

文章编号:1000-582X(2011)03-126-06

主动减压超前支护结构关键问题分析

王培勇¹, 刘元雪¹, 冉仕平², 张正波²

(1. 后勤工程学院, 军事建筑工程系, 重庆 401331; 2. 西藏自治区交通厅, 西藏 拉萨 850000)

摘要:针对边坡工程中超前支护结构未充分发挥岩土体自身抗剪能力的问题,通过对支护结构与边坡体耦合作用机理的分析,提出了一种主动减压超前支护结构型式,主要由柔性填料和超前支护结构组成。柔性填料的设置和厚度是主动减压超前支护结构设计的关键问题。一方面,柔性填料的设置在支护施工时要保证主动减压超前支护结构两个组成部分互不影响;另一方面,柔性填料的设计厚度要能保证边坡岩土体充分发挥自身抗剪能力,使得边坡体下滑推力由目前超前支护结构独自承担向超前支护结构和岩土体共同承担转变,此时超前支护结构承受的推力最小,从而达到主动减压的效果。最后以工程实例说明了柔性填料厚度的计算过程,得到了比较合理的计算结果。

关键词:边坡工程;主动减压;柔性填料;超前支护;应变软化;施工

中图分类号:TU37

文献标志码:A

Analysis on key problems of initiative decompression pre-reinforced structure

WANG Pei-yong¹, LIU Yuan-xue¹, RAN Shi-ping², ZHANG Zheng-bo²

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401331, P. R. China; 2. Communication Department of Tibet Municipality, Lasa, Tibet 850000, P. R. China)

Abstract:In slope engineering, the shear resistance of rock and soil can never be exerted themselves by general pre-reinforced structure, through the coupling mechanism between reinforced structure and slope, an initiative decompression pre-reinforced structure consists of soft stuffing and pre-reinforced structure is presented. The setting and thickness of soft stuffing are both key questions during the design of initiative decompression pre-reinforced structure. On one hand, the setting of soft stuffing assure that parts of initiative decompression pre-reinforced structure cannot interact each other under reinforcing; on the other hand, the thickness of soft stuffing can assure that the shear resistance of rock and soil can be exerted by themselves, the sliding thrust which is endured by pre-reinforced structure alone is changed to be endured by soil and pre-reinforced structure together. Then the sliding thrust endured by pre-reinforced structure minimizes, accordingly the effect of initiative decompression is achieved. In the end, the calculation procedure of thickness is illustrated by a practical project and the result is rational.

Key words: slope engineering; initiative decompression; soft stuffing; pre-reinforced structure; strain softening; construction

收稿日期:2010-10-24

基金项目:国家自然科学基金(50979112);重庆市自然科学基金项目资助(2008BB6144)

作者简介:王培勇(1982-),男,后勤工程学院博士研究生,研究方向为岩土工程稳定性与计算力学,
(E-mail)wpy2000p@163.com。

中国是一个山区面积占国土陆地面积 69% 的多山国家,尤其在西部 12 个省(自治区、直辖市),山区面积更是占陆地总面积的 86% 以上。随着中国 2000 年“西部大开发”战略的实施,在山区城镇与交通建设中,由于场地地形条件的限制,很多时候就不得不进行人工开挖形成道路、房屋建筑等工程建设场地,此时,开挖形成的人工高边坡的稳定性问题成为威胁工程建筑物安全的一项主要因素。人工切坡引起的灾害已成为继滑坡、崩塌、泥石流之后的又一大地质病害,因此,为了在山区建设过程不形成“工程—灾害—更大工程”^[1],很有必要采用超前支护结构^[2]。这种支护技术由于要求在施工前预先设置支护结构,在防止边坡变形失稳方面有其不可比拟的优点^[3],而又由于超前支护结构的存在限制了岩土体的变形,使材料自身抗剪能力未得到充分发挥,此时作用在超前支护结构上的土压力为静止土压力 E_0 ,而在相同的条件下,作用在超前支护结构上的主动土压力 $E_a < \text{静止土压力 } E_0 < \text{被动土压力 } E_p$,这就使得支护结构上的土压力并未达到最小的主动土压力。

因此,为了减小作用在超前支护结构上的土压力,研究一种新的超前支护结构型式,使作用在超前支护结构上的静止土压力转化为主动土压力就非常必要。目前在计算理论方面,主要集中在考虑位移影响的土压力计算方法^[4-8],比如,利用挡土结构土压力随位移的变化关系得到的土压力计算模型以及采用折减系数法得到受位移影响的非极限状态下土压力的取值关系等。在实际应用方面,采用柔性填料的方式作为结构减载的措施主要应用在高填方涵洞以及桩基上覆垫层^[9-13],其机理是利用柔性填料的缓冲作用达到减压的效果。

笔者在支护结构与边坡体作用机理的基础上,分析了支护结构受力随边坡体位移变化的规律,总结出支护结构推力最小时对应的边坡体位移值,同时建立了采用边坡超前支护结构后填充柔性材料的方式对结构进行减载,一方面柔性填料促使岩土体在边坡施工后发生变形,另一方面超前支护结构限制边坡体变形的自由发展,当位移值控制适当时,岩土体抗剪能力得到充分发挥,此时作用在超前支护结构上的静止土压力转变为主动土压力,从而达到主动减压的目的,起到“以柔克刚”的作用。

1 边坡体与支护结构作用机理

边坡岩土体根据材料进入塑性后表现出的力学性质,可分为:应变硬化、理想塑性和应变软化材

料^[14]。实际上,边坡沿滑动面的失稳破坏基本上都是应变软化材料强度从峰值强度向残余强度转变的这么一个不稳定过程,岩土体产生剪切破坏面后,材料的变形主要表现为沿破坏面的滑移,已不能单纯的用应力-应变关系表征材料的变形规律,而只能采用应力-位移关系来表征,如图 1。

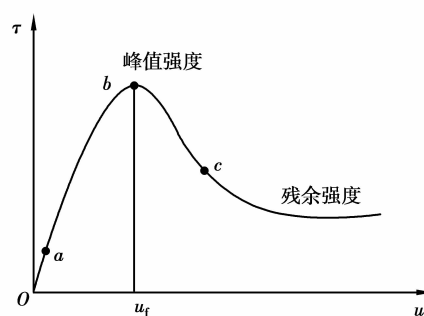


图 1 应变软化应力变形关系曲线

边坡体与支护结构的耦合作用是通过边坡体的应力应变状态与支护结构的荷载关系体现的。根据弹性力学理论中半无限体的应力应变状态与作用荷载的关系可知:边坡体应力应变状态的不同将导致支护结构承受荷载差异较大;相应地不同的支护结构对应不同的边坡体应力应变状态。比如,当支护结构承受主动土压力、静止土压力或被动土压力时边坡岩土体所处的应力应变状态是不一样的。因此,合理地控制边坡体的应力应变状态,才能使支护结构产生较小的推力。

从图 1 中应变软化材料应力变形关系可以看出:边坡岩土体变形的大小直接影响材料应力是否达到峰值强度或越过峰值强度进入残余强度阶段。同时也能反映出材料的抗剪能力是否得到充分发挥,当 $u < u_f$ 时,岩土体抗剪能力未完全发挥;当 $u = u_f$ 时,岩土体抗剪能力得到充分发挥;当 $u > u_f$ 时,岩土体发生破坏。在边坡工程中,支护结构与边坡体的作用时机直接反映出边坡体变形的大小,相应地应力状态也会不同。对于边挖边固、先挖后固以及先固后挖 3 种边坡体与支护结构的耦合作用^[15],岩土体所处的应力状态是不同的。比如,若采取先挖后固方式^[16],在实施支护结构时边坡岩土体已发生较大的变形,此时岩土体应力状态极有可能处于残余强度阶段 c 点,支护结构将承受较大的推力。采取边挖边固方式^[17],若支护过早,边坡体变形很小,可能处于 a 点,此时岩土体应力状态可能还远未达到峰值强度,导致未充分发挥自身的抗剪能力;若当边坡体变形处于 b 点正好达到峰值强度所需的位

移量时进行支护,此时岩土体抗剪能力得到充分发挥,真正实现“新奥法”边坡施工;若支护不及时,边坡体自由变形得不到有效控制,极有可能处于 c 点,岩土体应力状态处于残余强度阶段,从而出现失稳破坏。而采取先固后挖方式^[18],边坡体几乎没有产生或变形很小,可能处于 a 点,此时岩土体应力状态还远未达到峰值强度,并未充分发挥自身的抗剪能力。

边坡岩土体不同的应力状态将决定支护结构推力的的大小,从上述 3 种支护结构与边坡体的耦合作用分析可知,若边挖边固方式控制得当,将会对支护结构产生较小的推力,然而目前的“新奥法”施工监测费用较大^[19],根本无法推广。因此,在支护结构与边坡体的耦合作用时,使岩土体应力状态达到峰值强度,以充分发挥自身的抗剪能力,此时对支护结构产生推力最小,从而达到主动减压的作用。

2 主动减压超前支护结构施工关键问题

2.1 主动减压超前支护结构型式

从上述支护结构与边坡体的耦合作用机理分析可知:先固后挖施工方式在防止边坡失稳方面具有不可比拟的优点,但未充分发挥自身抗剪能力的缺点;而边挖边固施工方式能做到完全发挥自身抗剪能力但不易控制的缺点。因此,主动减压超前支护结构必须具备两个优点:一方面具有超前支护结构的优点,另一方面具有充分发挥自身抗剪能力达到主动减压的优点。为了达到上述功能,主动减压超前支护新型结构型式组成部分必须满足如图 2 所示,柔性填料促使岩土体在边坡施工后发生变形,超前支护结构控制位移值恰好使应力状态达到峰值强

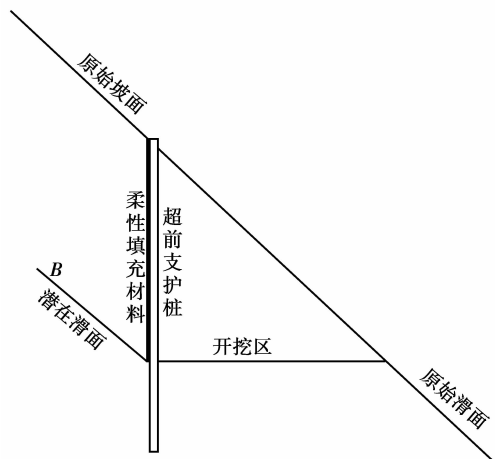


图 2 主动减压超前支护结构型式

度,如图 3 所示中位移从 A 点到 B 点变化,同时保持 B 点不变,从而起到超前支护和主动减压的效果。

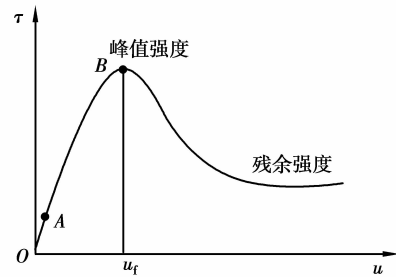


图 3 主动减压超前支护结构原理

2.2 主动减压超前支护结构施工关键问题

主动减压超前支护结构主要是由柔性填料和超前支护结构组成的,如何做到在施工中两者互不影响,在使用中两者共同作用是主动减压超前支护施工的关键。在边坡的待支护处挖孔,然后在该孔中设置柔性填料,最后在挖孔其余位置设置超前支护结构。由于柔性填料较软,为了在后续施工中对该部分的保护,如图 4 所示,在挖孔后首先在孔中适当位置放置隔板 1,然后在由隔板与护壁围成的与边坡相邻的空间内设置柔性填料 2,最后在由隔板与护壁组成的另一空间内设置超前支护结构 3。

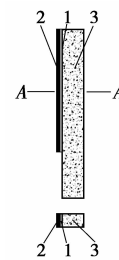


图 4 主动减压超前支护结构施工示意图

3 主动减压超前支护结构关键参数计算

主动减压超前支护结构主要由柔性填料和超前支护结构构成,一部分促使岩土体在边坡施工后发生变形,另一部分限制边坡体变形的自由发展,当位移值控制适当时,岩土体应力状态正好处于峰值强度,此时岩土体抗剪能力得到充分发挥。此时边坡体下滑推力由超前支护结构独自承担向支护结构和岩土体共同承担转变,也就是使支护结构承受的静止土压力转化为主动土压力,超前支护结构承受的

推力达到最小,从而达到主动减压的效果,真正实现边坡工程的“新奥法”施工。因此,如何设置柔性填料厚度使边坡岩土体变形正好达到应力状态为峰值强度时所需的位移值是主动减压超前支护结构实施成败的关键。

3.1 主动减压超前支护结构变形特性分析

通过支护结构与岩土体耦合作用机理分析,根据作用力与反作用力的关系,柔性填料、隔板、支护结构以及边坡岩土体都承受压力,产生压缩变形,由于隔板的设置属于施工构造,弹性模量较大,变形不予考虑。设边坡体任意位置处的水平变形总量为 $U_0(z)$,柔性填料变形量为 $U_1(z)$,超前支护结构变形量为 $U_2(z)$,则这 3 种变形量之间应该满足式(1)的关系,如图 5 所示。

$$U_0(z) = U_1(z) + U_2(z) \quad (1)$$

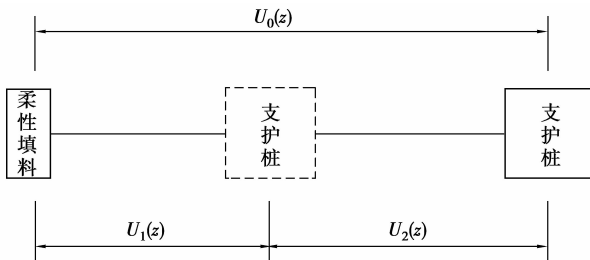


图 5 主动减压超前支护结构变形协调关系图

3.2 主动减压超前支护结构柔性填料厚度计算

根据主动减压超前支护结构作用机理和变形特性的分析可知,柔性填料、支护结构以及边坡岩土体承受相同的荷载。为了对主动减压超前支护结构柔性填料厚度进行计算,必须将主动减压超前支护结构体系解耦为边坡体、柔性填料和超前支护结构分别进行变形计算,再根据式(1)的变形协调关系对柔性填料厚度进行计算。

如图 6(b),边坡体在荷载作用下的变形计算可以采用半无限平面体的弹性力学位移解^[20]。

$$U'_0(z) = \int_0^h \frac{(1-2\nu)p(z)}{\pi E_0(h-z)} dz \quad (2)$$

式中: $p(z)$ 为荷载分布函数; $U'_0(z)$ 为边坡体任意位置处的水平位移; E_0 、 ν 分别为边坡岩土体的弹性模量和泊松比; h 为边坡高度。

如图 6(c),柔性填料在荷载作用下的变形可以按单轴压缩计算。假设柔性材料为弹性体,设柔性填料的厚度为 U 。

$$U_1(z) = \frac{p(z)}{E_1} U \quad (3)$$

式中: $p(z)$ 意义同上; $U_1(z)$ 为柔性填料任意位置处的水平位移; E_1 、 U 分别为柔性填料的弹性模量和厚度。

如图 6(d),超前支护结构在荷载作用下的变形计算采用抗滑桩承受水平荷载的变形计算方法^[21]。

$$U_2(z) = U'_2(z) + U''_2(0) + \varphi(0) \cdot z \quad (4)$$

式中: $U_2(z)$ 为支护结构自由段的水平总变形; $U'_2(z)$ 为支护结构自由段隔离体的水平变形; $U''_2(0)$ 为支护结构锚固段顶部水平位移值; $\varphi(0)$ 为支护结构锚固段顶部转角。

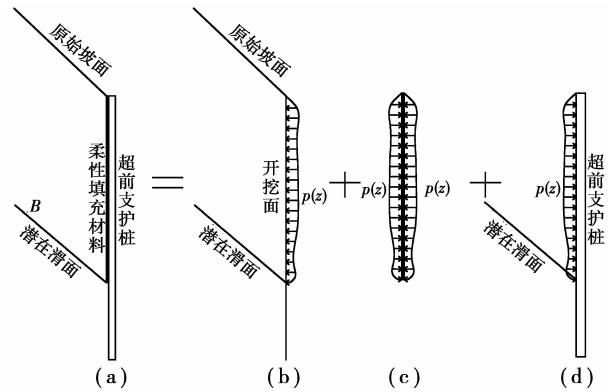


图 6 主动减压超前支护结构解耦示意图

主动减压超前支护结构实施的关键就是要保证边坡体位移量为 u_f ,而边坡体在压力荷载作用下产生压缩变形,方向与 u_f 相反,则可得出:

$$U_0(z) = U_f + U'_0(z) \quad (5)$$

根据式(1)-(5),则得柔性填料厚度 U 的计算表达式。

$$U = \frac{(u_f + U'_0(z) - U_2(z))}{p(z)} E_1 \quad (6)$$

4 工程应用

某边坡工程滑体的弹性模量 E_0 和泊松比 ν 分别为 $5e^7$ Pa, 0.3, $u_f = 0.01$ m;柔性填料弹性模量 E_1 为 $3e^7$ Pa;抗滑桩采用 C20 钢筋混凝土,弹性模量 $E_2 = 28e^9$ Pa,桩长 H 为 10 m,受荷段长度 h 为 6 m,锚固深度为 4 m,桩中心距 l 为 6 m,下滑力 $E_h = 400$ kN/m,桩截面为矩形,面积 $S = b \times a = 1 \times 1.5 = 1.5$ m²,截面惯性矩 $I = 0.28125$ m⁴,相对刚度系数 $E_2 I = 0.85 \times 28e^9 \times 0.28125 = 6.69375e^6$ kN·m²,桩的计算宽度 $B_p = 1 + 1 = 2$ m。

采用 m 法计算桩身内力,根据岩性地层,滑面处的地系数采用 $A = 300000$ kN/m³,滑床土的地系数随深度变化的比例系数采用 $m = 80000$ kN/m⁴。

1) 计算抗滑桩变形系数: $\alpha = \left(\frac{mB_p}{E_2 I}\right)^{\frac{1}{5}} = 0.4739$,

$\alpha \cdot (H-h) = 1.9 < 2.5$, 则支护桩为刚性桩。

2) 计算外力: 每根抗滑桩承受的水平推力为 $E_h \times l = 2400$ kN, 推力分布按矩形分布计算, 则 $p(z) = 400$ kN/m。

3) 计算位移: 根据式(2)可得到 $U'_0(h) = 1.83e^{-3}$ m; 根据式(5)则可得 $U_0(h) = 10e^{-3} + 1.83e^{-3} = 11.83e^{-3}$ m; 根据式(4)可得 $U_2(h) = 9.8e^{-3}$ m

4) 计算柔性填料厚度: 根据公式(6)得柔性填料厚度 U 为 0.15 m。

5 结 语

主动减压超前支护结构是在超前支护结构后填充适当厚度的柔性材料, 可为废旧橡胶或普通泡沫等弹性体。通过支护结构与边坡体的作用机理分析、主动减压超前支护结构关键问题研究等可得到如下结论:

1) 主动减压超前支护结构型式是充分利用先固后挖施工方式和边挖边固施工方式两者优点建立起来的, 主要由柔性填料和超前支护结构构成, 前者促使岩土体在边坡施工后发生变形, 后者限制边坡体变形的自由发展。

2) 柔性填料厚度设置的大小直接关系到边坡岩土体抗剪能力是否完全发挥, 若设置合理, 支护结构承受的荷载将从静止土压力转变为主动土压力, 从而实现主动减压的作用, 柔性材料具体厚度可根据柔性填料、超前支护结构以及边坡岩土体之间的变形协调关系进行计算。

3) 为了在施工中做到主动减压超前支护结构中的柔性填料和超前支护结构在施工中互不影响, 在使用中共同发挥作用, 采用在挖孔适当位置设置隔板的方式将挖孔分割成两个相互独立的空间, 然后再设置柔性填料, 最后设置超前支护结构的施工方式。

参考文献:

- [1] 张红利. 高边坡病害预加固设计中的若干问题[J]. 中国西部科技, 2007, 5(9): 41-42.
ZHANG HONG-LI. Problems of pre-reinforced design in high slope [J]. Chinese Western Science and Technology, 2007, 5(9): 41-42.
- [2] 何思明, 李新坡. 高切坡超前支护桩作用机制研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(3): 43-46.
HE SI-MING, LI XIN-PO. Study on the interaction

between high cutting slope and pre-embedded pile[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(3): 43-46.

- [3] 田金昌, 张正波, 何思明, 等. 人工边坡超前支护研究及其应用[J]. 西藏科技, 2007, 32(12): 62-66.
TIAN JIN-CHANG, ZHANG ZHENG-BO, HE SI-MING, et al. Study and application on pre-reinforced pile in manual slope[J]. Tibet Science and Technology, 2007, (12): 62-66.
- [4] 宋林辉, 梅国雄, 宰金珉, 等. 考虑位移的土压力理论在支护桩受力分析中的应用[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 91-96.
SONG LIN-HUI, MEI GUO-XIONG, ZAI JIN-MIN, et al. Application of earth pressure theory considering displacement to mechanical analysis [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5): 91-96.
- [5] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressure with various wall movements [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 317-333.
- [6] FANG Y, ISHIBASHI I. Static earth pressure with various wall movement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 317-333.
- [7] MITTAL S, GARG K G, SARAN S. Analysis and design of retaining wall having reinforced cohesive frictional backfill [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24: 499-522.
- [8] DONOVAN J G, KARFAKIS M G. Design of backfilled thin-seam coal pillars using earth pressure theory [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22(4): 627-642.
- [9] 顾安全, 吕镇锋, 姜峰林, 等. 高填土盖板涵 EPS 板减荷试验及设计方法 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1481-1486.
GU AN-QUAN, LV ZHEN-FENG, JIANG FENG-LIN, et al. Load reduction tests and design methods for culverts with high fill soil using EPS slabs [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1481-1486.
- [10] VASLESTADJ, JOHANSEN T H, TOLM W. Load reduction on rigid culverts beneath high fills long-term behavior [R]. Transportation Research Record No. 1415, 1993.
- [11] OKABAYASHI K, OHTAMI W. Centrifugal model test for reducing earth underground structure pressure on the culvert by using the flexible material [C] // Proceeding of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, April 10-15, 1994 Osaka, Japan. [S.l.]: ISOPE, 1994: 620-624.
- [12] GRECO V R. Lateral earth pressure due to backfill

- subject to a strip of surcharge[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(3): 615-636.
- [13] HARUYAMA M. Drained deformation-strength characteristics floose Shirasu (volcanic sandy soil) under three dimensional stresses [J]. Soils and Foundations, 1985, 25(1):65-76.
- [14] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [15] 邵江. 开挖边坡的渐进性破坏分析及桩锚预加固措施研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- [16] 罗渝, 何思明. 高切坡超前支护锚杆受力机制研究[J]. 人民长江, 2009, 40(3):76-78.
LUO YU, HE SI-MING. Mechanics between pre-reinforced anchor bolt and rock mass in high cutting slope[J]. Yangtze River, 2009, 40(3):76-78.
- [17] 何思明, 李新坡, 王成华. 高切坡超前支护锚杆作用机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5):1050-1054.
HE SI-MING, LI XIN-PO, WANG CHENG-HUA. Mechanism of interaction between pre-reinforced anchor bolt and rock mass in high cutting slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5):1050-1054.
- [18] 何思明, 李新坡. 高切坡半隧道超前支护结构研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3827-3832.
HE SI-MING, LI XIN-PO. Study on pre-reinforced half tunnel structure in high cut slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3827-3832.
- [19] 何思明. 高切坡超前支护桩与坡体共同作用分析[J]. 山地学报, 2006, 24(5):574-579.
HE SI-MING. Interaction of pre-reinforced pile-soil of high cutting slope[J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(5): 574-579.
- [20] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
- [21] 赵明阶, 何光春, 王多垠. 边坡工程处治技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.

(编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第 120 页)

- [19] 刘猛, 姚润明. 建筑生命周期环境影响分析通用模型及应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3):114-118.  
LIU MENG, YAO RUN-MING. Generic model and application of environmental impacts exergy analysis for building life cycle[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(3):114-118.
- [20] 黄志甲. 建筑物能量系统生命周期评价模型和案例研究[D]. 上海:同济大学, 2003.
- [21] 国家统计局工业交通统计司, 国家发改委能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2006.
- [22] 李夏苗, 谢如鹤. 论交通运输与能源的关系, 兼论交通运输的能源消耗与节能[J]. 综合运输, 1999, 21(10): 23-27.  
LI XIA-MIAO, XIE RU-HE. The relationship of transportation and energy consumption [J]. Comprehensive Transportation, 1999, 21(10): 23-27.
- [23] 李发智, 方淑芬. 东北地区成品油运输方式的探讨[J]. 油气储运, 1993, 17(6): 8-10.  
LI FA-ZHI, FANG SHU-FEN. Transportation means of oil products in Northeast area [J]. Storage and Transportation of Oil and Gas, 1993, 17(6): 8-10.
- [24] 国家统计局出版局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2006.
- [25] 国家统计局工业交通统计司, 国家发改委能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2007.
- [26] 国家统计局工业交通统计司, 国家发改委能源局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2008.
- [27] 国家统计局出版局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2007.
- [28] 国家统计局出版局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2008.
- [29] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的量化评价研究[D]. 北京:清华大学, 2004.

(编辑 郑洁)