

岩石高陡边坡的岩体模型及其参数研究

张永兴

(重庆建筑大学岩土工程研究所, 630045)

文 摘 岩石边坡稳定性分析, 通常将边坡岩体的模型抽象为地质模型、力学模型及几何模型三种。本文提出应根据分析方法的侧重点分别建立相应的模型, 即针对三维相似模型试验建立地质概化模型; 针对块体稳定分析建立块体-夹层模型; 针对数值模拟建立等效连续模型。文中结合三峡链子崖危岩体建立了这三种模型并确定相应的参数。模型试验与计算成果基本一致, 与现场实际情况吻合较好。

关键词 岩石高陡边坡, 链子崖危岩体, 岩体模型, 参数取值。

1 前 言

实际工程中存在着许多这样的岩质高陡边坡, 它们由于人类工程活动及自然营力作用, 边坡岩体的质量不断劣化, 不仅岩石本身的强度逐渐丧失、变形性能逐渐增大, 而且产生了许多宽大的裂缝, 其稳定与否又严重威胁着人民生命财产的安全。长江三峡链子崖危岩体就是这类岩质高陡边坡的典型例子^[1]。它岩质软硬交替, 具有软弱夹层约40余层, 而且被大型断裂构造所切割, 加上其下部煤系地层(R_{001} 软层)的不规则开采, 使人们对其稳定性的研究十分困难。

人们已对链子崖危岩体进行了近30年的研究, 但从这些研究中发现, 按通常的方法将岩体的模型抽象为地质模型、力学模型及几何模型, 采用统一的强度变形参数进行模型试验、块体稳定分析及数值模拟计算, 则不仅得到的危岩体的变形量与现场估测的数据有量级上的差别, 而且相互之间的结果也不尽一致, 不能形成互相一致的论证^[2]。对此, 本文通过分析认为应根据问题分析方法的侧重点, 分别建立相应的岩体模型, 并确定相应的岩体力学参数。即:

- (1) 针对三维相似模型试验建立地质概化模型 (简称地质模型)
- (2) 针对块体稳定分析建立块体-夹层模型 (简称块体模型)。
- (3) 针对有限元分析建立等效连续体模型 (简称等效模型)。

下面结合链子崖危岩体 T8-T12 缝段的实际条件分别建立这三种模型并确定相应的参数。

2 岩体模型的建立

2.1 地质模型

为了采用三维相似模型试验研究危岩体的变形破坏机理, 首先必须建立地质模型。地质

模型实际上是经过科学的、符合实际地质状况简化的一种岩体等效模型。这是由于用于试验的地质模型与实际地质体很难做到在几何的、物理的、力学的各种参数及其变化上完全绝对确定的、细微的相似所致。

通过对链子崖危岩体 T8 - T12 缝段地质勘探及试验资料的综合分析，建立如下的地质模型。

(1) 模型范围 图 1 是 T8 - T12 缝段危岩体概化地质平面图。模型的西部和南部分别到 T8 及 T12 裂缝，T8 南侧及 T12 西侧核桃背取约 10m 的小部分。底部到本区内煤层的最低点 (+40m) 顶端到该区的最高点 +330m

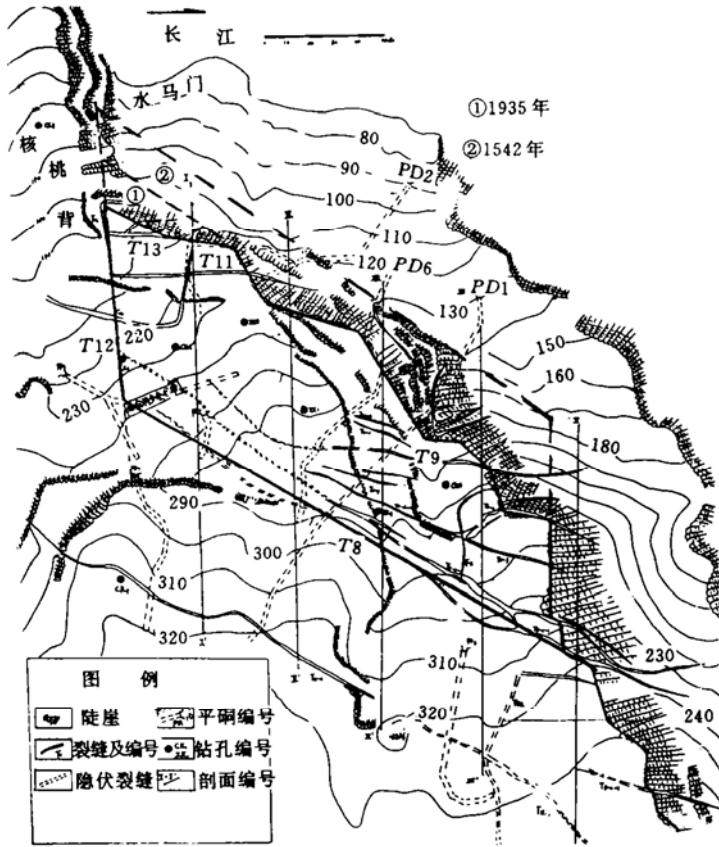


图1 危岩体地质模型平面图

(2) 岩层分组 根据各岩层及夹层的物理力学特性，将组成本危岩体的岩层及夹层分成表 1 所示的分组。

(3) 裂缝分布及产状 区域内存在裂缝数十条，模型中取规模较大的几条及其特征见表 2。

区域内构造裂隙较发育，模型中主要取密度较大的两组，即北西组：走向 $N40^{\circ} \sim 60^{\circ} W$ ，倾向 NE，倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，最大线密度 8 条/5m；北东组：走向 $N25^{\circ} \sim 45^{\circ} E$ ，倾向 SE，倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，最大线密度为 7 条/5m。

2.2 块体模型

被裂缝切割的具有软弱夹层的岩质高陡边坡，岩体变形主要由结构面（包括软弱夹层及

裂缝)控制,而岩石块体自身的变形较小。因此,工程上习惯对块体作稳定评价。

根据切割岩体的结构面的大小,可切割出不同级别的块体。对链子崖危岩体,本文提出首先以裂缝尖灭点岩层为准重新划分裂缝级别,再建立块体-夹层模型。

表1 T8-T12 缝段岩层分组

名称或代号	厚度 (m)	特征简述
黄龙灰岩 (C ₂ hn)		煤系地层底板,岩质坚硬、完整
煤系地层 (R ₀₀₁)	4.2 左右	
瘤状灰岩 (P ₁ q ₁)	25~29	煤系地层顶板,较完整
R ₂₀₁	0.3~0.68	薄层碳质泥岩、页岩
块状灰岩 (P ₁ q ₂)	73~85	危岩体构成绝壁部分,其中含 26m 左右薄层碳质泥灰岩层间错动带 R ₂₀₃
R ₃₀₁	0.35~0.4	薄层泥灰岩
块状灰岩 (P ₁ q ₃)	12~18	部分为山体表面
R ₄₀₁	0.4~0.44	灰色薄层碳质泥岩、页岩
疙瘩状灰岩	37 左右	危岩体顶面

表2 主要裂缝特征

裂缝编号	产 状			规 模 (m)			尖灭层位
	走 向	倾 向	倾 角	长 度	宽 度	深 度	
T8	N60°~80°W	NE	70°~80°	285	3~2.3	140~150	R ₀₀₁
T9	N75°~90°W	SW~NE	70°~90°	160	13~9	126~148	R ₀₀₁
T11	N70°W~N80°E	SW	76°~85°	90	2	94	R ₂₀₂
T12	N10°W	NE	65°~77°	55	1~2	148	R ₀₀₁
T13	N80°~85°W	NE	79°~85°	45	1~3	82.6	R ₂₀₂

(1) 尖灭于 R₀₀₁层为一级裂缝,本区主要有 T8-1, T9 及 T12;

(2) 尖灭于 R₁₀₂~R₁₀₇层的为二级裂缝,本区主要有 T8-0-1、T14;

(3) 尖灭于 R₂₀₂的为三级裂缝,本区主要有 T8-4, T10-16, T11, T13 等;

(4) 尖灭于 R₃₀₁的为四级裂缝,均在本区,有 T8-6, T8-7, T8-8, T8-9, T8-10, T10-1~T10-10; T11-1~T11-3。

据此裂缝分级,可使本区危岩体需要重点研究的块体更为明确,主要是一级和三级裂缝组成的块体需逐个进行研究,如图2所示。现将各主要块体的方量列于表3。

2.3 正交异性等效模型

等效连续体模型是将现实岩体视为一个大岩体试件,认为其目前存在的变形和破坏现状不过是经历了一系列自然界的各种作用与人类工程活动这一特殊试验的结果。然后以这巨大的岩体试件建立等效的岩体物理力学模型,估计其变形和强度参数,以用于数值模拟作应力应变分析,力求再现岩体的变形和破坏现状。

链子崖 T8-T12 缝段岩体的等效模型取域如图3所示。其边界取 T8, T12 及 R₀₀₁, 域内断裂构造只取 T9, T11, 软弱夹层仅取 R₂₀₂。将 R₂₀₂上部块状灰岩及下部瘤状灰岩中其他

裂缝及夹层和含有中小型裂隙在内的岩块一起作为等效连续体处理。

表 3 一、三级裂缝切割块体及其方量

裂缝级别	裂缝组成块体	工程量 (10^4m^3)
一级	T9 - T12	98.5
	T8 - T12	200.5
三级	T12 - T13	1.98
	T11 - T12	13.3

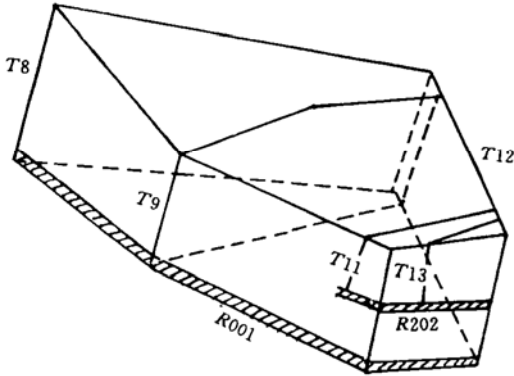


图 2 块体模型示意图

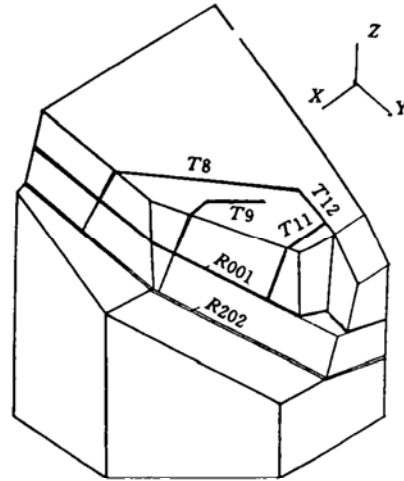


图 3 危岩体简化为等效连续模型

进一步从地质构造来看区域内的岩体应按各向异性考虑。由于区域内特殊的地质构造节理走向近东西占优，不连续面皆为陡倾角的张节理，故简化为正交异性体。

事实上，现存岩体的正交异性等效连续体的强度可以认为完整灰岩经过无数次地质构造和人类工程活动等作用后灰岩的残余强度，其变形主要受控于结构面，而且具有很强的方向性，图 3 中 Y 方向的变形远远大于 X 方向，因此作本简化是符合实际情况的。

3 岩体物理力学参数估计

3.1 地质模型参数

地质模型作为危岩体煤系地层开采前的模型，取开采前的等效参数。通过对近 30 年来人们研究链子崖危岩体进行的大量室内外试验成果的分析，本文采用的各主要岩层的参数如表 4。将经分析后确定的模型试验时采用的各主要软弱夹层的参数取值列于表 5。

煤系地层按开采前后分别考虑，变形模量开采前取 200MPa，而开采后是按现场平硐内的调查资料及对采矿老矿工等调研推测的（结合目前试验成果），共分成九个区域分别估计，如图 4 所示。

3.2 块体模型参数

由于块体模型将块体本身视为刚体，因此参数取值主要是切割成该块体的结构面的取

值, 结构面 (包括软弱夹层) 参数与地质模型相同, 煤系地层也按开采前后分别取值。

表4 各主要岩层力学参数取值

岩层		γ (kN/m ³)	E (GPa)	μ	P_0 (MPa)	P_t (MPa)	c (MPa)	φ (°)
栖霞组	P ₁ q ₄	25	35	0.23	100.	2.0	0.55	50
	P ₁ q ₃	26	45	0.21	120.	3.0	0.60	55
	P ₁ q ₂							
	P ₁ q ₁	25.5	40	0.22	110.	2.5	0.55	50
黄龙灰岩		27	50	0.2	140.	3.2	0.6	60

表5 主要软弱夹层强度参数取值

主要夹层	方向	c (MPa)	φ (°)	f	备注
R ₄₀₂	NW40°	0.03	22	0.4	已滑动
R ₃₀₁	NW10°	0.3	26.5	0.5	均为饱和状
R ₂₀₁ R ₂₀₃	NW10°	0.3	26.5	0.5	
R ₀₀₁	NW10°	0.2	15.0	0.27	
油泥层	NW10°	0.03	10	0.18	
T12-1	NW10°	1.0	40	0.8	完好灰岩面
T12-2	NW10°	0.3	22	0.4	破碎岩体

3.3 正交异性等效连续体参数

确定等效连续体物理力学参数的方法很多^[2], 通过比较分析, 本文采用 Bineiwski 建立的工程岩体分类系统及 Hoek-Brown 等人提出的岩体分类指数 (RMR) 与岩体的强度, 变形参数之间的经验公式^[3], 再综合考虑现场声波测试结果^[4], 以及 Goodman 等效连续体理论计算变形参数的方法^[5], 得到块状灰岩、瘤状灰岩的等效变形和强度参数如表6。由表6可知正交异性等效连续体的变形模量比地质模型中岩层参数小1~2个数量级, 反映了开采煤层及自然营力作用下岩体的质量劣化情况。

表6 等效连续体灰岩岩体力学参数估计

岩层	变形模量 E (GPa)			R_c (MPa)	R_t (MPa)	c (MPa)	φ (°)
	垂直层面	层面 (南北)	层面 (东西)				
块状灰岩	3.5	0.175~0.100	3.5	2.02	0.159	0.43~0.61	33~45
瘤状灰岩	3.0	0.150~0.100	3.0	1.22	0.091	0.31~0.75	28~42

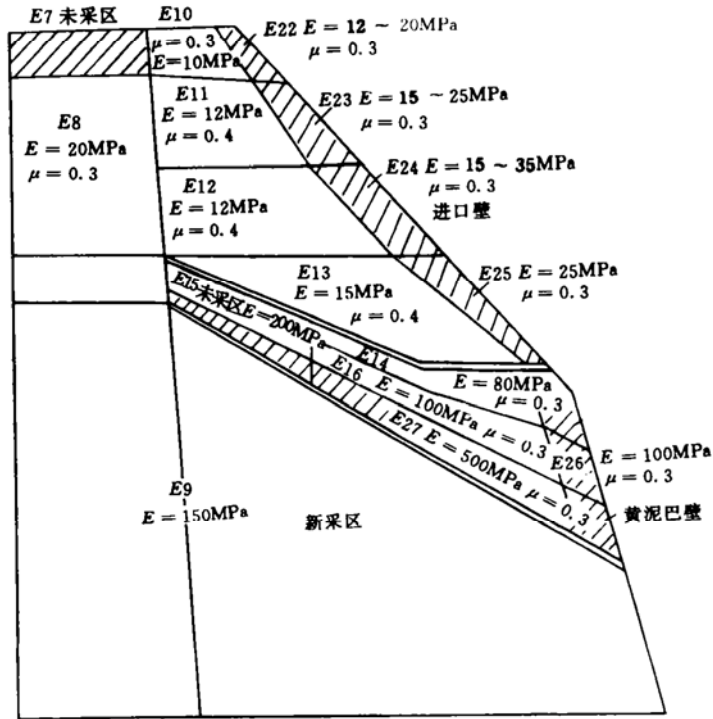


图4 煤系地层开采区分布及变形模量估计

4 对试验及计算成果的讨论

4.1 试验简介

根据地质模型,用以重晶粉及铁粉为主的相似材料制作了1:145的三维重力相似模型,模型中通过砌块间的拼缝模拟前述二组主要裂隙。模型试验模拟了随煤层开采引起的裂隙开裂过程及观察岩体的变形破坏情况。

根据块体-夹层模型,制作了将煤系地层及T12视为滑面,T8-T12缝段视为楔形体滑块的1:400的相似模型,作为大模型试验的预备试验并了解危岩体承受的极限荷载。

4.2 计算简介

通常采用刚体极限平衡法计算楔形体的安全系数,通过计算发现该法计算的安全系数(1.18)比小模型破坏结果($F_s = 1$)偏大,因此,本文研制了考虑滑动面变形(刚度系数分别为法向 k_n ,沿两滑面交线方向 k_s 及与交线垂直方向 k_t)的稳定分析方法,编制了三维块体的稳定分析程序(LDEM-3D)。该程序不仅可以研究滑面上的线性、非线性特征,而且比有限元等数值分析方法可以节省大量的计算机时。

正交异性等效体的有限元模拟,计算了煤层开采前后随着岩体质量劣化时的应力场、位移场变化情况,岩体肢解及风化过程中岩体变形模量及抗弯、抗扭刚度逐渐减小对岩体变形及稳定性的影响,共计算了15种方案。

4.3 主要成果讨论

通过对试验及计算成果的分析,发现针对不同的分析问题方法确立的岩体模型及确定的相应的参数,对危岩体得到的最终成果是一致的,与现场情况也相吻合。具体表现在以下两个方面:

(1) 模型试验取开采前的地质等效参数然后模拟煤层开采引起的裂缝张开,而正交异性连续体按危岩体目前情况等效取值,两者裂缝张开度与现场实际估测情况如表7,说明等效模型所取较小参数可以反映煤系地层开采后岩体质量劣化现状,而煤层开采是危岩体产生宽大裂缝的主要原因。

表7 危岩体各剖面裂缝张开度

剖面		I - I	II - II	III - III
T8 张开度 (cm)	有限元	37.2	59.3	86.7
	试验	40	62.3	95.7
	现场估测	50~70	80~105	100~200
T9 张开度 (cm)	有限元	20.8	42.6	55.1
	试验	15	56.5	70.4
	现场估测	0~30	30~50	50~80
备注	现场估测值由原链黄指挥部专门组织人员取得			

(2) 有限元分析, LDEM-3D分析的滑面 T12 及 R₀₀₁的内力分布如表8,计算得到的安全系数约为 1.12,与模型试验成果吻合,说明危岩体安全余量不大。

表8 有限元计算与 LDEM-3D 计算内力 (10⁵kN) 对比

滑面名称	T12			R ₀₀₁		
	S	T	N	S	T	N
有限元 SP6 计算方案	66.0	116.12	135.67	68.79	25.30	300.07
LDEM-3D	85.89	136.22	139.17	49.44	26.99	278.13

模型试验及计算模拟还得到了对链子崖危岩体防治具有重要指导意义的结论,限于篇幅,不作一一讨论。

5 结 语

根据不同岩体模型采用不同分析方法得到的结果一致,由此可以推测岩质高陡边坡的变形破坏机理及发展趋势。尤其是采用较为简单的块体-夹层模型可以进一步进行岩体稳定性的可靠性研究,限于本文侧重点,不作具体介绍,笔者将另文专述。

可行性研究方案
参 考 文 献

- 1 湖北省水文地质大队. 链子崖危岩体防治工程可行性研究方案比选阶段勘察试验报告. 1990.
- 2 张永兴. 长江三峡链子崖危岩体稳定性研究 [博士学位论文] 重庆建筑大学, 1994.
- 3 Bieniawski Z T. Engineering Rock Mass Classification. 1989.
- 4 黄理兴, 吴亚平. 采用声波技术勘测链子崖危岩体力学特性的研究. 见: 第二届全国岩石动力学学术会论文集, 392~400.
- 5 Richard E Goodman. Introduction to Rock Mechanics, 1980.

Study on Rock Mass Models and Its Parameters in High and Steep Rocky Slope

Zhang Yong - xing

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jianzhu University)

Abstract In the stability analysis of rocky slope, the rock mass is generally abstracted into geologic model, mechanical model or geometric model. The distinct model must be selected according to the feature of analyzing method used, i. e. the general geologic model is established for 3 - d model test and the equivalent continuum model is established for numeric calculation. Taking the Lianziya precipice as an example, these models with corresponding parameters are made in the paper. It is shown that the results of model test, calculation and field test are consistent with each other.

Key words high and steep rocky slope, lianziya precipice, rock mass model, parameters.

简 讯

国际加筋土学术研讨会通知

国际加筋土学术研讨会将于1996年11月12~14日于日本九州大学召开。这次会议得到日本土力学与基础工程学会赞助并由国际土工合成材料学会发起召开。'88九州和'92九州两届研讨会为加筋土技术的发展做出了积极贡献, 本届大会是前两届大会的延续和扩充, 旨在进一步讨论加筋土中的各种问题, 交流这一技术发展的最新信息并推动这一技术在世界各国的发展。本届大会将组织有关加筋土试验和设计方法两个专题的讨论。本届会议还将举行关于1995年1月17日阪神地震的特别报告, 与会者将得到加筋土结构在地震作用下性状方面很有价值的信息。

会议将征集加筋土技术在: ①堤坝, ②挡土结构, ③基础, ④边坡与开挖方面应用的文章。请作者提交以上四个议题中任一方面大约300字的英文摘要, 同时注明文章的题目、作者姓名、通讯地址, 摘要须清楚说明研究的目的和全部结论。摘要请于1995年9月30日前提交'96九州大会组委会。通讯地址:

Professor Hidetoshi Ochiai
Department of Civil Engineering,
Kyushu University,
6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku
Fukuoka 812, JAPAN

(通讯员 施建勇供稿)