

预应力钢绞线网加固混凝土桥梁的 索力分布试验研究

郭琦¹, 叶全斌², 尹海军¹, 闫雯¹

(1.西安建筑科技大学教育部结构与抗震重点实验室, 陕西 西安 710055;

2.陕西凯达公路桥梁建设工程有限公司, 陕西 西安 710064)

摘要: 对于采用挤压头连接锚固工艺的高强钢绞线网的桥梁加固技术, 为了在预加应力阶段对一次锚固得到的预应力水平与索力分布均匀程度进行便捷和高精度的监测, 基于静力平衡原理推导了修正边界的钢绞线索力监测公式, 并开展了两组大比例模型梁钢绞线网张拉与索力监控试验研究. 试验结果表明: 修正后的索力监测值与实际值的相对误差为4.6%, 测试精度满足工程要求. 基于索力分布统计规律开展了应力松弛试验, 提出了无应力索长控制的索力修正模型, 以减小钢绞线网索力分布的界限波动率, 达到了一致性索力设计状态. 该方法解决了狭小空间下预应力钢绞线网索力监测问题, 对于后续索力调整研究及保障设计预应力水平平均具有重要的意义.

关键词: 桥梁工程; 预应力钢绞线网; 挤压头连接锚固; 索力分布; 修正边界; 界限波动率

中图分类号: U446.3; U445.7+2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)01-0044-05

目前, 采用预应力高强钢绞线网-高性能砂浆加固桥梁技术已经越来越多地应用于实际工程中, 它具有施工简便迅速、耐腐蚀、耐老化、加固效果良好等优点^[1-2]. 该技术属于预应力体系的深化应用范畴, 对于此类特殊预应力体系的研究从计算理论、模型试验、索力预测等角度均开展了研究^[3-6]. 由于应用单层或双层高强预应力钢绞线网的加固工艺采用了小直径预应力束筋分散布置的方式, 若采用传统的预应力锚固工艺, 受操作空间限制, 很难在桥梁加固中得到很好的应用, 因此相应的预应力张拉锚固方式也呈现多样化. 刘伯权、黄华等^[7]应用该技术对T梁进行了加固试验, 对于预应力钢绞线采用专用锚板的摩擦锚固工艺. 聂建国、周孙基^[8-9]等对预应力钢绞线加固板、梁的抗弯性能进行了试验研究, 采用高强度螺母紧固承压锚板钢绞线锚固工艺. 郭彤等^[10]采用锚固拉环与U形卡具进行了薄壁箱梁桥的加固试验. 杨军民等^[11]应用专用锚具锚固闭合预应力钢丝绳进行抗剪加固试验. 吴刚等^[12]采用铝合金套筒制作挤压锚头, 把钢丝绳端部挤压, 经预张后从而实现了单根钢丝绳的可靠锚固. 由于锚固性能的优劣与加固目标及效果存在着必然的因果关系, 对于以上高强钢丝绳网的多种锚固连接体系中, 采用挤压锚头实现有效连接的锚固方式无论从预应力储备还是粘结锚固性能上均体现出较优的性能. 而对于这一方式, 索力量值以伸长量控制为主, 对其分布的一致性及相应监测方法的研究较少.

本文通过北京羿射旭科技有限公司提供的YS-09系列预应力锚固体系对模型梁进行了基于挤压头连接锚固方式的预应力施加与锚固试验, 通过修正的静力等效原理来测试索力, 实现高强钢绞线网索力监测的应用.

1 修正边界下的索力监测方法

在预应力逐根张拉锚固建立预应力体系的过程中, 为掌握各根钢索索力的动态变化, 及时了解结构的预应力水平, 首先需要而进行索力监测. 在预应力束筋端部挤压锚固后, 受锚板约束, 其刚度远大于单根柔性钢索, 因此可视作半无限体的固结边界, 两端则不存在相对滑移和变形. 考虑到与钢索被测表面三个接触点处产生了索段的局部强迫变形, 加之弦弯曲刚度及轴向伸长量对索力影响, 如图1所示.

在静力平衡的基础上, 推导出修正的挤压锚固钢绞线索力测试公式如式(1)所示.

$$F = \frac{\Delta T L_1}{4\Delta\delta} + \Delta F \quad (1)$$

式中: ΔT 为分级横向张力差; $\Delta\delta = \delta_{i+1} - \delta_i$ 为分级横向位移差; L_1 为索支承间距; ΔF 为边界修正项, 它

收稿日期: 2013-09-26

修改稿日期: 2014-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108372); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20106120120001); 陕西省教育厅专项科研项目(12JK0904); 陕西省重点学科建设专项资金项目(E01004)

作者简介: 郭琦 (1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事混凝土桥梁结构性能评估研究. E-mail: gq8558@126.com

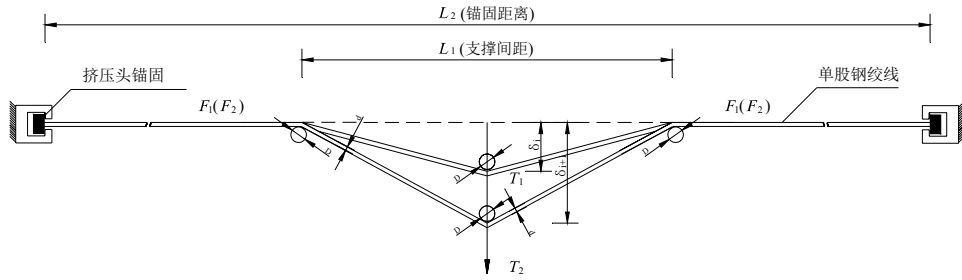


图1 修正边界分析模式

Fig.1 Analytical mode for corrected boundary condition

反映出了挤压锚固钢绞线在实际边界条件下索力理论值的变化量,可由式(2)表达:

$$\Delta F = (F_A + F_I) \quad (2)$$

式中: F_A 为考虑拉压刚度索力修正项:

$$F_A = -\frac{1}{4} E_p A_p \beta \left[(\sqrt{4\delta_{i+1}^4 + \delta_{i+1}^2 L_1^2} - \sqrt{4\delta_i^4 + \delta_i^2 L_1^2}) - L_1 \right] \quad (3)$$

F_I 为考虑三支撑弯曲刚度索力修正项:

$$F_I = -\frac{8E_p I_p \Delta \delta}{(D+d) \left(\sqrt{L_1^2 + 4\delta_{i+1}^2} + \sqrt{L_1^2 + 4\delta_i^2} \right)} \quad (4)$$

式中: δ_i, δ_{i+1} 为分级测试工况下对应的横向位移值; β 为索支撑间距 L_1 与锚板距离 L_2 的比值; $E_p A_p$ 与 $E_p I_p$ 分别为索截面等效拉压刚度与等效抗弯刚度; D 为三支撑点等效直径; d 为预应力钢索公称直径。

2 预应力钢绞线网试验

2.1 预应力钢绞线网模型梁设计

规划两组采用挤压锚固施加预应力的钢绞线网模型试验梁 PCB-1 与 PCB-2. 混凝土标号为 C40, 截面尺寸均为 500 mm × 400 mm, 计算跨径 $l_0 = 3\,220$ mm. 梁底面建立预应力体系, 锚板间距 $L_2 = 2\,700$ mm, 索中心距梁底 25 mm.

预应力钢绞线网采用 16 股高强钢绞线网片, 索股间横向净距 30 mm. 模型梁预应力钢绞线网如图 2 所示. 为满足狭小空间下单股钢绞线张拉锚固的需要, 选用公称直径为 4.5 mm 的高强钢绞线, 公称面积 9.62 mm². 通过基础力学性能试验得到钢绞线平均极限抗拉强度为 1 370.7 MPa, 平均弹性模量 1.5×10^5 MPa. 在比例界限前, 应力-应变具有良好的线性关系, 各试件极限拉伸应变均大于 3%. 单股预应力张拉应力 $\sigma_p = 0.6 f_{tk} = 822$ MPa, 对应张力理论值为 7.9 kN.

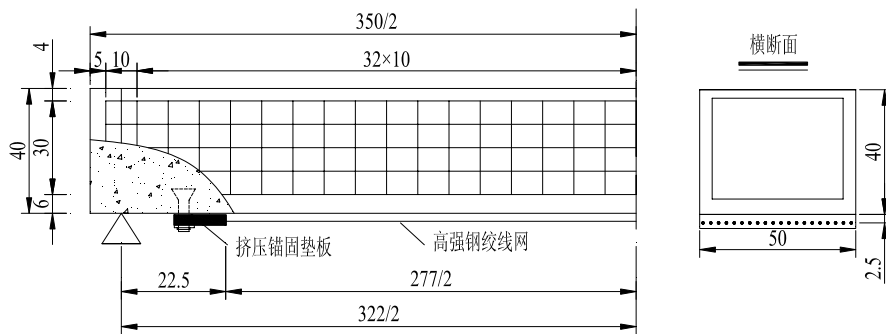


图2 模型梁预应力钢绞线网

Fig.2 Main dimensions of specimen

2.2 挤压锚固与预应力施加

挤压锚固是借助专用挤压油泵通过对预应力钢绞线网端部施加环向挤压力以固定合金锚头, 应用专用设备实现有效锚固. 施加过程如图 3 所示.

2.3 索力监测与控制

根据索力平衡原理采用索力仪 (型号: YSX-ZLY-400) 进行索力监测试验, 量测模型梁 16 股预应力钢绞线单股索力值, 在预应力钢绞线网逐根张拉过程中分级进行. 试验过程中索力监测如图 4 所示.

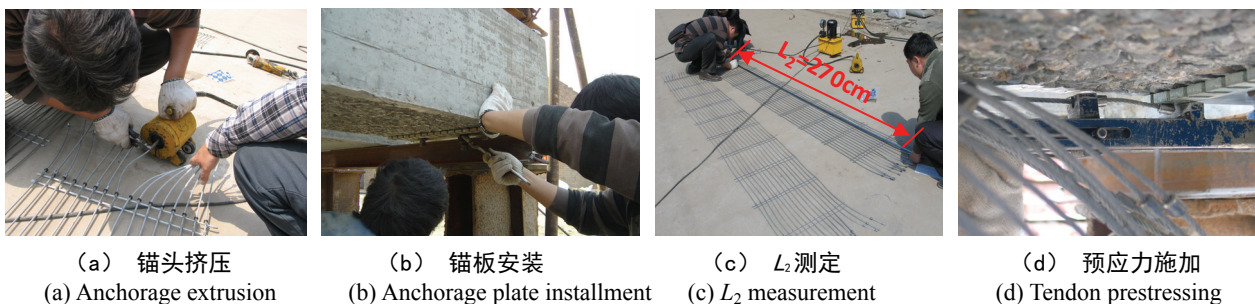


图3 预应力施加过程

Fig.3 Process of prestressing



图4 索力监测

Fig.4 Monitor on stretching force

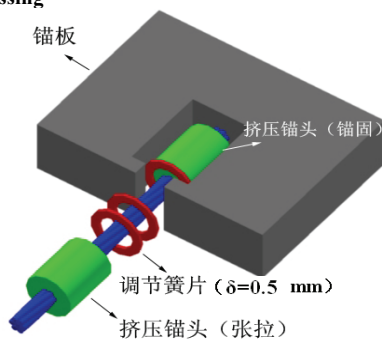


图5 索力控制示意

Fig.5 Control on stretching force

由于单根钢绞线布设时紧贴梁体底面,加之挤压头张拉锚固板的特殊构造,锚头距离梁底平面的空间狭小,净空仅为 2~4 cm,为此采用专用调节簧片进行索力控制(图 5)。

3 试验结果分析

3.1 索力量值偏差分析

试验中索力实际值是通过二次张拉法建立的,即在挤压锚头(张拉)端采用专用液压千斤顶对各股钢绞线实施二次张拉,并用调节簧片定位,同步记录挤压锚头(锚固)端移动时刻的读数。根据纵向受力平衡,该时刻油表显示的张力值与克服当前实际索力的量值相等,以此作为索力监控方法的校验。应用式(4)的方法得到的索力值记为各索力监测值,试验得到两片模型梁呈现出较为一致的规律。

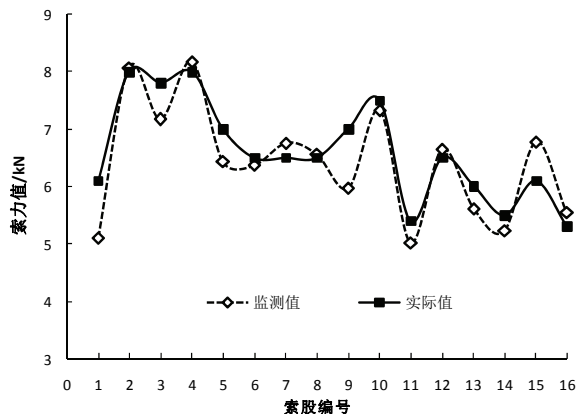


图6 PCB-1 梁索力偏差曲线

Fig.6 Deviation curve of stretching force of PCB-1

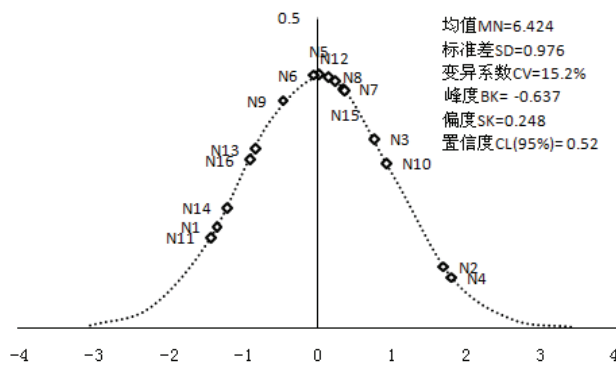


图7 索力分布统计图

Fig.7 Distribution diagram of stretching force

从图 6 可以看出,经过修正后的各股钢索监测值(式(4))将平均误差小于 4.6%,表明了基于修正的静力等效原理监测索力的精度能够满足工程需求。

3.2 索力分布波动率分析

在预加应力阶段,预应力钢绞线网控制的核心参数体现索力的绝对量值和各索股索力分布的波动率两方面,前者以预应力锚固后索力均值为代表,而后者则以索力分布的标准差和变异系数为代表。监测索力结果的分布统计图如图 7 所示,其界限波动率可由最大索力偏差与张拉控制力的比值界定,与索力分布的变异系数相关。

从图中可看出: 各股索监测索力离散性较大, 索力分布的变异系数为 15.2%, 索力的界限波动率达到了 31.3%, 表明此时钢绞线网未能达到较为一致的索力分布水平 (小于 5%), 这对于梁体服役阶段预应力钢绞线的应力增量控制是非常不利的。

4 松弛性能分析与修正模型

4.1 松弛性能分析

采用挤压锚固工艺施加预应力的构件, 预应力索股在挤压锚固后基本不存在回缩量, 预应力钢绞线的松弛性能成为控制预应力损失、决定有效预应力水平的重要因素。应力松弛与时间、钢材种类、初始应力等诸多因素有关, 通过室内松弛试验获得其基础力学性能是较为直接、客观的研究手段。

以索力分布统计图为基础, 按照 95% 置信区间分别取用模型梁中 N10、N6 及 N11 钢绞线对应的预留样本进行松弛率试验, 试件尺寸 150 cm。在恒温 18.25~21.55 °C, 湿度 55% 环境下, 参照文献[13]中的试验规程, 进行松弛试验, 得到了钢索的松弛曲线如图 8 所示。

在加载初期, 尤其是模型试验测试时间点 180 min 时, 松弛应力结果显示三根钢索应力松弛率的偏差程度与模型试验索力测值规律一致, 表明此类小直径钢绞线整体松弛系数高于普通 $\phi^S 15.2$ 低松弛钢绞线, 且松弛率的差异是导致索力分布的不均匀性主要因素之一, 因此需要基于松弛试验结果建立无调索索长的修正模型。

4.2 索长修正模型

模型梁为采用挤压锚固工艺施加预应力的构件, 与传统的采用夹片式的预应力锚固方式不同, 钢绞线网以“伸长量”控制为主。由模型梁试验结果可知, 由于钢绞线网在张拉锚固后索力存在着偏差, 需要在实践中进一步通过预应力钢索的调索来控制补偿, 因而限制了该技术的大规模推广应用。

对于 PCB-1 与 PCB-2 两片模型梁, 初始的无应力索长 l_0 均是按照式 (5) 所示的基础模型预先计入钢绞线的伸长值来控制的。

$$l_0 = L_2 \left/ \left(1 + \frac{N_p}{E_p A_p} \right) \right. \quad (5)$$

式中: l_0 为无应力索长; N_p 为目标张拉控制力; 其他符号意义同前。

现结合索力测试与抽样松弛试验, 建立考虑修正索长模型如式 (6) 所示:

$$l_{0i} = \xi L_2 \left/ \left(1 + \frac{N_p (1 + \gamma_i - \bar{\gamma})}{E_p A_p} \right) \right. \quad (6)$$

式中: l_{0i} 为第 i 根索无应力索长; ξ 为小于 1 的无量纲修正系数; γ_i 为第 i 根索实测松弛率; $\bar{\gamma}$ 为中值索的松弛率; 其他符号意义同前。

上述模型中 ξ 考虑了应力滞后等因素影响下钢绞线网预应力水平的整体提升; 在预加应力阶段通过考虑单根索股应力松弛的折减或补偿实现了索力的均匀分布。鉴于逐根预应力索股松弛试验过于繁琐, 还需进一步通过索力控制试验达到索长优化调整的批次实现模型, 最终得到无调索的一致性索力状态。

5 结语

(1) 在采用挤压锚固方式施加预应力的钢绞线网加固工艺中, 预加应力阶段对索力的绝对量值和各股索力分布状态的监测对预应力储备水平及服役期内应力增量的分析与控制尤为重要, 而基于静力平衡的间接监测方法则是可行技术之一。

(2) 在静力平衡原理基础上推导了间接监测索力量值的修正钢绞线索力测试公式, 由两片大比例模

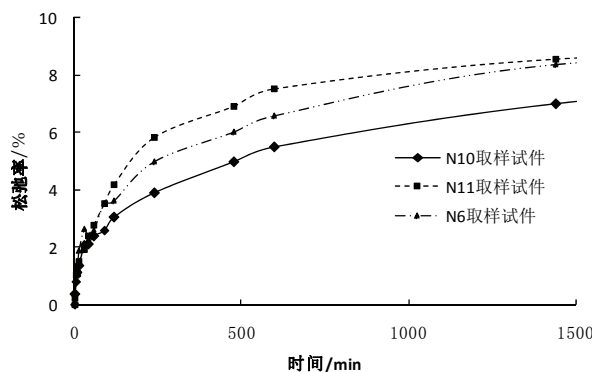


图 8 松弛性能试验结果
Fig.8 Relaxation test results

型梁钢绞线网张拉试验结果反映出应用该方法得到的各监测索力值与实际值误差均小于4.6%,具有较高的监测精度。

(3) 对于以“伸长量”控制为主的采用挤压锚固工艺张拉的钢绞线网片而言,小直径预应力索股松弛率的差异是导致索力分布的不均匀分布的主导因素,需进一步结合调索试验完善无应力索长修正模型。

参考文献References

- [1] 聂建国, 陶巍, 张天申. 预应力高强不锈钢绞线网-高性能砂浆抗弯加固试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(8): 1-7.
NIE Jianguo, TAO Wei, ZHANG Tianshen. Experimental study on the flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(8): 1-7.
- [2] PELLEGRINO C, DA PORTO F, MODENA C. Experimental behavior of reinforced concrete elements repaired with polymer-modified cementitious mortar[J]. Materials and Structures, 2011, 44(2): 517-527.
- [3] 黄侨, 荣学亮, 杨明. 桥梁体外预应力筋极限应力计算方法[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 78-83.
HUANG Qiao, RONG Xueliang, YANG Ming. Calculation method of ultimate stress of external prestressed tendons on bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 78-83.
- [4] PECCE M, CERONI F, PROTA A, et al. Response prediction of RC beams externally bonded with steel-reinforced polymers[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(3): 195-203.
- [5] GUO Qi, ZHANG Gang, HE Shuan-hai. Unified analogue method of effective prestress for post-prestressed tendon[J]. ACAD J XJTU 2008, 20(3): 187-192.
- [6] HAN K B, HONG S N, PARK S K. RC slabs repaired and strengthened by alumina/polymer mortar and prestressing strands in the tension zone: experimental investigation under static and fatigue loadings [J]. Mechanics of Composite Materials, 2012, 48(5): 587-602.
- [7] 黄华. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固钢筋混凝土梁式桥试验研究与机理分析[D]. 西安: 长安大学, 2008.
HUANG Hua. Experimental study and theoretical analysis on strengthening RC girder bridge with steel wire mesh and polymer mortar[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [8] 聂建国, 王寒冰, 张天申, 等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合物砂浆抗弯加固的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 1-9.
NIE Jianguo, WANG Hanbing, ZHANG Tian-shen, et al. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with stainless steel wire mesh and permeability polymer mortar [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 1-9.
- [9] 周孙基. 高强不锈钢绞线加固钢筋混凝土板的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
ZHOU Sunji. Research on steel reinforced concrete slabs strengthened with high-strength stainless steel wire[D]. Beijing: Tsinghua university, 2004.
- [10] 郭彤, 李爱群, 姚秋来, 等. 钢绞线网片-聚合物砂浆加固钢筋混凝土箱梁试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23(2): 36-42.
GUO Tong, LI Aiqun, YAO Qiulai, et al. Experiment on reinforced concrete box-girder strengthened by steel stranded wire mesh and polymer mortar[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2): 36-42.
- [11] 杨军民. 闭合预应力钢丝绳加固 RC 梁抗剪性能试验研究[D]. 福州: 华侨大学, 2011.
YANG Junmin. Study on shear behavior of RC beam retrofitted by prestressed closed wire rope units[D]. Fuzhou: Huaqiao University, 2011.
- [12] 吴刚, 蒋彪彪, 吴智深, 等. 预应力高强钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土梁的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(12): 17-27.
WU Gang, JIANG Jianbiao, WU Zhishen, et al. Experimental study on flexural strengthening of RC beams with prestressed high strength steel wire ropes[J]. China civil Engineering Journal, 2007, 40(12): 17-27.
- [13] GB/T10120-1996 金属应力松弛试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
GB/T10120-1996 Metallic materials-Stress relaxation test[S]. Beijing: Standards Press of China, 1996.

Experimental study of distribution on prestressed strand mesh in strengthening concrete bridges

GUO Qi¹, YE Quanbin², YIN Haijun¹, YAN Wen¹

(1. Key Laboratory of Structure and Earthquake-resistance of Ministry of Education, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Kai Da Highway & Bridge Construction Co., LTD, Xi'an 710064, China)

Abstract: For bridge reinforcement using high-strength prestressed strand mesh with extruded joint anchorage, the corrected boundary formula of stretching force for a single steel strand is derived based on static balance principle in order to monitor the stretching force and its distribution state in convenient and high-precision way once after anchorage. Experiment on two group of large-scale PC beam models is conducted as well for the purpose of testing the method mentioned before. The test result shows that the relative error for stretching force of a single strand between monitoring value and actual one is less than 4.6 percent. Based on statistical distribution mode of stretching force and stress relaxation test, amending model on stress-free length is promoted to reduce the limited fluctuation ratio of the stretching force distribution of steel wire mesh. This method solves the problem of stretching force monitoring on prestressed strand mesh in small spaces and meets the requirement of engineering accuracy and therefore, has great significance for subsequent research of stretching force adjustment and can guarantee the expected prestressing levels.

Key words: bridge engineering; prestressed strand mesh; extruded joint anchorage; stretching force distribution; corrected boundary; limited fluctuation ratio

(本文编辑 桂智刚)