常指的是 c_h 值. 设土层层面与水平面的夹角为 β , 基于 c_v 和 c_h 确定沿 β 方向的内聚力 c_β 的简单办法是线性内插. 但是, 试验表明, c_β 往往不是 β 的线性函数. 当 β 在 0° 附近和 90° 附近时, c_β 分别与 c_v 和 c_h 差别不大; 当 β 在 45° 时则变化很快. 公式 (2) 符合这一试验结论, 因为 $\sin^2 \beta$ 是条 S 形曲线, 在 $\beta = 0^\circ$ 时取极小值, 在 $\beta = 90^\circ$ 时取极大值, 在 $\beta = 45^\circ$ 时为曲线的拐点. 但是, 这一函数明显缺乏灵活性, 不能适应具体土样测试结果. 为此, 本文建议一族带有一个可变参数 λ 的 S

形曲线

$$y = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{45^\circ} \right)^\lambda, & 0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{90^\circ - \beta}{45^\circ} \right)^\lambda, & 45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

(1 < λ < 2)

这个分段函数有如下性质：当 β = 0° 时，y = 0；当 β = 90° 时，y = 1；当 β = 45° 时，y = 0.5。整个曲线对 (45°, 0.5) 点中心对称，是条 S 形曲线。随着 λ 由小到大的变化，这条曲线的弯曲情况也在变化。因此，这是一族 S 形曲线。利用它可对不同类型的土样选用不同的 λ 值，其对应的那条曲线即为理想的该土样的 c_β 的非线性公式，即

$$c_\beta = c_h + \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{45^\circ} \right)^\lambda (c_v - c_h), & 0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{90^\circ - \beta}{45^\circ} \right)^\lambda (c_v - c_h), & 45^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

(1 < λ < 2)

由于各土条侧面上作用力方向是变化的，因此滑面上内聚力均是 β 的函数。在边坡稳定性分析中，内聚力 c 的耦合需要迭代。

1.2 非线性

土体强度的非线性主要表现在内摩擦角对法向应力的依赖性上，其原因主要归于剪胀速率的不均匀性，剪切带中土颗粒相互接触和挤压所造成破损，以及随着滑动进行在滑动带中所产生的各种软化效应，如细粒化效应、滚轴效应等。为了描述滑动带强度特征，土力学领域已经提出了多种土体非线性强度准则，如幂、抛物线、双曲线等关系 [6~8]。

一般来说，不同的滑动带其物质组成、结构构造均有较大差别，其所可能遇到的荷载范围也不同，因此对于具体场地的土体强度非线性特征必须借助于较多的精细实验才能确定。判定所建立的非线性强度准则是否合理，其基本标准是在其滑动带可能遇到的应力范围内是否有效，以及准则的物理意义是否明确。

Maksimovic 认为剪切带内摩擦角随有效正应力呈双曲线关系 [7]。如图 2 所示，剪切带内摩擦角可表示为

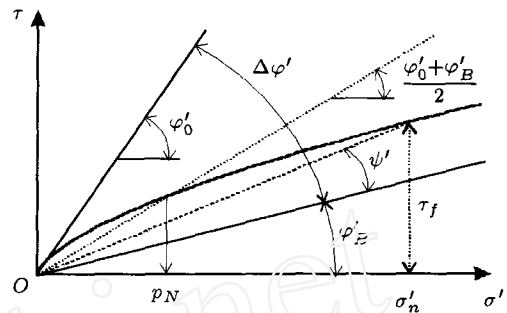
$$\varphi' = \varphi'_B + \frac{\Delta\varphi'}{1 + \sigma'_n/p_N} \quad (6)$$

式中

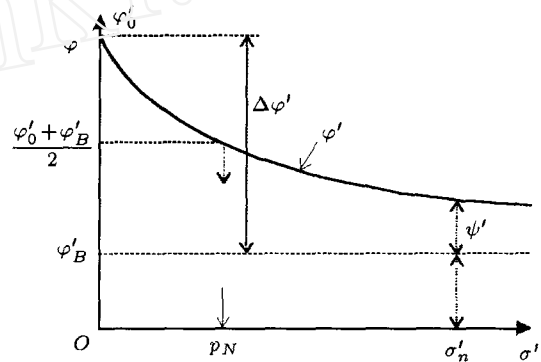
$$\varphi' = \tan^{-1}(\tau_f/\sigma'_n) \quad (7)$$

φ'_B 是基本摩擦角，也可理解为残余内摩擦角；Δφ' 是峰残内摩擦角间的最大差；p_N 是峰残内摩擦角的均值对应的法向有效应力，可理解为 1/2 广义剪胀角对应的法向应力。

这一准则能较好地反映剪切带由峰值强度演化为残余强度的一般过程。可以看出，其内摩擦角典型地由两部分组成，



(a) 破坏包络线



(b) 内摩擦角随法向应力的变化

图 2 剪切带内摩擦角的双曲模型

第一部分对应于体积不变情况下的摩擦角 φ'_B；第二部分包含了 Δφ'，主要是粒状土的最大剪胀效应的贡献，它能够用来描述强度的非线性特征，因而更具一般意义。

该模型中的相关参量可由常规的直剪试验和三轴试验数据运用优化方法得到。其中，可以用直剪试验资料经整理、优化直接得到；对于三轴试验，Zambrano-Mendoza 提出了直接运用三轴试验数据获得强度包络线的“变量误差”分析方法 [9]。

边坡稳定性分析中，内摩擦角对法向应力的依赖性的耦合同样需要数值迭代。

1.3 各向异性、非线性强度准则

基于上述考虑，Mohr-Coulomb 强度准则可更一般地表示为

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi' = c'_v [K + (1 - K) \sin^2 \beta] + \sigma'_n \tan \left(\varphi'_B + \frac{\Delta\varphi'}{1 + \sigma'_n/p_N} \right) \quad (8)$$

式中各参量均有明显的物理意义。

2 各向异性、非线性强度下的边坡稳定性

就岩土体来说，各向异性和非线性是绝对的，而各向同性是相对的。沉积历史越长，土中层状构造越加明显，因而越表现出强烈的各向异性。在低应力范围内，滑动面强度变化主要取决于破坏面上的法向应力水平。当要根据已有破坏事例反算滑动面上的强度参数时，土体各向异性和非线性必须考虑，否则所反演的强度参数的适用范围将受到限制。通

常,所反演的 Mohr-Coulomb 直线强度准则中的参数 c, φ , 实际上都是某一特定方向上、对应于某特定法向应力水平的精确值,很显然将这一数值用于滑动面具有不同几何形状、不同法向应力水平的边坡加固设计将是缺乏依据的。

区别于以往将非线性强度准则直接代入仅适用于圆弧滑动面的 Bishop 平衡方程的繁琐做法,借助于 Janbu 普遍条分法^[10], 这里采用将不同侧向力作用方向下、不同法向应力水平上滑动面的剪切强度逐点等效到 Mohr-Coulomb 强度线上并反复迭代的方法(图 3), 方便快速地获得了边坡稳定性分析中的非线性强度准则耦合。其具体方法如下:

1) 初始地, 利用 Mohr-Coulomb 直线强度参数, 借助于 Janbu 普遍条分法(GPS) 计算每个条块侧面作用力作用方向 $\beta(\beta_i = \arctan(T_i/E_i))$ 、底面上的有效法向应力 σ'_n ;

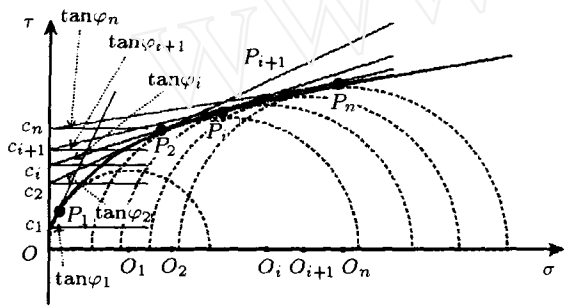


图 3 非线性强度逐点等效到 Mohr-Coulomb 强度线的方法

- 2) 用此 β, σ'_n 代入式(3), 式(6) 逐点计算 $\tan\varphi'_i$ 及 c'_i ;
- 3) 将上述 $\tan\varphi'_i$ 及 c'_i 代入 Janbu 平衡方程, (通过 Janbu 的两重迭代) 以求得稳定系数 F_s 的第一个估算值;
- 4) 用此 F_s (通过 t 值耦合在 σ'_n 中) 计算每一条块侧面作用力新的作用方向 β , 底部的新的 σ'_n 值;
- 5) 以新的 β , 新的 σ'_n 值, 按上述步骤 2) 计算新的 $\tan\varphi'_i$ 及 c'_i 值;
- 6) 以新的 $\tan\varphi'_i$ 及 c'_i 值, 计算新的稳定系数 F_s ;
- 7) 如果第 1 次稳定系数与第 2 次稳定系数间差值大于 0.000 001, 返回到第 4 步, 用第 2 次稳定系数作输入, 重复上述计算, 直到收敛为止。

上述过程在 SPREADSHEET 中, 运用迭代运算技巧

可以方便实现^[10,11]。

3 算例

三峡库区云阳塞坝滑坡区内的崩滑堆积物平台前缘发育一次生滑坡(图 4)。取滑坡前缘原位大剪试验上限数据¹⁾, 拟合结果见图 5, 其中, 直线型强度拟合结果为: $c = 22.13 \text{ kPa}, \varphi = 15.22^\circ$, 残差平方和为 74.1791。基于优化算法, 双曲型强度拟合结果为 $\varphi_B = 7.81^\circ, \Delta\varphi = 30.97^\circ, p_N = 169.48 \text{ kPa}$, 残差平方和为 23.3864。双曲拟合时取了 0 截距, 即不考虑内聚力。现场试验所取剪切面均系层面。现场大剪度试验结果: 天然重度 $\gamma_n = 21.4 \text{ kN/m}^2$, 饱和重度 $\gamma_s = 22.5 \text{ kN/m}^2$ 。计算中, 取 c 的软化系数为 0.6, φ 的软化系数为 0.8, 各向异性比 K 为 0.6。

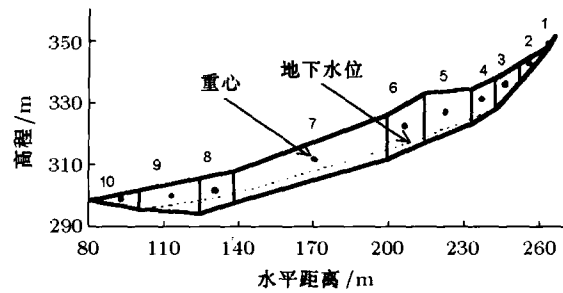


图 4 柏杨湾次级滑坡计算剖面

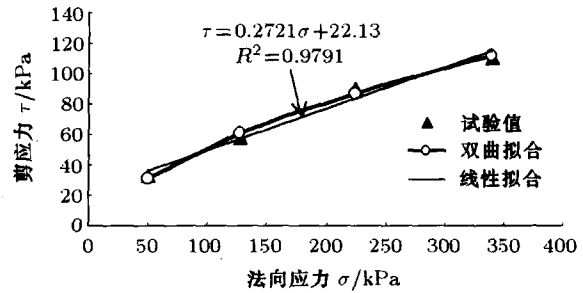


图 5 法向应力与剪切应力关系

计算结果表明, 如果以最不利荷载组合要求的安全系数 1.05 考虑, 运用直线型破坏准则进行分析, 则表明原有滑坡的稳定性不能满足要求(表 1)。然而, 运用非线性准则, 则表明滑坡稳定系数均远大于所要求的安全系数; 若在直线型

表 1 稳定性计算结果

工况 ²⁾	工况条件 [*]	直线型准则	稳定系数 F_s		
			非线性准则(双曲)	各向异性准则	各向异性、非线性准则
1	①+②	1.2617	1.6718	1.2927	1.6991
2	①+②+③	1.2493	1.6391	1.2802	1.6678
3	①+②+③+④	1.2291	1.5857	1.2421	1.5981
4	①+②+③+④+⑤	1.0259	1.3267	1.0377	1.3377

^{*} ①天然地下水位, ②自重, ③暴雨地下水位(按饱和重度计), ④建筑外载(按 20 kN/m 计), ⑤地震(VI 度, $a = 0.05g$)

1) 长江科学院重庆岩基研究中心试验室, 三峡库区云阳县新城塞坝滑坡原位直剪试验报告, 2002.1

2) 工况中的暴雨地下水位取埋深为 2~3m, 据长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 重庆市三峡库区云阳县城塞坝滑坡区工程地质勘察报告, 2002.3

准则基础上, 仅考虑内聚力的各向异性, 即 c 取 (3) 式而 $\varphi = 15.22^\circ$, 则滑坡稳定性也稍有增大, 但仍不能满足要求; 若同时考虑强度的各向异性、非线性, 则滑坡稳定性完全满足要求。

假定相对误差 η 定义为: $(F_l - F)/F_l$, 其中 F_l 是线性准则下的稳定系数, 而 F 为非线性或各向异性、或者两者同时起作用时准则下的稳定系数。如果以直线型准则为基础, 由计算结果可以看出, 仅考虑非线性效应时, 滑坡稳定性平均相对误差为 -30.5% , 强度非线性对滑坡的稳定性有正效应 (但不同滑坡此效应不同, 应视试验结果而定); 如果仅考虑各向异性, 则滑坡稳定性平均相对误差为 1.8% , 如系试验室得到的 c 为 c_h , 则强度各向异性对滑坡的稳定性总有正效应; 如果同时考虑非线性和各向异性, 滑坡稳定性平均相对误差为 -32.2% 。

上述运用不同准则, 所得计算结果均有所不同, 将对滑坡治理设计起重要作用。与本文工作几乎同时, 最新文献 [8] 的工作发现, 线性准则总是高估了边坡的稳定性, 并且与 2D 计算相比较, 在 3D 稳定性分析中, 忽略土体的非线性这种过高估计将更加明显。但是, 无论何种情况, 运用精确的现场实验, 更全面考虑滑坡固有力学性质, 将总是合理的途径。就此而言, 非线性、各向异性始终是绝对的, 线性、各向同性则是相对的, 考虑前者将是必然趋势。

4 结 论

土体强度非线性的物理本质可以归结于剪胀性。就此而言, 无黏性土的非线性将更加明显。一般地, 从更为广阔的应力范围来看, Mohr-Coulomb 直线强度准则都高估了滑坡的稳定性, 尤其是极低应力 (通常所遇到的滑坡都处于极低应力范围, 而试验室测定的强度所使用的压力都高于其实际所受的压力, 因为低应力区不易得到试验数据) 和极高应力范围 (对于陡坡坡脚附近, 以及大型深厚滑坡体的滑坡舌部位更是如此), 过高估计更加明显; 但在某些较窄应力范围, 由于惯例的线性回归估值, 也许低估了滑动面具有的抗剪强度。因此, 具体的稳定性分析必须针对具体滑坡的现场或室内精细试验结果所确定的非线性特征进行计算评价。滑动带内聚力对所加应力方向有依赖性, 若试验室以层面内聚力为测定目标, 那么这种各向异性将降低边坡稳定性, 降低程度取决于各向异性比。由于强度各向异性总是增加滑坡稳定性, 而非线性有时可增加稳定或降低稳定性, 因此两者共同耦合作用并不总是十分明确的, 需要具体问题具体分析。本文工作还表明, 直线强度准则的误差是不可忽略的, 目前各向异性、非线性准则的获得并不困难, 其引入边坡稳定分析的意义已经十分重要了, 并且运用此强度各向异性、非线性解析关系, 将滑动面上不同法向应力水平上的剪切强度逐点等效到 Mohr-Coulomb 强度线上并反复迭代, 可以方便快速地获得更为合理的边坡稳定性评价。过去仅考虑线性、各向异性的主要原因是计算机对复杂的迭代能力不够所致, 在新的 SPREADSHEET 环境下, 复杂的迭代则将很容易实

现, 这是目前国际上工程计算的重要发展趋势。

参 考 文 献

- 1 Bishop AW. The strength of soils as engineering material. *Geotechnique*, 1966, 16(2): 89~130
- 2 Duncan JM, Seed HB. Anisotropy and stress reorientation in clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1966, 92(SM5): 21~50
- 3 Charles JA, Watts KS. The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill. *Geotechnique*, 1980, 30(4): 353~367
- 4 Al-Karni AA, Al-Shamrani MA. Study of the effect of soil anisotropy on slope stability using method of slices. *Computers and Geotechnics*, 2000, 26: 83~103
- 5 Casagrande A, Carillo N. Shear failure of anisotropic materials. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Contributions to Soil Mechanics*, 1944, 31(4): 1941~1953
- 6 Zhang XJ, Chen WF. Stability analysis of slopes with general nonlinear failure criterion. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1987, 11: 33~50
- 7 Maksimovic Milan. A family of nonlinear failure envelopes for non-cemented soils and rock discontinuities. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Premiere Volume*, 1996, Volume 1, 1~62. Also see: <http://www.ejge.com/1996/Ppr9607/Abs9607.htm>
- 8 Jiang JC, Baker R, Yamagami T. The effect of strength envelope nonlinearity on slope stability computations. *Can Geotech J*, 2003, 40: 308~325
- 9 Zambrano-Mendoza O, Valko PP, Russell JE. Error-invariables for rock failure envelope. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, 40: 137~143
- 10 Low BK, Tang WH. Probabilistic slope analysis using Janbu's generalized procedure of slices. *Computer and Geotechnics*, 1997, 21(2): 21~142
- 11 Wang JF, Chen ZY, Chang KT. Slope stability analysis using anisotropic and nonlinear failure criteria. In: Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Sayao eds. *Landslides: Evaluation and Stabilization*. London: Taylor & Francis Group, 2004. 1125~1131

SLOPE STABILITY ANALYSIS WITH NONLINEAR FAILURE ENVELOPES USING JANBU'S GENERALIZED PROCEDURE OF SLICES

WANG Jianfeng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

CHEN Zuyu

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

CHANG Ki-Tae

(Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

Abstract The shear strength developed in a landslide is usually anisotropic and nonlinear. The anisotropy is primarily due to the process of sedimentation predominantly followed by one-dimensional consolidations. The nonlinearity could be attributed to "interlocking" or "dilatancy" of the material, which is generally dependent upon the stress level. In the paper, a new anisotropic function was developed. An analytical method considering both anisotropy and nonlinearity of the failure envelopes is pre-

sented in the paper. The nonlinear failure envelopes can be obtained from routine triaxial tests. In a SPREAD-SHEET setup, the authors developed an approach that uses the Janbu's Generalized Procedure of Slice and incorporates anisotropic and nonlinear failure envelopes. In the analysis, an equivalent Mohr-Coulomb linear relation is obtained by drawing a tangent to the anisotropic and nonlinear envelope. An illustrative example is given to show the feasibility and numerical efficiency of the method.

Key words anisotropy, nonlinearity, shear strength, slope stability, iteration

混凝土砌块墙体裂缝的力学机理探讨¹⁾

刘文锋

(青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266033)

摘要 从混凝土砌块墙体裂缝的工程调查出发, 分析裂缝的成因和表现形式, 指出温度裂缝和干缩裂缝混凝土砌块墙体裂缝的两种主要形式, 根据实测的墙体温差, 计算了温度裂缝应力; 根据 Kelvin 方程, 阐述了干缩裂缝的机理, 并估算了干缩裂缝应力, 解释了产生混凝土砌块墙体的裂缝原因。

关键词 混凝土砌块墙体, 温度裂缝应力, 干缩裂缝的机理, 裂缝

1 混凝土砌块墙体裂缝研究的必要性与紧迫性

砖石是最古老的建筑材料, 几千年来由于其良好的物理力学性能、易于取材、生产和施工, 造价低廉, 是我国传统的主导墙体材料。近年来, 随着可持续发展战略的实施, 传统的墙体材料改革势在必行。墙体材料革新向节能、节地、利废、环保、绿色、高强、轻质、保温、隔声、高效省工等方向发展。

采用混凝土砌块替代实心黏土砖是墙体材料改革的措施之一, 但是由于砌块砌体的抗拉及抗剪强度比黏土砖砌体低、砌块砌体的收缩率比黏土砖砌体大、砌块体积较大, 搭接长度相对较小, 机械咬合力较小等原因, 造成实际工程中砌块建筑的墙体开裂现象比较普遍, 裂缝的类型也较为复杂。

解决混凝土砌块墙体裂缝问题是一个多学科的综合问题, 涉及材料学、热物理学、力学、土力学等多个学科, 包括材料性能、热力场模拟、材料在动态环境的力学行为、有限元分析、建筑结构设计、施工技术与管理、试验、检验、检测等问题。因此, 应从产生裂缝的力学机理的基本问题出发, 分析产生裂缝的原因, 寻找解决裂缝的办法。

2 裂缝的成因与表现形式

2.1 裂缝的成因

经过广泛的调查和分析, 根据混凝土砌块墙体裂缝产生的部位和特征, 产生裂缝的成因主要有以下几种情况: ①温度应力引起的裂缝; ②砌体干缩裂缝; ③设计、施工原因, 导致的墙体承载力不足产生的裂缝; ④地基不均匀沉降; ⑤砌块材料不合格和施工不符合要求导致的砌体裂缝。产生裂缝的力学原因是多种因素的综合反映, 其中, 温度、干缩、温度和干缩的共同作用是导致混凝土砌块墙体裂缝的主要力学原因。

2.2 裂缝的表现形式

2.2.1 温度裂缝的表现形式

温度裂缝主要表现在: 纵墙和横墙上斜裂缝; 屋盖与墙体之间的水平缝或包角裂缝; 内横墙与外纵墙相交处在横墙出现斜裂缝; 窗口上角沿过梁出现倒八字斜裂缝; 门、窗和洞口角部斜裂缝; 沿圈梁与混凝土砌块相交出的水平裂缝; 女儿墙墙根与屋盖顶板相交处的水平环形封闭裂缝; 女儿墙压顶处的不规则裂缝等。

温度裂缝最常见的有斜裂缝和水平裂缝, 斜裂缝有一端宽另一端细和中间宽两端细两种。水平裂缝多数呈断续状, 中间宽两端细, 缝宽变化不大。温度裂缝不仅位置、形状、分布有一定规律, 还表现在阳面比阴面裂缝多; 顶部比底部裂缝多; 纵墙比横墙裂缝多。

2.2.2 干缩裂缝的表现形式

干缩裂缝主要表现在: 房屋内外纵墙中间对称分布的倒

2003-12-01 收到第 1 稿, 2004-04-01 收到修改稿。

1) 山东省自然科学基金项目 (Y2001F07) 资助。