

DOI: 10.11779/CJGE201403023

深基坑局部深坑突涌稳定性计算研究

李瑛，刘兴旺，曹国强

(浙江省建筑设计研究院，浙江 杭州 310006)

摘要：突涌稳定性关乎基坑安全和造价，而局部深坑是深基坑中突涌破坏最薄弱部位。基于局部深坑坑底土体沿铅垂面整体剪切破坏的假定，提出可考虑坑底土体抗剪强度、深坑几何尺寸和坑底加固的突涌稳定性计算公式，并研究计算公式适用范围和坑底土体抗剪强度计算方法。通过对杭州钱塘江两岸大量已安全施工完成深基坑工程的计算分析，得出以下结论：考虑原状土抗剪强度可使突涌稳定系数增加30%以上，常规坑底加固使其进一步增加20%左右，计算结果符合实际情况；坑底隔水层的侧面积和顶面积的比值越大，突涌稳定性越好；平面尺寸较大的基坑可通过分块开挖来确保突涌稳定性。

关键词：突涌；局部深坑；承压水；抗剪强度；平面尺寸

中图分类号：TU43 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2014)03-0580-05

作者简介：李瑛(1985-)，男，江西九江人，博士，工程师，从事基坑围护结构设计和土力学原理研究。E-mail: liying3104@163.com。

Calculation of inrushing stability of local pits in deep excavation

LI Ying, LIU Xing-wang, CAO Guo-qiang

(Zhejiang Province Architectural Design and Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: Inrushing may lead to a high construction cost or even failure of excavation, while local deep pit, including elevator shaft and collecting well, is the most dangerous place of inrushing in the deep excavation. Based on the assumption of general shear failure of soils between the pit bottom and the confined aquifer top, an equation is proposed to evaluate the inrushing stability of local deep pit, which can consider the effect of soil shear strength, plan size and reinforcement. Applicable conditions of the formula and the method to calculate the shear strength are also provided. Finally, the data of deep excavations along the Qiantang River in Hangzhou are analyzed. The following conclusions are drawn: (1) the shear strength has an increase of more than 30% in inrushing stability and an extra increase of about 20% in stability is achieved by reinforcement of pit bottom soils; (2) the possibility of inrushing decreases with the increase of the height of pit bottom soils and the ratio of pit circumference to pit area; (3) it can prevent inrushing by dividing a large excavation into lots of small ones.

Key words: inrushing; local pit; confined water; shear strength; plan size

0 引言

交通拥堵和停车困难是经济发达城市面临的重要难题之一，开发地下空间是目前最多采用的解决办法。在修建多层地下室和地铁中，都会遇到强大的水土压力，在沿江沿河地区还可能受到高水头承压含水层的威胁。

基坑底板在承压水作用下的破坏形式与坑底土层的渗透性有关^[1]。当坑底为不透水层时，突涌常常表现为坑底被顶破，出现网状或树枝状裂缝，地下水从裂缝中涌出，并带出下部土颗粒。其机理是隔水层土单元在水头压力作用下发生大的变形或应力承受水平急剧降低，坑底土呈现屈服或塑性流动破坏。在突涌前，坑底土体整体承受承压水水头压力。当坑底为弱

透水层时，基坑突涌形式常常表现为坑底发生流砂、流土或类似于沸腾的喷水冒砂现象，其原因是因为土单元同时承受水头压力和渗透力的作用，在渗透力作用下，松散细颗粒土产生悬浮或受到冲刷，土结构受到破坏，属于渗透破坏。

目前对坑底为弱透水层的渗透破坏的认识比较一致，稳定条件是土颗粒的有效应力大于其承受的渗透力。虽然近年国内也对坑底为不透水层的突涌破坏进行了大量研究，但是由于岩土工程的复杂性，并未达成共识。鉴于国家规范推荐的压力平衡法偏保守，例如常州市1990年前安全竣工的一批基坑工程用该方

法计算出的安全系数只有 $0.49\sim0.67$ ^[2]，研究者主要从两方面来提高突涌稳定性，其一是假定坑底土体为均质连续构件^[2-3]，用抗剪强度或抗拉强度控制坑底土体临界厚度，另一是在坑底抗突涌能力中考虑土颗粒间的凝聚力和摩擦力。

大量的工程实践表明：除去沿先期勘探孔发生的突涌，绝大多数突涌发生在电梯井、集水井等局部深坑处。局部深坑处隔水层厚度与基坑跨度的比值较大，均质连续构件分析法不合适，在抗突涌能力中考虑土体抗剪强度已被证明比较可行。已有算例分析^[4]和有限元模拟^[5]证明：坑底土体接触面黏聚力对抗突涌贡献较小，基本可以忽略。汉口地区基坑^[6]分析结果说明抗突涌稳定验算应当考虑坑底土体抗剪强度，而且考虑土体抗剪强度后安全系数可增大一倍。

然而在已有的研究中，平面尺寸、隔水层厚度等基坑尺寸对突涌稳定安全系数的影响没有得到足够的重视，而且少有研究涉及坑底加固对突涌稳定性的影响。结合浙江省建筑设计研究院近年在钱塘江两岸设计的数十个深基坑，以局部深坑的整体剪切破坏为研究对象，建立了坑底加固和未加固时的突涌破坏模型，并用工程数据分析模型的表现。

1 杭州地区承压水概况

杭州地区钱塘江两岸的深基坑工程受承压水影响比较明显。钱塘江两岸的松散岩类承压含水层（江北复兴地区一带隔水层缺失，无承压水分布），受气候影响不明显，受上游侧向径流补给，水量充沛，具有明显的埋藏深、污染少、水量大的特点，单井涌水量大于 $700\text{ m}^3/\text{d}$ ，含水层顶板埋深一般在 $32\sim43\text{ m}$ 之间，承压水头存在着动态变化，水头黄海高程 $-1.34\sim-5.43\text{ m}$ （埋深约 $8.34\sim12.43\text{ m}$ ），年水位变幅最大约 4 m 。图1为钱塘江两岸典型地质简图，浅层约 20 m 厚为填土及粉砂性土层，埋藏第四系孔隙潜水层，其下为黏土层（相对隔水层，约 $10\sim15\text{ m}$ 厚），下卧厚度一般超过 $15\sim20\text{ m}$ 的砾砂及圆砾层，砾砂及圆砾层渗透性好并埋藏第四系孔隙承压含水层。相对隔水层是由淤泥质粉质黏土和其下两层性质稍有差异的粉质黏土组成，物理力学指标如表1所示。

根据水土压力平衡,按最不利工况计算(取最高承压水头及埋藏最浅的承压水顶板处进计算,抗突涌安全系数取1.1),当开挖深度超过17.6m时即处于抗突涌临界开挖深度,而随着钱塘江两岸建设的快速发展,以及地下空间的利用率愈来愈高,钱塘江两岸出现了一大批深度超过地下3层的地下室,开挖深度大多超过16m,核心筒开挖深度超过22m,个别项目

大面积开挖深度甚至达到了 25 m, 坑底隔水层厚度远远小于基坑突涌临界厚度, 需进行必要的处理^[7-8]。

止水帷幕隔断、深井降水减压、坑底加固是常用的3种处理高水头承压水的手段^[9]。坑底是否需要加固，承压含水层水位的降深都直接取决于突涌稳定计算结果。偏于保守的结果意味着较高的经济代价，而且可能造成较大的地面沉降，甚至导致地面建筑倾斜和开裂；而偏于冒险的结果容易造成坑底突涌事故的发生。

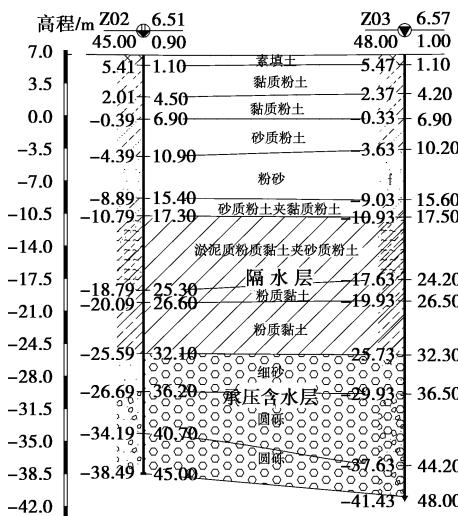


图 1 钱塘江岸典型地质剖面

Fig. 1 Typical geological profile along Qiantang River

表 1 杭州承压隔水层主要力学参数

Table 1 Mechanical properties of aquifer in Hangzhou

名称	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	c/kPa	$\phi/(^\circ)$	k_0
淤泥质粉质黏土	17.8	10.0	15.9	0.70
粉质黏土 1	19.9	24.1	19.1	0.65
粉质黏土 2	20.0	18.2	20.9	0.60
加固土	22.0	50.0	25.0	0.45

2 突涌稳定分析模型

由于局部深坑平面尺寸较小，在承压水作用下，最可能沿着坑底隔水层侧面发生整体剪切破坏，图 2

(a) 所示为坑底隔水层未加固时突涌稳定分析模型, 图中的虚线示意为整体剪切破坏面。当坑底隔水层未加固时, 根据突涌破坏体(图中阴影部分)的静力平衡, 突涌稳定安全系数计算公式为

$$K_1 = \frac{\gamma D}{P_w} + \frac{\alpha \tau}{P_w} \quad . \quad (1)$$

式中 K_1 为坑底土体未加固时的突涌稳定安全系数; γ 为坑底隔水层的天然重度 (kN/m^3), 对多层土, 取按土层厚度加权的平均天然重度; D 为坑底隔水层的厚度 (m); α 为与局部深坑平面尺寸和 D 有关的无

量纲系数, $\alpha = lD / S$, l 和 S 分别为局部深坑的周长和面积 (m) 和 (m^2); τ 为剪切破坏面上土体抗剪强度 (kPa); P_w 为承压含水层顶面处的水头压力 (kPa)。

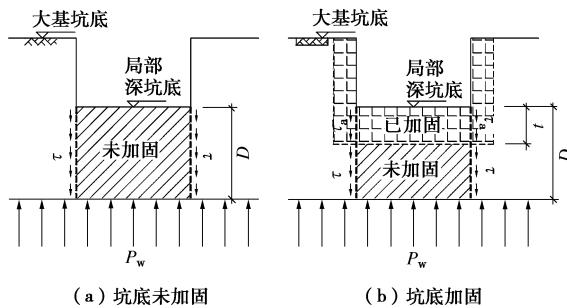


图 2 坑底突涌稳定分析模型

Fig. 2 Inrushing model for foundation pit

当突涌破坏体的重量小于承压含水层顶面的水头压力时, 通常会对坑底一定厚度的土体进行三轴水泥搅拌桩或高压旋喷桩加固, 加固范围一般会从局部深坑坑边向外扩展 1.0~2.0 m。经过分析, 加固后突涌破坏最可能的路径同样是沿着坑底隔水层侧面^[10], 图 2 (b) 示意了坑底土体加固后突涌稳定分析模型。根据突涌破坏体静力平衡, 突涌稳定安全系数计算式为

$$K_2 = \frac{\gamma D}{P_w} + \frac{\alpha \tau}{P_w} + \frac{\alpha(\tau_a - \tau)t}{P_w D} \quad (2)$$

式中 K_2 为坑底土体加固后的突涌稳定安全系数; τ_a 为剪切破坏面上加固土抗剪强度 (kPa); t 为坑底加固土层的厚度 (m); 其余符号意义同上文。当 t 为 0 时, 式 (2) 便退化为式 (1)。式 (2) 忽略了加固导致的重度提高给突涌稳定安全系数带来的增大, 对一般的局部深坑而言这个增量在 0.18 左右。

相比规范推荐使用的公式: 式 (2) 右边增加了两项, 增加的第一项表示坑底原状土体抗剪强度对突涌稳定性的作用, 增加的第二项表示坑底加固导致的抗剪强度提高量对突涌稳定性的作用。式 (2) 增加了 3 个变量, 它们的取值直接关系到本文的合理性以及坑底土层抗突涌能力的大小。

α 为与突涌破坏体三维尺寸有关的无量纲系数, 下文简称为“突涌尺寸系数”, 定义为突涌破坏体侧面积与顶(底)面积之比。以局部深坑平面为正方形为例, 表 2 列出不同 α 值对应的基坑尺寸和突涌稳定安全系数增量。为了计算方便, D 取 10 m, P_w 取 250 kPa, τ 取 30 kPa。结果表明: 基坑平面尺寸越大, 则 α 越小, 坑底土体抗剪强度对突涌的影响越小; 反之, α 越大时, 抗剪强度对突涌系数的影响越大。由于式 (1) 和式 (2) 成立的前提是坑底土体在承压水作用下发生整体剪切破坏, 即式 (2) 只适用于符合某一尺寸要求

的基坑。当 α 值大于 1 时, D/b 的值大于 0.25, 坑底土体在承压水作用下因中部挠度过大而破坏的可能性很小, 故暂且规定式 (1) 和式 (2) 成立的前提条件之一是 $\alpha \geq 1$ 。

表 2 突涌尺寸系数

Table 2 Inrushing dimension coefficients

α	b	D/b	$\alpha\tau / P_w$
0.1	400	1/40	0.012
0.5	200	1/20	0.06
1.0	40	1/4	0.12
2.0	20	1/2	0.24
5.0	8	5/4	0.60
10.0	4	5/2	1.0

τ 和 τ_a 分别为剪切破坏面上原状土和加固土的抗剪强度, 可以用莫尔-库仑强度理论计算。原状土的抗剪强度计算式为

$$\tau = c + 0.5\gamma Dk_0 \tan \varphi \quad (3)$$

式中 c , φ 分别坑底土体在固结不排水条件下的黏聚力和内摩擦角; k_0 为静止土压力系数。需要稍加说明的是, 局部深坑土体处于卸荷后的超固结状态, 但是超固结状态对应的静止土压力系数比正常固结的大, 故计算中仍采用正常固结状态下的静止土压力系数。

在杭州“浙江商会”项目进行直径 1000 mm 全套管咬合桩施工至距承压含水层顶 2 m 时, 孔底处于突涌临界状态, 根据式 (1) 反算出的 τ 值为 30 kPa。如果用式 (3) 根据表 1 的参数进行计算, τ 值为 31.0 kPa。

在杭州地区, 为抵抗坑底承压水突涌而进行的坑底水泥搅拌桩或三轴水泥搅拌桩加固厚度一般为 4 m。根据式 (3) 和表 1 可计算出 τ_a 为 59 kPa。

3 工程数据分析

浙江省建筑设计研究院近十年来在钱塘江两岸设计了近百项基坑工程, 积累了大量数据。笔者根据规范方法和本文方法分别对这些数据进行整理分析, 并从中选取表 3 所示 7 个典型基坑工程, 它们具有以下 3 个特点: ①基坑开挖过程中没有发生突涌; ②规范推荐方法计算出的突涌安全系数小于 1.1; ③本文方法计算出的突涌安全系数大于 1.1 或接近 1.1。表 3 中 h_w 为承压含水层顶面的水头高度。除中国移动项目没有进行坑底加固外, 其余项目均进行了坑底三轴水泥搅拌桩或高压旋喷桩加固, 加固深度范围为大基坑底 3~4 m。

依照表 3 计算结果, 一些基坑即使不进行坑底加固, 仅考虑坑底土体抗剪强度的作用, 突涌安全系数也能满足规范要求。抗剪强度的增量与突涌尺寸系数关系密切。图 2 显示: 单纯由坑底土体(未加固)抗剪强度导致的突涌安全系数增量与基坑突涌尺寸系数

表3 典型工程突涌安全系数

Table 3 Safety factors of piping for typical pit foundations

编号	工程名称	D/m	h_w/m	S/m^2	l/m	α	K	K_1	K_2
1	港丽振泽	7.00	19.50	507.8	91.8	1.27	0.68	0.88	1.02
2	万象城	9.40	25.90	275.5	66.6	2.27	0.69	0.95	1.09
3		11.00		227.2	62.4	3.02	0.81	1.16	1.32
4	来福士	12.82	23.54	308.0	68.0	2.83	1.03	1.40	1.48
5		12.42		213.0	59.0	3.44	1.00	1.44	1.55
6	中国移动	12.05	23.05	184.0	54.3	3.56	0.99	1.46	—
7	侨商大厦	10.60	20.00	68.5	34.4	5.32	1.01	1.81	2.04
8	浙江商会	16.00	28.00	39.8	25.8	10.37	1.09	2.20	2.41
9		13.44		46.8	28.2	8.10	1.04	1.69	1.91
10	万银国际	13.44	24.64	39.4	27.0	9.21	1.04	1.78	2.03
11		12.94		158.0	52.0	4.26	1.00	1.34	1.46

α 基本成正比例关系, α 越大突涌安全系数增加越多, 增加百分比范围为 30%~100%; 加固所导致的突涌安全系数增量在 20% 左右, 这是因为坑底加固的形式和范围类似; 增量为 0 的项目是坑底未加固的“中国移动”项目(图 3)。

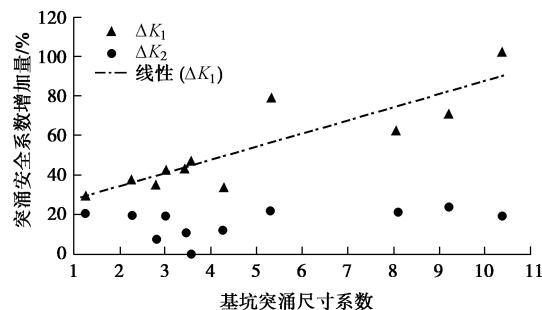


图 3 突涌安全系数增量与突涌尺寸系数的关系

Fig. 3 Relationship between ΔK_1 (ΔK_2) and α

表 4 主要规范突涌安全系数

Table 4 Safety factors of piping in main codes

规范名称	安全系数
建筑地基基础设计规范 GB50007—2011	1.10
建筑基坑工程技术规范 JGJ120—2012	1.10
上海市基坑工程设计规范 J11577—2010	1.05
天津市建筑基坑工程技术规程 DB29—202 —2010	1.10 或 1.05
北京市建筑基坑支护技术规程 DB11—489 —2007	1.05
湖北省基坑工程技术规程 DB42—159— 2004	1.00 或 1.20
广东省建筑基坑支护工程技术规程 DBJ/T15—20—97	$1.2\gamma_0$

注: γ_0 为基坑重要性系数。

考虑坑底土体抗剪强度后, 局部深坑突涌安全系数增加了 45%~120%。虽然所有基坑都安全开挖到底, 鉴于深基坑突涌关系重大, 对突涌安全系数的计算和最低要求必须慎之又慎。表 4 列出国内主要基坑规范允许的突涌安全系数最小值。湖北省基坑工程技

术规程安全系数说明中还补充: 对于大面积普遍开挖的基坑, 不应小于 1.20, 对于承台可分别开挖且平面尺寸较小的基坑, 不应小于 1.0。天津市建筑基坑工程技术规程安全系数说明中对坑底有群桩基础或经加固处理时可取 1.05。规范推荐的重力平衡法普遍认为偏保守, 故安全系数的取值也较小; 如果采用本文方法, 安全系数是否应适当提高或者对本文方法计算出的安全系数进行适当折减是值得讨论和进一步研究的, 尤其是当基坑突涌尺寸系数较大时。

4 结论

基坑内的电梯井、集水井等局部深坑是突涌破坏的最薄弱部位, 当承压含水层顶部分布有相对隔水层时, 突涌破坏的形式是沿着坑底土体侧面发生的整体剪切破坏。规范推荐的突涌安全系数计算方法基于重力平衡法, 忽略了坑底土体抗剪强度对突涌的作用, 普遍认为偏于保守。根据突涌破坏三维模型, 提出的突涌安全系数计算式能够考虑局部深坑的平面尺寸、开挖深度、坑底土层厚度等空间参数的影响, 也能考虑坑底加固的作用。通过对杭州钱塘江两岸大量深基坑的计算分析, 得出如下结论和建议:

(1) 考虑坑底原状土体抗剪强度后, 即使不对坑底土体进行加固, 局部深坑的突涌安全系数依然增大 30%~100%, 计算结果与基坑开挖实际情况相符; 对坑底土体进行加固后, 突涌安全系数可进一步提高 20% 左右。

(2) 突涌安全系数不仅与坑底土体的抗剪强度指标有关, 而且与局部深坑的平面尺寸有关, 坑底隔水层的侧面积和顶面积的比值越大, 安全系数越大。

(3) 考虑坑底土体抗剪强度后局部深坑突涌安全系数可大幅增加, 但是现行规范规定的安全系数值较低, 故有必要进行相应配套调整。

(4) 为确保突涌稳定, 平面尺寸比较大的基坑可划分为若干区块分步开挖。

(5) 当坑底隔水层的厚度较小时, 加固可能破坏

地基的均匀性和不透水性，应慎用。

(6) 本文的计算结果需要得到更多实测数据的验证，必要时可用空间有限元进行核算。

参考文献：

- [1] 丁春林. 软土地区承压水基坑突涌稳定计算法研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 333 – 338. (DING Chun-lin. Summary of study on calculation method of inrushing for confined water foundation pit in soft soil area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 333 – 338. (in Chinese))
- [2] 梁勇然. 条形基坑突涌分析[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 75 – 79. (LIANG Yong-ran. Analysis of strip pit inrushing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 75 – 79. (in Chinese)).
- [3] 李 涛, 王 超. 高承压水地层开挖基坑底板隆起稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1236 – 1241. (LI Tao, WANG Chao. Bottom heave stability during foundation pit excavation in soil layer with high artesian water pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1236 – 1241. (in Chinese))
- [4] 杨建明, 郑 刚. 基坑降水中渗流破坏归类及抗突涌验算公式评价[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 261 – 264. (YANG Jian-ming, ZHENG Gang. Classification of seepage failures and opinion to formula for check bursting insatibility in dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 261 – 264. (in Chinese))
- [5] 丁春林, 朱 晓, 叶 丹. 承压水引发基坑突涌塑性破坏抑制因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增刊 2): 1594 – 1599. (DING Chun-lin, ZHU Kai, YE Dan. Analysis on inhibiting factors of inrushing plastic failure caused by confined water in foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1594 – 1599. (in Chinese))
- [6] 谭松林. 考虑土体强度的建筑基坑突涌问题分析[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(2): 209 – 211. (TAN Song-lin. Analyses of abrupt gush problem of soil and water based on strength of soil body in building foundation pit[J]. Earth Science – Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 209 – 211. (in Chinese))
- [7] 张忠苗, 赵玉勃, 吴世明, 等. 杭州庆春路过江隧道基坑围护体系设计分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1399 – 1405. (ZHANG Zhong-miao, ZHAO Yu-bo, WU Shi-ming, et al. Design and analysis of retaining system of foundation pit of Qingchun Road River-Crossing Tunnel in Hangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1399 – 1405. (in Chinese))
- [8] 杨学林. 浙江沿海软土地基深基坑支护新技术应用和发展[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 33 – 39. (YANG Xue-lin. Application and development of new technology for support of deep excavations in coastal areas of Zhejiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 33 – 39. (in Chinese))
- [9] 翁其平, 王卫东. 深基坑承压水控制的设计方法与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 343 – 348. (WENG Qi-ping, WANG Wei-dong. Design and application of control of confined groundwater in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 343 – 348. (in Chinese))
- [10] 李 瑛, 刘兴旺, 曹国强. 考虑土体抗剪强度的深基坑承压水突涌分析[J]. 浙江建筑, 2012, 29(增刊): 44 – 47. (LI Ying, LIU Xing-wang, CAO Guo-qiang. The effect of soil strength to deep foundation pit inrushing stability[J]. Zhejiang Construction, 2012, 29(S0): 44 – 47 (in Chinese))