

沈毅. 地震作用下岩溶加固地基抗震构造评估模型分析[J]. 华南地震, 2020, 40(1): 100–104. [SHEN Yi. Analysis of Seismic Structure Evaluation Model of Karst Reinforced Foundation under Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(1): 100–104]

地震作用下岩溶加固地基抗震构造评估模型分析

沈 毅

(浙江建设职业技术学院, 杭州 311231)

摘要: 针对当前在地震作用下岩溶加固地基抗震构造的评估模型评估范围不全面, 导致评估结果准确性低下的问题, 提出地震作用下岩溶加固地基抗震构造评估模型分析。采用莫尔—库仑理论, 根据岩溶塌陷地质形成因素, 计算岩溶顶板安全厚度的极限承载能力, 分析岩溶顶板稳定性, 由岩溶顶板抛物线拱力学模型, 计算压力拱高度变化取值, 完成岩溶顶板注浆加固机理研究, 分析地震作用下的抗震构造可靠性, 建立岩溶加固地基抗震构造评估模型。实验结果表明, 所设计的地震作用下岩溶加固地基抗震构造评估模型, 与传统相比所得到的评估范围更加广泛, 使评估结果更加精准。由此可见, 此模型更有效。

关键词: 地震; 岩溶地基; 地基加固; 抗震构造; 模型评估

中图分类号: TU470 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2020)01-0100-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.01.015

Analysis of Seismic Structure Evaluation Model of Karst Reinforced Foundation under Earthquake

SHEN Yi

(Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

Abstract: Aiming at the problem that the seismic structure evaluation model of karst reinforcement foundation under earthquake is not comprehensive and the accuracy of evaluation result is low, this paper puts forward the seismic structure evaluation model of karst reinforcement foundation under earthquake. Using the mohr-coulomb theory and according to the geological formation of karst collapse factors, the paper calculates the ultimate bearing capacity of roof karst with the safe thickness, analyzes the karst roof stability, calculates value of the pressure arch height change basing the karst parabolic arch roof mechanics model, completes the karst roof grouting reinforcement mechanism research, analyzes the seismic structural reliability under earthquake, and establishes the model of the karst foundation aseismic structure reinforcement. The experimental results show that compared with the traditional evaluation model, the designed evaluation model for the seismic structure of karst reinforced foundation is more extensive, which makes the evaluation result more accurate. Thus, this model is more effective.

Keywords: The earthquake; Karst foundation; Foundation reinforcement; Seismic structure; Model evaluation

收稿日期: 2019-03-26

作者简介: 沈 毅(1968-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事建筑结构、地基基础研究。

E-mail: shenyi0066@163.com.

0 引言

岩溶地质是众多地质形态当中较为特殊的一种,该地区的地貌,是由经过长年侵蚀的岩石所演变形成的。岩溶本身的强度较高,且极具稳定性,因此能够作为建筑物的地基所使用的^[1-2]。但由于其形态及规模,会随着时间的推移而缓慢变化,为此需要注意建筑物的使用期限,分析岩溶的溶蚀作用,以及其作用对建筑工程的影响。由于岩溶地质形态存在裂隙,溶蚀等问题,使建筑地基的设计施工存在一定的难度,无法保障建筑的抗震性能与建筑的安全性能,使人们的人身安全与财产安全受到威胁,为此分析岩溶上部结构的变化规律,研究其基础设计以及地基加固的可行性。地震所带来的灾害以及次生灾害,对人们安全的威胁以及日常生活的影响都是十分严重的。随着高层建筑结构的日益发展,其结构设计以及地基的搭建方法也逐渐有所变化,需要协调地基与上层建筑之间的稳定性能,满足两者之间的平衡^[3-4]。为此研究高层建筑在地震作用下,结构与地基之间的相互作用情况。为了减小地震发生时所产生的影响,需要加固建筑地基,增强建筑的抗震性能^[5]。

1 地震作用下岩溶加固地基抗震构造评估模型

分析岩溶塌陷地质形成的影响因素,计算岩溶顶板稳定性,根据莫尔—库仑破坏准则,研究岩溶顶板注浆加固机理,建立地震作用下岩溶加固地基抗震构造评估模型。

1.1 地震作用下的岩溶顶板稳定性分析

为了准确分析岩溶顶板的稳定性,首先需要得出岩溶塌陷地质形成的影响因素。由于地下水位变化以及岩溶覆盖层的类型所影响,导致地震作用下的岩溶地基塌陷,地基层的透水程度有所差异,形成的岩溶塌陷地质概化模型,具体情况如表1所示。

由表1可知,若覆盖层为黏土阻水层,则地下水位在覆盖层中,虽然能够避免产生渗流的情况,但会引起潜蚀作用,使覆盖层软化,导致土洞的产生^[6-7]。受真空吸蚀效应的影响,土洞得以迅速扩大,并且无法继续支撑上部载荷,使土层下沉,岩溶塌陷,溶沟被坍塌物所填充,直至上

部载荷能够得到支撑,最终导致该地基塌陷。在岩溶顶板发生塌陷之前,处于破碎状态的顶板将会处于一种如下图所示的平衡状态。岩溶顶板破裂后一旦发生塌陷,则会产生破裂拱,为了承受上部坍塌岩土的重量,破裂拱自身具有一定的厚度^[8]。采用莫尔—库仑理论分析岩溶顶板安全厚度的极限承载能力,具体情况如图1所示。

表1 岩溶塌陷地质概化表

Table 1 Generalized table of karst collapse geology			
模型分类	水位/m	塌陷主要原因	构成情况
阻-透水型	≥15	渗流液化	黏土、杂填土、全风化砂岩
单一阻水型	7~10	潜蚀致塌	黏土
单一透水型	10~15	水力及重力压差场潜蚀致塌	风化砂岩、风化粉砂岩

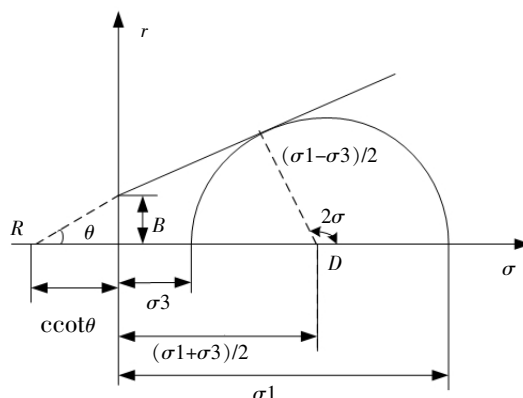


图1 莫尔—库仑包络图

Fig.1 Mol-coulomb envelope diagram

如图1所示,当地下水压力较小时,包络曲线以直线形式表达,该直线方程表达式如下:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \theta \quad (1)$$

其中 f 为屈服面函数, τ_f 为所受的切向应力, c 为凝聚力, σ 为所受的法向应力, θ 为图中所示的内摩擦角。

当岩土的状态处于难以支撑的极限时,由图1可得,其极限平衡条件如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \theta}{1 - \sin \theta} + 2c \frac{\cos \theta}{1 - \sin \theta} \quad (2)$$

或

$$\sigma_3 = \sigma_1 \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} - 2c \frac{\cos \theta}{1 - \sin \theta} \quad (3)$$

其中 σ 为所受的法向应力, c 为凝聚力, θ 为图中所示的内摩擦角。

将公式(2)与公式(3)合并简化,得到:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \sin \theta + c \cos \theta \quad (4)$$

所得公式(4)为莫尔-库仑破坏准则式。

在满足应力空间中 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 的前提下, 所得出的莫尔-库仑准则式则以下述方式表示:

$$F \left[\begin{array}{c} \frac{1}{3} L_1 \sin \theta \\ (\cos \beta_\sigma + \frac{\sin \beta_\sigma \sin \theta}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2} + c \cos \theta) \end{array} \right] \quad (5)$$

其中 L_1 表示应力张量第一应力不变量, J_2 表示应力偏张量第二应力不变量, β_σ 表示应力偏张量第三应力不变量, F 为所受力。

上式所表达的屈服函数式在应力空间中, 以不规则六角形的形式表示。法向受到压力过程中所产生的摩擦力增大, 导致抗剪强度随之增大, 但三轴压缩与拉伸两者之间强度不同, 使得屈服轨迹岩坐标轴的正负无法对称^[9], 则所形成的六边形为不规则形状。至此完成岩溶顶板的稳定性分析, 并在此基础上研究其注浆加固机理。

1.2 岩溶顶板注浆加固机理研究

为了使地震作用下的地基牢固程度有所保障, 对岩溶顶板节理切割, 具体情况如图 2 所示。

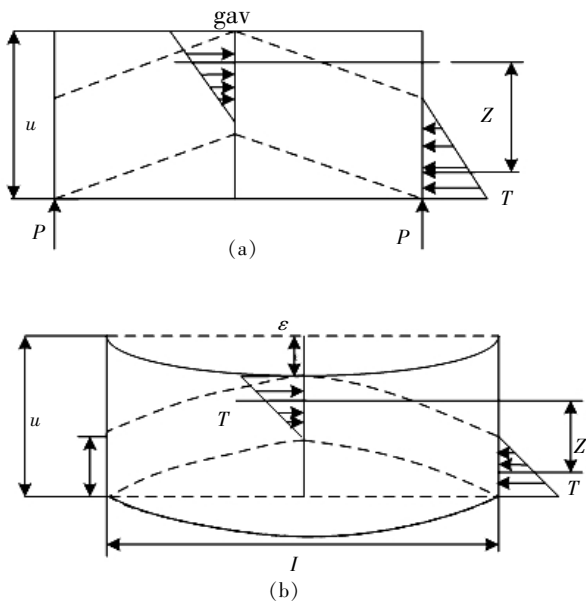


图 2 岩溶顶板抛物线拱力学模型

Fig.2 The parabolic arch mechanics model of karst roof

由图 2 可以得到, 图(a)为岩溶顶板变形弯曲之前状态, 图(b)为岩溶顶板变形弯曲后的状态。岩溶顶板由于横向挤压力以及下部支撑阻力的共同影响, 使其裂缝的宽度保持在一定范围内, 无法使持续扩张, 为此在其塌陷之前能够始终保持抛物线压力拱的状态下, 保持其压力平衡。岩溶顶板在上覆荷载以及顶板自重的作用下产生一定

的挠曲变形^[10-11], 通过计算可以得出具体为:

$$y = \frac{\delta}{2} (1 - \cos \frac{2\pi x}{l'}) \quad (6)$$

其中 l' 为梁跨度, 单位为 m, δ 为最大弯曲挠度, 其他变量见图 2 中标识。

当公式(6)满足条件 $x=0$, $y=0$, $x=l'$ 时, 则拱推力线的长度计算公式如下:

$$L = \frac{l'}{2} \sqrt{1 + \frac{4z}{l'}} + \frac{l'^2}{8z} \ln \left(\frac{4z}{l'} + \sqrt{1 + \left(\frac{4z}{l'} \right)^2} \right) \quad (7)$$

其中 z 为压力拱高度, 单位为 m, t 为梁高度, 单位为 m, nt 为拱压力的作用高度, 且必须满足, $\left(\frac{l'}{2} \right)^2 = 4\epsilon z$, $z = t - \delta - \frac{2nt}{3}$ 其他变量见图 2 中标识。

通过上述公式计算, 能够得到拱推力线经过压缩变形后, 转化为:

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 \quad (8)$$

$$\text{且必须满足 } \Delta L_1 = \sum_i \frac{f_{av}}{E_i} j_i, \Delta L_2 = \frac{f_{av}}{E_c} (u - \Delta L_1)。$$

其中 j_i 为第 i 个岩体断裂缝隙的张度, E_i 为第 i 个岩体断裂缝隙的法向刚度, E_c 为岩溶顶板的压缩模量, f_{av} 为平均水平推力, 单位为 N/m, u 为岩溶顶板的横向压缩变形量。

将公式(7)微分变形, 计算得出拱高度的变化取值如下所示:

$$\Delta z = \frac{\Delta L z^3}{\left[\frac{l'^2}{8} \ln \left(\frac{4z}{l'} + \sqrt{1 + \left(\frac{4z}{l'} \right)^2} \right) - \frac{8z^3}{\sqrt{l'^2 + (4z)^2}} \Delta L z \right]} \quad (9)$$

其中必须满足 $\Delta L = \frac{uf_{av}}{E_c}$, 式中 f_{av} 为平均水平推力, 单位为 N/m, E_c 为岩溶顶板的压缩模量, 其他变量定义见图 2 中标识。

通过上述计算能够得到, 岩体断裂缝隙被注浆充填后, 岩溶顶板的压力拱高变化量将得以缩小。与此同时压力拱推力变形线压缩变形量, 也将在力的作用下被迫缩小, 则有利于岩溶顶板稳定型的维护, 保证了地震作用下, 岩溶地基的抗震构造有效性^[12-13]。

1.3 地震作用下岩溶加固地基抗震构造评估模型

地震作用下, 岩溶加固地基抗震构造的可靠性, 需要根据实际建筑工程的施工情况, 考虑各项干扰因素, 使用近似法, 简化计算情况以及计算量^[14-15]。在简化计算的前提下, 为保证计算结果的准确度, 假设地基构造的结构抗力, 以及作用效应皆服从正态函数分布, 得出功能函数, 若功

能函数同时服从正态函数分布, 则:

$$\begin{cases} \mu_Z = \mu_R - \mu_S \\ \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \end{cases} \quad (10)$$

其中 R 为地基构造的结构抗力, S 为作用效应, μ_R 为结构抗力均值, μ_S 为作用效应均值, σ_R 为结构抗力标准差, σ_S 为作用效应标准差, 将其整合后分别表示为 $N(\mu_R, \sigma_R)$ 以及 $N(\mu_S, \sigma_S)$, 且功能函数 $Z=R-S$ 。从而进一步得出失效概率如下:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}\right] dz \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2P\sigma_R\sigma_S}} \quad (11)$$

其中 P_f 为失效概率, f 为屈服面函数, d 为距离长度, Z 为功能函数。

将式中功能函数 Z 的分布 $N(\mu_Z, \sigma_Z)$ 转换为正态函数标准分布形式 $N(0, 1)$, 且满足标准化随机变量 t ($\mu_t=0, \sigma_t=1$)。并以此得出:

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (12)$$

式中变量定义与上式相同, 且由此能够得出, 地震作用下的岩溶加固地基抗震构造的可靠性评估如下:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2P\sigma_R\sigma_S}} \quad (13)$$

其中 μ_R 为结构抗力均值, σ_R 为结构抗力标准差, μ_S 为作用效应均值, σ_S 为作用效应标准差, P 为抗力与荷载的相关系数, μ_Z 为结构抗力的功能函数, σ_Z 为作用效应的功能函数。

由上述计算得到, 当失效概率减小时, 可靠概率 β 将会增大, 根据结构抗力的函数式引入极限方程, 采用多个评估模式分析抗震构造的结构抗力, 计算出结构的可靠性, 完成地震作用下岩溶加固地基的抗震构造评估模型。

2 实验论证分析

为了保证所提出的地震作用下岩溶加固地基抗震构造评估模型的有效性以及可实施性。将原有的传统抗震构造评估模型, 与其对照分析, 将两者的评估范围与评估结果相比较, 检验其评估准确度, 完成对照试验。

2.1 实验准备

该实验采用 SeismoArtif 地震波模拟软件, 基

于真实的频谱匹配技术, 采用不同的计算方法和各种假设地震加速记录, 模拟地震发生环境。并利用地震模拟振动台, 将地震波再现, 模拟地震过程, 从而研究岩溶加固地基构造的抗震性能, 地震模拟振动台具体实物图如图 3。

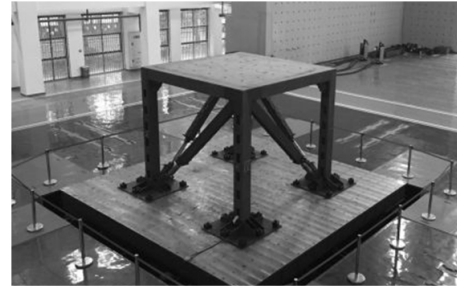


图 3 地震模拟振动台实物图

Fig.3 Physical map of seismic simulation table

为保障本次实验的严谨性, 选取相同地区相同施工方式的建筑地基完成模拟实验。采用所设计的抗震构造评估模型与传统评估模型, 分别对该建筑在地震作用下的岩溶加固地基抗震构造进行模拟评估, 并对比其两者的评估范围, 从而检验其评估准确度。

2.2 实验过程

采用 SeismoArtif 地震波模拟软件, 模拟地震过程, 利用所设计模型, 与传统评估模型, 同时评估分析, 记录评估结果, 具体操作界面如图 4。

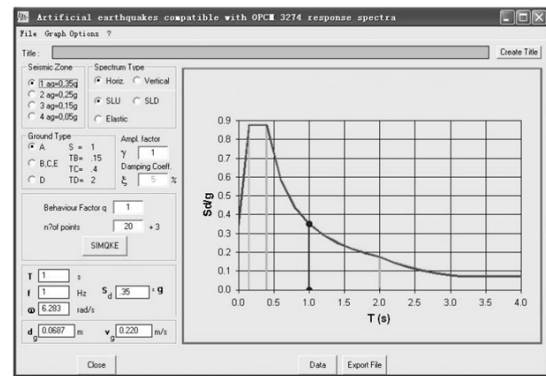


图 4 SeismoArtif 操作界面

Fig.4 SeismoArtif operation interface

利用 SeismoArtif 软件设定相关操作数据, 标定参数, 根据软件模拟, 得到传统评估结果与所设计评估模型所得的评估结果, 对比两种评估模型的评估范围, 完成对照试验。

2.3 实验结果

将所设计抗震构造评估模型的评估范围, 与传统模型对比, 为保证所得结果的准确性与严谨性, 在实验期间反复对比分析, 完成了多次模拟,

最终得到结果如图 5、6 所示:

通过 SeismoArtif 软件模拟所得的抗震构造评估范围对比可知, 传统评估模型所得到的评估范围较小, 岩溶加固地基的透水性与压缩模量无法被准确测量, 导致无法对岩溶加固地基的抗震构造进行全方面的评估, 使评估结果与实际情况有所差异。而文中所设计的评估模型能够弥补这一

造评估模型研究。设计一种新型岩溶加固地基抗震构造评估模型, 岩溶区由于其复杂的地质条件, 采用普通的构造评估模型无法对其进行详细的研究。因而, 设计新型构造评估模型, 使构造评估过程简单易处理。在此次模型设计中, 使用大量的数据提升模型评估的精度。对其加固机理与稳定性进行分析, 与模型中的计算部分相结合, 能够有效解决传统模型评估精度较低的问题。设计对比实验, 由实验结果可知, 所设计的评估模型相较于传统评估模型, 评估范围更广泛, 评估准确性更高。因而, 所设计的评估模型使用效果更加优越。将其应用于地震作用下, 岩溶加固地基抗震构造评估研究中, 为该研究提供相应的理论依据。

参考文献:

- [1] 李宁, 吕恒林. 苏北新沂市重点设防类建筑抗震性能排查及防灾能力分析[J]. 苏州科技大学学报: 工程技术版, 2017, 16(30): 91.
- [2] 彭祖武, 杨帆, 尹欧, 等. 涟源市七甲村岩溶塌陷形成条件与机理分析[J]. 华南地质与矿产, 2017, 33(2): 177-186.
- [3] 李建中, 管仲国. 桥梁抗震设计理论发展: 从结构抗震减震到震后可恢复设计[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 1-9.
- [4] 吕西林, 全柳萌, 蒋欢军. 从 16 届世界地震工程大会看可恢复功能抗震结构研究趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(03): 001-9.
- [5] 岳衍. 高层建筑工程中厚板转换层及抗震结构设计的探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017, 18(27): 160-161.
- [6] 陈伟平. 浅淡施工中钢筋砼框架结构抗震有足够延性构造的重要性[J]. 江西建材, 2017, 24(18): 107-107.
- [7] 隋传毅, 高波, 申玉生, 等. 穿越断层隧道抗震结构性能振动台试验分析[J]. 铁道学报, 2017, 39(11): 124-130.
- [8] 郑山锁, 丁明松, 郑捷, 等. 基于多元线性回归方法的砌体结构加固费用估算模型研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 6-13.
- [9] 李盼盼, 王家鼎, 谷天峰, 等. 强夯振动加速度的量测及现场试验研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 166-170.
- [10] 黎亚生, 洪振国. 基于强岩溶地区的水库库底土工膜防渗地基加固技术研究[J]. 中州煤炭, 2017, 39(7): 34-38.
- [11] 胡爱珍, 孙元平. 浅埋偏压岩溶隧道坍塌体开挖及加固技术——以罗仙关 2 号隧道为例 [J]. 工业技术创新, 2017, 18(2): 89-93.
- [12] 张健, 李术才, 张乾青, 等. 覆盖型岩溶地基注浆处理与效果检测分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 167-173.
- [13] 陶景晖, 金如元, 陆飞, 等. 岩溶地区高层建筑刚性桩复合地基现场试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 163-174.
- [14] 高伟, 赵前进, 刘永胜. 岩溶富水区铁路隧道加厚底板结构施工力学行为研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(5): 757-763.
- [15] 陈引锋, 马长玲, 魏奥林. 注浆加固法在治理煤矿岩溶陷落柱的应用[J]. 西部探矿工程, 2018, 26(4): 142-144.

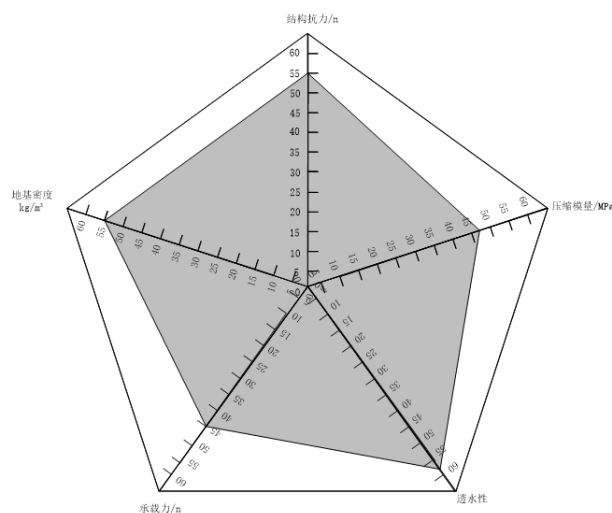


图 5 文中设计评估模型评估范围

Fig.5 The evaluation scope of evaluation model designed in

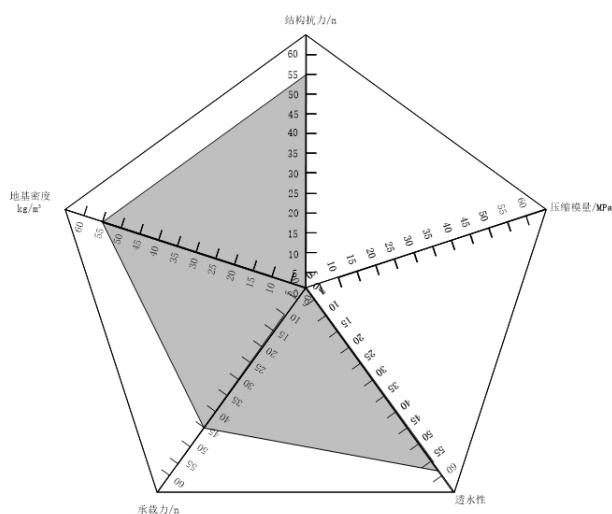


图 6 传统评估模型评估范围

Fig.6 The evaluation scope of traditional evaluation models

缺陷, 评估范围较广, 能够完整评估其构造的抗震效果。能够证实该评估模型与传统模型相比较, 其评估范围更加广泛, 从而保证了评估模型的准确性。

3 结语

在以往的研究中发现, 过去的几十年里岩溶地区工程时常出现岩溶顶失稳的工程事故, 为避免这一事件的发生, 提出岩溶加固地基抗震构