

# 柔性框架石笼在大型崩塌体治理工程中的应用

## ——以5·12汶川地震区豆芽坪崩塌错落体为例

王全才<sup>1,2</sup>, 王兰生<sup>2</sup>, 李宗有<sup>3</sup>, 丁瑜<sup>1</sup>

(1 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护  
国家重点实验室, 四川 成都 610041; 3 四川省交通厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017)

**摘要:** 5·12汶川大地震诱发了许多大型崩塌体, 对这类崩塌体尤其是处于江河强势冲刷下的大型崩塌体, 采用常规的治理工程措施显然是很不适宜的! 柔性框架石笼就是针对都汶路最突出的豆芽坪崩塌错落体提出的一种新型防护工程。这种防护工程不仅便于就地取材, 经济实用, 而且较好地解决了依然处于变形调整中的崩塌体工程治理问题, 突出了柔性防护的特色, 具有一定的应用和推广价值。

**关键词:** 柔性框架石笼; 大型崩塌体; 治理工程

**中图分类号:** P642.21, U417.1

**文献标识码:** A

5·12汶川大地震引发了大量的次生灾害<sup>[1]</sup>, 其中有的已经给人们造成了危害, 有的则以灾害隐患的形式继续孕育和发展着。都(江堰)汶(川)路豆芽坪崩塌错落体就是5·12汶川大地震于震中附近引发的同属上述两种代表性的大型次生灾害体。这一灾害体正处于有名的老虎嘴壅塞体的上游, 二者之间仅夹了一个200 m范围的老虎嘴滑塌体。豆芽坪崩塌错落体因为老虎嘴巨型崩塌体形成的壅塞体, 而使本段公路外侧岷江积水成湖, 并成为岷江最大的一个天然壅塞湖。也正是这个壅塞湖的存在, 才使豆芽坪崩塌错落体、老虎嘴滑塌体、老虎嘴巨型崩塌体和磨子沟泥石流沟这四个紧紧相连的不同性质的灾害群体(图1)<sup>[2,3]</sup>更加复杂多变, 充满危险性和危害性。目前虽然公路已经开通, 甚至一些路段也做了些应急工程处理, 但其安全隐患并未真正解除, 相反在大部分重点部位, 其防护工程技术难度有增无减, 必须认真对待!

豆芽坪崩塌错落体给科研设计人员提出的突出

难题之一, 就是如何尽快解决尚处于变形调整中且仍将遭受岷江洪水冲刷的大型崩塌体的工程治理问题。柔性框架石笼成套防护技术的推出, 正是解决上述系列问题的一种积极举措。

## 1 研究区概况

豆芽坪崩塌错落体倚临的岷江上游, 构造复杂, 褶皱发育, 区内断裂构造主要有北川-映秀断裂、茂汶断裂及其上盘的茂汶北支断裂、挂思岭断裂。这些断裂总体走向北东向, 陡倾北西。对上述断裂活动研究表明, 断裂属元古代扬子地块和中生代俯冲板块接触的深断裂, 北川-映秀断裂为龙门山中央断裂<sup>[4]</sup>, 2008年“5·12”汶川大地震震中就位于这一断裂上; 茂汶断裂为龙门山后山断裂, 活动性也很强, 其他断裂(层)规模相对较小。发育的裂隙主要以构造裂隙为主。该区新构造活动强烈<sup>[4]</sup>, 新生代以来主要表现为大面积抬升隆起和断块差异升降,

收稿日期(Received date): 2008-12-15; 改回日期(Accepted): 2009-05-20.

基金项目(Foundation item): 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-332资助。[Supported by Knowledge Innovation Program of CAS(KZCX2-YW-332).]

作者简介(Biography): 王全才(1959-), 男, 汉族, 研究员, 主要从事滑坡整治工程设计与滑坡机理、工程结构与坡体协调性等方面的研究。

[Wang Quancai(1959-), male, the Han nationality. Professor, works fields mainly covering mechanism of landslides, engineering design etc.]

E-mail: slopeok@imde.ac.cn

并导致岷江强烈溯源侵蚀。新构造剧烈变形产生的应力集中,最终导致该区中、强地震时常发生。主要有 1713 年的叠溪 7 级地震、1748 年的漳腊北 6.5 级地震、1933 年叠溪的 7.5 级地震、1960 年的漳腊 6.3 级地震;以及 2008-05-12 的汶川 8.0 级地震。这些不断出现的强震自然导致本已破碎的岩体更加支离破碎。

豆芽坪崩塌错落体发育区位于川西北高原的东北部,地貌属构造剥蚀及侵蚀堆积中山斜坡地貌,地形是北东高,南西低。据实地勘察,崩塌源的高度非常高,最高点海拔约 1 470 m,而崩塌体前缘直抵

岷江河床,其河床标高约 900 m,相对高差 570 m(图 2)。据 2008-11-15 调查发现,该堆积区原为岷江的冲刷岸,由于岷江河水的长期冲刷,导致岷江左岸上部岩体多次滑(崩)塌、错落并堆积于早期河床之上,形成巨厚的松散堆积体,堆积体平面形态呈“撮箕”状,宽约 700 m,长约 1 000 m,最大堆积厚度已大于 80 m。本次新近堆积厚度 0~40 m,堆积方量约  $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,属于一大型崩塌堆积体,堆积体由许多大小不一的块、碎石组成,底部以碎石土为主。其表面块体粒径 20~100 cm 不等,约占 50% (图 3 图 4)。

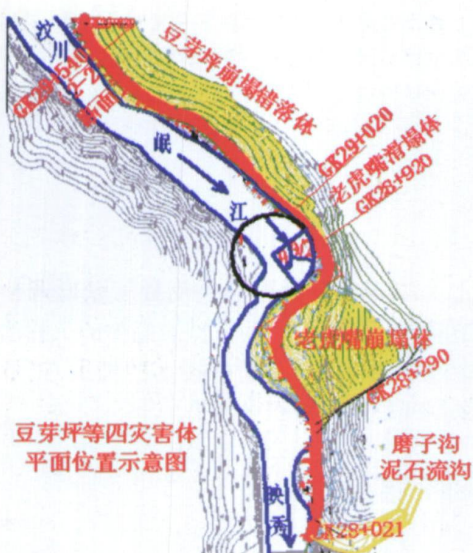


图 1 灾害体平面位置图

Fig. 1 Sketch map of four Mountain Hazards



图 2 岷江最大壅塞湖畔的都汶路豆芽坪崩塌错落体

Fig. 2 Duwen Road Douyaping Collapse located along the biggest dam lake in Minjiang River



图 3 上部崩塌物质松散丰富

Fig. 3 Loose and plentiful collapse materials on the top



图 4 崩塌体块、碎石居多

Fig. 4 Most of the collapse are block rock and scree

## 2 崩塌错落体成因、特点及发展趋势

### 2.1 成因、特点

豆芽坪崩塌错落体位于都汶路映秀—汶川段 K29+020~K29+630 里程范围岷江的左岸。其主要成因在于地形、构造、节理、岩性等环境本底条件的控制作用, 以及地震、河流强力冲刷等长期外因条件的综合影响<sup>[5]</sup>, 尤其是 2008 年“5·12”汶川大地震突发地震力的剧烈激发作用, 最终形成如今的体貌特征, 并一举成为“5·12”汶川大地震在都汶路诱发的崩塌体中沿公路分布最长、规模范围最为突出的一个。

豆芽坪崩塌错落体由新、老崩塌错落体组成, 新形成的崩塌体因时间不长, 自然堆积干扰不大, 所以当前尚不存在整体失稳的问题。但临江新近堆填的路基稳定性是一大隐患, 由于堆填物质比较松散, 且部分路基相对枯水面高差已近 30 m, 因而一旦条件成熟, 这种高路堤库岸边坡由洪、枯水位交替变化引发的跌落带效应, 再加上岷江洪水的强势冲刷切割, 破坏坡体前缘脆弱存在的支撑条件, 从而将不可避免地导致堆积体沿浸润的原地面或其他软弱面变形失稳, 并必然危及公路的安全。因而豆芽坪崩塌错落体除来自上部崩塌安全威胁外, 河流对岸坡的剧烈再造作用将成为当前和未来一段时间内的突出问题。

### 2.2 发展趋势

豆芽坪崩塌错落体不仅由表及里有新、老堆积之分, 而且从横向、高低层次上由多级组成。若从岷江坡脚向上追源, 自然坡长可延伸 600 m 多。其中, 深部较老的厚层堆积体经过长时间的压实过程, 结构呈中密—密实状, 稳定状态较好。事实上从堆积体自然坡度达  $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$  与休止角的关系也表明了这一点。

新近堆积体由于相对松散, 故崩塌、落石及局部滑移不稳定现象偶有所见, 坡体浅表层物质的动态调整仍在进行, 并还将持续较长一段时间。特别是位于陡坎及山脊部位的堆积体更有可能继续崩塌。相对而言, 上部不同规模垮塌的可能性要大一些; 而中下部短期内尚不存在整体垮塌的危险, 不过这一点将主要取决于下游壅塞体对公路外侧水面的影响情况。因此就公路运营安全而言, 除上部以外, 公路外侧坡体的稳定将逐步成为重心所在。

就发展趋势而言, 当前坡体整体处于基本稳定—稳定及浅表层处于调整活动的不稳定状态, 还要持续几个月到几年的时间, 之后其稳定性将会出现逆转现象, 即浅表层大部分范围将由不稳定转为基本稳定; 而下部整体上将因岷江冲刷切割由基本稳定转向局部的不稳定。尤其在极端不利的工况条件下, 如地震+持续暴雨洪水位工况下, 更是如此。未来随着时间的推移, 强降雨特别是河流冲刷将成为影响公路安全的最不利因素。

## 3 防治工程

### 3.1 崩塌错落体初期稳定状态

现豆芽坪崩塌错落体是在历史上原崩塌错落体的基础上由“5·12”汶川大地震再次崩塌堆积而成, 之后在开通公路时, 仅对其下部有所扰动。堆积与稳定情况经分析主要呈现以下三点: 1. 在其他条件不进一步恶化的情况下, 整体是基本稳定—稳定的; 2. 作为自然堆积, 其坡角  $\alpha$  (图 5) 与堆积体本身物理性质密切相关, 即直接受控于堆积体内摩擦角  $\phi$  的大小; 3. 因为来自地震诱发, 所以崩塌物质在脱离母体之际, 或多或少地拥有不同的初始动能, 因而这种堆积而成的坡角将因地而异, 而且比堆积物质内摩擦角要小。至于二者相差多少着重取决于最终表层崩塌物质在崩塌滚动过程中消耗和重新吸收能量的情况。如同是豆芽坪, 不同部位的坡角最小的  $24^{\circ}$  最大的  $35^{\circ}$ , 相差  $11^{\circ}$ , 而同是老虎嘴崩塌堆积体其正面和侧面的堆积坡角分别为  $16^{\circ}$  和  $39^{\circ}$ , 二者竟然相差  $23^{\circ}$ 。

### 3.2 岷江冲刷与水作用

豆芽坪崩塌错落体路堤高边坡具有江河岸坡和水库岸坡的双重特性, 所以对未来坡体稳定性的影响除本身岩性条件和库岸形态外, 主要有河流冲刷、波浪侵蚀和库水对坡体的湿化作用。其中尤以后二者为主。豆芽坪崩塌错落体工程设计的技术目标, 就是中、下部坡体在雨水、河水浸泡坡体以及洪水冲刷坡脚等状态下仍能保证其稳定性。

对于冲刷, 主要是因为弯道的原因, 使水流形成螺旋流<sup>[5]</sup>, 进而引起断面环流和泥沙的横向运动, 其中面流流向凹岸, 底流流向凸岸。研究分析, 水流进入弯道中心角为  $\theta$  的弯道后 (图 1), 在离心力作用下, 引起流速流向的重新分布, 大约到湾顶断面 ( $\theta/2$ ) 主流逼向凹岸, 在  $(2\theta)/3 \sim \theta$  断面之间, 形成

较完整的断面环流。其间有两个高切应力区,一个高应力区在凸岸的  $0^\circ \sim \theta/2$  间,一个在凹岸的  $\theta/2 \sim \theta$  间。豆芽坪崩塌错落体下游的老虎嘴崩塌堆积体弯道中心角为  $90^\circ$ ,  $0^\circ$  处为进口断面,  $90^\circ$  处为出口断面。最大流速区在凹岸  $75^\circ \sim 90^\circ$  的范围内,且近底流速稍大于水面流速。而最大点流速  $U_{max}$  出现在  $75^\circ \sim 90^\circ$  和下游  $0.66B$  ( $B$  为河宽) 的  $0.6h$  ( $h$  为水深) 处。龙口又正位于出口断面处,所以龙口的上下游附近将成为严重冲刷段。

综合铁路、公路及水利河道关于冲刷计算的分析,并结合豆芽坪崩塌错落体岸坡的具体情况,可采用下式对其平顺护坡的冲刷深度进行计算

$$h_B = h_p (\lambda^2 - 1) (h_p / d)^{1/20} C_m \quad (1)$$

在水流作用下,保持护坡稳定的堆积体平均粒径与水流流速可按式计算

$$d = \frac{V_c^2}{[2gk^2 (\frac{r_2 - r}{r})]} \quad (2)$$

式中  $h_B$  局部冲刷深度 (m);  $h_p$  水深 (m);  $d$  平均折算粒径 (m);  $\lambda$  冲刷系数;  $\lambda = V_p / V_{允}$ ,  $V_c$  为平均流速 (m/s);  $V_{允}$  允许不冲流速 (m/s);  $C_m$  冲刷边坡折减系数,  $C_m = e^{-0.16m}$ ;  $m$  边坡系数,即边坡为  $1:m$ ; 重力加速度  $g$  ( $9.81 \text{ m/s}^2$ );  $r_s$ ,  $r$  分别为石块、水的重率 ( $\text{kN/m}^3$ );  $K$  石块运动稳定系数,水平底坡时取  $0.9$  倾斜底坡时取  $1.2$ 。

岸坡前缘直立极限高度  $H_v$  可按式考虑

$$H_v = \frac{C}{\gamma_d \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \varphi)} \quad (3)$$

式中  $C$  内聚力;  $\gamma_d$  堆积体饱和容重;  $\alpha$  边坡坡角;  $\varphi$  饱和摩擦角。

### 3.3 防治工程体系

对任何灾害体的正确处理,其重中之重是对灾害体的正确认识和未来趋势的准确把握。进而选择正确的工程措施来防止灾害的发生与发展。作为壅塞湖高陡岸坡的防护更要采取专门的防护措施<sup>[6]</sup>。

根据上述对豆芽坪崩塌错落体现状、成因、性质、特点以及发展趋势的分析,我们对上、中、下部分别采用安全拦挡、警示固坡和严防冲刷的综合防治措施,具体就是采取柔性框架石笼、骨架护坡、石笼组合体、内挡墙、被动网、安全警示系统和位移监测系统。其中柔性框架石笼则成为这一崩塌体形成的

浸水护坡的主体防治工程。

### 3.4 柔性框架石笼及其特点

由于豆芽坪崩塌错落体的水下岸坡,不仅本身比较松散,不稳定,而且受洪水冲刷的影响非常大,因而这种岸坡已决非是单一的坡面问题,显然已成为坡体局部甚至较大范围变形的问题了,再加上豆芽坪崩塌错落体段这种边坡不仅延伸很长,而且比较高陡,对于这种高陡厚大的松散库岸边坡,想完全保证路基的安全稳定显然不是一朝一夕的事情,必须要经过几个水文年的调整过程。所以对此专门采用柔性框架石笼这一新型柔性防护工程结构<sup>[1]</sup>,这种针对老虎嘴豆芽坪等灾害群体提出的这一新型防护措施具有抗冲、抗腐、整体性好,并能随河势变化而适度自我调整的半永久柔性工程。这种工程整体结构和适度刚度的提高不仅相对一般石笼寿命得以突出延长,而且对防冲效果有极大的提升作用,很适应于豆芽坪这一短期不能稳定的高陡岸坡的防护,取材方便,经济适用。

柔性框架石笼,以  $1.5 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 8 \text{ m}$  为标准结构,即厚  $1.5 \text{ m}$ ,宽  $6 \text{ m}$ ,高  $8 \text{ m}$ ,也可取  $1.5 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,纵、横向可以上述单元任意扩展组合。其中大部分上下两两结合后,在最下部采取专设的  $4 \text{ m}$  高小框架石笼,其结构与上述单体的  $1/2$  结构基本相同,区别在于,强化了整体性和防冲的作用,即增加了底部支撑托杆,以保证洪水强冲刷下即使框架位置调整变化也能保证其整体性。同时为增强抗冲刷能力,表面由浆砌卵石改为 C25 砼。内部全部干砌充填块、卵石,由  $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$  厚的薄型框架约束。为方便施工,  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$  的支撑杆件可以事先预制。此种结构主要用于中等冲刷条件下,高而松散的崩塌堆积岸坡上。该结构不仅经济实用,寿命长,兼顾抗冲、护坡、以及轻度支挡的多重作用,尤其对岸坡较高,洪水消落带变化很大,坡体物质又松散不稳的情况更加实用。

并在柔性框架石笼上部设置高  $5.0 \text{ m}$  的骨架护坡,以防止洪水对上部坡面的冲刷破坏,水下岸坡则以  $4 \text{ m}$  长条状石笼作为可调性更大的底层防冲工程。其他配套组合工程也在坡体不同部位分别予以考虑(图 5),如在几个控制点采用  $6 \text{ m}$  高的 SNS 高抗弯柔性防护系统。

除此之外,为了改善视觉效果,专门在公路内侧

1)引自王全才等《鄱阳湖映秀至汶川段灾后重建工程设计文件》中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,四川省交通厅交通勘察设计研究院: 2008. 12

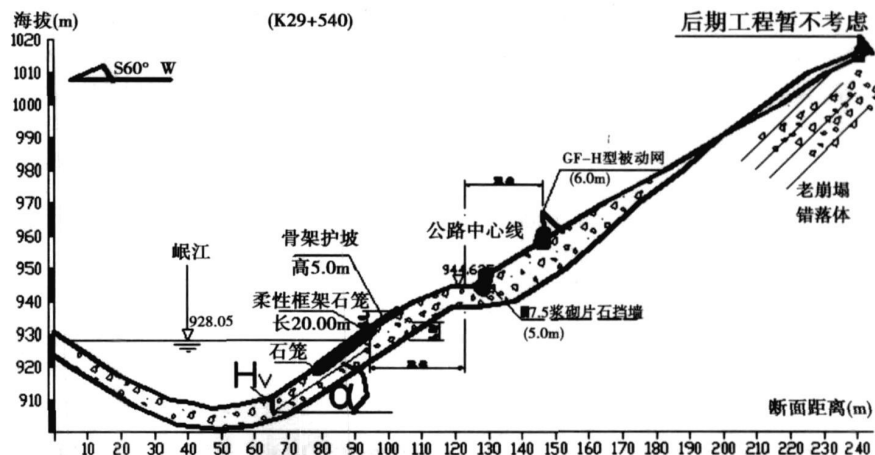


图 5 治理工程剖面图

Fig 5 Profile section of the Controlling project

距离线路中心线 30m 范围内的坡面上考虑设置灌木绿化带, 在内侧坡体上种植灌木绿化带。可以既保持水土、又可隐蔽公路上方大量裸露危岩, 突出了心理安全的设计特色。

## 4 结论

1. 5·12 汶川大地震诱发了许多大型崩塌体, 这类崩塌体不仅规模大, 而且分布较广, 它们当中有的在崩塌发生之时, 就已经给社会造成了损失, 而其中大部分仍在以不同的形式威胁着国家财产和人民生命的安全。对此, 不可盲目处理, 必须针对不同情况分别认真对待。

2. 都汶路豆芽坪崩塌错落体是这次大地震于震中附近引发的一种既有灾害体和灾害隐患体。由于它属于岷江最大壅塞湖畔的一个高陡岸坡, 所以岷江的强势冲刷必将使本身就不稳定的这一边坡更加不稳定。针对这种崩塌体采用以往的传统方法显然是不行的! 而有效的措施要同时解决好不稳定体上的工程可靠性、强大抗冲性、防腐长效性以及小工程解决大型崩塌体的科学技术性等系列问题。柔性框架石笼首先克服了普通石笼寿命短的缺陷, 充分考虑了抗冲能力, 尤其是单体间的两两组合突出了整体完整和柔性防护的两大特色, 解决了不稳定体上难以实施工程的一大难题。加上回避刚性结构和体现被动、分期实施工程特色后, 使工程规模大大缩小! 工程本身又能就地取材, 便于追加和维修, 所以具有很好示范效应和应用前景。

3. 本文所述柔性框架石笼这一新型防护结构

是基于豆芽坪崩塌错落体的具体条件尤其是地震作用下的自然崩塌堆积的现实情况提出来的, 对于其他人工作随意堆积和其他河段堆积的滨水岸坡不可盲目照搬这一工程, 应对适用性充分分析, 附属结构配套好之后方可采用。

4. 由于本柔性框架工程与下部老虎嘴巨型崩塌体形成的壅塞体密切相关, 加上岷江冲刷携带能力极强, 而洪水水位又变化无常, 所以不可能保证所有实施柔性框架工程的部位在一定的时间内都不出现任何轻微或较明显的破坏, 相反出现一些变形和适度的破坏也是正常的, 只是根据情况给予必要的维护即可, 这也是为何选择这一就地取材、便于维护的柔性结构的原因所在。对此, 解决的办法是, 当结构调整达到一定程度时, 只需在整片框架上增加一些浅层锚杆(索)即可。

## 参考文献 (References)

- [1] Huang Runqiu. Distribution and Mechanism of Landslides induced by Wenchuan Earthquake[A]. In China-Japan Symposium on Seismic Disaster Prevention and Mitigation[C]. Chengdu, 2008: 57~71 [黄润秋. 汶川地震震发地质灾害发育分布规律及形成机理研究[C]. 见: 中日地震防灾减灾学术研讨会文集[C]. 成都, 2008: 57~71]
- [2] Wang Quancai, Liu Xilin. Bridge study on Danger influenced by debris in Taoguan Gully of Dujiangyan Wenchuan Highway[J]. Advance in Earth Science, 2004, 19: 238~241 [王全才, 刘希林. 都汶公路泥石流对沟口桥梁危险性评价[J]. 地球科学进展, 2004, 19: 238~241]
- [3] Wang Xiaolin, Shen Junhui, Wang Lansheng. Analysis of debris flow characteristics and manage design of the Heping Gully in the west outlet of Erang Mountain Tunnel of Sichuan Tibet Road [J].

- Advance in Earth Sciences* 2004 19(suppl): 395~ 401[王小群, 沈军辉, 王兰生. 川藏公路二郎山隧道和平沟泥石流特征研究与治理设计[J]. 地球科学进展, 2004 19(suppl): 395~ 401]
- [4] Liu Mingguang, et al. Physiogeographical Maps of China[M]. Beijing Science Press 1998[刘明光, 等. 中国自然地理图集[M]. 中国地图出版社, 1998]
- [5] Gao Dongguang. Washout of Flood Protection Harness of Highway and Bridge[M]. Beijing China Communication Press 2002 [高冬光. 公路与桥梁水毁防治[M]. 人民交通出版社, 2002]
- [6] Cheng Zunlan, Cui Peng. Major Disaster and Countermeasures of Dammed Lakes from Landslides and Debris Flows[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(6): 733~ 738 [程尊兰, 崔鹏等. 滑坡、泥石流堰塞湖灾害主要的成灾特点与减灾对策[J]. 山地学报, 2008 26(6): 733~ 738]
- [7] Sun Yuke, Mu Huichong, Yao Baokui. Stability Analysis of Rock Mass for Slope[M]. Beijing Science Press 1988[孙玉科, 牟会宠, 姚宝魁. 边坡岩体稳定性分析[M]. 科学出版社, 1988]

# Application of Flexible Stone-gabion Framework in Large-scale Rock-collapse Controlling Engineering ——A Case Study of Duwen Road Douyaping Collapse Induced by Wenchuan “5·12” Earthquake

WANG Quancai<sup>1,2</sup>, WANG Lansheng<sup>2</sup>, LI Zongyou<sup>3</sup>, DING Yu<sup>1</sup>

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3 Sichuan Communication Surveying and Design Institute, Chengdu 610017, China)

**Abstract** 5·12 Wenchuan Earthquake induced many large-scale rock collapses. For such collapses, especially forcefully eroded by river, conventional controlling measures are clearly no longer feasible. Flexible Stone-gabion Framework is a new type of protective works designed to control the most prominent Douyaping Collapse on Duwen Road. This protective works not only facilitates the use of the local materials, economically and practicably, but also solves the problem of collapse controlling still in deforming. In conclusion, the Flexible Stone-gabion Framework highlights the characteristics of flexible protection and deserves applying and popularizing in some extent.

**Key words** Flexible Gabion Framework; large-scale rock collapse; controlling engineering