

基于 P - R 相关性研究的岩石地基承载力优化取值

李维树^{1,2}, 黄志鹏^{1,2}, 周火明¹, 景 锋¹

(1.长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 2.长江科学院重庆岩基研究中心, 重庆 400014)

摘 要: 岩石地基承载力是建筑工程中一个重要的力学指标, 大多数建筑工程主要依据岩石饱和单轴抗压强度的标准值 R 确定, 重要建筑工程还需要通过岩体载荷试验的承载力特征值 P 确定, 那么两种方法必然存在一定的相关性。实践经验表明, 用 R 确定承载力的方法简单易行, 但 R 代表的是岩石材料的特性, 与工程岩体的情况有显然的不同, 而原位载荷试验是在半无限条件下进行的, 与工程实际条件更为接近, 因此, 用 P 确定地基承载力比用 R 要合理。在总结多达 43 点的岩体载荷试验及对应部位至少 3 组的单轴抗压强度对比试验成果与收集 248 组重庆地区岩石的三轴强度试验成果的基础上, 建立了 P - R 相关关系及围压条件下的强度特征。通过揭示它们之间的相关性, 提出采用岩石饱和单轴抗压强度标准值的 1.5 倍作为地基承载力特征值的重要结论, 为岩石地基承载力优化取值提供了重要依据。

关 键 词: 岩石地基承载力; P - R 相关性; 载荷试验; 饱和单轴抗压强度; 优化取值

中图分类号: TB 125

文献标识码: A

Optimization of bearing capacity of rock foundation based on study of relativity of P - R

LI Wei-shu^{1,2}, HUANG Zhi-peng^{1,2}, ZHOU Huo-ming¹, JING Feng¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics & Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Chongqing Rock Foundation Research Centre, Yangtze River Scientific Research Institute, Chongqing 400014, China)

Abstract: Bearing capacity of rock foundation is an important index in civil engineering. It is based on the uniaxial compression strength R of saturated rock for most civil engineering, and also based on the eigenvalue P of plate loading test for important engineering. Thus, the two methods must have some relativity. It is indicated in the practices that the R method is simple and easy for handling; but R represents characteristics of rock materials which is quite different from the condition of the engineering rock mass. Plate loading test is carried out under the semi-infinite condition; it is more close to the engineering practice. Therefore, the P method is more reasonable than the R method. This article establishes the relativity of P - R as well as the strength characteristics under surround compression on the basis of summarizing 43 plate loading tests results and three groups of uniaxial compression strength tests results on the same position, and collecting 248 groups of triaxial compression test results in Chongqing area. By demonstrating the relativity of P - R , the article brings forward an important conclusion of taking rock saturated uniaxial compressive strength of the standard value of 1.5 times the characteristic values as a foundation bearing capacity of the important conclusions, so as to provide an important reference for optimization of bearing capacity of rock foundation.

Key words: bearing capacity of rock foundation; relativity of P - R ; plate loading test; uniaxial compression strength of saturated rock; optimization

1 前 言

随着我国能源、交通及城市建设加速发展, 岩石地基承载力的确定是关系到工程安全和经济的重要因素之一。工程实践中常常面临岩体地基承载力不足的问题, 其主要原因是岩体中含有大量的节理、

裂隙, 导致岩体具有不连续性, 裂隙的存在对岩体的力学性能产生显著的影响^[1], 岩石和岩体的力学参数表现出很大的差异性。人们一般可通过常规的测试手段来认识岩石的强度特性, 通过岩块的物理力学性质试验研究岩石的材料力学性能, 通过现场试验了解工程岩体的力学性能, 再结合工程地质条

件等诸多因素综合评价岩体的力学参数。

文献[2]研究了软岩地基承载力取值方法,并提出即使考虑岩体的围压效应及嵌固效应也还未充分发挥软岩地基承载力的作用。文献[3]认为,人们对岩体固有特性的传统认识限制了岩质地基承载力理论的发展,致使岩基承载力的确定成为一个非常复杂的课题,研究工作远落后于工程实践,并提出岩质地基承载力应在考虑多种因素和破坏模式基础上结合数值计算综合确定。文献[4]认为,岩体地基强度受控于岩体的强度、场地地形、建筑物与岩体的尺寸关系、基础形状和尺寸、基础旁侧超载、场地地应力、地基变形、结构面的各向异性等诸多因素,所以,确定岩基承载力非常复杂,合理地确定岩基承载力,探讨完善的岩基承载力计算理论,对各种建筑物都非常必要。文献[5]从多元复合地基受力条件出发,研究了强度发挥系数和承载力修正系数对多元复合地基承载力的影响,阐述了多元复合地基承载力确定的 2 种方法,对工程设计具有重要意义。

有关规范^[6-7]中关于地基承载力设计值的确定主要以岩石的单轴抗压强度标准值为取值的依据。对于甲级建筑物,以原位承载力试验为取值依据,其他建筑物以单轴抗压强度标准值为准,并乘以折减系数作为最终的承载力指标,且岩石的单轴抗压强度至少要折减 1/2。高层及中高层建筑基础很难达到设计荷载的要求,因此甲乙类建筑桩基处理工程量,施工难度大,无形中工程造价也巨大。

实践经验表明,用岩石单轴抗压强度确定地基承载力的方法比采用原位载荷试验经济简单、容易操作,但岩石单轴抗压强度代表的是岩石材料的特性,与工程岩体的情况有显然的不同,而原位载荷试验是在半无限条件下进行的,与工程实际条件更为接近,因此,用原位载荷试验确定地基承载力比用岩石饱和单轴抗压强度要合理。由于工程的迫切性和重要程度及勘察阶段的不同,进行载荷试验的情况较少,往往是在通过单轴抗压强度确定的地基承载力无法满足工程要求时才进行少量的原位载荷试验,或者为了优化设计而进行原位试验。大多数工程是通过岩块的力学性质确定地基承载力,那么采用原位载荷试验确定岩体的承载力与采用岩石单轴饱和抗压强度确定的承载力之间有多大的差别呢?要回答这个问题必须进行大量的对比试验研究。

2 对比试验

在进行岩体载荷试验时,对载荷试验影响范围内的岩石取样进行饱和单轴抗压强度对比试验,以

寻求二者的相关关系。

2.1 试验方法

2.1.1 岩体原位载荷试验

岩体载荷试验一般在基础持力层岩体上进行,对于浅基础在基础开挖到位后进行,对于桩基础在桩端进行,提供反力的方式主要有堆载法,反锚法。在深井的桩端进行试验时,采用桩端上部岩土体作为反力时有大梁法、三角支撑法。岩体载荷试验一般采用直径为 300 mm 的圆形刚性承压板法,承压板四周 2~3 倍承压板直径范围内应大致平整,使试点近似满足半无限体条件。每个场地载荷试验的数量不少于 3 点,当地质条件复杂时,试验的数量不少于 6 点。根据试验结果绘制 P - S 曲线,并根据曲线形态确定各个阶段的特征值:比例极限 P_b 、屈服极限 P_q 和极限承载力 P_j 。典型曲线见图 1。

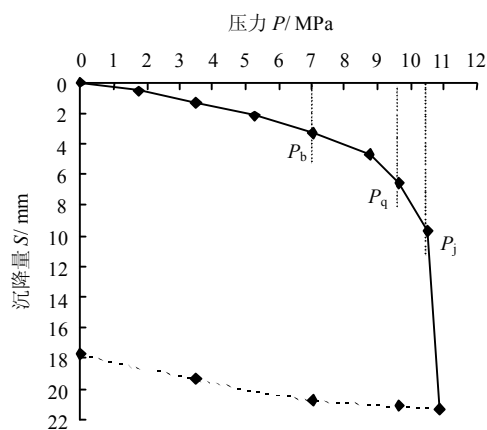


图 1 紫红色泥岩 P - S 关系曲线
Fig.1 P - S relation curve of magenta mudstone

2.1.2 岩块单轴抗压强度试验

在载荷试验点附近 1 m 直径范围内人工取样 1~2 组,送试验室加工成标准芯样进行饱和状态下的单轴抗压强度试验,根据规范要求确定岩石抗压强度标准值。

2.2 对比试验结果

收集了重庆地区 43 点对比试验数据。其中 22 点达到极限破坏,6 个点达到屈服界限点,15 点未达到极限破坏。在 22 点破坏试点中,有 6 个试点岩体为层状或者互层状结构,由于软硬相间或层间充填物影响,岩样难于代表层状或者互层状结构的强度特征,其单轴抗压强度高于极限承载力,这样的试点代表性不强。为了研究岩体和岩石强度之间的关系,选取承载力试点以下一定深度范围内岩体的性状基本一致,岩样具有代表性的试点作为研究的对象,对比试验结果见表 1。

表 1 对比试验成果表
Table 1 Results of comparative tests

岩性	比例界限值 P_b / MPa	极限承载力 P_j / MPa	饱和单轴抗压强度标准值 R / MPa	P_j / P_b	P_j / R	P_b / R	破坏特征
红紫色泥岩	5.13	6.41	2.30	1.25	2.79	2.23	破坏
红紫色泥岩	1.28	2.57	2.10	2.01	1.22	0.61	破坏
红紫色泥岩	1.92	2.89	2.10	1.51	1.38	0.91	破坏
红紫色泥岩	3.21	5.13	2.40	1.60	2.14	1.34	破坏
红紫色泥岩	7.02	10.52	3.33	1.50	3.16	2.11	破坏
页岩	3.55	5.78	4.00	1.63	1.45	0.89	破坏
页岩	2.22	4.10	3.70	1.85	1.11	0.60	破坏
页岩	3.11	5.34	2.10	1.72	2.54	1.48	破坏
泥岩	2.22	3.81	1.88	1.72	2.03	1.18	破坏
泥岩	2.66	4.00	2.45	1.50	1.63	1.09	破坏
泥岩	1.78	3.11	0.87	1.75	3.57	2.05	破坏
紫红色泥岩	18.00	24.40	13.06	1.36	1.87	1.38	破坏
泥质砂岩	18.00	28.30	12.50	1.57	2.26	1.44	破坏
砂岩	25.70	36.00	14.20	1.40	2.54	1.81	未破坏
泥质砂岩	36.00	43.70	19.20	1.21	2.28	1.88	破坏
砂岩	19.30	30.00	10.57	1.55	2.84	1.83	破坏
泥岩	6.40	7.10	3.53	1.11	2.01	1.81	破坏
砂质泥岩	19.19	>31.98	16.00	≥ 1.67	≥ 2.00	1.20	
砂质泥岩	25.58	≥ 31.98	17.30	≥ 1.25	≥ 1.85	1.48	未破坏
泥岩	13.30	>13.32	3.90	≥ 1.00	≥ 3.42	3.41	

3 相关关系

3.1 P_j - R 相关关系

极限承载力 P_j 与饱和单轴抗压强度标准值 R 之间经验关系见式 (1), 关系曲线见图 2。

$$P_j = 2.17R \quad (1)$$

式中: P_j 为极限承载力 (MPa); R 为岩石饱和单轴抗压强度标准值 (MPa)。

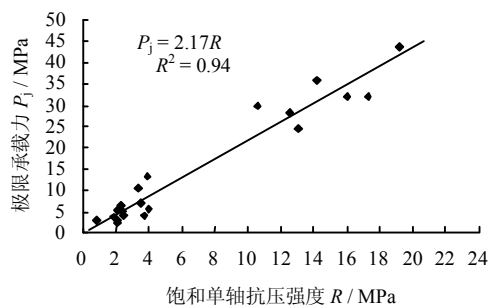


图 2 P_j - R 关系曲线
Fig.2 P_j - R relation curve

3.2 P_b - R 相关关系

比例界限值 P_b 与单轴饱和抗压强度标准值 R 之间的关系见式 (2), 关系曲线见图 3。

$$P_b = 1.58R \quad (2)$$

式中: P_b 为岩体极限承载力 (MPa)。

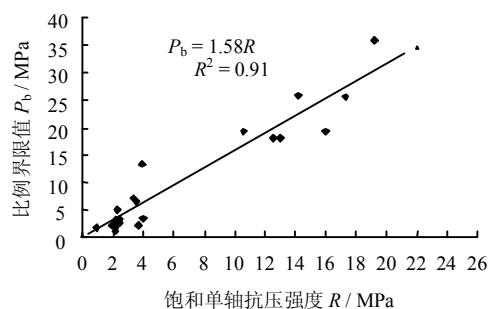


图 3 P_b - R 关系曲线
Fig.3 P_b - R relation curve

3.3 P_j - P_b 相关关系

极限承载力 P_j 与比例界限值 P_b 之间的关系见式 (3), 关系曲线见图 4。

$$P_j = 1.35P_b \quad (3)$$

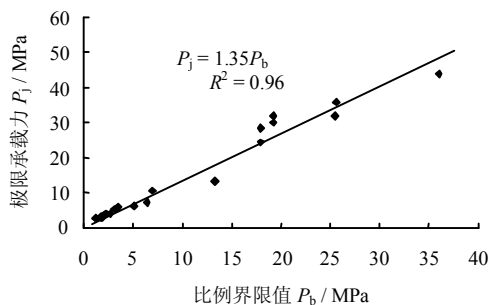


图 4 P_j - P_b 关系曲线
Fig.4 P_j - P_b relation curve

3.4 破坏机制分析

以上关系式说明, 对于基本均质的较坚硬~软质岩体, 其地基极限承载力是对应岩石饱和单轴抗压强度的 2.17 倍, 比例极限值是岩石饱和单轴抗压强度的 1.58 倍。这是因为二者的破坏机制和破坏准则不同, 岩石试块在无侧限的单轴压应力状态下拉伸破坏, 原位岩体在竖向向外载荷作用下受到一定的侧向约束而挤压破坏。作为建筑物基础的地基岩体受压后的破坏机制和破坏准则属于冲切和压碎性的滑动或上滑挤出破坏, 岩石试块在较低围压的三向应力状态下的破坏机制和破坏准则属于拉剪破坏。

除破坏机制不同外, 试验尺寸也有明显的差

别, 原位载荷试验的面积是试块断面面积的 3 600 倍。而桩基础一般直径为 0.8~1.5 m, 它又是载荷试验面积的 7~16 倍。可见, 原位载荷试验更接近工程实际情况。

4 围压状态下岩石的强度特征

对 248 组不同岩体在不同围压条件下的三轴强度试验结果进行统计分析 (见表 2)。每组试验在不同侧向围压下有对应的轴向破坏值, 以 18 组砂质泥岩为例, σ_1 - σ_3 关系曲线见图 5。 σ_1 - σ_3 之间符合直线方程, 直线斜率 A 在 3.75~8.01 之间, B 在 15.56~28.00 之间, 平均值 $A=5.73$, $B=22.08$ 。

表 2 岩石三轴试验统计成果
Table 2 Test results of rocks under triaxial compression

岩性	单轴抗压强度范围 / MPa	饱和单轴抗压强度 / MPa	围压范围 / MPa	A		B		备注
				范围	平均	范围	平均	
泥岩	$\sigma_c \leq 5.0$	4.07	0~4	2.70~4.46	3.68	2.82~6.30	4.40	$\sigma_1 = A\sigma_3 + B$
	$\sigma_c = 5.1 \sim 15.0$	11.49	0~6	3.49~7.77	4.85	8.26~14.74	11.70	
	$\sigma_c = 15.1 \sim 30.0$	23.52	0~8	3.89~9.43	5.83	18.08~24.08	23.95	
砂质泥岩	$\sigma_c = 5.1 \sim 15.0$	9.98	0~4	3.31~8.78	5.59	5.14~14.90	10.86	
	$\sigma_c = 15.1 \sim 30.0$	21.67	0~8	3.75~8.01	5.73	15.56~28.00	22.08	
	$\sigma_c = 30.1 \sim 60.0$	34.83	0~8	5.63~8.08	6.37	22.00~45.04	35.25	
泥质砂岩	$\sigma_c = 15.1 \sim 30.0$	22.12	0~4	9.95~18.13	12.36	14.96~30.50	21.84	
	$\sigma_c = 30.1 \sim 60.0$	37.48	0~8	5.35~10.16	6.97	22.00~69.44	38.73	
砂岩	$\sigma_c = 15.1 \sim 30.0$	24.26	0~8	5.19~9.78	6.94	22.66~29.60	25.62	
	$\sigma_c = 30.1 \sim 45.0$	39.02	0~8	5.23~9.75	7.42	30.48~58.00	40.71	
	$\sigma_c = 45.1 \sim 60.0$	52.61	0~8	6.62~9.13	7.70	42.50~62.00	54.33	
	$\sigma_c = 60.1 \sim 100.0$	73.84	0~12	6.58~12.50	7.99	63.66~73.46	74.89	
灰岩	$\sigma_c = 30.1 \sim 60.0$	46.55	0~12	4.23~10.88	7.79	43.18~62.96	48.59	
	$\sigma_c = 60.1 \sim 100.0$	75.05	0~12	3.82~10.62	8.10	64.58~131.94	78.81	

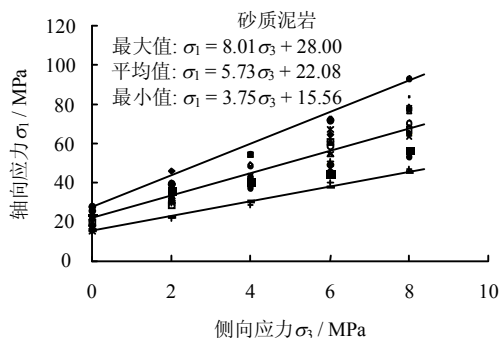


图 5 砂质泥岩三轴试验 σ_1 - σ_3 关系曲线

Fig.5 The σ_1 - σ_3 relation curves of triaxial compression test for sand-mudstone

表 2 的数据说明 2 个问题: (1) 在围压条件下, 岩石的饱和单轴抗压强度是围压的 3~10 倍; (2) A 值随着岩石的 R 值增大而增大, 并满足二阶函数关系: $A = -0.0009R^2 + 0.1263R + 3.6568$ 。 A - R 关

系曲线见图 6。当岩石饱和单轴抗压强度小于 50 MPa 时, 可以近似为一阶线性方程: $A = 0.083R + 4.034$ 。当岩石饱和单轴抗压强度 > 50 MPa 后, 可以近似为一阶线性方程: $A = 0.126R + 3.657$ 。表明岩石的围压系数与岩石的坚硬程度有关。

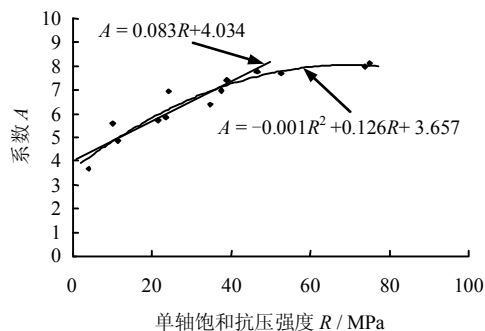


图 6 A - R 关系曲线

Fig.6 A - R relation curve

研究表明,岩石的抗压强度是岩石的基本物理性质,但作为建筑物基础的工程岩体是在半无限体条件,对于深埋基础还有嵌岩深度的约束效应,也就是说,任何地基都是在一定的侧向约束条件下工作的,这就是岩体载荷试验的承载力比单轴抗压强度高得多的主要原因,同时也说明用单轴抗压强度作为地基基础承载力的取值是十分保守的,有相当大的富余。

5 岩石地基承载力的优化取值

从岩体载荷试验与对应部位岩块单轴抗压强度对比试验结果说明,岩体的极限承载力是对应岩石饱和单轴抗压强度标准值值的 2.17 倍;岩体极限承载力是岩体比例界限值的 1.31 倍;岩体比例界限值是岩石饱和单轴抗压强度标准值值的 1.58 倍;岩石三轴试验说明,在围压状态下岩石的饱和和抗压强度至少可以提高 3 倍,则岩体极限承载力至少是岩石饱和单轴抗压强度标准值的 6 倍。若以载荷试验比例界限值作为地基承载力标准值,则承载力特征值至少是饱和单轴抗压强度标准值的 4~5 倍。

表 1 和式(2)还说明,对于饱和抗压强度标准值小于 5 MPa 的泥岩和 12~19 MPa 的砂岩, P_b/R 的统计平均值在 1.5~1.6 范围,二者差别不大。因此,用岩石饱和单轴抗压强度标准值确定地基承载力特征值时,应乘以 1.5 的系数。此结论是纯从对比试验结果而得,尚未考虑空间条件对修正系数的放大作用^[2,8]。

建筑地基基础设计规范^[7]中规定,当采用岩石单轴抗压强度确定岩石地基承载力特征值时,在岩石单轴抗压强度标准值基础上,根据岩体完整程度乘以 0.1~0.5 的折减系数,可见折扣太大;重庆市工程地质勘察规范^[9]吸取了本文一些对比研究成果并考虑地基的空间条件,在单轴抗压强度标准值基础上乘以地基条件系数,系数范围为:完整岩体取 1.6~1.2,较完整时取 1.2~0.85,较破碎时取 0.85~0.55,虽然比国家标准提高了很多,但对坚硬且完整岩体要求系数取 1.2 为宜,仍然没有充分发挥地基基础的贡献。

因此,本文提出岩石地基承载力特征值应在单轴饱和和抗压强度标准值基础上乘以 1.5 的系数,其本身还有相当大的安全裕度。下面的应用实例可以充分证明此结论。

6 应用实例

以某水电站^[10]坝基 O_{1d}^{1-3} 层微新页岩为例,可

行性研究阶段以岩石单轴抗压强度确定地基承载力。18 组 54 点岩石芯样饱和单轴抗压强度标准值为 12.7 MPa,按照工程地质评价为较完整岩体,取折减系数 0.30,按照国标取值原则地基承载力特征值为 3.8 MPa,不满足设计要求,随后进行了岩芯室内三轴试验,相关关系为 $\sigma_1 = 4.15\sigma_3 + 21.6$,根据围压效应进行修正,修正后的抗压强度标准值为 24.1 MPa,地基承载力特征值提高为 7.2 MPa,但仍然不满足设计要求。技施阶段对该地层岩体进行了 6 点原位载荷试验,试验最大压力达到 30.8~44.3 MPa 都未能使页岩破坏,承载力特征值取 6 点中比例界限的最小值为 20.5 MPa,且对应的沉降量小于 2 mm,满足建筑物对地基允许沉降要求。可见按载荷试验确定的承载力特征值是饱和单轴抗压强度的 1.61 倍,在原设计基础上提高了 5.4 倍。

又例:重庆市某超高层建筑^[11]为桩基础,桩端岩体为巨厚层~厚层中等风化泥岩、局部夹砂岩。泥岩天然单轴抗压强度标准值为 8.7 MPa,饱和单轴抗压强度标准值为 5.7 MPa。场地复杂程度和地基复杂程度等级均为二级,整体稳定性较好,初步设计阶段确定的地基承载力为 2.31 MPa。为了优化设计,进行了 3 点桩端原位载荷试验,极限承载力分别为 19.49、27.74 MPa 和 28.11 MPa,3 个点比例界限值的最小值为 9 MPa,相当于饱和单轴抗压强度的 1.58 倍,且对应的最大测降量小于 3 mm,可见,通过载荷试验,地基岩体承载力特征值在原设计基础上提高了 3.9 倍。

7 结 语

通过大量的对比试验研究,揭示了岩石单轴抗压强度与岩体承载力之间的关系,提出采用岩石的饱和单轴抗压强度标准值的 1.5 倍作为地基基础承载力特征值,从而大大优化了岩石地基承载特征值的取值,对于今后国标和地标的修编工作具有一定的指导意义。

本文提出用岩石的饱和单轴抗压强度标准值作为地基基础承载力特征值的观点适用于地基岩体较完整、不存在明显的地质缺陷、且在无条件进行原位载荷试验的情况,对于极软岩或者层理裂隙发育而不能成样的情况仍应以原位载荷试验结果为取值依据。用原位载荷试验确定地基基础承载力是直观可靠的方法,不能因为本文的观点而否定原位载荷试验的重要性和必要性。

参考文献

- [1] 周小平, 张永兴. 节理岩体地基极限承载力研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1254—1258.
ZHOU Xiao-ping, ZHANG Yong-xing. Research on ultimate load bearing capacity of foundation of jointed rock masses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1254—1258.
- [2] 何沛田, 黄志鹏, 邬爱清. 确定软岩岩体承载能力方法探讨[J]. 地下空间, 2004, 24(1): 89—93.
HE Pei-Tian, HUANG Zhi-peng WU Ai-Qing. Study on estimation of bearing capacity of soft rock body[J]. **Underground Space**, 2004, 24(1): 89—93.
- [3] 叶海林, 方玉树, 顾宏伟. 岩石地基承载力确定方法评述[J]. 后勤工程学院学报, 2007, 23(3): 1—6.
YE Hai-lin, FANG Yu-shu, GU Hong-wei. Discussion on the methods determining bearing capacity of rock foundation[J]. **Journal of Logistical Engineering University**, 2007, 23(3): 1—6.
- [4] 李培勇, 杨庆, 栾茂田. Hoek-Brown 岩石破坏经验判据确定岩石地基承载力的修正[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 664—666.
LI Pei-yong, YANG Qing, LUAN Mao-tian. Modification of formula estimating ultimate bearing capacity of rock foundation based on Hoek-Brown strength criterion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 664—666.
- [5] 尚新生, 林银飞, 谢定义. 多元复合地基承载力的确定方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(3): 75—77.
SHANG Xin-sheng, LIN Yin-fei, XIE Ding-yi. Discussion about confirming the capacity of multi-element composite foundation[J]. **Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power**, 2007, 28(3): 75—77.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] 中华人民共和国建设部. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 方玉树, 黄家愉. 重庆地区地基承载力的确定[J]. 城市建设与管理, 40(2): 51—53.
FANG Yu-Shu, HUAN Jia-Yu. Determination of the ground bearing capacity in Chongqing[J]. **Urban construction and management**, 40(2): 51—53.
- [9] 重庆市建设委员会. DBJ—50—043—2005 重庆市工程地质勘察规范[S]. 重庆: 重庆市建设委员会, 2005.
- [10] 李维树, 乐俊义, 谭新. 重庆乌江银盘水电站杨家沱坝址可研阶段岩石力学性质试验研究综合报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2005.
- [11] 李维树. 重庆中央温泉大酒店岩石地基载荷试验报告[R]. 重庆: 长江科学院, 2008.