

doi:10.3799/dqkx.2015.171

水电工程坝基玄武岩体波速与变形模量关系

周洪福¹, 聂德新², 王春山¹

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059

摘要: 岩体变形模量是岩体工程设计最重要的参数之一。由于受到资金、时间、尺寸效应等限制, 在工程勘察设计阶段往往不可能大量开展岩体现场和室内变形模量试验, 试验结果也不具有普遍代表性。因此, 水电工程常常采用岩体纵波波速与变形模量之间的相关关系来估算大范围及深部岩体变形模量。根据波动微分方程从理论上解释了岩体纵波波速与变形模量之间内在的联系。以我国西南金沙江干流上坝基主要为玄武岩体的4个大型水电工程为例, 根据132组现场变形模量试验结果与同向波速测试结果建立玄武岩体波速与变形模量相关方程, 并与已有的研究成果对比分析。研究表明, 玄武岩体波速与变形模量具有较好的相关性。当波速小于4 500 m/s时, 不同类型玄武岩根据波速计算变形模量差别较小; 当波速大于4 500 m/s时, 差别逐渐增加。选取最优的相关方程用于估算坝基玄武岩体变形模量, 为水电工程坝基玄武岩体变形模量的快捷评价提供科学依据。

关键词: 玄武岩; 水电工程; 变形模量; 纵波波速; 坝基岩体; 相关性; 岩土工程。

中图分类号: P642.3

文章编号: 1000-2383(2015)11-1904-09

收稿日期: 2014-12-31

Correlation between Wave Velocity and Deformation Modulus of Basalt Masses as Dam Foundation in Hydropower Projects

Zhou Hongfu¹, Nie Dexin², Wang Chunshan¹

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Deformation modulus is an important parameter for rock engineering design. However, the relation between longitudinal wave velocity and deformation modulus is often used to estimate the deformation modulus of large-scale and deep rock mass in the hydroelectric projects because it is difficult to conduct many in-situ and laboratory deformation modulus tests due to the limited funds, time and test size during the engineering survey and the test results have no general representativeness. In this paper, the intrinsic relation between longitudinal wave velocity and rock deformation modulus is theoretically explained based on the wave differential equation. Meanwhile, 132 in-situ test data derived from 4 hydropowers are used to set up an experience formula between longitudinal wave velocity and deformation modulus for basalt in the Jinsha River area. The results show that there is close relation between the basalt longitudinal wave velocity and its deformation modulus. The deformation modulus difference of different basalt rock masses by calculating of longitudinal wave velocity is small when $V_p < 4\ 500$ m/s. While it becomes larger when $V_p > 4\ 500$ m/s. The optimal equation is helpful to evaluate the deformation modulus of basalt rock mass, and it offers a quick and scientific method for selecting basic parameters of dam foundation in the hydropower projects.

Key words: basalt; hydropower project; deformation modulus; longitudinal wave velocity; rock mass of dam foundation; correlation; geotechnical engineering.

岩体变形模量是岩体工程设计最重要的参数之一, 许多水电工程的设计规范中均对岩体变形模量

做了明确的规定(中华人民共和国行业标准编写组, 1999, 2001a, 2001b, 2005), 同时也是难以准确获得

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40372127); 中国地质调查局国土资源大调查项目(No. 12120114069501).

作者简介: 周洪福(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事工程岩土体稳定性和地质灾害调查等方面的研究工作. E-mail: zhf800726@163.com

引用格式: 周洪福, 聂德新, 王春山, 2015. 水电工程坝基玄武岩体波速与变形模量关系. 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1904-1912.

的参数之一(周洪福等,2010)。这是因为岩体中不仅包含了完整的岩块,更重要的是岩体中发育大量断层、节理等不连续面。它们是影响岩体变形性能的主要因素,尤其对于坚硬岩体更是如此(宋彦辉等,2011)。总的来说,目前有 2 种方法确定岩体的变形模量:直接法和间接法(吴兴春等,1998)。直接法是通过现场或者室内试验直接获取岩体变形模量的一种方法;间接法是通过经验关系法、地球物理法、等效连续模型计算法、反算法等间接方法获取岩体变形模量。Kulatilako *et al.* (1992)对各种方法的优缺点进行了评述:现场试验法是最直接、最准确的方法,但是受到资金、技术、时间等限制,在大型工程勘察阶段或者中小型岩石工程中不可能大量开展。并且由于岩体结构差异及岩体变形试验的尺寸效应(张占荣等,2010),实际上原位测试也只能代表某一点的变形性能。室内变形试验受到样品尺寸、扰动、成样条件等因素的限制,难于全面反映岩体的结构特征及赋存条件(李维树等,2010)。因此,人们更加关注利用间接法来获取岩体变形模量,特别是经验关系法,该方法可以通过较易获得的指标来计算岩体的变形模量,不仅简便易于操作,而且可以获得工程区域各个部位岩体的变形模量值,给工程设计带来了巨大便利(吴兴春等,1998)。

目前采用经验公式估算岩体变形模量的方法很多,这些方法大多以各种岩体质量分级值与变形模量之间建立相关关系(Chun *et al.*, 2006; 张宜虎等, 2011), Zhang and Einstein (2004)建立的岩体变形模量(E_m)、完整岩块变形模量(E_r)与 RQD 之间的相关关系:

$$\text{低值: } E_m/E_r = 0.2 \times 10^{0.0186\text{RQD}-1.91}, \quad (1)$$

$$\text{高值: } E_m/E_r = 1.8 \times 10^{0.0186\text{RQD}-1.91}, \quad (2)$$

$$\text{平均值: } E_m/E_r = 10^{0.0186\text{RQD}-1.91}. \quad (3)$$

岩体 RMR 分级质量与岩体变形模量之间的相关关系被广泛使用(Chun *et al.*, 2006):

$$\text{RMR} > 50, E_m = 2\text{RMR} - 100, \quad (4)$$

$$\text{RMR} \leq 50, E_m = 10^{(\text{RMR}-10)/40}. \quad (5)$$

也有考虑单因素指标或组合因素指标建立与变形模量的关系(Kayabasi *et al.*, 2003; Zhang and Einstein, 2004)。利用岩体波速建立与岩体变形模量关系的研究相对较少。目前应用较成熟的是 Barton (2002)建立的岩体纵波波速与变形模量之间的相关关系:

$$E_0 = 10 \times 10^{(V_p-3.5)/3}. \quad (6)$$

另外吴兴春等(1998)利用岩石力学参数管理系

统 ROMEDA 拟合了花岗岩岩体纵波波速与变形模量之间的关系:

$$E_0 = 0.01(V_p)^{4.8}. \quad (7)$$

但对不同的岩体介质,由于岩性、密度、结构等特征的不同,波速与变形模量的相关关系可能不尽相同。如果仅仅采用一个通用的估算公式无疑其估算精度将大大降低。更有效的途径是分别建立不同介质岩体的相关关系,这样才能提供更为准确的预测结果。因此,本文对我国西南多个水电工程坝基玄武岩体进行变形模量试验与波速同向测试,在试验测试结果的基础上采用多种方法分析玄武岩体纵波波速与变形模量的相关关系,对比分析现有的研究成果,建立玄武岩体波速与变形模量的相关方程,为水电工程坝基玄武岩体变形模量的快捷评价提供科学依据,同时也期望能对其他类似工程力学参数研究有一定的借鉴作用。

1 岩体波速与变形模量关系讨论

当弹性波在岩体中传播时,其动力参数如速度、振幅、频率,很容易受到岩性、结构面、风化程度等地质因素的影响。反过来可以借助弹性波波速的变化来了解岩体的一些特性,如弹性模量、单位弹性抗力系数、岩体的完整性等。因击发装置和频率不一样,一般分为声波法和地震波法,前者是通过换能器将电振荡能量转换为机械振动能量传给岩体,后者是通过爆破将能量传给岩体,但其基本理论是基于弹性体波动微分方程,周洪福(2008)给出相关方程:

$$E = \frac{\gamma V_p^2 (1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}, \quad (8)$$

上式中: V_p 代表岩体纵波速度; γ 代表岩体密度; E 代表岩体动弹性模量; μ 代表岩体泊松比。

波动微分方程从理论上解释了岩体纵波波速与弹性模量(变形模量)之间内在的联系;岩体纵波波速与弹性模量呈正相关。而岩体弹性模量与变形模量也呈正相关。其计算公式均是应力除以应变,只不过弹性模量计算时应变为弹性应变,而变形模量计算时应变包括弹性应变和塑性应变。因此,岩体的纵波波速与变形模量也呈正相关关系。

2 岩体变形模量试验与波速同向测试

2.1 变形模量试验与波速同向测试简介

在处理平整的变形试验点中心时,利用风钻垂

直试验面凿单孔,孔深按照变形模量试验时应力有效传递深度,取 1.2~1.5 m。这样变形模量试验时岩体受力方向与声波在岩体中传播方向一致,能够更好地反映试验点处岩体结构面发育特征,从而使变形试验结果和波速测试结果具有更好的对应性。

为了反映自然状态下岩体波速,在变形模量试验前对单孔波速进行测试。声波测试间距为 10 cm,为了获得声波孔表部 0~30 cm 范围内岩体波速,采用底部发射专用换能器。这样一个声波孔可以测得 12~15 个声波数据,取平均值作为岩体变形模量试验结果所对应的声波值。

2.2 现场变形模量试验要点

现场变形模量试验采用刚性圆形承压板法,承压板直径为 40 cm,厚度为 5 cm。试验点均为手工刻凿,岩面直径为 60 cm,起伏差小于 5 mm。加荷方式为逐级一次循环法,共进行 5~7 级加、卸荷循环。加压速率以时间控制,当测表相邻 2 次读数之差 < 5% 以及同级压力下第一次变形读数与前一级压力下最后一次变形读数差 < 5% 时,则认为变形稳定,可加载下一级应力或卸荷(中华人民共和国行业标准编写组, 2001)。岩体的变形模量按均匀、连续、各向同性的半无限弹性体表面受局部荷载的公式进行计算。

3 水电工程实例研究

本文选取我国西南金沙江干流上坝基岩体为玄武岩的 4 个典型水电工程:金安桥水电站、白鹤滩水电站、溪洛渡水电站、龙开口水电站。这 4 个水电工程规模较大,坝基主要岩体均为二叠系玄武岩,并且包含多种玄武岩类型,具有较好的代表性。

3.1 金安桥水电站坝基玄武岩波速与变形模量关系

金安桥水电站位于云南省丽江市、永胜县交界的金沙江中游河段,坝高为 160 m,坝型为混凝土重力坝,装机为 2 400 MW,总库容为 9.13 亿 m^3 ,工程规模为 I 等大(1)型。坝址区地层为二叠系玄武岩,断裂构造以 SN 向及 NE 向为主。在河床坝基及两岸低高程部位发育裂面绿泥石化玄武岩体,厚度为 40~70 m,基本平行似层面展布。裂面绿泥石化玄武岩裂隙迹长较短,大部分小于 50 cm,并且有较明显的优势方位。

在右岸 II 线低高程靠近河水位附近裂面绿泥石化玄武岩试验平台上一共布置 17 组变形模量试验,在变形试验之前同向测量每个试验点处岩体波速。变形模量与波速同向测试结果见表 1:绿泥石化玄

表 1 金安桥水电站坝基玄武岩体波速与变形模量试验结果
Table 1 Experiment result of wave velocity and deformation modulus of Basalt in Jinanqiao hydropower station

试点编号	岩性	试验位置	V_p (m/s)	E_0 (GPa)
PTB1	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 245	2.7
PTB2	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 276	2.8
PTB3	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 463	3.1
PTB4	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 324	3.2
PTB5	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 558	3.3
PTB6	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	3 267	3.9
PTB7	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 683	4.1
PTB8	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 821	4.4
PTB9	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 845	4.8
PTB10	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	2 946	5.0
PTB11	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	3 840	5.4
PTB12	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	4 231	7.1
PTB13	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	3 750	8.3
PTB14	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	4 648	9.2
PTB15	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	4 350	12.4
PTB16	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	5 077	18.8
PTB17	绿泥石化玄武岩	右岸 II 线试验平台	5 789	18.6

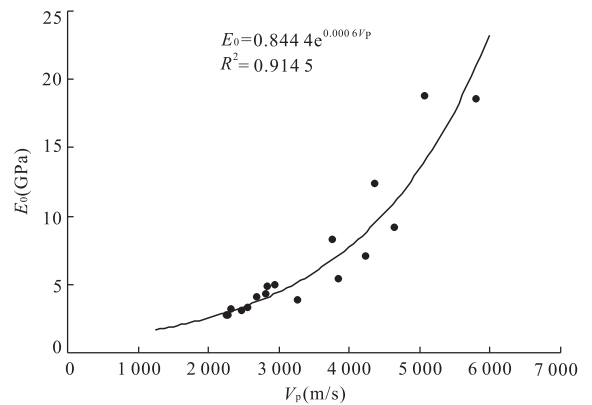


图 1 金安桥水电站坝基玄武岩体波速与变形模量关系
Fig. 1 Relation of wave velocity and deformation modulus of basalt in Jinanqiao hydropower station

武岩体波速为 2 245~5 789 m/s,对应的变形模量为 2.7~18.8 GPa。试验结果既有低值,也有高值,具有较好的代表性。

根据表 1 中 17 组试验结果可以拟合得到绿泥石化玄武岩体波速与变形模量相关曲线及方程(图 1),两者之间呈指数函数关系:

$$E_0 = 0.844 4e^{0.0006V_p}, R^2 = 0.9145. \quad (9)$$

虽然有一定离散型,但是波速与变形模量相关系数在 0.91 以上,相关性较好,可以用作绿泥石化玄武岩体变形模量评价。

3.2 白鹤滩水电站坝基玄武岩波速与变形模量关系

白鹤滩水电站位于云南省巧家县大寨乡与四川

表 2 白鹤滩水电站坝基玄武岩体波速与变形模量试验结果
Table 2 Experiment result of wave velocity and deformation modulus of Basalt in Baihetan hydropower station

试点编号	岩性	试验位置	V_p (m/s)	E_0 (GPa)
ZBX01	柱状节理玄武岩	PD111-198 m	4 000	9.2
ZBX02	柱状节理玄武岩	PD111-194.8 m	5 100	20.8
ZBX03	柱状节理玄武岩	PD111-190.1 m	4 170	10.8
ZBX04	柱状节理玄武岩	PD111-176.6 m	5 900	30.7
ZBX05	柱状节理玄武岩	PD111-154.7 m	5 530	26.4
ZBX06	柱状节理玄武岩	PD111-146 m	5 300	21.6
ZBX07	柱状节理玄武岩	PD111-121.5 m	5 800	29.8
ZBX08	柱状节理玄武岩	PD111-119 m	5 340	22.6
ZBX09	柱状节理玄武岩	PD111-53.9 m	4 800	18.2
ZBX10	柱状节理玄武岩	PD111-47.8 m	4 400	15.7
ZBX11	柱状节理玄武岩	PD111-23.8 m	2 260	1.4
ZBX12	柱状节理玄武岩	PD111-7.4 m	2 070	1.3
ZBX13	柱状节理玄武岩	PD111-30.7 m	3 360	6.8
YBX01	杏仁玄武岩	PD716-6.6 m	2 700	2.6
YBX02	杏仁玄武岩	PD716-11.9 m	3 540	5.0
YBX03	杏仁玄武岩	PD716-26.3 m	3 100	2.9
YBX04	杏仁玄武岩	PD716-35.1 m	4 200	10.3
YBX05	杏仁玄武岩	PD716-39.65 m	3 160	3.8
YBX06	杏仁玄武岩	PD716-55 m	3 530	5.0
YBX07	杏仁玄武岩	PD716-79.1 m	2 500	1.5
YBX08	角砾熔岩	PD716-101.65 m	4 820	17.1
YBX09	角砾熔岩	PD716-104.35 m	4 720	16.3
YBX10	角砾熔岩	PD716-107.55 m	5 100	22.2
ZBX14	隐晶玄武岩	PD923-11 m	3 110	5.0
ZBX15	隐晶玄武岩	PD923-28.5 m	3 670	11.6
ZBX16	隐晶玄武岩	PD923-34 m	4 150	11.2
ZBX17	隐晶玄武岩	PD113-117 m	4 800	16.5
YBX11	隐晶玄武岩	PD112-118.3 m	5 300	21.7

省宁南县跑马乡的金沙江中游河段,水库正常蓄水位为 825 m,坝型为双曲拱坝,坝高为 282 m,电站装机为 12 000 MW,工程规模为 I 等大(1)型。

坝址地形为典型的峡谷地形,右岸地形陡峻,左岸地形稍缓,受玄武岩似层面控制呈现台阶状。坝址主要地层为二叠系峨眉山玄武岩,可进一步细分为 11 个大的岩层。各岩层大多由柱状节理玄武岩、杏仁玄武岩、角砾熔岩、隐晶玄武岩等多种岩性小层组成。

为了分析不同类型玄武岩波速与变形模量关系,在平洞中一共布置 28 组变形模量试验。其中柱状节理玄武岩中布置 13 组;杏仁玄武岩中布置 7 组;角砾熔岩中布置 3 组;隐晶玄武岩中布置 5 组。在变形试验前对每个试验点进行波速同向测试,变形模量与波速同向测试结果见表 2。

将表 2 全部 28 组不同类型玄武岩体波速与变形模量进行拟合分析,拟合结果见图 2。从图 2 中结果可知,虽然玄武岩类型不同,但是波速与变形模量

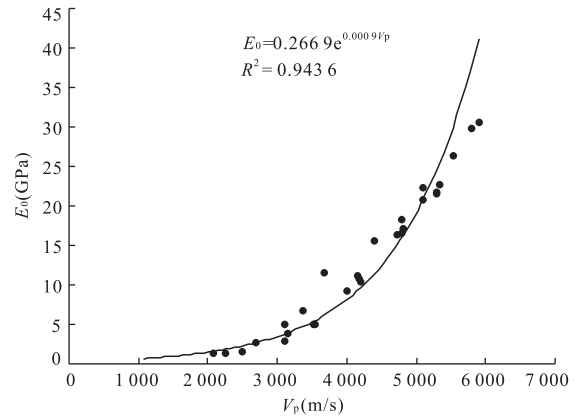


图 2 白鹤滩水电站坝基玄武岩体波速与变形模量关系
Fig. 2 Relation of wave velocity and deformation modulus of basalt in Baihetan hydropower station

之间呈指数函数关系,相关性较好,相关系数达 0.943 6:

$$E_0 = 0.2669e^{0.0009V_p}, R^2 = 0.9436. \quad (10)$$

3.3 溪洛渡水电站坝基玄武岩体波速与变形模量关系

溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省善县接壤的金沙江峡谷段,电站坝型为双曲拱坝,坝高为 286.5 m,正常蓄水位为 600 m,总库容为 126.7 亿 m^3 ,装机为 12 600 MW,是我国仅次于长江三峡的第二大水电站。

坝址区地形为“U”字型河谷,峡谷两岸谷坡陡峻,谷坡高度为 300 m 左右,坡度为 $50^\circ \sim 70^\circ$ 。坝址主要地层为二叠系峨眉山玄武岩,共有 14 个岩层 $P_2\beta^1 \sim P_2\beta^{14}$,进一步可细分为斑状玄武岩、角砾熔岩、凝灰岩、杏仁玄武岩、致密玄武岩 5 种类型。坝址无大的断层,地质构造以层间错动带和层内错动(简称 Lc)为主。

在左右岸开挖拱肩槽以及排水洞和灌浆洞中一共布置 63 组变形模量试验,这些变形试验涵盖坝址玄武岩的全部类型。其中斑状玄武岩中布置 8 组;角砾熔岩中布置 12 组;凝灰岩和杏仁玄武岩中布置数量较少,分别仅有 1 组;致密玄武岩中布置 41 组。在变形试验之前对每个试验点进行波速同向测试,变形试验与波速同向测试结果见表 3。变形模量为 0.5~45.4 GPa,波速为 1 761~5 956 m/s。

将表 3 中试验和测试结果进行拟合分析,得到溪洛渡水电站坝基玄武岩体波速与变形模量相关曲线(图 3)。从图 3 中拟合结果可知,虽然试验点较多,并且玄武岩类型不同,但是不同类型玄武岩波速与变形模量之间具有指数函数的正相关关系,相关

表 3 溪洛渡水电站坝基玄武岩体波速与变形模量试验结果

Table 3 Experiment result of wave velocity and deformation modulus of basalt in Xiluodu hydropower station

试点编号	岩性	试验位置	V_p (m/s)	E_0 (GPa)
ZB440	斑状玄武岩	左岸 EL440 下游幅	5 956	29.9
ZB430	斑状玄武岩	左岸 EL430 拱轴线	4 653	12.7
YB451	斑状玄武岩	右岸 EL451 上游幅	4 683	12.1
YB440	斑状玄武岩	右岸 EL440 下游幅	5 271	25.5
YB430	斑状玄武岩	右岸 EL430 下游幅	4 065	9.4
YB398	斑状玄武岩	右岸 EL398 上游幅	5 097	22.7
ZB411	斑状玄武岩	左岸 EL411 坝轴线	4 535	13.6
ZB386	斑状玄武岩	左岸 EL386 上游幅	4 821	17.3
ZB561X	角砾熔岩	左岸 EL561 下游幅	3 044	4.5
ZB561S	角砾熔岩	左岸 EL561 上游幅	3 163	4.6
ZB355	角砾熔岩	左岸 EL355	4 528	13.7
YB370X	角砾熔岩	右岸 EL570 下游幅	3 800	6.2
YX570S	角砾熔岩	右岸 EL570 上游幅	4 286	11.2
YB561S	角砾熔岩	右岸 EL560 上游幅	3 903	7.4
YB523	角砾熔岩	右岸 EL523 排水洞下方	4 186	12.0
YB510X	角砾熔岩	右岸 EL510 下游幅	4 041	8.3
YB500	角砾熔岩	右岸 EL500 坝轴线	3 631	7.7
YB461	角砾熔岩	右岸 EL460 上游幅	2 649	4.6
YB370	角砾熔岩	右岸 EL370 m 坝轴线	2 353	2.3
YX-BX	角砾熔岩	右岸缺陷 B 区	3 838	9.6
ZB470	凝灰岩	左岸灌浆洞 6 m	2 540	1.9
YB481	杏仁玄武岩	右岸 EL481	4 750	14.8
ZB610-4	致密玄武岩	左岸灌浆洞 82.6 m	4 870	16.9
ZB610-3	致密玄武岩	左岸灌浆洞 54 m	3 133	5.0
ZB610-2	致密玄武岩	左岸灌浆洞 39 m	3 300	6.0
ZB610-1	致密玄武岩	左岸灌浆洞 15 m	3 051	4.8
ZB580	致密玄武岩	左岸 EL580 下游幅	3 736	9.4
ZB575S	致密玄武岩	左岸 EL575 上游幅	2 415	2.1
ZB565X	致密玄武岩	左岸 EL565 下游幅	3 593	8.2
ZB565S	致密玄武岩	左岸 EL565 上游幅	1 890	1.8
ZB563-1	致密玄武岩	左岸排水洞 7.3 m	3 755	8.4
ZB563-2	致密玄武岩	左岸排水洞 35 m	2 610	3.9
ZB551S	致密玄武岩	左岸 EL551 坝轴线	3 649	7.9
ZB541	致密玄武岩	左岸 EL541 坝轴线	3 709	9.7
ZB522X	致密玄武岩	右岸 EL560 上游幅	3 503	6.5
ZB491	致密玄武岩	左岸 EL491 拱轴线	2 381	2.3
ZB486	致密玄武岩	左岸 EL486 拱轴线	2 060	2.2
ZB461	致密玄武岩	左岸 EL461 上游幅	3 553	5.9
ZB451	致密玄武岩	左岸 EL450 上游幅	3 898	7.5
ZB405	致密玄武岩	左岸 EL405 下游幅	5 556	24.1
ZB382	致密玄武岩	左岸 EL382 上游幅	4 601	15.1
YB610-6	致密玄武岩	右岸灌浆洞 81 m	4 491	13.1
YB610-5	致密玄武岩	右岸灌浆洞 58 m	2 952	4.5
YB610-4	致密玄武岩	右岸灌浆洞 57 m	3 486	7.7
YB610-3	致密玄武岩	右岸灌浆洞 47 m	2 631	2.4
YB610-2	致密玄武岩	右岸灌浆洞 31 m	3 922	11.0
YB610-1	致密玄武岩	右岸灌浆洞 10.5 m	4 893	16.9
YB601X	致密玄武岩	右岸 EL601 下游幅	2 233	3.3
YB601S	致密玄武岩	右岸 EL601 m 上游幅	4 092	9.3
YB581	致密玄武岩	右岸 EL581 m 下游幅	1 761	0.5
YB563	致密玄武岩	右岸排水洞 7.3 m	3 626	7.3
YB563-1	致密玄武岩	右岸排水洞 46.5 m	5 327	28.9
YB563-2	致密玄武岩	右岸排水洞 93.3 m	4 741	13.0
YB563-3	致密玄武岩	右岸排水洞 108 m	5 900	45.4
YB562X	致密玄武岩	右岸 EL562 m 下游幅	2 586	3.5
YB551	致密玄武岩	右岸 551 m 拱轴线	2 390	2.9
YB541X	致密玄武岩	右岸 541 下游幅	2 487	3.2
YB531	致密玄武岩	右岸 531 m 坝轴线	4 319	12.6
YB420	致密玄武岩	右岸 EL420 上游幅	2 970	2.1
YB391	致密玄武岩	右岸 EL391 上游幅	4 663	14.0
YB382	致密玄武岩	右岸 EL382 m 上游幅	4 048	7.5
YB367	致密玄武岩	右岸 EL367 上游幅	3 231	6.2
YB347	致密玄武岩	右岸 EL347 m 上游幅	2 047	1.6

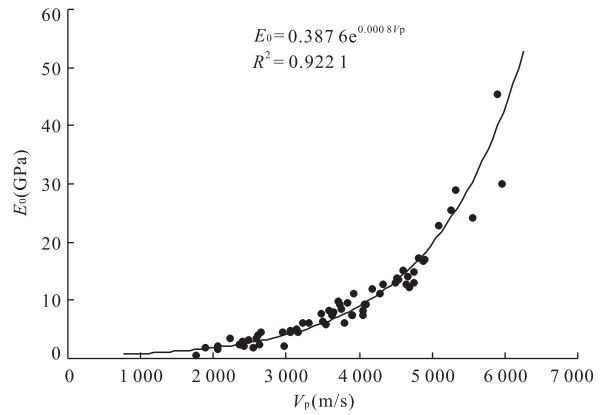


图 3 溪洛渡水电站坝基玄武岩体波速与变形模量关系

Fig. 3 Relationship of wave velocity and deformation modulus of basalt in Xiluodu hydropower station

表 4 龙开口水电站坝基玄武岩体波速与变形模量试验结果

Table 4 Experiment result of wave velocity and deformation modulus of Basalt in Longkaikou hydropower station

试点编号	岩性	试验位置	V_p (m/s)	E_0 (GPa)
PDB1	致密玄武岩	PD11-67.5 m	5 164	21.1
PDB2	致密玄武岩	PD11-83.5 m	4 353	7.8
PDB3	致密玄武岩	PD13-75.8 m	5 143	20.7
PDB4	致密玄武岩	PD13-47.5 m	4 176	9.1
PDB5	致密玄武岩	PD11-15 m	3 543	5.7
PDB6	致密玄武岩	PD11-17.5 m	4 669	14.2
PDB7	致密玄武岩	PD11-18.2 m	4 304	10.2
PDB8	致密玄武岩	PD13-33 m	4 466	12.5
PDB9	致密玄武岩	PD13-40 m	4 737	13.1
PDB10	致密玄武岩	PD16-20 m	4 954	17.3
PDB11	致密玄武岩	PD16-33 m	5 379	25.8
PDB12	致密玄武岩	PD16-63 m	5 115	20.7
PDB13	致密玄武岩	PD23-46 m	2 028	2.0
PDB14	致密玄武岩	PD23-76 m	4 002	7.1
YBX2	致密玄武岩	右岸江边露头	4 366	8.8
YBX4	致密玄武岩	右岸江边露头	3 388	6.4
YBX5	致密玄武岩	右岸江边露头	3 857	7.6
ZBX2	致密玄武岩	左岸江边露头	2 888	4.7
PT1-1	致密玄武岩	右岸江边 1 号平台	5 256	23.8
PT1-2	致密玄武岩	右岸江边 1 号平台	4 585	15.6
PT1-3	致密玄武岩	右岸江边 1 号平台	4 703	11.0
PT2-1	致密玄武岩	右岸江边 2 号平台	4 974	15.5
PT2-2	致密玄武岩	右岸江边 2 号平台	4 868	18.5
PT2-3	致密玄武岩	右岸江边 2 号平台	4 105	13.1
PT3-3	致密玄武岩	右岸江边 3 号平台	4 496	9.8

系数为 0.922 1,相关性较好。

$$E_0 = 0.3876 e^{0.0008V_p}, R^2 = 0.9221. \quad (11)$$

3.4 龙开口水电站坝基玄武岩波速与变形模量关系

龙开口水电站坝址位于云南省鹤庆县中江乡境内的金沙江中游河段上,坝型为混凝土重力坝,坝高

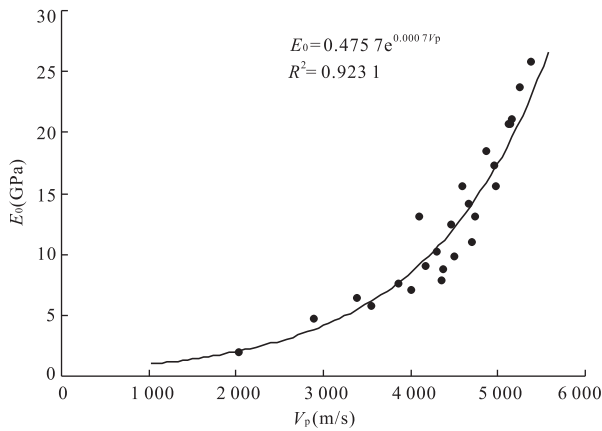


图 4 龙开口水电站坝基玄武岩体波速与变形模量关系
Fig. 4 Relation of wave velocity and deformation modulus of basalt in Longkaikou hydropower station

为 119 m, 正常蓄水位为 1 298 m, 总库容为 5.44 亿 m³, 装机容量为 1 800 MW, 工程规模为 I 等大(1)型。

坝址地形为宽阔河谷, 谷宽为 700~800 m, 左岸为坡度 20°~40°的斜坡, 局部存在陡崖; 右岸地形平缓, 坡度为 5°~20°, 分布 I~IV 级堆积阶地。坝址区断层规模较小, 破碎带宽度均在 1 m 以下, 断层走向主要为 NW-NWW 和 NE-NEE 向, 倾角较陡, 绝大多数大于 50°。坝址区地层岩性主要为二叠系上统致密玄武岩, 厚度大于 800 m。

在平洞和右岸江边试验平台一共布置 25 组变形模量试验, 进行变形模量试验之前对每个试验点进行波速同向测试, 变形模量与波速同向测试结果见表 4。

根据表 4 试验结果得到波速与变形模量相关曲线(图 4), 从图 4 中曲线可以得到龙开口水电站致密玄武岩波速与变形模量相关方程:

$$E_0 = 0.4757e^{0.0007V_p}, R^2 = 0.9231. \quad (12)$$

4 坝基玄武岩体波速与变形模量关系综合分析

前面对金沙江干流上 4 个(金安桥、白鹤滩、溪洛渡和龙开口)大型水电工程坝基玄武岩体波速与变形模量相关关系进行了试验分析。虽然这些水电工程坝基玄武岩既有单一类型, 也有多种类型, 并且所处地质环境条件也不尽相同。但是分析结果表明 4 个水电工程坝基玄武岩体变形模量与纵波波速具有较好的相关性, 相关系数均在 0.91 以上。

利用前面表 1~表 4 中试验和测试结果进一步分析不同类型玄武岩波速与变形模量关系。由于凝灰岩只有一组变形模量试验和波速测试, 不具备拟合分析条件。其余斑状玄武岩、角砾熔岩、绿泥石化玄武岩、杏仁玄武岩、隐晶玄武岩、致密玄武岩、柱状节理玄武岩 7 种类型玄武岩波速与变形模量的拟合关系见图 5, 相关方程如下:

$$\begin{aligned} \text{斑状玄武岩: } E_0 &= 0.5991e^{0.0007V_p}, \\ R^2 &= 0.8902. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{角砾熔岩: } E_0 &= 0.4600e^{0.0007V_p}, \\ R^2 &= 0.9459. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{绿泥石化玄武岩: } E_0 &= 0.8444e^{0.0006V_p}, \\ R^2 &= 0.9145. \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{杏仁玄武岩: } E_0 &= 0.1537e^{0.001V_p}, \\ R^2 &= 0.9694. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{隐晶玄武岩: } E_0 &= 0.9407e^{0.0006V_p}, \\ R^2 &= 0.8870. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{致密玄武岩: } E_0 &= 0.4051e^{0.0008V_p}, \\ R^2 &= 0.9204. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{柱状节理玄武岩: } E_0 &= 0.2934e^{0.0008V_p}, \\ R^2 &= 0.9578. \end{aligned} \quad (19)$$

根据式(13)~式(19)计算得到不同波速对应变形模量见表 5。从表 5 和图 5 可知:

(1)当波速小于 4 000 m/s 时, 相同波速条件下致密玄武岩体变形模量小于绿泥石化玄武岩, 这是因为绿泥石是玄武岩后期热液作用形成的蚀变矿物或热液中沉淀结晶的矿物, 主要分布在致密玄武岩的裂隙和缝隙中, 对裂隙和缝隙起到一定的粘结作用, 改善了绿泥石化玄武岩体结构(崔银祥, 2005)。

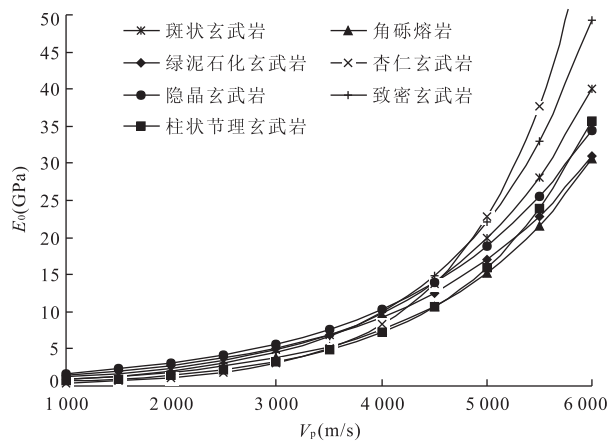


图 5 不同类型玄武岩体波速与变形模量关系
Fig. 5 Different basalt rock mass relation curve of wave velocity and deformation modulus

表 5 不同玄武岩体根据波速计算的变形模量

Table 5 Different basalt rock mass values of deformation modulus by different equations

V_p (m/s)	E (斑状玄武岩) (GPa)	E (角砾熔岩) (GPa)	E (绿泥石化玄武岩) (GPa)	E (杏仁玄武岩) (GPa)	E (隐晶玄武岩) (GPa)	E (致密玄武岩) (GPa)	E (柱状节理玄武岩) (GPa)	E_0 平均值 (GPa)
1 000	1.2	0.9	1.5	0.4	1.7	0.9	0.7	1.1
1 500	1.7	1.3	2.1	0.7	2.3	1.3	1.0	1.5
2 000	2.4	1.9	2.8	1.1	3.1	2.0	1.5	2.1
2 500	3.4	2.6	3.8	1.9	4.2	3.0	2.2	3.0
3 000	4.9	3.8	5.1	3.1	5.7	4.5	3.2	4.3
3 500	6.9	5.3	6.9	5.1	7.7	6.7	4.8	6.2
4 000	9.9	7.6	9.3	8.4	10.4	9.9	7.2	8.9
4 500	14.0	10.7	12.6	13.8	14.0	14.8	10.7	13.0
5 000	19.8	15.2	17.0	22.8	18.9	22.1	16.0	18.8
5 500	28.2	21.6	22.9	37.6	25.5	33.0	23.9	27.5
6 000	40.0	30.7	30.9	62.0	34.4	49.2	35.7	40.4

因此在低波速区间,相同波速条件下绿泥石化玄武岩体变形模量高于致密玄武岩体变形模量。

(2)当波速小于 4 500 m/s 时,相同波速计算得到不同类型玄武岩变形模量差别在 4 GPa 以下,比较接近。当波速大于 4 500 m/s 时,相同波速计算得到不同类型玄武岩变形模量值差距逐渐增大。这主要是由于玄武岩体自身的岩性和岩体结构特征不同。当波速较小时,玄武岩体变形模量主要由岩体中的裂隙密度和张开度决定,而在相同波速条件下,不同类型玄武岩体中的裂隙密度和张开度差别不大,因此得到的岩体变形模量差别也较小;当波速较大时,此时岩体中的裂隙基本闭合,玄武岩体变形模量由自身岩性特征决定,而不同玄武岩体自身岩性特征有一定差别,导致其变形模量也有一定的差别。

将表 1~表 4 中全部 132 个变形模量试验值与对应的波速同向测试值放入一个坐标系中分析,采用不同类型拟合关系经过多次拟合试验后得到的最优拟合曲线及方程见图 6。中间实线为全部 132 个点的拟合曲线,相关系数为 0.918 9;上下两条虚线分别为拟合变形模量的最大值和最小值,相关系数分别为 0.994 9 和 0.977 8。从图 6 中拟合结果可知,3 条曲线相关系数在 0.91 以上,相关性系较好。式(20)~式(22)分别为拟合关系的最大值、中间值、最小值相关方程:

$$\text{最大值: } E_0 = 0.7337e^{0.0007V_p}, \quad (20)$$

$$\text{中间值: } E_0 = 0.3298e^{0.0008V_p}, \quad (21)$$

$$\text{最小值: } E_0 = 0.2169e^{0.0008V_p}. \quad (22)$$

为进一步研究这一规律与已有研究成果之间的关系,分别利用式(20)~式(22)和式(6)、式(7)计算不同波速下的变形模量,将计算结果与表 5 中模量平均值进行对比分析,用以比较各种预测结果的差

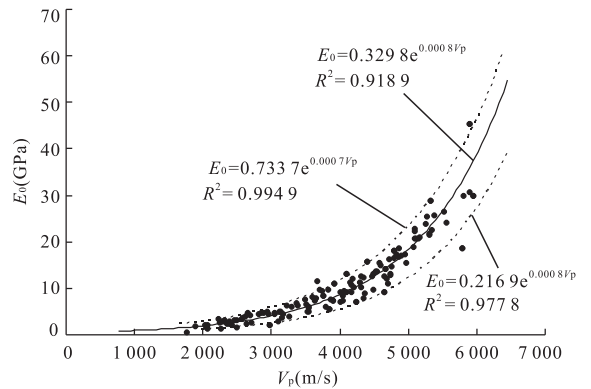


图 6 玄武岩波速与变形模量关系

Fig. 6 Basalt rock mass relation of wave velocity and deformation modulus

表 6 不同公式计算得到的玄武岩体变形模量

Table 6 Estimated deformation modulus values by different equations

V_p (m/s)	E_0 (GPa)					表 5 平均值
	式(6)	式(7)	式(20)	式(21)	式(22)	
1 000	1.47	0.01	1.48	0.73	0.48	1.1
1 500	2.15	0.07	2.10	1.09	0.72	1.5
2 000	3.16	0.28	2.98	1.63	1.07	2.1
2 500	4.64	0.81	4.22	2.44	1.60	3.0
3 000	6.81	1.95	5.99	3.64	2.39	4.3
3 500	10.00	4.09	8.50	5.42	3.57	6.2
4 000	14.68	7.76	12.07	8.09	5.32	8.9
4 500	21.54	13.66	17.12	12.07	7.94	13.0
5 000	31.62	22.65	24.30	18.01	11.84	18.8
5 500	46.42	35.79	34.48	26.86	17.67	27.5
6 000	68.13	54.34	48.93	40.07	26.36	40.4

异,从而说明各种估算方法的应用条件和限制。计算结果见表 6,从表 6 中结果可以得到以下几点结论:(1)当波速小于 3 500 m/s 时,式(7)估算的变形模量值明显偏低;(2)当波速小于 4 000 m/s 时,式(6)

(Barton, 2002)估算的变形模量与本文式(20)(变形模量预测公式最大值)接近;(3)当波速大于 4 000 m/s时,式(7)和式(20)预测值接近,而 Barton 公式预测值稍高;(4)式(21)(变形模量预测公式中间值)与表 5 中变形模量平均值非常接近;(5)式(22)(变形模量预测公式最小值)估算的变形模量明显偏低。

上述研究表明,不同估算公式对岩体变形模量随波速的变化具有相同的预测趋势,各公式预测结果既具有一致性,也存在一定的偏差,这主要是由于岩体介质不同造成的。式(6)样本来自不同类型岩体,式(7)样本来自花岗岩,而本文样本全部来自玄武岩。

综合上述分析,在大型水电工程坝基岩体变形模量预测时,基于工程安全考虑,选取式(21)(变形模量预测公式中间值)预测玄武岩体变形模量。该预测公式也应用于多个大型水电工程坝基玄武岩体变形模量预测分析,结果合理可靠。

5 结论

(1)根据波动微分方程,岩体纵波波速与岩体变形模量之间存在内在的正相关关系。

(2)无论是同一个水电工程坝基不同类型玄武岩体,还是不同水电工程同一类玄武岩体波速与模量之间均有较好的相关关系。

(3)当波速小于 4 500 m/s 时,不同类型玄武岩根据波速计算变形模量差别较小;当波速大于 4 500 m/s时,差别逐渐增加。

(4)对 4 个大型水电工程一共 132 组坝基玄武岩体变形模量试验结果与同向波速测试结果进行拟合分析,得到玄武岩体变形模量与波速拟合关系的最大值、中间值和最小值相关方程,并与已有研究成果进行对比分析。综合分析结果表明本文拟合的变形模量预测中间值公式具有较好的适用性和重要的工程参考价值,可以用于水电工程勘察阶段估算坝基玄武岩体变形模量。

本文建立的玄武岩体波速与变形模量相关关系是在有限数据(共 132 组)基础上建立的,今后随着试验测试数据的不断增加,还将对预测公式进行进一步修正、完善。

References

Barton, N., 2002. Some New Q-Value Correlations to Assist

in Site Characterization and Tunnel Design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (39):185—216.

Chun, B. S., Lee, Y. J., Seo, D. D., et al., 2006. Correlation of Deformation Modulus by PMT with RMR and Rock Mass Condition. *Tunneling and Underground Space Technology*, (21):231—232.

Cui, Y. X., 2005. Probability Evaluation of Cataclastic Rock Mass Used for High Concrete Dam Foundation (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu, 46 (in Chinese with English abstract).

Kayabasi, A., Gokceoglu, C., Ercanoglu, M., 2003. Estimating the Deformation Modulus of Rock Masses; A Comparative Study. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (40):55—63.

Kulatilako, P. H. S. W., Ucpirti, H., Wang, S., et al., 1992. Use of the Distinct Element Method to Perform Stress Analysis in Rock with Non-Persistent Joints and Study the Effect of Joint Geometry Parameters on the Strength and Deformability of Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 25(4):253—274.

Li, W. S., Huang, Z. P., Tan, X., 2010. Research and Application of Correlation between Deformation Modulus and Wave Velocity of Rock Mass in Hydroelectric Project. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(Suppl. 1):2727—2733 (in Chinese with English abstract).

Song, Y. H., Ju, G. H., Sun, M., 2011. Relationship between Wave Velocity and Deformation Modulus of Rock Masses. *Rock and Soil Mechanics*, 32(5):1507—1512, 1567 (in Chinese with English abstract).

The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China, 1999. SL228-98 Design Code for Concrete Face Rockfill Dams. China Water Power Press, Beijing (in Chinese).

The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China, 2001a. SL264-2001 Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Power Engineering. China Water Power Press, Beijing (in Chinese).

The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China, 2001b. SL274-2001 Design Code for Rolled Earth-Rock Fill Dams. China Water Power Press, Beijing (in Chinese).

The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China, 2005. SL319-2005 Design Specification for Concrete Gravity Dams. China Water Power Press, Beijing (in Chinese).

Wu, X. C., Wang, S. J., Ding, E. B., 1998. Relationship between Rock Mass Deformability Modulus and the

- Depth. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 17(5): 487—492 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. Y., Einstein, H. H., 2004. Using RQD to Estimate the Deformation Modulus of Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, (41): 337—341.
- Zhang, Y. H., Zhou, H. M., Wu, A. Q., et al., 2011. Statistical Analysis of Deformation Moduli of Rock Masses Based on Quality Classification. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(3): 486—492 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. R., Sheng, Q., Yang, Y. S., et al., 2010. Study of Size Effect of Rock Mass Deformation Modulus Based on In-Situ Test. *Rock and Soil Mechanics*, 31(9): 2875—2881 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. F., 2008. Research for Multi-Complicated Rock Mass as Gravity Dam Foundation Located in the Wide River-Bed with Deep Overburden Layer (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu, 65 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. F., Nie, D. X., Chen, J. M., 2010. A New Experimentation Method and an Example of Deformation Modulus for Deep Cracked Rock Mass. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(6): 1390—1394 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 崔银祥, 2005. 碎裂岩体用作高混凝土重力坝坝基的可能性评价(博士学位论文). 成都: 成都理工大学, 46.
- 李维树, 黄志鹏, 谭新, 2010. 水电工程岩体变形模量与波速相关性研究及应用. *岩石力学与工程学报*, 29(增刊1): 2727—2733.
- 宋彦辉, 巨广宏, 孙苗, 2011. 岩体波速与坝基岩体变形模量关系. *岩土力学*, 32(5): 1507—1512, 1567.
- 吴兴春, 王思敬, 丁恩保, 1998. 岩体变形模量随深度的变化关系. *岩石力学与工程学报*, 17(5): 487—492.
- 中华人民共和国行业标准编写组, 1999. SL228-98 混凝土面板堆石坝设计规范. 北京: 中国水利水电出版社.
- 中华人民共和国行业标准编写组, 2001a. SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程. 北京: 中国水利水电出版社.
- 中华人民共和国行业标准编写组, 2001b. SL274-2001 碾压式土石坝设计规范. 北京: 中国水利水电出版社.
- 中华人民共和国行业标准编写组, 2005. SL319-2005 混凝土重力坝设计规范. 北京: 中国水利水电出版社.
- 张宜虎, 周火明, 邬爱清, 等, 2011. 基于质量分级的岩体变形模量统计. *岩石力学与工程学报*, 30(3): 486—492.
- 张占荣, 盛谦, 杨艳霜, 等, 2010. 基于现场试验的岩体变形模量尺寸效应研究. *岩土力学*, 31(9): 2875—2881.
- 周洪福, 2008. 深覆盖宽河床多种复杂岩体作为重力坝建基岩体研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学, 65.
- 周洪福, 聂德新, 陈津民, 2010. 深部破碎岩体变形模量的一种新型试验方法及工程应用. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(6): 1390—1394.