

沉管海底隧道强度折减法分析探讨

李秀地¹, 郑颖人^{1, 2}, 袁勇³, 石少卿¹

(1. 后勤工程学院军事土木工程系, 重庆 401311; 2. 重庆市地质灾害防治工程技术研究中心, 重庆 400041;

3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 将强度折减法用于静荷载作用下海底钢筋混凝土沉管隧道安全稳定性分析。首先, 基于应变协调原理并按照沉管钢筋的分布形式和受力特征, 推导出钢筋混凝土沉管等效模型抗剪强度指标、抗拉强度的计算公式; 其次, 利用FLAC^{3D}软件建立了沉管-土体-海水相互作用强度折减法非线性数值分析模型, 探讨钢筋混凝土沉管的破坏分析方法。研究表明: 不能用位移突变作为沉管破坏分析判据; 通过综合分析沉管顶板下沉位移与折减系数的关系、塑性状态以及剪应变增量的分布规律, 得到了沉管隧道的安全系数; 强度折减法能直观地揭示沉管破坏机理, 沉管段的破坏模式主要表现为沉管顶板中部及其与两侧墙壁交汇处的拉伸、剪切破坏。

关键词: 沉管; 钢筋混凝土等效模型; 强度折减法; 安全系数

中图分类号: U459.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)10-1876-07

作者简介: 李秀地(1970-), 男, 安徽宿州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程、地下工程方面的教学与科研工作。E-mail: lixiudivip@163.com。

Strength reduction method for submarine immersed tunnels

LI Xiu-di¹, ZHENG Ying-ren^{1, 2}, YUAN Yong³, SHI Shao-qing¹

(1. Department of Architectural and Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. Chongqing Engineering and Technology Research Center of Geological Hazard Prevention and Treatment, Chongqing 400041, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The strength reduction method is proposed to study the safety and stability of a submarine immersed tunnel made of reinforced concrete under static loading. Firstly, based on the strain compatibility principle considering the distribution and mechanical characteristics of reinforcing bars, formulas for calculating the shear strength and the tensile strength of the equivalent model of reinforced concrete structures are derived. Secondly, a non-linear numerical model for the strength reduction method considering structure-soil-seawater interaction is established by means of FLAC^{3D} software to simulate the failure of the immersed tunnel. The simulated results show that a sudden change of displacement can not be used as one of failure criterions for the immersed tunnel. The safety factor of the immersed tunnel is obtained considering the plastic state, shear strain increment and relationship between the tunnel roof displacements and the reduction factors. By using the strength reduction method, the failure mechanism of the immersed tunnel is revealed. Failure modes of the immersed tunnel section are mainly the shear failure and the tensile failure distributed near the center of the tunnel roof slab and the intersection between the roof slab and the two lateral walls.

Key words: immersed tunnel; equivalent model of reinforced concrete; strength reduction method; safety factor

0 引言

近年来, 随着中国沿海经济的持续高速发展和海洋开发战略的需要, 跨海桥梁、海底隧道和人工岛等近海重大交通工程建设、规划渐入高潮, 如已建成通车的青岛胶州湾海底隧道、正在建设中的港珠澳大桥、规划中的渤海湾海底隧道等等。这些投资巨大的跨海重大交通基础设施对全国或区域国民经济和社会发展作用巨大, 其安全性至关重要。因此, 开展海底隧道

安全稳定性研究具有重要意义^[1-4]。近年来, 随着计算机数值模拟技术的快速发展, 强度折减法在岩土工程边坡、隧道工程围岩稳定性分析等方面得到了广泛应用^[5-9]。该方法通过不断折减岩土材料的强度参数, 能

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013600); 国家科技支撑计划项目(2012BAK05B02); 后勤工程学院学术创新基金项目(YZ0742202)

收稿日期: 2013-01-05

够得到岩土材料极限平衡状态时的破坏位置、破坏性质, 并得到稳定安全系数^[10-12]。强度折减法在海底隧道结构安全稳定性分析方面的研究鲜见报道。鉴于此, 本文尝试将强度折减法用于钢筋混凝土沉管海底隧道结构安全稳定性分析。首先, 基于应变协调原理, 推导了钢筋混凝土沉管莫尔-库仑等效模型抗剪强度指标、抗拉强度参数的计算公式。其次, 利用 FLAC^{3D} 软件建立了沉管-土体-海水相互作用下强度折减法非线性数值分析模型, 探讨了钢筋混凝土沉管强度折减法计算方法, 揭示了沉管海底隧道的失稳破坏机理, 综合采用多种安全稳定判据得到了沉管的安全系数。

1 整体式钢筋混凝土等效模型参数

根据沉管结构特性及其受力特点, 认为主要受力钢筋为沉管环向钢筋, 忽略纵向钢筋在承载中的作用^[13]。

1.1 等效抗剪强度指标 c , φ

假设等效材料承受的剪力 s 等于混凝土与钢筋所承受的剪力 s_c , s_s 之和, 即

$$s = s_c + s_s \quad (1)$$

当混凝土首先达到剪切破坏时, 等效材料承受的剪力为

$$s = (c + \sigma \tan \varphi) \cdot A \quad (2)$$

式中 c , φ 分别为等效材料的抗剪强度指标; σ 为剪切面上的正应力; A 为剪切面积。

此时, 混凝土处于极限平衡状态, 所承受的剪应力和剪力分别为

$$\tau_c = c_c + \sigma \tan \varphi_c \quad (3)$$

$$s_c = (c_c + \sigma \tan \varphi_c) \cdot A_c \quad (4)$$

式中 c_c , φ_c 分别为混凝土的抗剪强度指标, A_c 为混凝土剪切面积。

假设钢筋与混凝土变形协调, 钢筋的剪应变 γ_s 与混凝土的剪应变 γ_c 相等。根据剪应变定义, 混凝土的剪应变为

$$\gamma_c = \frac{\tau_c}{G_c} = \frac{c_c + \sigma \tan \varphi_c}{G_c} \quad (5)$$

式中, G_c 为混凝土的剪切模量。

则钢筋所承受的剪力为

$$\begin{aligned} s_s &= \gamma_s \cdot G_s \cdot A_s = \gamma_c \cdot G_s \cdot A_s \\ &= \frac{c_c + \sigma \tan \varphi_c}{G_c} \cdot G_s \cdot A_s \end{aligned} \quad (6)$$

式中, G_s 为钢筋的剪切模量, A_s 为钢筋剪切面积。

由式 (1)、(2)、(4)、(6) 得到

$$(c + \sigma \tan \varphi) \cdot A$$

$$= (c_c + \sigma \tan \varphi_c) A_c + \frac{c_c + \sigma \tan \varphi_c}{G_c} \cdot G_s \cdot A_s \quad (7)$$

整理式 (7), 得到钢筋混凝土等效材料的抗剪强度指标分别为

$$c = \left[1 + \left(\frac{G_s}{G_c} - 1 \right) \cdot v_s \right] \cdot c_c \quad (8)$$

$$\tan \varphi = \left[1 + \left(\frac{G_s}{G_c} - 1 \right) \cdot v_s \right] \cdot \tan \varphi_c \quad (9)$$

式中, v_s 为钢筋混凝土配筋率。

本文按混凝土剪切破坏后即认为钢筋混凝土等效材料失效进行数值计算。

1.2 等效抗拉强度

(1) 混凝土首先拉伸屈服阶段

混凝土的抗拉强度小, 受拉情况下钢筋混凝土材料中的混凝土首先屈服。假设钢筋和混凝土变形协调, 钢筋应变和混凝土在钢筋方向的应变相等。混凝土屈服时的应变为

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s = \frac{\sigma_{tc}}{E_c} \quad (10)$$

式中, σ_{tc} 为混凝土的抗拉强度, E_c 为混凝土的弹性模量。

则混凝土与钢筋中的拉应力分别为

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c = \sigma_{tc} \quad (11)$$

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s = \frac{E_s}{E_c} \sigma_{tc} \quad (12)$$

式中, E_s 为钢筋的弹性模量。

设钢筋混凝土截面总横截面积为 a , 其中混凝土横截面积为 a_c , 钢筋横截面积为 a_s , 等效材料的抗拉强度为 σ_t 。等效材料的拉应力由混凝土和钢筋共同承担, 由静力关系可得

$$a \sigma_t = a_c \sigma_c + a_s \sigma_s \quad (13)$$

混凝土首先屈服时, 将式 (11) 代入得

$$a \sigma_t = a_c \sigma_{tc} + a_s \frac{E_s}{E_c} \sigma_{tc} \quad (14)$$

则等效材料的抗拉强度为

$$\sigma_t = \left[1 + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1 \right) \cdot v_s \right] \cdot \sigma_{tc} \quad (15)$$

(2) 钢筋随后拉伸屈服阶段

设混凝土拉伸屈服后钢筋混凝土材料的拉应力全部由钢筋承担, 对钢筋混凝土等效材料, $\sigma_t a = \sigma_{ts} a_s$ 。则钢筋混凝土等效材料的抗拉强度为

$$\sigma_t = v_s \sigma_{ts} \quad (16)$$

式中, σ_{ts} 为钢筋的抗拉强度。

本文采用钢筋拉伸屈服阶段的等效抗拉强度等效计算, 即忽略钢筋混凝土材料中混凝土的抗拉强度。

2 沉管海底隧道强度折减法计算原理

随着材料强度参数的折减, 沉管安全稳定性不断降低直至失稳破坏。强度折减法就是将材料抗剪强度指标 c , $\tan \varphi$ 分别折减 ω , 即

$$\left. \begin{aligned} c' &= \frac{c}{\omega}, \\ \varphi' &= \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{\omega}\right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

使材料达到极限平衡状态, 此时的折减系数即为安全系数^[12]。为考虑拉伸破坏的影响, 利用强度折减法计算时还需对材料的抗拉强度进行折减:

$$\sigma'_t = \frac{\sigma_t}{\omega} \quad (18)$$

本文主要研究钢筋混凝土沉管的安全稳定性, 由于沉管与周围土层之间存在相互作用, 在进行强度折减法分析时需保持土层强度参数不变, 用式(17)、(18)不断折减沉管材料强度参数进行分析, 直到沉管失稳破坏为止。将此时的折减系数定义为沉管安全系数, 以此作为评价沉管稳定安全性的重要指标。

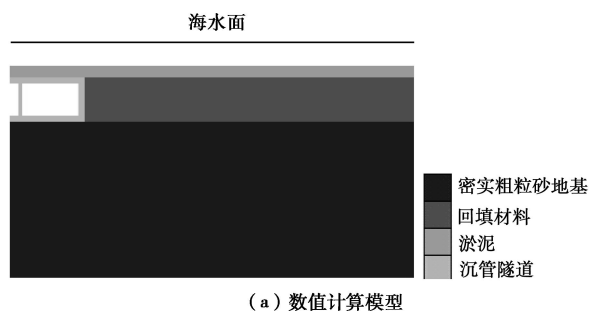
3 数值模型与边界条件

3.1 数值模型

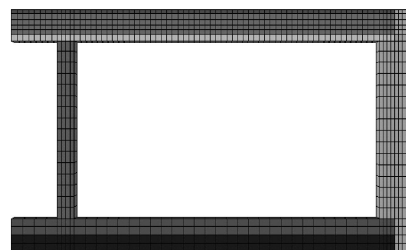
计算用海底沉管隧道由两侧两个公路通道及中间一个服务通道组成。隧道总宽度约 38 m, 总高度 11.5 m。隧道顶板厚 1.5 m, 底板厚 1.5 m, 中墙厚 0.8 m, 边墙厚 1.5 m。现浇混凝土强度等级为 C50。

计算断面土层由上至下分别为淤泥 (silt, 厚 3.0 m)、回填材料 (backfill, 厚 11.5 m) 及密实粗粒砂地基 (coarse sand, 厚 40.0 m)。海水面距海床 10 m。水平向计算范围为 206 m。

采用显式有限差分软件 FLAC^{3D} 进行数值模拟^[14]。沉管与土体均采用八节点六面体实体单元。为使等效材料力学行为符合实际沉管的钢筋分布特征, 作为本文重点监测对象的顶板上下两层钢筋混凝土等效单元厚度分别为 0.2, 0.3 m, 配筋率分别为 3.6%, 8.5%。纵向取 1 个单元厚度 (准平面分析)。建模时对实际沉管局部进行了简化。利用沉管几何和受力的对称性建立的数值模型及沉管单元网格划分, 如图 1 所示。



(a) 数值计算模型



(b) 沉管网格划分

图 1 沉管数值计算模型

Fig. 1 Numerical model for immersed tunnel

3.2 计算参数

计算采用莫尔-库仑强度准则。表 1 为材料物理力学参数。在土体材料参数中给出的是干密度, 湿饱和和属性根据流体密度及土的孔隙率由程序自动计算完成, 其中淤泥、回填料及地基的孔隙率分别为 0.66, 0.30, 0.30。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of materials

材料名称	干密度 /(kg·m ⁻³)	弹性 模量/MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩 擦角 /(°)	抗拉 强度/kPa
淤泥	940	8.0	0.45	7	19	2.3
回填料	1800	257	0.29	0	35	0
地基	1800	1285	0.29	0	40	0
混凝土	2600	34500	0.20	5000	58	1830
钢筋	7850	200000	0.20	210000	0	360000

在沉管与土层间设置了接触面单元模拟沉管与土层间的错动滑移、分开与闭合。采用“移来移去”法建模, 接触面为非渗透边界, 其法向刚度、切向刚度均为 100 MPa/m, 黏聚力为 0 MPa, 内摩擦角为 60°。

3.3 边界条件

模型底部固定, 两侧人工边界水平约束, 淤泥层顶面为自由边界。将海水压力作为外荷载施加在沉管上覆淤泥层顶面。海水压力大小根据 $P = \rho gh$ 计算确定。其中, ρ 为水密度, g 为重力加速度, h 为海水深度。采用无渗流模式模拟土中海水压力的影响, 在土层中按海水深度设置初始孔隙压力, 但力的作用可引起孔压的改变。沉管中孔隙压力固定为零。

4 模拟结果分析

4.1 土层垂直应力与土层孔压结果验证

强度折减系数为 1.0 时计算模型土体垂直应力云图, 见图 2 所示。

从图 2 可以看出, 模型底边界的垂直应力为 $(1.20 \sim 1.22) \times 10^6$ Pa 之间。这与理论计算结果 $\sigma_z = \sum \gamma z + \rho_w gh = 1.21 \times 10^6$ Pa 一致。模型顶部及其

他土层的垂直应力也与理论计算结果基本一致。说明本文计算模型的应力平衡结果合理。

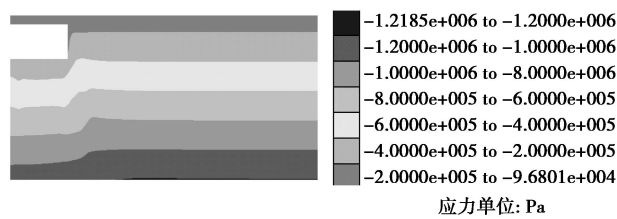


图 2 垂直应力云图
Fig. 2 Cloud of vertical stress

强度折减系数为 1.0 时土体及沉管中的孔隙水压力场分布, 见图 3 所示。

从图 3 中可以看出沉管等效模型中的水压力为零, 与本文将沉管设置为不透水模型一致; 模型土体底面、顶面受到的水压力分别在 $(6.0\sim6.3)\times10^5$ Pa 及 $(0\sim10)\times10^5$ Pa 之间, 也与理论计算结果 $P_w = \rho gh = 6.3\times10^5$ Pa 及 0.98×10^5 Pa 一致。

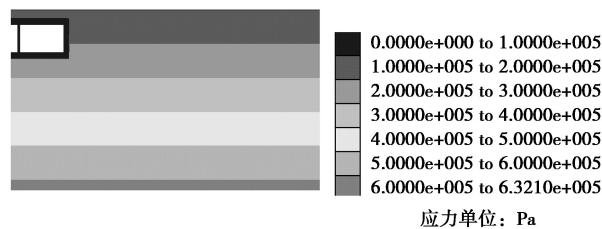


图 3 初始孔隙水压力云图
Fig. 3 Cloud of initial pore water pressure

4.2 沉管顶板沉降与强度折减系数关系曲线分析

图 4 为沉管、土体及海水自重荷载作用下沉管典型位移矢量 (强度折减系数为 2.0)。沉管公路通道顶板发生弯曲变形, 其中部下沉位移最大。为此, 本文以沉管公路通道顶板中部下沉的相对位移, 即顶板中部下沉绝对位移减去顶板左右两端绝对下沉位移均值的差值, 作为沉管变形的主要监测对象。

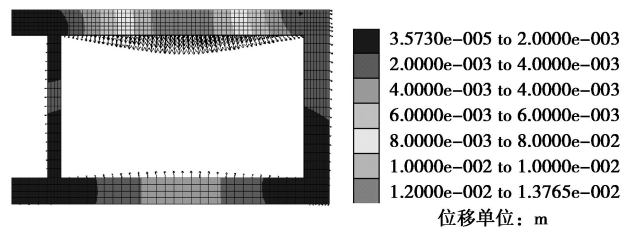


图 4 沉管典型位移矢量
Fig. 4 Typical displacement vector of immersed tunnel

保持土层单元尺寸在 0.5~1.0 m 之间, 比较了沉管单元尺寸的影响规律, 见图 5 所示。其中, 工况 1 为顶板竖向 4 层单元、单元横向 0.5 m; 工况 2 为顶板竖向 6 层单元、单元横向 0.25 m; 工况 3 为顶板竖

向 12 层单元、单元横向 0.125 m。为比较, 图中还给出了 C50 素混凝土沉管强度折减的计算结果 (单元尺寸同工况 2)。

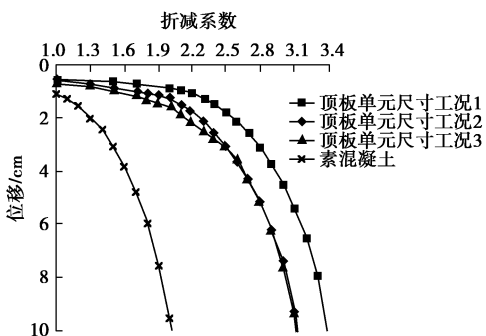


图 5 沉管相对位移与强度折减系数关系
Fig. 5 Curves of relative displacement-strength reduction factors of immersed tunnel

由图 5 可以看出, 工况 1 因单元尺寸较大, 顶板下沉位移计算结果明显偏小。单元尺寸工况 2 和工况 3 的计算结果基本一致。综合考虑数值计算精度和计算耗时, 本文选取工况 2 的沉管单元尺寸进行计算。此时, 沉管不同强度折减系数与沉管顶板中部相应的位移, 见表 2 所示。

表 2 强度折减系数与顶板沉降量

Table 2 Strength reduction factors and relative displacements of immersed tunnel								
折减系数	1.0	2.0	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
沉降量/cm	0.7	1.3	3.1	3.6	4.3	5.2	6.2	7.5

对钢筋混凝土等效材料, 当强度折减系数从 1.0 增大到 2.0 时, 沉管下沉位移从 0.7 cm 增大到 1.3 cm, 位移变化不大, 下沉曲线基本上呈直线变化, 可认为沉管处于弹性变形阶段; 随着强度折减系数的增大, 下沉曲线开始向下弯曲, 说明沉管顶板产生了较大的塑性变形, 顶板承载能力下降直至失稳破坏。由图 5 可知, 钢筋混凝土沉管顶板下沉曲线无明显拐点, 呈延性破坏特征。

对图 5 中的素混凝土材料与钢筋混凝土等效材料曲线对比可知, 素混凝土材料的承载能力要小得多。比如, 强度折减系数为 1.5 时钢筋混凝土等效材料下沉位移为 0.8 cm, 而素混凝土下沉位移为 3.1 cm, 后者约是前者位移的 4 倍。因此, 采用本文推导的式(8)、(9)、(15)、(16)进行钢筋混凝土等效模型参数计算, 计算结果能够反映钢筋混凝土材料的一般力学特性。

4.3 沉管顶板位移曲线分析

关键点位移的突变性常作为岩土工程强度折减法分析的失稳判据之一^[15-16]。当强度折减系数分别为 3.3, 3.4, 3.5 时, 钢筋混凝土沉管公路通道顶板中部下沉位移曲线, 见图 6 所示。

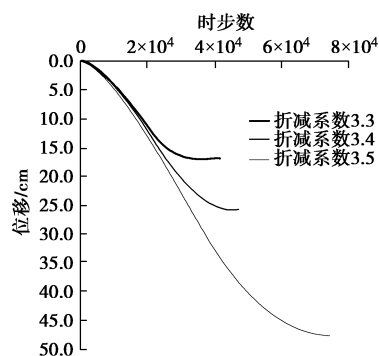


图6 顶板中部下沉位移曲线

Fig. 6 Curves of subsidence displacement-steps of immersed tunnel

随着计算时步数的增大,沉管顶板逐步达到静力平衡,顶板中部下沉位移值趋于稳定。由图6可见,相应的位移值分别收敛于17.0, 25.9, 47.6 cm。尽管此时沉管仍未失稳,但下沉位移值表明钢筋混凝土沉管已破坏。这也与上述沉管等效材料呈延性破坏特征一致。因此,与岩土工程强度折减法不同,对沉管这类呈延性破坏的结构,不能用关键点位移的突变性作为破坏判据。

4.4 塑性状态分析

塑性区的贯通性是岩土工程破坏的必要条件之一^[15-16]。当强度折减系数分别为1.0, 2.79, 2.80时沉管的塑性状态,见图7所示。

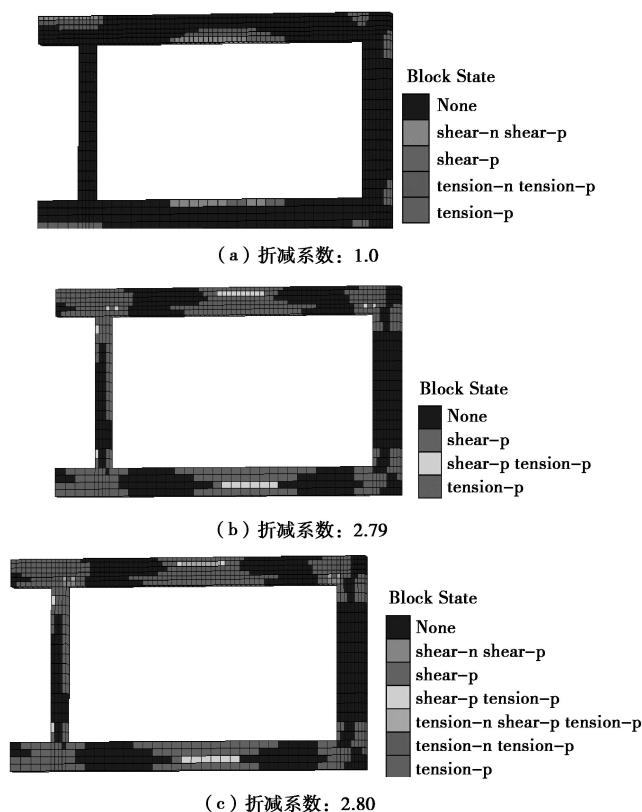


图7 不同折减系数时的沉管塑性状态

Fig. 7 Plasticity states of immersed tunnel with different strength reduction factors

从图7(a)中可以看出,尽管强度折减系数为1.0,在静力平衡过程中沉管顶底板中部及顶板与墙壁交汇处等部位也会出现拉伸、剪切塑性单元,但这些单元仅满足屈服条件,没有发生任何有意义的塑性流动,沉管不会发生失稳破坏。随着强度折减系数的增大,沉管中的塑性破坏范围逐步扩大。对图7(b),当强度折减系数为2.79时,沉管在静力平衡结束后由于应力重分布塑性单元应力不再满足塑性屈服条件;对图7(c),当强度折减系数为2.80时,在公路通道顶板中部及顶板与两侧墙交汇处的大量单元处于塑性破坏状态,与图7(b)对比,单元受力状态发生突变;特别是顶板与两侧墙交汇处的塑性区已贯通,顶板发生了破坏。破坏方式主要表现为配筋等效单元的剪切破坏及素混凝土单元的拉伸破坏。

4.5 剪应变增量分析

图8为沉管强度折减系数分别为1.0, 2.80时的剪应变增量分布图。

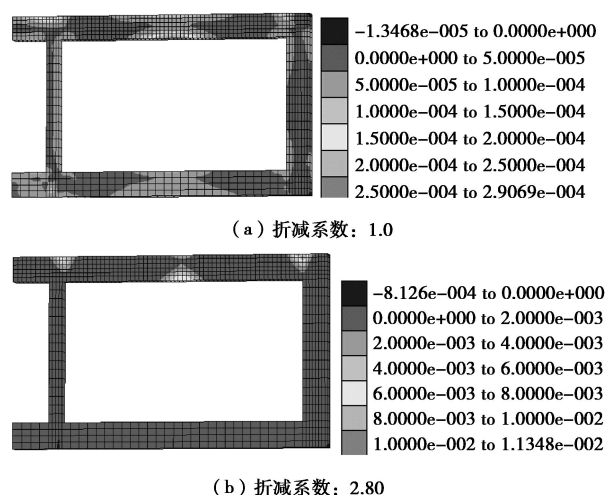


图8 不同折减系数时的沉管剪应变增量

Fig. 8 Nephograms of shear strain increment of immersed tunnel with different strength reduction factors

对图8(a),在公路通道顶板中下部及顶板与两侧墙交汇处剪应变增量较小,剪应变值基本上在 10^{-4} 数量级。随着强度折减系数的增大,剪应变增量逐步增大。对图8(b),当强度折减系数为2.80时,沉管公路通道顶板中下部及顶板与两侧墙交汇处的剪应变增量值已达到 10^{-2} 数量级,达到甚至超过了混凝土的极限应变,说明顶板出现了破坏。

综上所述,本次计算条件下,当沉管顶板上覆淤泥厚度3 m、水深10 m时,该沉管的安全系数可取为2.79。此时沉管顶板最大位移为5.1 cm。而采用FLAC^{3D}软件对土层和沉管同时强度折减并自动求解得到的安全系数为2.31,小于本文仅折减沉管强度参数所得到的安全系数值。这是由于土层强度参数折减

后作用在沉管两侧墙上的约束变小,沉管更易失稳破坏的缘故。这也说明本文提出仅折减沉管强度参数、保持土层强度参数不变求解沉管安全系数的方法是合理的。

5 结 论

(1) 基于应变协调原理及材料实际受力状况,分别推导出了钢筋混凝土等效材料抗剪强度指标及抗拉强度参数的计算公式。等效抗剪强度指标与混凝土剪切模量、钢筋剪切模量及配筋率有关;而等效抗拉强度按钢筋混凝土实际受力特征分阶段确定,与混凝土弹性模量、钢筋弹性模量及配筋率有关。

(2) 由于沉管与周围土层之间存在力的相互作用,本文提出钢筋混凝土沉管强度折减法计算需保持土层强度参数不变,仅不断折减沉管材料的抗剪强度和抗拉强度参数,直到沉管失稳破坏为止。

(3) 沉管、土体及海水自重荷载作用下,沉管公路通道顶板发生弯曲变形,其中部下沉位移最大。沉管的破坏主要是由于沉管顶板弯曲变形较大,在沉管公路通道顶板中部及顶板与两侧墙交汇处产生拉伸、剪切破坏造成的。

(4) 由于钢筋混凝土结构呈延性破坏特征,不能用位移突变性作为沉管破坏判据。综合分析沉管顶板沉降位移与强度折减系数的关系以及塑性状态、剪应变增量的分布规律,得到了沉管的安全系数为2.79。显然,沉管安全系数与沉管、土层性质及土层厚度、海水深度等因素有关,有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 孙 钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(8): 1513 - 1520. (SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(8): 1513 - 1520. (in Chinese))
- [2] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题——兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案”[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(11): 2161 - 2172. (WANG Meng-shu. Current developments and technical issues of underwater traffic tunnel-discussion on construction scheme of taiwan strait undersea railway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(11): 2161 - 2172. (in Chinese))
- [3] 杜朝伟, 王秀英. 水下隧道沉管法设计与施工关键技术[J]. 中国工程科学, 2009, **11**(7): 76 - 80. (DU Chao-wei, WANG Xiu-ying. Key technology of design and construction on immersed tube tunnel[J]. Engineering Science, 2009, **11**(7): 76 - 80. (in Chinese))
- [4] 王明年, 路军富, 张建国, 等. 大断面海底隧道施工安全判定基准及应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 867 - 873. (WANG Ming-nian, LU Jun-fu, ZHANG Jian-guo, et al. Determinant criterion for safety of large section subsea tunnel and its application during construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 867 - 873. (in Chinese))
- [5] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Géotechnique, 1999, **49**(6): 835 - 840.
- [6] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(3): 343 - 346. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 343 - 346. (in Chinese))
- [7] 黄光虎, 滕伟福, 高 林. 基于强度折减法的港珠澳大桥沉管隧道干坞工程高边坡稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2012, **19**(3): 111 - 115. (HUANG Guang-hu, TENG Wei-fu, GAO Lin. Stability analysis of high rock slope in the dry rock project of Hong kong-Zhuhai-Macao bridge immersed tunnel based on strength reduction method[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, **19**(3): 111 - 115. (in Chinese))
- [8] 赵尚毅, 郑颖人, 王建华, 等. 基于强度折减安全系数的边坡岩土侧压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(9): 1760 - 1766. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, WANG Jian-hua, et al. Discussion on calculation method of slope rock-soil lateral pressure based on factor of safety with strength reduction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1760 - 1766. (in Chinese))
- [9] 张黎明, 郑颖人, 王在泉, 等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学, 2007, **28**(1): 97 - 101. (ZHANG Li-ming, ZHENG Ying-ren, WANG Zai-quan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(1): 97 - 101. (in Chinese))
- [10] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, **8**(12): 39 - 61. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, DENG Chu-jian, et al. Development of finite element limit analysis method

- and its applications in geotechnical engineering[J]. Engineering Science, 2006, **8**(12): 39 - 61. (in Chinese))
- [11] 郑颖人, 赵尚毅, 孔位学, 等. 极限分析有限元法讲座-I 岩土工程极限分析有限元法[J]. 岩土力学, 2005, **26**(1): 163 - 168. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, KONG Wei-xue, et al. Geotechnical engineering limit analysis using finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(1): 163 - 168. (in Chinese))
- [12] 郑颖人, 赵尚毅, 李安洪, 等. 有限元极限分析法及其在边坡工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, LI An-hong, et al. FEM limit analysis and its application in slope engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [13] 艾亿谋, 杜成斌, 洪永文, 等. 混凝土坝抗震加固中钢筋混凝土的动力本构模型[J]. 水利学报, 2009, **40**(3): 289 - 295. (AI Yi-mou, DU Cheng-bin, HONG Yong-wen, et al. Dynamic constitutive model for reinforced concrete in a seismic strengthening of concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, **40**(3): 289 - 295. (in Chinese))
- [14] Itasca Consulting Group, Inc. Fast Lagrangian analysis of continua in three dimensions(version 3.0)user's manual[R]. [S.l.]: Itasca Consulting Group, Inc., 2003.
- [15] 郑颖人, 赵尚毅, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座-II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, **26**(2): 332 - 336. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(2): 332 - 336. (in Chinese))
- [16] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21 - 27. (ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1): 21 - 27. (in Chinese))

第一届全国软土工程学术会议——暨上海市岩土力学与工程2013年学术年会 (2013年11月16日~17日, 上海) 二号通知

会议主题: 软土工程的理论创新与工程实践。

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会软土工程专业委员会; 上海市力学学会岩土力学专业委员会。

承办单位: 同济大学。

协办单位: 上海市土木工程学会岩土力学与工程专业委员会; 华东建筑设计研究院有限公司; 上海市基础工程有限公司; 上海交通大学; 上海广大基础工程有限公司; 上海港湾基础建设(集团)有限公司。

会议背景: 我国的软土广泛分布于沿江沿海地区, 在内陆和山区也有分布。近年来, 随着工程建设的快速发展, 软土地基的工程问题非常突出, 发生了不少工程事故, 也取得了许多宝贵的经验。软土地区的工程事故和处理经验提供了土力学发展的客观条件, 在总结这些事故的基础上, 发展了土力学的理论, 软土力学与工程已经成为岩土工程学科的重要课题之一。第一届全国软土工程学术会议本着“软土工程的理论创新与工程实践”的主题, 立足于交流近年来我国软土工程领域的最新研究成果, 并致力于推动理论在工程实践中的应用, 为我国人居和重大工程提供安全环境而努力。本次会议旨在加强对软土工程的理论认识, 提高软土基础工程及软土地下工程设计与施工水平, 为从事软土工程研究和应用的科技工作者提供一个良好的交流平台, 也为我国未来软土工程的发展提供技术支持。

论文议题: 软土强度与变形特性; 软土特性测试技术; 软

土基础工程理论设计与施工; 软土地下工程理论设计与施工; 软土地区重大工程实践; 软土工程的其他问题。

大会报告: 院士报告(孙钧讲座)。主题报告: 郑刚: 软土地区基坑工程的冗余度设计理论与工程应用; 刘松玉: 基于CPTU测试的我国土分类体系研究; 杨光华: 软土工程的一些工程问题和研究; 王卫东: 深基坑桩墙合一技术与工程实践; 蔡袁强: 饱和软黏土的动力特性试验研究; 陈仁朋: 软土地基高速铁路路基沉降控制技术; 尹振宇: 软土的基本力学特性及本构模拟; 黄茂松: 软土地下工程稳定性分析理论与工程应用。邀请报告(待定)。

大会秘书处: 秘书长梁发云; 秘书吕玺琳, 赵程, 张陈蓉, 木林隆, 顾晓强; 地址: 上海市四平路1239号同济大学地下建筑与工程系; 邮编: 200092; 邮箱: softsoilcom@163.com。电话: 13918420176; 13918247471。

会议安排: 会议时间: 2013年11月16日~17日, 地点: 上海宝隆美爵酒店(上海市虹口区逸仙路180号); 日程安排: 11月15日报到、注册, 16, 17日大会报告, 分组报告、闭幕式。注册费: 正式代表: 1200元/人, 学生代表: 800元/人。参会专家和代表请2013年10月15日务必填写回执, 并于10月15日前发回大会组委会邮箱。

(会议组委会 供稿)