

三峡工程永久船闸陡高边坡岩体 卸荷非线性力学分析

①
72-79

TU457

张永兴

哈秋舫

(重庆建筑大学岩土工程研究所 630045) (中国三峡工程开发总公司 宜昌 443002)

摘 要 结合三峡工程永久船闸陡高边坡特点, 将高边坡岩体简化为正交异性体, 在对高边坡岩体开挖卸荷非线性力学特性充分认识的基础上, 提出了各向异性非线性卸荷岩体的力学分析方法——变刚度分析理论, 其计算成果与现场观测成果有良好的一致性。对三峡工程永久船闸陡高边坡岩体开挖分析表明高边坡岩体将产生较大的变形, 与以往研究成果有数量级的差别。

关键词 三峡工程, 永久船闸, 卸荷非线性, 边坡稳定性, 壳不
中图法分类号 TU457

三峡工程永久船闸是三峡工程的重要组成部分, 是目前世界上最大的通航建筑物之一。其工程特点为:

1) 尺度大。三峡工程永久船闸闸室段长 1 617 m, 有效尺寸 280 m × 34 m × 5 m, 处于花岗岩岩体深开挖的槽谷内, 最大边坡开挖高度 170 m, 其余 50 ~ 120 m; 边坡开挖坡度 30° ~ 90°, 是世界罕见的长、大、陡高边坡工程;

2) 岩体各向异性明显。虽然工程所处基岩主要为闪云斜长花岗岩, 岩体中各种岩脉、断层及节理、裂隙等结构面特别发育, 尤其是存在众多陡倾角结构面, 使岩体呈明显的各向异性特征;

3) 地应力水平高。由于当地地质自然条件十分复杂, 地应力水平高达 10 MPa, 开挖后初始应力释放范围大, 形成的二次应力场由新的岩石边坡承担, 岩体的变形量值相对较高;

4) 岩体水平卸荷特性显著。由于长江河谷地貌, 使工程所处的黄陵背斜闪云斜长花岗岩岩体循东、西、南三个方向卸荷, 以偏南方向为主, 属于岩体自然卸荷; 而随着船闸开挖, 边坡的不断形成, 产生快速的人为卸荷过程, 优势方向与船闸边坡垂直。自然卸荷和人为卸荷过程的耦合, 体现出区内岩体卸荷特性的典型性。

以往对岩石边坡稳定及应力应变分析存在的主要问题是, 计算或试验得到的边坡岩体的变形量远远小于现场岩体的实际变形量。例如三峡工程库岸边坡链子崖危岩体的实际岩体裂缝开度达 2 m 以上, 而以往试验及计算成果表明该危岩体的裂缝开度仅在 3 cm 左

收稿日期: 1997 - 01 - 20

张永兴, 男, 1961 年生, 工学博士, 教授

国家“八五”重点科技攻关(85-16-03-05)成果之一

右^[1];又如金川露天边坡岩体的实际变形量已超过 5 m,而以往试验及计算成果表明该边坡岩体的变形只有 20 cm 左右^[2]。显然根据这些成果是不可能正确认识边坡的变形破坏机理及发展趋势的。对三峡船闸陡高边坡而言,过去的研究成果^[3]存在着同样的问题。其主要原因是:

(1) 以往研究所选用的物理模拟与岩体的工程力学特性有较大的出入。岩体开挖后,由于岩体应力平衡体系遭到了严重的破坏,使得边坡两侧岩体产生大面积的卸荷区,从而使岩体不仅具有各向异性特征,而且具有明显的卸荷特征。过去的研究将岩体视作均质各向同性岩体,且按加荷方式进行力学模拟,不符合实际情况;

(2) 以往的研究所选用的物理力学参数是从室内岩块加载试验和现场原位加荷试验所取得的参数中选取的,而边坡开挖后,岩体处于卸荷状态,显然,由加荷试验确定的岩体力学参数不能直接应用于边坡岩体卸荷区的应力应变分析,且室内和现场试验一般由于反映岩体的尺寸有限,未能有效地估计岩体的尺寸效应;

(3) 对于产生大面积卸荷区的岩体边坡来说,将产生较大面积的拉应力区,岩体受拉必将引起裂缝的扩展而使其质量大大劣化且产生较大的变形,以往研究对此未充分重视。因此,需对岩体抗拉强度的不确定性作敏感性分析,以使数值分析结果能如实地反映岩体开挖卸荷的力学行为,为设计施工提供重要的资料和数据。

1 边坡岩体开挖卸荷力学特性及其参数

由于船闸区岩体历史上曾经受多次地质构造作用,从而形成了多组节理裂隙,且多为陡倾角,故可将本区岩体简化为正交异性体。

就岩体现状而言,当原位岩体变形性状或承载能力试验时,或是对岩体开挖卸荷时,岩体将追踪一条应力应变曲线,此曲线即是地质构造加、卸载曲线的继续^[4]。在进行原位试验时,通常是采用加载形式,故实际上由此获得的应力应变曲线是加载曲线。因此,以往计算中采用加载曲线的力学参数计算边坡岩体应力应变分布规律是不能反映边坡卸荷特性的。

为弄清船闸区边坡岩体(花岗岩)的卸荷应力应变关系,我们进行了相似模拟试验。试验采用重晶石粉等相似材料按相似原理分别模拟了船闸区的主要工程岩体(微新花岗岩)的地应力作用过程及开挖卸荷过程,试验结果表明,岩体的卸荷模量比加载情况小。图 1 为典型的试验曲线。当卸荷至地应力值 σ_0 后,应力应变的关系将沿 abc 曲线直至拉力区中。

为了确定船闸区边坡岩体(花岗岩)的卸荷宏观力学参数,根据船闸边坡岩体的地质特点和力学动态,结合地质、模拟试验、力学和测试等专业分别运用了岩体分类法、模拟试验方法、数值计算方法和地球物理方法等四种方法对其进行了较全面的研究(具体方法将另文专述),取得了较为一致的结论。微新花岗岩体在不同卸荷量时的水平变形模量如表 1 所示,表

表 1 微新花岗岩体卸荷变形模量 E_1 ($E_0 = 400 \text{ GPa}$, $\sigma_0 = 10 \text{ MPa}$)

卸荷量	< 30%	30% ~ 50%	50% ~ 80%	80% ~ 90%	90% ~ 100%	100% ~ α %
E_1	26	18	12	3.7	0.4	0.25
E_1/E_0	0.65	0.45	0.3	0.08	0.01	0.006 25

注:表中变形模量指割线模量,单位:GPa

中 E_0 为初始的加载模量, E_1 为卸荷模量。由表可见, 作数值计算或稳定分析时, 统一取加载模量 40 GPa 是不可能反映边坡岩体实际情况的。

2 岩体开挖卸荷计算方法—变刚度迭代法

2.1 非线性正交异性本构关系

如图 1, 岩体卸荷时的本构关系为非线性, 对平面应变问题, 用增量形式表述的非线性正交异性本构关系为

$$\{d\epsilon\} = [D] \{d\sigma\}$$

式中 $[D]$ 为具有 5 个独立参数的系数矩阵, 这些材料参数本身是应力状态的函数, 按卸荷曲线可以确定这些参数。 $[D]$ 为

$$[D] = \begin{bmatrix} 1/E_{11} & -\mu_{12}/E_{22} & 0 \\ -\mu_{12}/E_{22} & 1/E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

2.2 变刚度迭代法

由于岩体边坡开挖时, 边坡岩体中不同区域其卸荷程度不同, 而不同卸荷条件的岩体应取与之对应的岩体力学参数。通过下述步骤可以实现这种开挖的近似模拟。

1) 将计算区域的岩体视为正交异性连续体, 首先计算岩体中的地应力场, 计算开挖边界上的释放荷载;

2) 不改变岩体参数, 计算施加释放荷载后边坡岩体的应力场, 将该应力场与初始应力场组合与比较, 对开挖后的边坡岩体划分为若干不同级别的应力释放区域;

3) 对不同级别的应力释放区域分别按上面成果确定其相应的岩体卸荷力学参数, 再将开挖释放荷载反向施加计算, 由此即可得到初步的因开挖卸荷, 岩体质量劣化后的边坡岩体的位移场及应力场;

4) 上述计算岩体的卸荷区域将扩展, 可采用相同的方法重新确定卸荷区域作进一步计算分析反复迭代, 直至满足所要求的精度为止。

上述四步即为本研究提出的变刚度迭代法的精髓, 其分析框图见图 2。

对于永久船闸陡高边坡, 首先, 考虑岩体从上至下的自然风化程度把岩体分成全强风化、弱风化、微风化及新鲜四个部分, 通过上面第一次计算得知, 每部分岩体在边坡开挖后, 坡面内约 5 m 为强开挖劣化区, 其内约 20 m 为开挖劣化影响区, 因此共划分计算区域 10 个以上(不同计算方案有所不同), 每个计算区域在不同计算时步取其相应的宏观力学参数, 体现出岩体的卸荷特性, 以此模拟边坡变形破坏过程。

2.3 方法验证

根据船闸边坡目前已有的 TP29 GP02 的观测资料, 我们利用上述方法研究了开挖深度与变形的关系, 同时计算了以往研究中的弹塑性分析, 并作了比较, 如图 3 所示。由图可见,

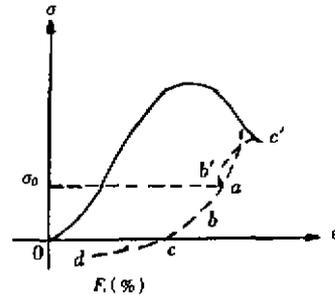


图 1 典型试验曲线

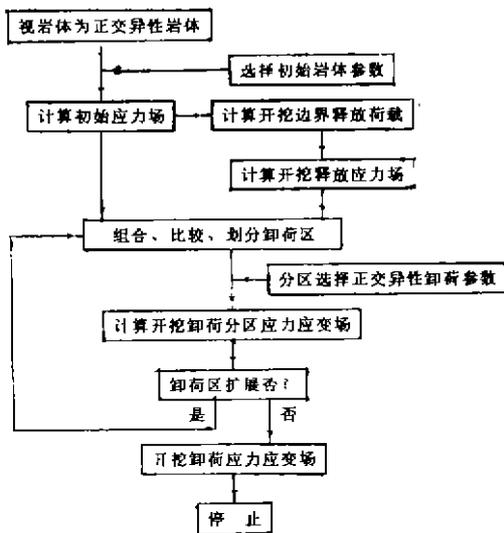


图 2 变刚度迭代法计算分析框图

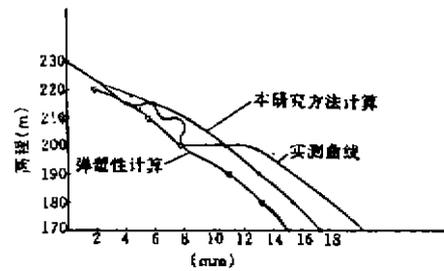


图 3 开挖深度与 Y 方向的变形相关曲线

一般弹塑性分析结果小于边坡的实际位移，采用上述方法略高于实测位移，但比较接近。事实上实际位移监测滞后一段时间，弹性变形恢复已完成，实测位移主要为非弹性变形。

为了验证变刚度迭代法在边坡研究中的适用性，还对具有丰富变形观测资料的金川边坡进行了正交异性卸荷非线性分析(计算成果将另文专述)。计算分析结果表明与观测的成果非常吻合，该边坡处的风井顶部与底部的相对位移达 5 m 多，与实际情况一致。因此用该法对三峡工程永久船闸陡高边坡进行非线性力学分析是可以比较客观地反映边坡开挖时岩体卸荷的力学动态的，且所得成果当具有一定的预测性。

3 高边坡岩体卸荷非线性力学分析

3.1 有限元计算网格划分

选取较为典型的三闸首 16# 剖面及闸室中部 20# 剖面作基本分析，计算域取南北长 1 200 m，底部高程 -100 m，16# 剖面有限元网格如图 4 所示。

3.2 地应力施加方法

首先将底部边界的垂直及右侧边界的水平方向固定，有限元计算时地应力的施加方法如下：

1) 将地应力分布值等效移置为左边界节点力，在重力及该力作用下计算初始位移场及应力场；

2) 将上述计算结果得到的左边界位移固定(即为地应力作用下完成的初位移)，在此条件下模拟边坡开挖。

3.3 计算方案

1) 16# 剖面

NOT1：非线性正交异性方案，采用卸荷参数；

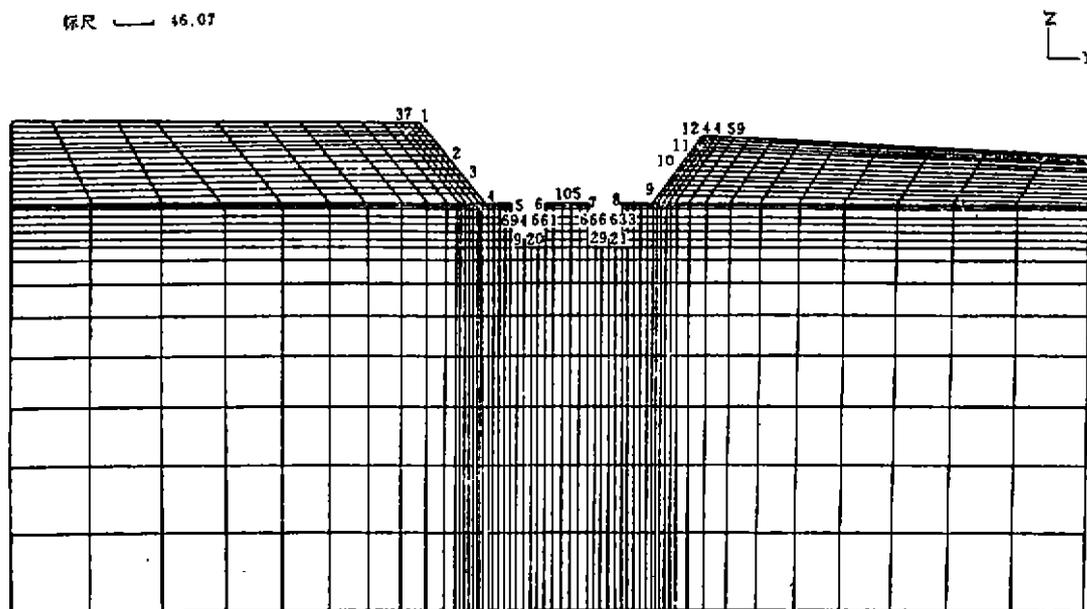


图 4 有限元计算网格

NOT2: 非线性正交异性计算方案, $R_{\min} = 1.5 \text{ MPa}$ (长委会计算时使用的抗拉强度);

NOT4: 非线性正交异性计算方案, $R_{\min} = 0.4 \text{ MPa}$ (本文研究提出抗拉强度)。

2) 20°剖面

R001: 非线性正交异性方案, 采用卸荷参数;

R004: 非线性正交异性计算方案, $R_{\min} = 1.5 \text{ MPa}$;

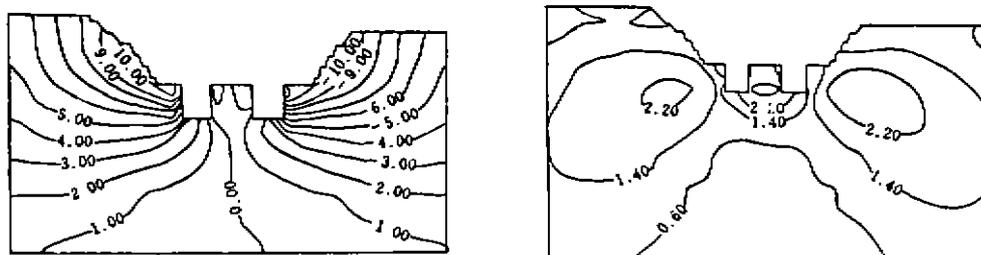
R006: 非线性正交异性计算方案, $R_{\min} = 0.4 \text{ MPa}$ 。

3.4 计算结果分析

为节省篇幅, 仅以 16°剖面为例加以说明。

3.4.1 计算位移场分析

边坡周边及内部的 Y 方向及 Z 方向 (NOT1 方案) 的相对位移等值线如图 5 所示。由图可见, 在边坡开挖周边, 最大水平位移发生在船闸闸室直墙的顶角处 (约为 14 cm)。最大垂直位移



(a) (Y 方向) 水平位移

(b) 垂直位移

图 5 16°剖面 EOT1 方案位移等值线

移发生在中墩的中部,在左右边坡中各有一个最大垂直卸荷的集中带,在等值线图上表现为等值线的封闭区域,这与一般的岩石边坡不同,这主要是由于地应力释放造成的。由于左右边坡高度的差异,总体的位移是坡高的一侧向低的一侧位移。

图 6 为 $R_{\text{max}} = 0.4 \text{ MPa}$ (EOT4)时的 16[#]剖面边坡周边位移的等值线图。由于拉应力区部分岩体被拉裂,边坡周边尤其是闸室两边岩体的水平位移比图 3 明显增加。在拉应力部位

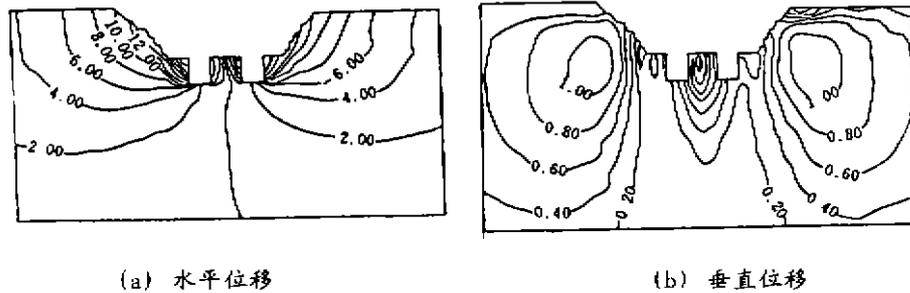


图 6 NOT4 方案位移等值线

等值线很密,说明位移增加主要发生在这些部位。其他抗拉强度时的情况与此类似。不同抗拉强度时右闸室直立坡顶点的最大水平位移如表 2 所示。

3.4.2 应力状态

永久船闸区岩体的初始应力状态,大主应力在近地表处接近铅直,深部接近水平,次主应力方向近地表处接近水平,深部接近垂直,船闸底板(+112 高程)处最大主应力值约为 8 MPa 左右,次主应力值约为 3 MPa。随着边坡的开挖下降,岩体卸荷逐渐发展,岩体质量不断劣化,抗拉强度逐渐降低,流变过程发育。当 $R_t = 0.4 \text{ MPa}$ 时,流变值约为 25~29 cm。岩体的应力状态随岩体强度的劣化不断调整,局部区域由压应力状态变为拉应力状态,中墩上部由双向压应力状态趋向双向拉应力状态、单向拉应力状态或零应力状态发展,在左右闸室底板与直立墙拐角处为压应力集中区,已处于压剪破坏状态。

计算结果表明,在直立墙以上的斜坡岩体中均有拉应力区存在,但只是局部的,在微新岩体中一般在距边坡坡面 15 m 以内,而在微风化及岩基中则表现为拉剪破坏状态,且范围

表 2 右闸室直立坡顶点最大水平位移 单位:cm

计算剖面	弹性	$R_t = 1.5$	$R_t = 0.4$
16 [#] 剖面	13.56	15.22	42.41
20 [#] 剖面	15.09	26.76	39.90

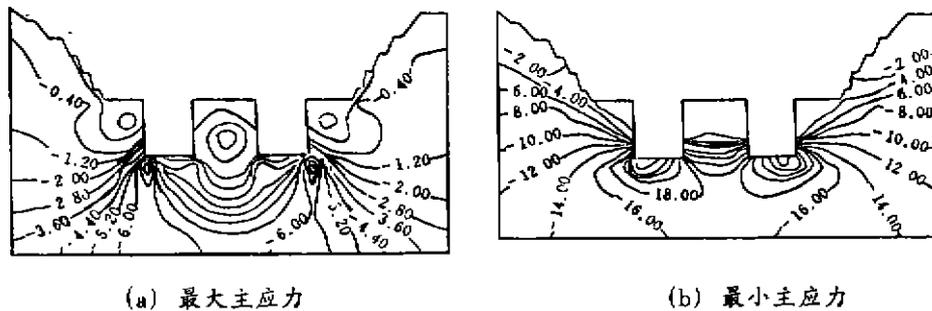


图 7 16[#]剖面主应力等值线

较大。在直立墙中,其上部约 1/4 范围为拉应力集中区,量值在 0.6 MPa 左右,在离墙 20 余米的岩体中,有呈三角形的拉应力区,一直至墙体下方,该区内均为压应力。中墩上部约 1/4 范围均为拉应力区,拉应力值一般在 1 MPa 以内,局部达 3.5 MPa 左右,计算 16# 剖面的最大及最小主应力等值线如图 7 所示。由图可见拉应力区的分布范围及其应力分布规律。

由以上分析可见,船闸边坡的开挖卸荷发育过程,是应力状态调整及演变的根本原因,流变过程的发育使边坡岩体抗拉强度发生变化,岩体强度不断劣化,进而边坡的变形量增加。因此,边坡变形量的控制是岩体稳定研究和控制的关键。

4 主要结论

1) 由于三峡工程永久船闸区岩体受多组岩体结构面切割、且 NWW 组和 NEE 组是工程优势结构面,以陡倾角岩体结构面为主,结合一定的岩体非均质性,造成了区内岩体明显的各向异性特征,因而为了有效地模拟岩体的力学行为,宜选用适合于本区岩体力学特性的正交异性力学模型;

2) 三峡工程永久船闸高边坡岩体开挖后,由于自然条件的破坏,边坡岩体产生大面积卸荷区,这些卸荷区岩体不同于加荷岩体,因此作力学分析时,应考虑岩体的非线性卸荷特征。利用变刚度迭代法通过岩体力学参数的不断劣化能有效地去模拟这种非线性卸荷过程;

3) 研究表明边坡岩体开挖卸荷模拟计算应采用宏观的卸荷力学参数计算。且计算中应考虑各向异性的影响,由此计算得到的开挖位移可以反映实际情况。与通常的计算(计算最大水平位移 3 cm 左右,最大时效变形为总位移的 15%) 相比得知,三峡船闸高边坡岩体的最大变形将达 10 cm 以上;

4) 计算结果表明,根据目前船闸高边坡设计方案在开挖后有较大范围的拉应力区,拉应力区主要集中在十分重要的闸室两侧的立墙或中墩上,对闸门的维护十分不利;

5) 计算结果表明,岩体的变形主要是由于节理裂隙张开、扩展及贯通等引起,当边坡岩体不能承受拉应力时,卸荷裂缝将与工程原生的优势结构面贯通且张开较大,根据本文边坡计算结果在闸室顶部马道上裂缝的合计宽度约达 1.0 m 以上;

6) 边坡岩体开挖地应力释放过程中,岩体将产生的最大释放位移约 14 cm 左右(闸室立墙顶点处),该位移在任何加固方案下均无法有效控制。因此在闸室开槽时,应及时或预先对开挖面施加主动侧压,以防止卸荷过程的快速发育,致使因岩体质量的进一步劣化而产生过大的位移而使边坡失稳。

参 考 文 献

- 1 哈秋龄,张永兴. 岩石边坡工程. 重庆: 重庆大学出版社, 1995
- 2 中国科学院地质研究所. 岩体工程地质力学问题. 北京: 科学出版社, 1985
- 3 中国长江三峡开发总公司等. 长江三峡工程施工关键技术研究专题研究报告集. 湖北: 湖北辞书出版社, 1994
- 4 L. 米勒. 岩石力学. 北京: 煤炭工业出版社, 1981: 1-12

Nonlinear Analysis of Unloading Rock Mass Related to the Shiplock High Slope of Three - Gorges Project

Zhang Yongxing

(Faculty of Civil Engineering Chongqing Jianzhu University, 630045)

Ha Qiuling

(China Three - Gorges Project Development Company, Yichang 443002)

Abstract According to the characteristics of the shiplock high slope of Three - Gorges Project, this paper simplified the rock mass of the high slope as orthogonally anisotropical media. On the basis of recognizing the nonlinear mechanics of excavation unloading, the paper presents the nonlinear mechanics calculating method, the theory of changing stiffen analysis. The calculating results agree fairly close to the measured one. By the excavating calculation of shiplock high slope, the paper shows that the rock mass will produce the large deformations, which have the large difference with the results of the old studies

Key Words Three - Gorges Project, permanent shiplock, nonlinear unloading

(编辑:王秀玲)

科研成果

铬渣微晶玻璃建筑装饰板

内容简介及技术水平:

铬渣微晶玻璃建筑装饰板是以工业废铬渣为主要原料,经融熔、成型、热处理和磨光等工序制成的人造板材,板材外观精美、质感豪华、物理力学性能及耐久性等性能指标远优于天然大理石,与天然花岗石相当,是一种高档建筑装饰板。属国际首创。