

DOI: 10.11779/CJGE2014S2013

中欧深基坑支护结构设计方法对比研究

李元松¹, 段 鑫¹, 李 洋¹, 李新平²

(1. 武汉工程大学资源与土木学院, 湖北 武汉 430073; 2. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 欧洲岩土设计规范 EN1997-1 采用基于概率极限原理的分项系数法进行设计, 其核心是三种设计方法, 针对不同的情形, 可分别选用其中一种, 两种或三者全选。利用支挡结构设计实例, 分别列举三种设计方法的计算过程, 参数取值方法, 并与引用我国规范的计算结果进行对比分析, 找出稳定性、抗滑移和地基承载力的计算值差异, 以期对我国岩土工程设计者熟悉与应用欧洲规范 EN1997-1 有所裨益。

关键词: 中欧规范; 深基坑; 支护结构; 设计方法; 对比研究

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0077-05

作者简介: 李元松(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程领域的教学与研究。E-mail: Li_yuan_song@126.com。

Comparative research on design approaches on retaining structure for deep foundation pits in Chinese and European geotechnical design codes

LI Yuan-song¹, DUAN Xin¹, LI Yang¹, LI Xin-ping²

(1. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China; 2. Hubei Key Laboratory of Road-bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The European geotechnical design code EN1997-1 introduces the partial coefficient method based on the theory of probability limit in geotechnical design. Its core is the three design approaches, which of one, two or three can be selected according to different circumstances. A design scheme of retaining structures is used as the example to illustrate the calculation process and the method for getting values of parameters in the three kinds of design approaches respectively. The results are compared with those calculated according to China's code to find out the difference in bearing capacity, stability, and anti-slip. Consequently, it is expected to help China's geotechnical engineering designers to understand and apply the European code EN1997-1.

Key words: Chinese and European standards; deep foundation pit; retaining structure; design approach; comparative research

0 引言

欧洲规范 EN1997-1 是基于 EN1990-结构设计基础和 EN1991-结构上的作用制订的, 其主要设计思想是极限状态设计, 要求明确区分承载力极限状态 (ULS) 和正常使用极限状态 (SLS), 用不同的计算方法验算 ULS 和 SLS。由于欧洲规范适用于欧盟各国, 既要遵循欧洲结构设计规范总体原则, 同时也要兼顾欧盟各国地质、气候、经济条件的差异。对于正常使用极限状态, EN1997-1 沿用了 EN1990^[1,2]的规定, 验算时分项系数取 1.0。对于承载能力极限状态, EN1997-1 采用 DA1 (Design Approach 1)、DA2 和 DA3 三种设计方法。从而出现三种设计方法, 这既是 EN1997-1 的核心部分, 也是与我国岩土设计规范的主要差异所在。理解与掌握欧洲规范的三种设计计算方

法与参数的取值, 就能从整体上把握中欧结构设计规范的区别^[2-5]。

1 EN1997-1 设计原理

1.1 设计极限状态

与中国规范类似, 欧洲规范关于支挡结构的设计均要求进行以下验算:

- (1) 整体稳定性验算;
- (2) 抗滑移验算;
- (3) 抗倾覆稳定性验算;
- (4) 地基承载力验算;
- (5) 支护结构自身强度验算。

1.2 设计表达式

检查地层和结构中出现破坏或过度变形极限状态时, 必须满足以下不等式:

$$E_d \leq R_d, \quad (1)$$

式中, E_d 为作用效应的设计值, R_d 为对应地层或结构抗力的设计值。与对结构设计进行的检查不同, 不能将地层岩土作用和地层的抗力分开, 因为岩土作用有时取决于地层抗力, 如有效土压力, 而地层抗力有时取决于作用, 如浅基础的承载力取决于基础所承受的作用。

1.3 作用的设计效应

作用效应是作用本身、地层特性和岩土参数的函数, 可将作用的分项系数用于作用的代表值 F_{rep} 和作用效应 E :

$$E_d = E\{\gamma_F F_{rep}, X_k / \gamma_M, a_d\}, \quad (2)$$

$$E_d = \gamma_E E\{F_{rep}, X_k / \gamma_M, a_d\}. \quad (3)$$

式中 γ_F 为作用的分项系数; γ_M 为材料特性分项系数; γ_E 为作用效应分项系数; a_d 为岩土参数的设计值; X_k 为地基强度。

1.4 设计抗力

地基抗力为地基强度 X_k 、作用 F_{rep} 和岩土参数的函数。若需获得抗力的设计值 R_d , 可将分项系数用于地层特性 X 或抗力 R , 或同时作用于两者, 计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} R_d &= R\{\gamma_F F_{rep}, X_k / \gamma_M, a_d\}, \text{ 或} \\ R_d &= R\{\gamma_F F_{rep}, X_k, a_d\} / \gamma_R, \text{ 或} \\ R_d &= R\{\gamma_F F_{rep}, X_k / \gamma_M, a_d\} / \gamma_R. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, γ_R 为地基抗力的分项系数, 其他符号意义同前。

1.5 作用组合

式(2), (3), (4)的区别在于作用、土体特性和抗力之间分配分项系数的方式不同, 两者的不同组合以及因此所导致的采用基本不等式(1)的分项系数的不同方式, 使得 EN1997-1 批准了 3 种设计方法。不同的设计问题可由不同的设计方法进行处理。

(1) 设计方法 1

使用分项系数的两种组合分别检查设计中土体和结构的破坏情况。

对于非桩与锚固结构, 作用组合如下:

组合 1

$$A1 '+' M1 '+' R1; \quad (5)$$

组合 2

$$A2 '+' M2 '+' R1. \quad (6)$$

式中 $A1$ 为作用为 $A1$ 组值; “+”为与后面 $M1$ 组合; $M1$ 为材料分项系数取 $M1$ 组值; $R1$ 为抗力取 $R1$ 组

值。

对于桩和锚固结构设计, 作用组如下:

组合 1

$$A1 '+' M1 '+' R1; \quad (7)$$

组合 2

$$A2 '+' (M1 \text{ 或 } M2) '+' R4. \quad (8)$$

当各分项系数集合的某一组合起决定作用时, 设计不需计算其他组合。通常, 岩土工程“尺寸确定”由组合 2 控制, 而结构设计则由组合 1 控制。

(2) 设计方法 2

设计方法 2 将分项系数集合的单一组合用于地层和结构承载能力极限状态的检查计算。组合为

$$A1 '+' M1 '+' R2. \quad (9)$$

岩土作用和结构所承受或结构所施加作用采用相同的分项系数值。地层抗力以及作用或作用效应也采用分项系数。

(3) 设计方法 3

设计方法 3 将各分项系数集合的单一组合用于检查地层和结构承载能力极限状态的计算。组合为

$$(A1 \text{ 或 } A2) '+' M2 '+' R3. \quad (10)$$

1.6 分项系数

对分项系数的规定, 国内挡墙设计规范与欧洲规范有较大的差别。针对不同的荷载状况(恒载和活载), 两种规范都分别取了不同的值。对于恒载国内规范中的分项系数取值要略大于欧洲规范; 活荷载的分项系数取值情况却刚好与恒载时相反, 欧洲规范取值要略大。而对于岩土参数的分项系数而言, 国内规范一般都取 1.0, 欧洲规范则大多取大于 1.0 的分项系数。分项系数的取值见表 1, 2。国内挡墙设计规范是通过安全系数来满足承载力要求, 而欧洲规范是通过分项系数来衡量^[6-7]。

2 我国岩土工程规范设计方法

在岩土工程的承载力和稳定设计中, 主要存在 3 种设计理论或方法: 容许承载力设计、极限状态的单一安全系数设计和极限状态的基于可靠度理论的分项系数设计^[8-12]。《建筑地基基础设计规范》针对不同问题将 3 种设计方法混合使用。

(1) 荷载与荷载效应按《建筑结构荷载规范》确定, 因而更接近于可靠度设计原则。地基承载力确定基本上是容许承载力方法和安全系数法(指载荷试验中, 用极限承载力除以安全系数确定承载力, 但用理论公式计算地基承载力时, 强度指标 c_k 和 φ_k 的确定又采用了概率论和数理统计的概念和方法)。

表 1 EN1997 中作用分项系数和作用效应的推荐值(永久和瞬时情况)

Table 1 Recommended values of partial factors on actions and effects of actions according to EN1997-1 (persistent and transient situations)

设计方法(分项系数集合)	作用分项系数		
	不利, 永久, $\gamma_G^{(1)}$	不利, 变化, $\gamma_Q^{(2)}$	
DA-1 组合 1(A1 ‘+’ M1 ‘+’ R1)	1.35	1.5	
DA-1 组合 2(A2 ‘+’ M2 ‘+’ R1)	1.0	1.3	
DA-2(A1 ‘+’ M1 ‘+’ R2)	1.35	1.5	
DA-3(A2 或 A1 ‘+’ M2 ‘+’ R3)	岩土作用 ^③ 结构作用 ^④	1.0 1.35	1.3 1.5

注: ①有利影响的永久作用: $\gamma_G = 1.0$; ②有利影响的可变作用: $\gamma_Q = 0.0$; ③岩土作用: 通过地层传递到墙体的作用; ④结构作用: 来自支撑结构的作用, 直接施加在墙体上。

表 2 EN1997-1 中土体参数和抗力分项系数的推荐值(永久和瞬时情况)

Table 2 Recommended values of partial factors on soil parameters and resistances according to EN1997-1 (persistent and transient situations)

设计方法(分项系数集合)	土体参数 γ_M			抗力	
	比重	$\tan \phi': \gamma_\phi$	$c': \gamma_c$	$c_u: \gamma_{cu}$	被动, $\gamma_{R,e}$
DA-1 组合 1(A1 ‘+’ M1 ‘+’ R1)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1
DA-1 组合 2(A2 ‘+’ M2 ‘+’ R1)	1.0	1.25	1.25	1.4	1.0
DA-2(A1 ‘+’ M1 ‘+’ R2)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4
DA-3(A2 或 A1 ‘+’ M2 ‘+’ R3)	1.0	1.25	1.25	1.4	1.0

(2) 在地基及其他稳定验算中采用的是单一安全系数法。由于它无法与分项系数联系起来, 尽管采用了承载能力极限状态荷载效应的基本组合, 但各种分项系数均采用 1.0, 与单一安全系数方法一致。

(3) 基础的结构设计与建筑物上部结构设计是一体的, 可以采用基于可靠度理论基础上的分项系数法进行, 如抗弯、抗剪、抗冲切等验算。

3 计算实例

如图 1 所示重力式挡土墙, 墙高 4 m, 设计埋深 0.5 m, 墙背存在 10 kPa 的附加荷载, 地层参数如图 1 所示, 试设计挡土墙底面宽度 B 。

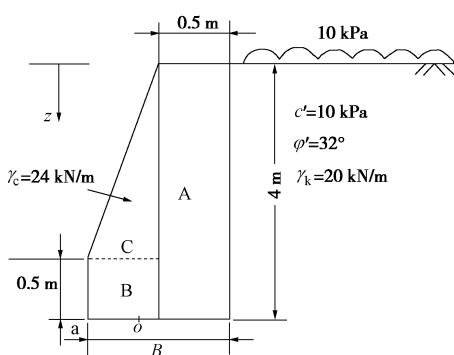


图 1 挡墙设计示意图

Fig. 1 Design sketch of retaining wall

3.1 按欧洲规范设计

按第 1 节介绍的方法, 分别进行抗滑移、抗倾覆

和地基承载力计算, 过程及结果见表 3。

3.2 按国内规范设计

(1) 计算主动土压力 E_a

将地面荷载换算成土层厚度 $h=0.5$ m, 按朗金土压力理论计算侧压力系数: $K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = 0.307$, 主动土压力 $E_a = \frac{1}{2} \times \gamma H^2 K_a - 2cH\sqrt{K_a} + 2c^2 / \gamma = 27.4$ (kN/m)。 E_a 至墙趾 a 的垂直距离 $L_{E_a} = (H-z_0)/3=0.089$ (m), 其中 $z_0 = \frac{2c-q\sqrt{K_a}}{\gamma\sqrt{K_a}}$ 。

(2) 抗倾覆验算

假设挡土墙底面宽度 $B=2$ m, 将挡土墙分成如图 1 所示三部分, 则 A、B、C 三部分重心至墙趾 a 的距离分别为 $L_A=1.75$ m, $L_B=0.75$ m, $L_C=1$ m; 每延米重量 $G_A=48$ kN/m, $G_B=18$ kN/m, $G_C=63$ kN/m。

抗倾覆安全系数 $K_t=(G_AL_A+G_BL_B+G_CL_C)/(E_a \cdot L_{E_a})=6.58>1.6$, 符合要求。

(3) 抗滑移验算

不考虑被动力的有利作用时, 假设该地基土为硬土层, 根据 GB50007—2002 表 6.6.5-2, 挡土墙基底对地基的摩擦系数 μ 取 0.32。 $K_s=(G_A+G_B+G_C)\mu/E_a=1.51>1.3$, 符合要求。

(4) 地基承载力验算

由 $\varphi'_k=32^\circ$, 查 GB50007—2002 表 5.2.5 得 $M_b=2.60$, $M_d=6.35$, $M_c=8.55$, 地基承载力特征值 $f_a=M_b\gamma_b+$

表 3 混凝土挡墙 ULS (承载力极限状态) 设计计算结果

Table 3 Results of ULS design of concrete retaining wall

设计参数及验算项目	DA-1		DA-2	DA-3
	组合 1	组合 2		
墙底面宽度 B/m	2.5	2.5	2.5	2.5
墙体重量 $V_{dw}/(kN\cdot m^{-1})$	156	156	156	156
墙体重力作用分项系数 (永久有利) γ_G	1.0	1.0	1.0	1.0
压顶荷载/kPa	10	10	10	10
压顶荷载水平作用分项系数 (可变不利) γ_Q	1.5	1.3	1.5	1.3
压顶荷载垂直作用分项系数 (可变有利) γ_Q	0	0	0	0
墙背土体水平作用力分项系数 (永久不利) γ_G	1.35	1.0	1.35	1.0
重度 γ_r	1.0	1.0	1.0	1.0
$\tan \phi' : \gamma_\phi$	1.0	1.25	1.0	1.25
土体 参数	土与墙背 δ_d	21.3°	17.7°	21.3°
	水平主动土压力系数 K_a	0.27	0.33	0.27
	水平主动土压力 $H_{dls}/(kN\cdot m^{-1})$	74.6	70	74.6
	压顶荷载产生的剪力 $V_{dl}, \tau/(kN\cdot m^{-1})$	0	0	0
抗滑动 设计	土体产生的剪力 $V_{dls}/(kN\cdot m^{-1})$	16.8	16.8	16.8
	设计滑力 $H_d=H_{dls}/(kN\cdot m^{-1})$	74.6	70	99
	抗滑力分项系数 γ_R	1.0	1.0	1.1
	设计抗滑力 $R_d = (V_{dw} + V_{dls} + V_{dl, \tau}) \tan \phi_d/(kN\cdot m^{-1})$	108.9	86.4	77.8
抗倾覆 设计	R_d/H_d	1.46	1.23	1.27
	稳定性所要求的 R_d/H_d 最小规定值	1.0	1.0	1.0
	设计结果: CR, 临界; NCR, 非临界	NCR	NCR	NCR
	a 点 $M_{E, d}$ 设计倾覆力矩/($kN\cdot m\cdot m^{-1}$)	110.4	104.8	110.4
抗倾覆 设计	承载力分项系数	1.0	1.0	1.4
	a 点 $M_{R, d}$ 设计抗倾覆力矩/($kN\cdot m\cdot m^{-1}$)	258.0	258	184.29
	$M_{R, d}/M_{E, d}$	2.34	2.46	1.67
	稳定性所要求的 R_d/H_d 最小规定值	1.0	1.0	1.0
承载力 破坏设计	设计结果: CR, 临界; NCR, 非临界	NCR	NCR	NCR
	受压面积/ m^2	2.5	2.5	2.5
	N_q	47.06	47.06	47.06
	N_y	57.56	57.56	57.56
承载力 破坏设计	N_c	73.71	73.71	73.71
	i_a	0.57	0.6	0.57
	i_y	0.37	0.4	0.37
	承载力分项系数 γ_R	1.0	1.0	1.4
承载力 设计	承载力设计值 R_d/kPa	850.37	899	607.4
	垂直作用设计值 $V_d/kPa; (V_{dw} + V_{dls} + V_{dl, \tau}) / A$	69.12	69.12	69.12
	设计方法 $V_d < R_d$	$V_d < R_d$	$V_d < R_d$	$V_d < R_d$
	$M_d \gamma_{mb} + M_c c_k = 475.3 \text{ kPa}$ 。土压力及挡土墙重力的合力 N 对墙趾 a 的距离 $c=1.06 \text{ m}$, 则偏心距 $e=B/2-1.06=-0.06 \text{ m} < B/6=0.33 \text{ m}$ 。此时基底压力呈梯形或三角形分布。			

$$p_{\max} = \frac{N}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) = 76.11 \text{ kPa} < 1.2 f_a = 570.36 \text{ kPa}.$$

$$p_{\min} = \frac{N}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) = 52.89 \text{ kPa} < 1.2 f_a = 570.36 \text{ kPa}.$$

符合要求。

综合上述稳定性验算、抗滑移验算和地基承载力验算, 可以看出, 墙底宽度 $B=2 \text{ m}$ 满足要求, 抗滑移起控制作用。

4 对比分析

(1) 中欧规范计算方法比较

从以上计算过程可以看出: 墙后填土上的分布荷载, 国内规范计算中将其转化为相等的一定厚度土体的压力, 在挡土墙设计中抗倾覆和抗滑移中均为不利荷载, 增大作用效应, 且对结果有一定影响; 欧规中墙后填土上的分布荷载在抗倾覆和抗滑移均视为有利荷载, 但是考虑其分项系数 $\gamma_Q=0.0$ 后, 对作用效应无影响。

欧规设计墙底宽 $B=2.5 \text{ m}$, 国内规范设计 $B=2.0$

m, 两者相比欧规设计略微保守。

(2) 欧洲规范三种设计方法比较

a) 从表 3 中抗滑移、稳定性和地基承载力的计算结果可以看出, DA-1 和 DA-3 给出的结果相同, 这是因为 DA-1 中, 组合 2 起决定作用, 而这一组合使用与 DA-3 相同的材料分项系数; 系统中所有作用都属于岩土作用, DA-1 组合 2 和 DA-3 中的岩土作用有相同的分项系数。

b) 对于抗滑移 ULS 验算, DA-1 和 DA-3 的结果 ($R_d/H_d=1.23$) 比 DA-2 的计算结果 ($R_d/H_d=1.27$) 更为保守。

c) 对于挡墙结构设计 (STR ULS), 与 DA-1 和 DA-3 ($M_{R,d}/M_{E,d}=2.46$) 相比, DA-2 ($M_{R,d}/M_{E,d}=1.67$) 偏于不安全。

5 结 论

通过上述计算结果对比分析, 可初步得出如下几点结论:

(1) 欧洲规范将作用分为岩土作用与非岩土作用, 区分有利与不利岩土作用, 作用效应组合时分别乘以对应的分项系数, 概念清晰, 逻辑严明。

(2) 我国岩土设计中, 作用通常为标准值, 而材料参数却为设计值, 存在概念上的不协调; 将主动土压力与被动土压力统一乘以安全系数作为结构设计的基础, 不符合有利与不利组合原则。

(3) 尽管中欧规范从设计理论上存在差异, 但计算结果相差并不大; 欧洲规范注重设计过程的适当调节, 我国规范注重结果控制。

参考文献:

- [1] European Committee for Standardization. EN1990—2002 Eurocode0: basis of structural design[S]. London: BSI, 2002.
- [2] European Committee for Standardization. BS EN1997—1: 2004-Eurocod 7: Geotechnical Design Part1:General rules[S]. London:BSI,2004.
- [3] European Committee for Standardization.BS EN 1997—2: 2007-Eurocode7: Geotechnical Design Part2: Ground investigation and testing[S]. London: BSI, 2007.
- [4] FRANK R, BAUDUIN C, DRISCOLL R, et al. Designers' Guide to EN1997—1-Eurocode7 Geotechnical design and general rules[M]. London: Thomas Telford Ltd, 2004.
- [5] 陈立宏. 欧洲岩土工程设计规范 Eurocode7 简介[J]. 岩土工程学报, 2009, 30(1): 135 - 138. (CHEN Li-hong. Introduction to geotechnical design code: Eurocode7[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 30(1): 135 - 138. (in Chinese))
- [6] 陶洪辉. 欧洲规范最新体系的研究[J]. 红水河, 2009, 27(10): 52 - 59. (TAO Hong-hui. Research on latest system of Eurocodes[J]. Hongshui River, 2009, 27(10): 52 - 59. (in Chinese))
- [7] 李元松, 余顺新, 邓 涛. EN1997-1 设计方法与国内规范设计方法对比[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 105 - 110. (LI Yuan-song, YU Shun-xin, DENG Tao. Comparing three design approaches in EN1997-1 Eurocode with those in Chinese geotechnical design code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 105 - 110. (in Chinese))
- [8] 王桂林, 王 靖, 王韵斌, 等. Eurocode7 直接法中极限状态 3 种分项系数组合的选择[J]. 建筑结构, 2011, 40(3): 84 - 87. (WANG Gui-lin, WANG Jing, WANG Yun-bin, et al. Selection of different design approaches and related partial factors in ultimate limit state in Eurocode7[J]. Building Structure, 2011, 40(3): 84 - 87. (in Chinese))
- [9] 李广信. 我国的岩土工程规范标准纵横谈[J]. 工程勘察, 2004, 31(1): 11 - 15. (LI Guang-xin. The discussion on the codes and standards geotechnical engineering in China[J]. Geotechnical Investigation& Surveying, 2004, 31(1): 11 - 15. (in Chinese))
- [10] 张在明. 我国岩土工程技术标准系列的特点和可能存在的问题[J]. 岩土工程界, 2003, 6(3): 20 - 25. (ZHANG Zai-ming. The characteristics and problems of the standard series of geotechnical engineering in China[J]. Geotechnical Engineering World, 2003, 6(3): 20 - 25. (in Chinese))
- [11] 高大钊. 对修订国标《岩土工程勘察规范》若干问题的思考[J]. 工程勘察, 2011, 38(8): 1 - 6. (GAO Da-zhao. Pondering on issues for revising national standard "Code for investigation of geotechnical engineering" [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 38(8): 1 - 6. (in Chinese))
- [12] 李元松, 夏 进, 余顺新, 等. 中欧规范关于基桩承载力确定方法的比较[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(2): 44 - 49. (LI Yuan-song, XIA Jin, YU Shun-xin, et al. Comparing methods of determining foundation pile bearing capacity in EN1997-1 with those in Chinese Geotechnical Design Code[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2012, 34(2): 44 - 49. (in Chinese))

(本文责编 明经平)