

基于 FMEA 的土层锚杆病害预测分析

汪班桥^{1,2}, 门玉明^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部岩土工程开放实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:通过设定土层锚杆的 FMEA 评定标准:故障严重度评价标准、故障频度评价标准、故障探测度评价标准,建立了土层锚杆支护体系的 FMEA 分析表,得出系统存在的各种失效模式,并指出了各种失效模式的责任部门。对土层锚杆的 RPN 值进行分析,预测出了土层锚杆的四种高风险病害:土层与注浆体之间的剪切破坏、注浆体与筋体之间的剪切破坏、锚杆拉出破坏、锚杆直接破坏。并获知:土层锚杆的高风险病害主要集中在锚固段,且施工部门的责任比例较大,对这一部位,不仅应加强设计,而且应强化其施工管理。

关键词:土层锚杆;失效模式;影响分析;风险顺序数;高风险病害

中图分类号: TU94⁺2; X947

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)02-0228-05

土层锚杆支护结构作为一个整体系统,其各个组成部分在使用过程中会发生各种各样不同的病害,病害的类型不同、发生的部位不同,对土层锚杆锚固性能的影响也就不同^[1]。要保证土层锚杆的可靠性,最好的方法便是预防病害。如何在土层锚杆的系统设计审查时,找出整个锚杆系统中的薄弱环节和潜在缺陷^[2],就显得尤为重要。

目前,国内外对土层锚杆病害的研究主要是从力学机理的角度着眼,从定性的角度分析,没有定量化的数据作为依据,大多只是提出锚杆的破坏形式^[3]。对各种破坏模式的风险顺序及锚杆各段杆体的病害频度没有涉及。

失效模式与影响分析(FMEA, Failure Models and Effect Analysis)作为可靠性工程领域的基本工具,是一种用来确定潜在失效模式及其效果的分析方法^[4-5]。它的核心是对失效从严重度 S(Severity)、频度 O(Occurrence)和探测度 D(Detection) 3 个维度评估风险^[6-7],通过量化指标确定风险的失效模式及关键失效起因,并制定预防措施加以控制,从而将风险减少到可接受的水平。

本文利用 FMEA 对土层锚杆可能出现的病害类型进行分析,预测土层锚杆设计、施工过程中最易发生病害的位置及病害类型,明确哪些故障模式对土层锚杆支护系统的安全性、稳定性有影响,其分析结果不仅可以为其设计、综合安全评价等工作提供信息,还可为土层锚杆使用过程的安全检测工作提供参考依据。

1 失效模式与影响分析(FMEA)

FMEA 是一种预防性的可靠性分析技术。它是使用结构化的系统程序方法,及早发现产品潜在的失效模式,探讨其失效原因及失效发生后对上一层分系统、次系统和系统所造成的影响,并采取适当的预防措施和改进方案。该方法实际上是 FMA(失效模式分析)和 FEA(失效影响分析)的组合。在设计 and 运行系统时,通常有 3 道控制缺陷的防线:避免或消除失效起因、预先确定或检测失效、减少失效的影响和后果。FMEA 正是从第一道防线就将缺陷消除在摇篮之中的有效工具。它对各种可能的风险进行评价、分析,以便在现有技术的基础上消除风险或将风险减小到可接受的水平,提高系统过程的可靠性,降低后期进行弥补改善的成本^[5-6]。FMEA 分析的流程如图 1 所示。

收稿日期:2011-11-08 修改稿日期:2013-03-19

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41102177);国家中央高校基本科研业务费专项(CHD2011JC181);长安大学基础研究支持计划专项基金资助;国土资源部岩土工程开放实验室资助。

作者简介:汪班桥(1977-),女,陕西临潼人,讲师,现从事地质工程、安全工程学的教学与科研工作。

2 土层锚杆支护体系失效模式与影响分析

2.1 土层锚杆的系统功能框图

土层锚杆支护系统由锚头及垫块、锚杆杆体和土体三部分组成^[1-2,8-9]. 依照这三个组成部分之间荷载的传递过程, 绘制其功能框图, 如图 2 所示.

2.2 土层锚杆 FMEA 评定标准设定

2.2.1 土层锚杆的严重度

土层锚杆的严重度是指土层锚杆的故障模式对土层锚杆功能的影响程度. 严重度是单一的 FMEA 范围内的相对定级结果, 如表 1 所示.

2.2.2 土层锚杆的频度

土层锚杆的频度是指土层锚杆可能出现的故障模式在设计寿命内出现的可能性, 如表 2 所示.

2.2.3 土层锚杆的探测度

土层锚杆的探测度是指土层锚杆在开始使用之前, 探测潜在失效原因能力及可发展为后序的失效模式能力的评价指标, 如表 3 所示.

2.3 土层锚杆的故障等级

由于各种故障模式所引起的故障效应有很大的差异, 所以有必要对故障的等级进行划分. 故障的等级是衡量故障对系统造成影响的尺度. 在 FMEA 中, 故障的评定应根据各个项目的实际情况进行, 其中主要有严重度、发生度、检测度.

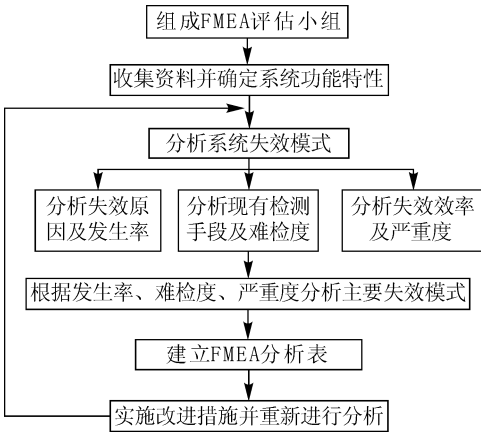


图 1 故障类型及影响分析程序框图
Fig. 1 Failure mode and impact analysis flowchart

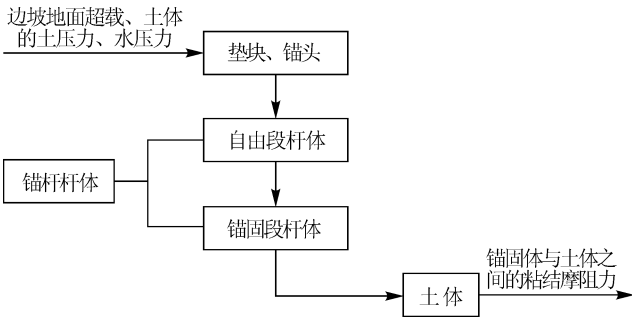


图 2 土层锚杆功能方框图
Fig. 2 Earth anchor's functional block diagram

表 1 土层锚杆故障严重度评价标准
Tab. 1 Evaluation criteria for earth anchor's failure severity

级别	评定准则	严重度
无警告的严重危害	这是一种非常严重的失效形式, 在没有任何失效预兆的情况下影响到土层锚杆安全工作, 设计和施工违反国家标准	10
有警告的严重危害	这是一种较为严重的失效形式, 在具有失效预兆的前提下发生并影响土层锚杆安全工作	9
很高	大部分土层锚杆不起作用, 丧失锚固性能	8
高	大部分土层锚杆起作用, 但锚固性能很差	7
中等	土层锚杆锚固性能下降明显	6
低	土层锚杆锚固性能变差, 锚固能力有所下降	5
很低	对锚固性能的影响较低	4
轻微	对锚固性能的影响轻微	3
很轻微	对锚固性能的影响及其轻微	2
无	无影响	1

为了分析问题的方便, FMEA 用 RPN 来表示故障的危险程度. 风险顺序数(RPN)是对设计风险的测量. 风险顺序数(RPN)是严重度(S)、频度(O)和探测度(D)的乘积, 即:

$$(S) \times (O) \times (D) = RPN$$

其中, $RPN \in (1, 1\ 000)$

表 2 土层锚杆故障频度评价标准			表 3 土层锚杆故障探测度评价标准		
Tab.2 Evaluation criteria for earth anchor's failure frequency			Tab.3 Evaluation criteria for earth anchor's failedetection degree		
可能性	可能的失效 [个/(100 个)]	频度	可能性	评价标准	探测度
很高:持续发生失效	≥80	10	绝对不可能	不能或不可能找出潜在起因及后续的失效模式	10
	70	9	非常少	只有非常少的机会找出潜在起因及后续模式	9
	60	8	极少	只有极少的机会找出潜在起因及后续模式	8
高:经常发生失效	50	7	很少	只有很少的机会找出潜在起因及后续模式	7
	40	6	少	有较少的机会找出潜在起因及后续模式	6
	30	5	中等	有中等多的机会找出潜在起因及后续模式	5
中等:偶然发生失效	20	4	中上	有中上多的机会找出潜在模式及后续模式	4
	10	3	多	有较多的机会找出潜在模式及后续模式	3
	5	2	很多	有很多的机会找出潜在模式及后续模式	2
极低:不太可能发生失效	1	1	几乎肯定	几乎肯定能找出潜在模式及后续模式	1

2.4 土层锚杆的 FMEA 分析表

按照设定的土层锚杆 FMEA 评价标准,分析土层锚杆的故障模式,填写土层锚杆 FMEA 表,如表 4 所示.

表 4 土层锚杆 FMEA 表							
Tab.4 FMEA of earth anchor							
名称	故障模式	故障影响	严重度 S	故障原因	频度 O	可探测度 D	风险顺序数 RPN
锚头和垫块	锚头锈蚀	锚杆端头与岩土体接触不牢固	3	安装后长期久置,缺乏防腐保护	6	3	54 施工部门
				工作期间防护剂崩落或充填不完全	6	3	54 施工部门
	锚头松动、脱落,能起一定作用	锚杆端头与岩土体接触不牢固	4	预应力张拉后锚具没有完全锚固;	4	3	48 施工部门
				地基变形过大;	3	3	36 施工部门
				预应力损失过大。	3	5	60 设计、施工部门
	锚头根本不起作用	锚杆与岩土体接触不牢固	8	锚头与支护结构接触不紧密,致使无法有效平衡应力	5	2	80 施工部门
	承压板破裂	承压板破裂,锚头失效,锚杆失效	8	承压板设计参数不当	3	3	72 设计部门
锚杆杆体	杆体角度过大	坡面变形	5	锚杆角度过大,加大对支护桩的压力;产生的下滑力作用锚杆台座,使预应力松弛	4	3	60 设计部门
	土层锚杆预应力减少	预应力减少,锚杆起不到应有的抗拉效果;土层锚杆破坏;边坡失稳。	6	群锚效应	3	3	54 设计部门
				锚具张拉时的变形与滑移	3	3	54 施工部门
				杆体材料的应力松弛	2	4	48 设计部门
				锁定荷载不足、达不到设计要求。	2	5	60 设计部门
	锚杆直接破坏	杆体被拉断或弯曲;灌浆体被拉裂或压碎;边坡失稳	8	锚杆钻孔不合标准或锚杆没有对中	4	3	96 施工部门
				锚杆筋体参数选取不当,钢筋强度不够,松弛	4	3	96 设计部门
				锚杆端部承压板或台座刚度太小、变形过大,预应力衰减严重	4	2	64 设计部门

名称	故障模式	故障影响	严重度 S	故障原因	频度 O	可探测度 D	风险顺序数 RPN	责任部门
自由段杆件	锚杆拉出破坏	整个锚杆杆体被直接拉出	8	锚杆自由段杆件长度过短,预应力衰减太快	4	3	96	设计部门
	自由段筋体的腐蚀破坏	腐蚀部位出现应力集中现象,锚杆杆体发生拉弯现象	8	地层运动造成拉筋超应力,产生裂纹;	2	2	32	设计部门
				拉筋存放时无保护或存放时间过长。	3	3	72	施工部门
				保护材料选择不当,造成的失效;	3	3	72	设计部门
				使用前自由段没有进行防腐处理	3	3	72	施工部门
锚固段杆件	注浆体与筋体之间的剪切破坏	注浆体被拉裂或压碎;锚杆筋体被拉出破坏	8	水泥砂浆参数选取不当、注浆养护后强度不够所致的灌浆体标号低	4	3	96	设计部门
				灌浆方式不合理、灌浆体密实度不够所导致的有效粘结长度不够	3	4	96	设计、施工部门
				环境因素,如水的的作用所致的抗剪强度降低	2	3	48	施工部门
				预应力施加过早、过大,拉筋与浆体发生相对位移	5	2	80	施工部门
				锚杆制作时,锚固段的油污和锈斑没有清除彻底,导致筋体与灌浆体之间粘结强度	3	3	72	施工部门
	土层与注浆体之间的剪切破坏	粘结破坏;锥体破坏;锥体—粘结复合破坏;整体失稳破坏	8	土层参数以及锚杆握裹体参数选取不当,使得锚杆从土体中被拔出	5	3	120	设计部门
				锚固段长度不足、倾角不合适或锚固体表面积过小,以至锚杆承载力不够	5	3	120	设计、施工部门
				环境因素,如水的的作用所致的抗剪强度降低	2	3	48	施工部门
	土体性质变化所致的土层锚杆抗剪强度降低	粘结破坏;锥体破坏;锥体—粘结复合破坏;整体失稳破坏	7	对正常固结状态的土体,其变形产生的孔隙压力为正值,作用在土层锚杆上的有效正应力值减小	4	3	84	设计部门
				坡体失稳发生破坏,导致土层锚杆抗拔力减小	4	3	84	设计部门
				环境因素如水、温度的影响	2	3	42	施工部门
土体	土体影响所致的土层锚杆预应力减小	预应力减少,锚杆起不到应有的抗拉效果;土层锚杆破坏;边坡失稳。	6	锚固段土层的蠕变	3	3	54	设计部门
				土体的位移	3	3	54	施工部门
				环境因素如水、温度的影响	2	3	36	施工部门

3 土层锚杆病害预测分析

对土层锚杆的 FMEA 表格进行统计分析,得到 RPN 值范围所对应的各种破坏模式及责任部门的比例,见表 5 所示. 其中,部门责任比例为:该 RPN 值范围内的故障责任部门数量/该 RPN 值范围内的故障总数量.

表 5 土层锚杆 RPN 值统计表
Tab. 5 Statistics of earth anchor's RPN value

RPN 值范围	故障模式	部门责任比例/%	
		施工部门	设计部门
$90 \leq RPN \leq 120$	土层与注浆体之间的剪切破坏、注浆体与筋体之间的剪切破坏、锚杆拉出破坏、锚杆筋体破坏	45.5	54.5
$70 \leq RPN \leq 90$	土体性质变化所致的土层锚杆抗剪强度降低、自由段筋体的腐蚀破坏、承压板破裂、锚头不起作用	50	50
$RPN < 70$	锚头锈蚀、锚头松动、脱落、杆体角度过大、土层锚杆预应力减少、锚杆直接破坏、自由段筋体的腐蚀破坏、土体影响所致的土层锚杆预应力减小等	66.7	33.3

RPN 值越大,说明其对应的失效模式的危险性越高.所以, $90 \leq RPN \leq 120$ 时,土层锚杆可能出现的四种故障模式,都是应重点防御的故障和失效现象.在这四种破坏模式中,土层与灌浆体之间的剪切破坏的风险顺序数最高, $RPN=120$,在土层锚杆的病害防治中应尤为注重.

另外,随着 RPN 值的减小,施工部门的责任比例越来越大.而风险顺序数越小,表示该病害可防可避的程度越大,应在施工中尽量避免.

对土层锚杆各部分的 RPN 值进行统计,得到表 6.

可以看出,锚杆锚固段的风险顺序数在 $90 \leq RPN \leq 120$ 范围内的比例最高,为 50%;而且该部分发生病害时,施工部门的责任比例高达 62.5%;也就是说,该部分属于病害的高风险地段,在锚杆的设计与施工中,应特别注意防范.

而锚头部分的 RPN 值则分布在较低的区段,风险顺序数在 $90 \leq RPN \leq 120$ 时的比例为零,71%的 RPN 值在 70 以下,只有 29%的 RPN 值大于 70,且最大值只有 80;且施工部门的责任大于设计部门,其责任比例为 71%,设计部门的责任比例为 29%.由此可见,在锚头的病害防治中,只要加强施工组织设计,做好施工的人文管理与培训,从材料上、设备上、工序上严格控制,大部分的病害都可以得到防避.

4 结 论

(1)建立了土层锚杆支护体系的 FMEA 分析表,得出系统存在的各种失效模式,并指出了各种失效模式的责任部门.

(2)对土层锚杆的 RPN 值进行分析,预测了土层锚杆的四种高风险病害主要为:土层与注浆体之间的剪切破坏、注浆体与筋体之间的剪切破坏、锚杆拉出破坏、锚杆直接破坏.其中,土层与注浆体之间的剪切破坏 RPN 值最高.

(3)通过对土层锚杆的 RPN 值分析可知:土层锚杆的高风险病害主要集中在锚固段,且施工部门的责任比例较大,对这一部位,不仅应加强设计,而且应强化其施工管理.

参考文献 References

- [1] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[D]. 泰安:山东科技大学, 2004.
YOU Chun-an. Theory and application study on stress-transfer mechanism of anchoring system[D]. Taian: Shandong University of Science and Technology, 2004.
- [2] 汪班桥, 门玉明, 沈 星. 土层锚杆的常见病害及防治对策研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(1): 154-159
WANG Ban-qiao, MEN Yu-ming, SHEN Xing. Study of the common defects of the anchors in clay and the controlling measures to be taken[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(1): 154-159.
- [3] 汪班桥. 土层锚杆常见病害破坏机理及防治技术研究 [D]. 西安:长安大学, 2010.
WANG Ban-qiao. Study of failure mechanism and control measures on anchors' common diseases in clay [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [4] 徐志胜, 吴 超. 安全系统工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
XU Zhi-sheng, WU Chao. Safety system engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [5] 袁昌明, 张晓冬, 章保东. 安全系统工程[M]. 北京:中国计量出版社, 2006.
YUAN Chang-ming, ZHANG Xiao-dong, ZHANG Bao-dong. Safety system engineering[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2006.
- [6] 王绍印. 故障模式和影响分析(FMEA) [M]. 广州:中山大学出版社, 2003.
WANG Shao-yin. Failure mode and effects analysis (FMEA) [M]. Guangzhou: The University of Chicago Press, 2003.

(下转第 244 页)

Effects of sand ratio on performance of pavement concrete

WENG Xing-zhong¹, ZHANG Guang-xian¹, HAN Zhao²,
YAN Xiang-cheng¹, QIAN Tao³, WANG Yong-lin⁴

(1. Department of Airport Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. The PLA 93926 Unit, Xinjiang Khotan 848000, China;

3. The Third Engineering Group of Airport Construction of China, Nanjing 210000, China;

4. The Ninth Engineering Group of Airport Construction of China, Chengdu 611430, China)

Abstract: Under the condition of low water-cement ratio, tests were carried out to study the effects of sand ratio on the workability, strength, wear resistance, impermeability and frost resistance of pavement concrete. It is proved that there exists a best sand ratio under which the pavement concrete performs best. With the increase of sand ratio, the wear resistance of pavement concrete decreases and the impermeability increases; the flexural strength, compressive strength and frost resistance all increase first and then decrease. In the end, it puts forward the rational sand ratio of pavement concrete in low water-cement ratio.

Key words: airport engineering; pavement concrete; sand ratio; workability; strength; durability

Biography: WONG Xing-zhong, Professor, Xi'an 710038, P. R. China, Tel: 0086-15829775089, E-mail: 15829775089@163.com

(上接第232页)

- [7] 居季成,徐名聪,乔 靓. 失效模式及后果分析的运用[J]. 现代制造工程,2004,6(11):83-86.
JU Ji-cheng, XU Ming-cong, QIAO Liang. Application of FMEA [J]. Machinery Manufacturing Engineer, 2004,6(11):83-86.
- [8] 卢 黎,张永兴,吴曙光. 压力型锚杆锚固段的应力分布规律研究[J]. 岩土力学,2008(6):1345-1349.
LU Li, ZHANG Yong-xing, WU Shu-guang. Distribution of stresses on bonded transmission length of compression type rock bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(6):1345-1349.
- [9] 郝建斌,门玉明,汪班桥. 地面荷载下土层锚杆工作性能试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(2):247-249.
HAO Jian-bin, MEN Yu-ming, WANG Ban-qiao. Working property of soil anchors under loads on ground surface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(2):247-249.

Earth anchor failure models and effect analysis

WANG Ban-qiao, MEN Yu-ming

(1. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Geotechnical Engineering Open Laboratory of Ministry of Land and Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: FMEA evaluation criteria, failure severity evaluation criteria, failure frequency evaluation criteria and failure detection degree evaluation criteria for earth anchor are set to establish FMEA analysis sheet for earth anchor support system, in deriving the various failure modes for existing of the system and point out responsible department of the failure mode. RPN value of earth anchor is analyzed and four high risk diseases of earth anchor are obtained i. e. shear failure between earth and concrete, shear failure between concrete and reinforcement bars, pulling destroy of anchor and direct destroy of anchor. It is known is analyzed high risk diseases of earth anchor are mainly focused on anchor segment which is mainly in the charge of the construction department. Therefore, to strengthen the design, and intensify construction management for this part become absolutely necessary.

Key words: earth anchor; failure models; effect analysis; risk sequence number; high risk disease

Biography: WANG Ban-qiao, Lecturer, Xi'an 710054, P. R. China, Tel:0086-13700285560, E-mail:dcdgx17@chd.edu.cn