

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.02.024

黄土固化剂及固化土养护液的配方优化研究

郭昊炜¹, 鞠 鹏¹, 张 豪⁴, 樊恒辉¹, 高建恩², 孙胜利³

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3. 郑州华之誉新材料科技有限公司, 河南 巩义 451200;

4. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 为提高土体固化剂加固新疆伊犁州黄土的固化效果, 通过正交试验及 AHP-CRITIC 主客观综合赋权法, 进行黄土土体固化剂及固化土养护液配方优化试验, 优化结果为: 得到土体固化剂及固化土养护液的配方及各组分的优属度, 在 12% 水泥掺量条件下, MBER 土体固化剂的最优配合比为 9% 石灰、2% 石膏、0.3% 硫酸钠、0.3% 硅酸钠、0.3% 明矾、1.2% 减水剂, 其 7d 龄期的饱水无侧限抗压强度为 3.23 MPa, 干燥无侧限抗压强度为 10.23 MPa, 软化系数为 0.32; 固化土养护液的最优配合比为 0.10 mol/L 碳酸氢钠溶液、0.04 mol/L 硫酸钠溶液、2% 纳米二氧化硅溶胶, 其 3 d、7 d 和 14 d 的饱水无侧限抗压强度分别为 1.88 MPa、3.76 MPa 和 5.22 MPa, 其 7 d 无侧限抗压强度相较于标准养护及纯水养护分别提高 16.43% 和 13.00%, 具有明显效果。

关键词: 伊犁州黄土; 土体固化剂; 养护液; 固化土; 配方优化

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)02-0171-09

Formulation Optimization of Ili Loess Soil Stabilizer and Stabilized Soil Curing Liquid

GUO Haowei¹, JU Peng¹, ZHANG Hao⁴, FAN Henghui¹, GAO Jianen², SUN Shengli³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Zhengzhou Huazhiyu New Material Technology Co., Ltd., Gongyi, Henan 451200, China;

4. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to improve the stabilized effect of soil stabilizer on loess in Ili Prefecture, Xinjiang, the formula of soil stabilizer and stabilized soil curing liquid and the priority of each component were calculated by orthogonal test and AHP-CRITIC subjective and objective comprehensive weighting method. Under the condition of 12% cement content, the optimal mix ratio of MBER soil stabilizer is 9% lime, 2% gypsum, 0.3% sodium sulfate, 0.3% sodium silicate, 0.3% alum and 1.2% water reducing agent. The saturated unconfined compressive strength of 7 d age is 3.23 MPa, the dry unconfined compressive strength is 10.23 MPa, and the softening coefficient is 0.32. The optimal mixture ratio of stabilized soil curing liquid is 0.10 mol/L sodium bicarbonate solution, 0.04 mol/L sodium sulfate solution and 2% nano-silica sol. The saturated unconfined compressive strength of 3 d, 7 d and 14 d is 1.88 MPa, 3.76 MPa and 5.22 MPa. Compared with standard curing and pure water curing, the 7 d unconfined compressive strength of the soil stabilized by this curing solution is increased by 16.43% and 13.00%, respectively.

Keywords: Ili loess; soil stabilizer; curing liquid; stabilized soil; formulation optimization

收稿日期: 2023-11-27

修稿日期: 2023-12-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900700); 国家自然科学基金项目(52079116)

作者简介: 郭昊炜(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: guohaowei@nwfufu.edu.cn

通讯作者: 樊恒辉(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事特殊土的工程性质及改良、土壤固化改良技术方面的研究工作。

E-mail: yt07@nwsuaf.edu.cn

我国有着约占国土面积 6% 的黄土高原。由于黄土通常具有较强的湿陷性,从而导致黄土在遇水后难以保持足够强度,易对基础设施造成破坏。同时,黄土高原许多区域缺少砂石,混凝土材料价格则较为昂贵,因此,常采用水泥、石灰等固化剂掺入土体,通过物理化学作用,提高土体的工程性能。但是,由于土体的特殊物理化学性质,导致固化性能较差。针对此类问题,在工程实践中常常通过向土体中加入其他核心材料或激发剂材料以使土体获得足够的强度,满足工程建设需要^[1-8],樊恒辉等^[9]以一种复合水泥基土体固化剂为固化材料(称为 MBER)加固黄土,大量的试验研究已经表明土体固化剂固化黄土具有良好的工程性能。樊恒辉等^[10-11]首先将其用于集流面的建设,并对其力学性能、集流效率及施工工艺进行了探究。之后又有研究者就 MBER 固化土的抗压强度、劈裂强度、耐久性能以及水质等工程相关指标及其影响因素进行了较为详细的研究,试验结果表明,MBER 具有环境友好、价格低廉、性能良好等优点,是一种理想的固化土体材料^[12-20]。樊恒辉等^[21-22]通过室内试验对 MBER 固化土的固化机理进行了系统的分析与阐述。Zhang 等^[23-24]利用纳米二氧化硅材料进一步对 MBER 土体固化剂配方进行了优化,试验结果表明纳米二氧化硅可显著加快固化土的强度形成。

由于土体中含有的物理化学成分、黏土矿物、酸碱度以及颗粒级配、土体活性物质不同,加固效果也不同。依托新疆维吾尔自治区伊犁州某道路工程建设项目,以 MBER 土体固化剂为研究对象,进行室内试验,分析土体固化剂配方以及固化土养护液对固化土力学性能的影响,并通过 AHP-CRITIC 主客

观综合赋权法对土体固化剂的配方及固化土养护液进行进一步优化,为工程项目建设提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样为新疆维吾尔自治区伊犁州某道路工程建设项目土样,其基本物理化学性质见表 1。供试土样中黏粒占 14.5%,粉粒占 83.0%,砂粒占 2.5%,以粉粒为主。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)将其定名为低液限黏土(CL)。

MBER 土体固化剂是由水泥与核心原料按一定比例混合制成的环保型的粉末状无机胶凝材料。其中水泥采用冀东海德堡(扶风)水泥有限公司生产的 42.5 号硅酸盐水泥。

石灰和石膏分别由分宜县黄宝珠日化用品有限公司和西安市港务区奥克建材厂生产。

明矾与硫酸钠由天津市致远化学试剂有限公司提供;减水剂由合肥千盛生物科技有限公司提供;硅酸钠由广东省化学试剂工程技术研发中心提供;碳酸氢钠与硫酸钠由广东光华科技股份有限公司生产,均为分析纯试剂。碱性纳米二氧化硅溶胶由广州穗泽环保科技有限公司生产,浓度为 50%,平均粒径为 100 nm,呈乳白色。

1.2 试验方案

本试验在预试验结果的基础上,选择 12% 水泥土作为研究对象,以 MBER 固化剂所用 6 个组分作为正交试验的 6 个影响因素,每个影响因素在前人研究的基础上,设置 5 个水平,即进行 6 因素 5 水平正交试验,配方优化所用因素水平表见表 2。

表 1 试验土样物理化学性质

土样名称	土粒比重	塑限/%	液限/%	塑性指数	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	pH
伊犁州黄土	2.67	12.0	27.2	15.2	1.92	11.69	9.07

表 2 固化剂最优配合比正交试验因素水平

水平	因素					
	石灰/%	石膏/%	硫酸钠/%	硅酸钠/%	明矾/%	减水剂/%
1	1.0	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1
2	3.0	2.0	0.3	0.3	0.3	0.4
3	6.0	4.0	0.6	0.6	0.6	0.8
4	9.0	6.0	0.9	0.9	0.9	1.2
5	12.0	8.0	1.2	1.2	1.2	1.6

分别测试各组土样养护龄期为 7 d 时的饱水无侧限抗压强度、干燥无侧限抗压强度以及软化系数,并根据 AHP-CRITIC 主客观综合赋权法对各试验方案进行模糊优选,筛选出土体固化剂的最优配合比。

在此基础上,研究 MBER 固化土体最佳养护溶液条件,分别以碳酸氢钠、硫酸钠以及碱性纳米二氧化硅溶胶浓度作为正交试验的 3 个影响因素,每个影响因素同样在前人研究的基础上,设置 5 个水平,即 3 因素 5 水平正交试验,最佳养护液配方选取所用因素水平表见表 3。分别测试各组土样养护龄期为 3 d、7 d、14 d 的饱水无侧限抗压强度,同样根据 AHP-CRITIC 主客观综合赋权法对各试验方案进行模糊优选,筛选出养护液的最优配合比。

表 3 养护液最优配合比正交试验因素水平			
水平	因素		
	碳酸氢钠 /(mol·L ⁻¹)	硫酸钠 /(mol·L ⁻¹)	纳米二氧化硅 溶胶/%
1	0.05	0.01	0.50
2	0.10	0.02	1.00
3	0.15	0.04	1.50
4	0.20	0.06	2.00
5	0.25	0.08	2.50

1.3 试样制备及养护

试验土样经风干后过 2 mm 筛,以击实试验所得固化土的最优含水率及最大干密度制样,并根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)要求,将土样压制成尺寸为直径 50 mm×高 50 mm 的圆柱体,每组设计 6 个平行样,拆模后包裹塑膜进行标准养护,到达预期养护龄期后进行无侧限抗压试验。

固化剂配方优化试验中养护条件设置为温度 20℃±2℃,湿度>95%。对于模拟干燥条件下土样,养护期最后一天,将试件置于 70℃±3℃的烘箱中烘干 24 h 至恒重,待其冷却至室温后测试其无侧限抗压强度;对于模拟水饱和状态下土样,养护期最后一天,将土样浸水 24 h 至恒重,取出并擦拭试件后测试其无侧限抗压强度。

养护液配方优化试验中养护条件为浸泡在配制的养护液中,至养护龄期后,将土样取出并擦拭试件后测试其无侧限抗压强度。

无侧限抗压试验均采用 WDW-10 型微机控制万能试验机,加荷速度控制为 1 mm/min。

1.4 基于 AHP-CRITIC 赋权法的模糊优选计算步骤

1.4.1 获取数据矩阵

将拥有 m 个待评价对象, n 个评价指标的正交试验结果数据,构建为原始数据矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

1.4.2 归一化处理原始数据矩阵

为消除评价指标量纲对于评价结果的影响,需对原始数据进行归一化处理,由于所用评价指标均为正向性指标,因此可按式计算:

$$s_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

得出归一化后的矩阵 S :

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix} = (s_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

1.4.3 基于 CRITIC 法计算客观权重

(1) 计算评价指标信息承载量

信息承载量是对评价指标赋权的重要依据,需要综合考虑数据的对比性与矛盾性,可由下式表示:

$$C_j = \delta_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (4)$$

式中: δ_j 为标准差,表示对比性; r_{ij} 为指标间的相关系数; $(1 - r_{ij})$ 表示矛盾性。

(2) 计算评价指标客观权重向量

各评价指标的客观权重可由其信息承载量确定,表示为:

$$W_{cj} = \frac{C_j}{\sum C_j} \quad (5)$$

根据各评价指标客观权重可得,正交试验中各评价指标的客观权重向量为:

$$W_c = [W_{c1} \quad W_{c2} \quad \cdots \quad W_{c_{j-1}} \quad W_{cj}] \quad (6)$$

1.4.4 基于 AHP 法计算主观权重

(1) 计算评价指标主观权重向量

将决策问题分解成若干指标层,每层指标根据 1~9 标度法构建 n 阶判别矩阵 A ,根据下式可求得各评价指标的主观权重^[25]:

$$W_{ap} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{q=1}^n a_{pq}}}{\sum \sqrt[n]{\prod_{q=1}^n a_{pq}}} \quad (7)$$

式中: a_{pq} 表示矩阵 A 中第 p 行第 q 列的数据,根据上述计算评价指标的主观权重向量为:

$$W_a = [W_{a1} \quad W_{a2} \cdots W_{an-1} \quad W_{an}] \tag{8}$$

(2) 判别矩阵的一致性检验

检验公式为:

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{9}$$

$$I_{CR} = \frac{I_C}{I_R} \tag{10}$$

式中: n 为某准则层的指标个数; $\lambda_{\max}$ 为矩阵 A 的最大特征值; I_R 为平均随机一致性指标,其值可由表 4 查得。

根据式(9) 和式(10) 可对矩阵 A 进行一致性检验,检验的判别依据为:若 $I_{CR} < 0.1$ 则矩阵满足一致性检验要求,若 $I_{CR} \geq 0.1$ 则说明矩阵 A 不能满足要求,需要重新构建判别矩阵。

表 4 平均随机一致性指标 I_R 查询表

n	3	4	5	6	7	8	9	10
I_R	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

1.4.5 计算评价指标综合权重向量

根据最小鉴别信息原理,可得综合权重向量的计算公式^[26]:

$$W_j = \frac{\sqrt{W_{aj}W_{cj}}}{\sum \sqrt{W_{aj}W_{cj}}} \tag{11}$$

同样,据此可得出综合权重向量可由下式表示:

$$W = [W_1 \quad W_2 \cdots W_{j-1} \quad W_j] \tag{12}$$

1.4.6 计算相对优属度

根据式(3) 矩阵 S 可求得各因素各水平所对应的评价指标特征值,其中第 i 个因素的第 k 个水平所对应的第 j 个评价指标的特征值可表示为^[27]:

$$a_{ij'k} = \frac{\sum_{k=1}^{k^*} s_{ij}(k)}{k^*} \tag{13}$$

式中: k^* 表示该因素所含的水平数。

进而方案相对优属度 u_i 与因素水平相对优属度 $l_{j'k}$ 可分别表示为:

$$u_j = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m (W_j | s_{ij} - 1 |)^d}{\sum_{i=1}^m (W_i s_{ij})^d} \right]^{\frac{2}{d}}} \tag{14}$$

$$l_{j'k} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m (W_j | a_{ij'k} - 1 |)^d}{\sum_{i=1}^m (W_i a_{ij'k})^d} \right]^{\frac{2}{d}}} \tag{15}$$

式中: d 为距离参数,一般为 1 或 2,本文取 2。

2 土体固化剂配方优化正交试验

2.1 土体固化剂配方优化正交试验结果分析

土体固化剂配方优化的正交试验结果如表 5 所示,其中软化系数用于表示固化土的耐水性能,计算公式为:

$$K_w = \frac{f_{cu,1}}{f_{cu,2}} \tag{16}$$

式中: $f_{cu,1}$ 表示土样饱水抗压强度; $f_{cu,2}$ 表示土样干燥抗压强度。

表 6 中数据为固化剂配方优化正交试验的极差分析结果,对于饱水抗压强度而言,石灰掺量是对其影响最大的因素,各因素对饱水抗压强度影响程度从大到小排序分别是:石灰 > 石膏 > 硅酸钠 > 明矾 > 减水剂 > 硫酸钠。对于干燥抗压强度而言,明矾掺量是对其影响最大的因素,各因素对干燥抗压强度影响程度从大到小排序分别是:明矾 > 硫酸钠 > 石膏 > 石灰 > 减水剂 > 硅酸钠。对于软化系数而言,石灰掺量是对其影响最大的因素,各因素对软化系数影响程度从大到小排序分别是:石灰 > 石膏 > 硫酸钠 > 硅酸钠 = 明矾 = 减水剂,其中减水剂、硅酸钠、明矾掺量对固化土体软化系数的影响率相同。

2.2 土体固化剂配方的模糊优化

2.2.1 评价指标权重计算

采用 CRITIC 客观赋权法计算各评价指标的客观权重,将正交试验结果根据式(2) 进行归一化处理后,根据式(4) 和式(5) 计算可得,各评价指标所用的客观权重向量可表示为: $W_c(\text{固}) = [0.225 \quad 0.344 \quad 0.431]$ 。

采用 AHP 法计算各评价指标的主观权重,固化剂配方优化试验中三个评价指标都设为同一指标层,则其所用判断矩阵如下表 7 所示,根据式(9) 和式(10) 计算可得随机一致性指标 $I_{CR}(\text{固}) < 0.1$ 。满足一致性判别条件,则可得固化剂配方优化各评价指标的主观权重向量为: $W_a(\text{固}) = [0.500 \quad 0.250 \quad 0.250]$ 。

在此基础上,根据式(11) 计算可得综合权重向量 $W_j(\text{固}) = [0.367 \quad 0.281 \quad 0.352]$ 。

表 5 固化剂配方优化正交试验方案及试验结果

方案 编号	因素						试验结果		
	石灰 /%	石膏 /%	硫酸钠 /%	硅酸钠 /%	明矾 /%	减水剂 /%	饱水抗压强度 $f_{cu,1}$ /MPa	干燥抗压强度 $f_{cu,2}$ /MPa	软化系数 K_w
1	1.0	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	2.19	10.09	0.22
2	1.0	2.0	0.6	0.9	1.2	0.4	2.31	11.15	0.21
3	1.0	4.0	1.2	0.3	0.9	0.8	2.41	9.45	0.26
4	1.0	6.0	0.3	1.2	0.6	1.2	2.28	10.57	0.22
5	1.0	8.0	0.9	0.6	0.3	1.6	2.55	12.65	0.20
6	3.0	1.0	1.2	0.9	0.6	1.6	2.34	7.77	0.30
7	3.0	2.0	0.3	0.3	0.3	0.1	3.19	12.94	0.25
8	3.0	4.0	0.9	1.2	0.1	0.4	2.43	8.44	0.29
9	3.0	6.0	0.1	0.6	1.2	0.8	2.17	6.04	0.36
10	3.0	8.0	0.6	0.1	0.9	1.2	2.65	11.91	0.22
11	6.0	1.0	0.9	0.3	1.2	1.2	2.63	10.43	0.25
12	6.0	2.0	0.1	1.2	0.9	1.6	2.22	10.08	0.22
13	6.0	4.0	0.6	0.6	0.6	0.1	2.52	11.49	0.22
14	6.0	6.0	1.2	0.1	0.3	0.4	2.33	11.08	0.21
15	6.0	8.0	0.3	0.9	0.1	0.8	2.65	13.06	0.20
16	9.0	1.0	0.6	1.2	0.3	0.8	2.74	12.58	0.22
17	9.0	2.0	1.2	0.6	0.1	1.2	3.37	11.96	0.28
18	9.0	4.0	0.3	0.1	1.2	1.6	2.64	10.04	0.26
19	9.0	6.0	0.9	0.9	0.9	0.1	2.21	10.90	0.20
20	9.0	8.0	0.1	0.3	0.6	0.4	2.73	11.61	0.24
21	12.0	1.0	0.3	0.6	0.9	0.4	2.49	10.60	0.24
22	12.0	2.0	0.9	0.1	0.6	0.8	2.44	10.85	0.23
23	12.0	4.0	0.1	0.9	0.3	1.2	2.81	11.02	0.26
24	12.0	6.0	0.6	0.3	0.1	1.6	2.72	11.97	0.23
25	12.0	8.0	1.2	1.2	1.2	0.1	2.32	11.42	0.20

表 6 固化剂配方优化正交试验极差分析

评价指标	因素	各因素水平对应均值/MPa					极差 R	影响率 P /%	排序
		1	2	3	4	5			
饱水抗 压强度 $f_{cu,1}$ /MPa	石灰	2.35	2.56	2.47	2.74	2.56	0.39	19.59	1
	石膏	2.48	2.71	2.56	2.34	2.58	0.37	18.59	2
	硫酸钠	2.42	2.65	2.59	2.37	2.55	0.28	14.07	6
	硅酸钠	2.45	2.74	2.62	2.46	2.40	0.34	17.09	3
	明矾	2.67	2.72	2.46	2.40	2.41	0.32	16.09	4
	减水剂	2.49	2.46	2.48	2.75	2.49	0.29	14.57	5
干燥抗 压强度 $f_{cu,2}$ /MPa	石灰	10.78	9.42	11.23	11.42	11.17	2.00	19.92	4
	石膏	10.29	11.40	10.09	10.11	12.13	2.04	20.32	3
	硫酸钠	9.77	11.44	11.82	10.58	10.33	2.05	20.42	2
	硅酸钠	10.79	11.28	10.54	10.78	10.62	0.74	7.37	6
	明矾	11.10	12.05	10.46	10.59	9.81	2.24	22.31	1
	减水剂	11.37	10.58	10.40	11.18	10.50	0.97	9.66	5
软化系数 K_w	石灰	0.22	0.28	0.22	0.24	0.23	0.06	25.00	1
	石膏	0.24	0.24	0.26	0.24	0.21	0.05	20.83	2
	硫酸钠	0.26	0.23	0.22	0.23	0.25	0.04	16.67	3
	硅酸钠	0.23	0.24	0.26	0.23	0.23	0.03	12.50	4
	明矾	0.24	0.23	0.24	0.23	0.26	0.03	12.50	4
	减水剂	0.22	0.24	0.25	0.25	0.24	0.03	12.50	4

注:影响率 P 表示不同因素对于某一评价指标的影响程度,其计算公式可表示为: $P = R/\Sigma R \times 100\%$,即某一因素对于该评价指标的极差与所有因素对于该评价指标的极差的和的比值。

表 7 判别矩阵及各因素主观权重

	饱水无侧限 抗压强度 P_1	干燥无侧限 抗压强度 P_2	软化系数 P_3	主观 权重
饱水无侧限抗压强度 P_1	1	2	2	1/2
干燥无侧限抗压强度 P_2	1/2	1	1	1/4
软化系数 P_3	1/2	1	1	1/4

2.2.2 固化剂配方优化计算

根据式(13)、式(14)、式(15)计算可得不同因素各水平以及正交试验各方案的相对优属度,以确定土体固化剂优化配方,其结果分别可见于图 1 与图 2。

为探究未包含于正交试验设计组别内的其他配方固化土体是否具有更优的性能,对不同因素的不同水平的优属度进行了分析。

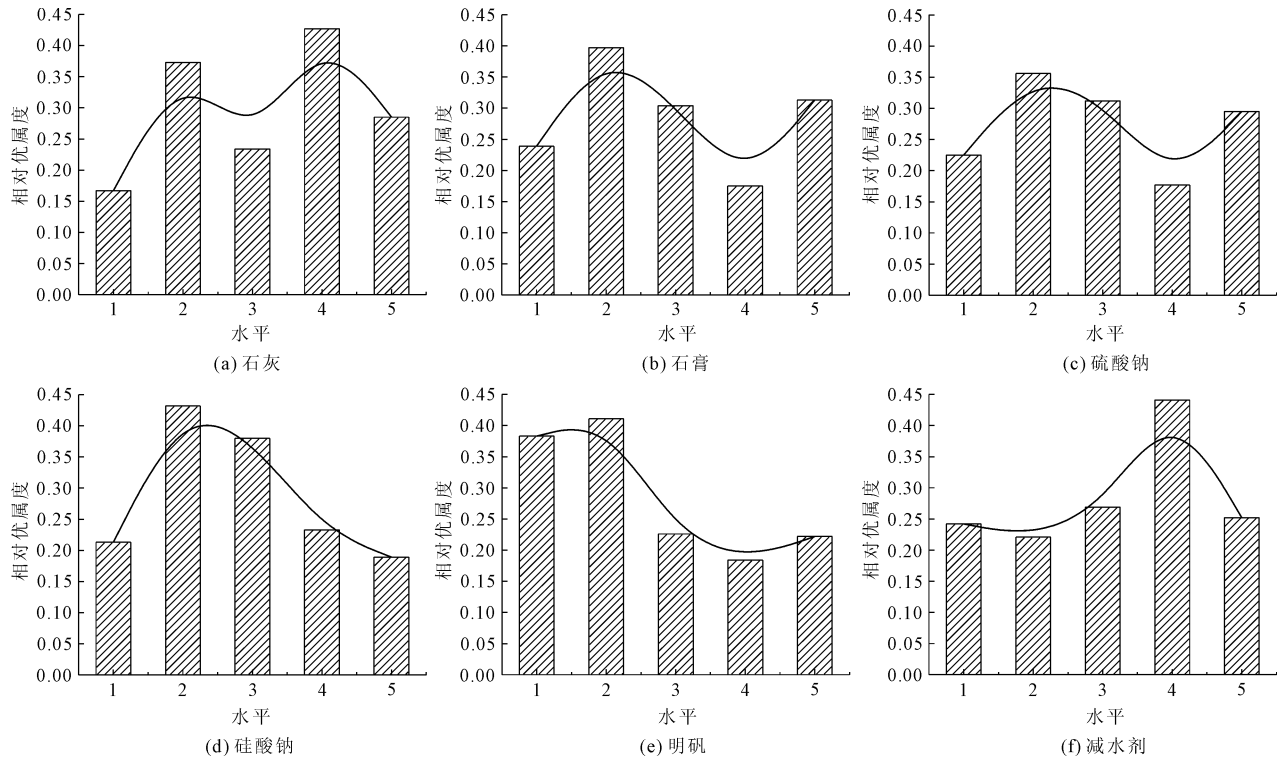


图 1 土体固化剂最优配合比试验各因素水平优属度结果

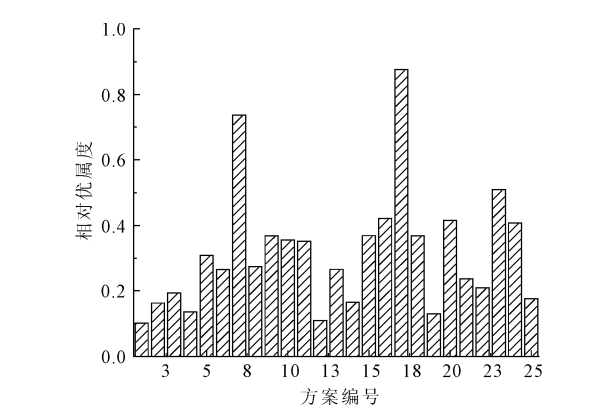


图 2 土体固化剂最优配合比试验各方案优属度结果

根据图 1 数据可知,对于石灰掺量而言,其第 4 个水平即 9% 掺量的相对优属度最大,为最优掺量,石灰掺量各水平优属度排序为 9% > 3% > 12% > 6% > 1%;同理可得,石膏的最优掺量为 2%,硫酸

钠的最优掺量为 0.3%,硅酸钠的最优掺量为 0.3%,明矾的最优掺量为 0.3%,减水剂的最优掺量为 1.2%。因此通过单独分析各因素最优掺量可得土体固化剂最优掺量为:9% 石灰、2% 石膏、0.3% 硫酸钠、0.3% 硅酸钠、0.3% 明矾、1.2% 减水剂,将其设为配方 1。

根据图 2 中数据可得,正交试验各试验组中第 17 组的相对优属度最大,其值为 0.876,即第 17 组固化剂配方为正交试验中土体固化剂最优配方。其他配方中除第 7 组的相对优属度为 0.737 外,基本相对优属度都分布在 0.100~0.500 之间,因此将第 17 组试验方案土体固化剂配方设为配方 2,该配方中核心原料组成为:9% 石灰、2% 石膏、1.2% 硫酸钠、0.6% 硅酸钠、0.1% 明矾、1.2% 减水剂。该配方固化土体饱水无侧限抗压强度为 3.37 MPa,干燥无

侧限抗压强度为 11.96 MPa,软化系数为 0.28。

测试配方 1 的固化土体的力学性能和耐水性能,可得其饱水无侧限抗压强度为 3.23 MPa,干燥无侧限抗压强度为 10.23 MPa,软化系数为 0.32。经计算可得其相对优属度为 0.883,略大于配方 2 的相对优属度 0.876,所以将配方 1 作为最优土体固化剂配方。

3 固化土体养护液配方优化正交试验

3.1 固化土体养护液配方优化正交试验结果分析

养护液配方优化正交试验主要测试不同养护液条件养护 3 d、7 d、14 d 饱水无侧限抗压强度,据此综合判断适宜的养护液最佳配方。固化土体养护液优化试验结果及其极差分析如表 8 和表 9 所示。

根据极差分析结果,对于 3 d 无侧限抗压强度而言,纳米二氧化硅溶胶浓度是对其影响最大的因素,各因素浓度对其影响程度由大到小排序为:纳米

二氧化硅溶胶>硫酸钠>碳酸氢钠;对于 7 d 无侧限抗压强度而言,碳酸氢钠浓度是对其影响最大的因素,各因素浓度对其影响程度由大到小排序为:碳酸氢钠>纳米二氧化硅溶胶>硫酸钠;对于 14 d 无侧限抗压强度而言,纳米二氧化硅溶胶浓度是对其影响最大的因素,各因素浓度对其影响程度由大到小排序为:纳米二氧化硅溶胶>碳酸氢钠>硫酸钠。

3.2 固化土体养护液的模糊优化

3.2.1 评价指标权重计算

与土体固化剂配方优化相同,也采用 AHP-CRITIC 主客观综合赋权法计算养护液配方优化试验中各评价指标的权重计算。

利用 CRITIC 赋权法所得评价指标的客观权重向量 $W_c(\text{液}) = [0.318\ 0.242\ 0.440]$ 。本研究中将三个评价指标设为同一指标层,根据表 10 中的判断矩阵,通过 AHP 法计算得出主观权重向量 $W_a(\text{液}) = [0.400\ 0.400\ 0.200]$,根据式(9)和式(10)计算

表 8 养护液配方优化正交试验结果

方案 编号	因素			试验结果		
	碳酸氢钠 /(mol·L ⁻¹)	硫酸钠 /(mol·L ⁻¹)	纳米二氧化硅 溶胶/%	3 d 抗压强度 f ₃ /MPa	7 d 抗压强度 f ₇ /MPa	14 d 抗压强度 f ₁₄ /MPa
1	0.05	0.01	0.50	1.65	3.41	4.46
2	0.05	0.02	1.50	1.59	3.30	4.30
3	0.05	0.04	2.50	1.78	3.65	4.56
4	0.05	0.06	1.00	1.84	3.31	4.04
5	0.05	0.08	2.00	1.83	3.30	4.31
6	0.10	0.01	2.50	1.77	3.19	4.54
7	0.10	0.02	1.00	1.51	4.01	5.47
8	0.10	0.04	2.00	1.88	3.76	5.22
9	0.10	0.06	0.50	1.75	3.59	3.73
10	0.10	0.08	1.50	1.80	3.13	3.40
11	0.15	0.01	2.00	1.70	3.09	4.09
12	0.15	0.02	0.50	1.55	2.77	3.76
13	0.15	0.04	1.50	1.50	2.91	5.72
14	0.15	0.06	2.50	1.62	3.11	4.57
15	0.15	0.08	1.00	1.67	3.03	4.84
16	0.20	0.01	1.50	1.44	2.52	5.46
17	0.20	0.02	2.50	1.32	2.33	3.98
18	0.20	0.04	1.00	1.59	2.36	3.45
19	0.20	0.06	2.00	1.79	3.19	3.56
20	0.20	0.08	0.50	1.89	3.87	3.53
21	0.25	0.01	1.00	1.72	3.48	4.17
22	0.25	0.02	2.00	1.91	3.36	3.90
23	0.25	0.04	0.50	1.93	3.59	3.53
24	0.25	0.06	1.50	1.61	3.76	4.74
25	0.25	0.08	2.50	1.78	2.80	4.35

表 9 养护液配方优化极差分析结果

评价指标	因素	各因素水平对应均值/MPa					极差 R	影响率 P/%	排序
		1	2	3	4	5			
3 d 饱水 抗压强度 f_3 /MPa	碳酸氢钠	1.74	1.74	1.61	1.61	1.79	0.18	29.03	3
	硫酸钠	1.66	1.58	1.73	1.72	1.79	0.21	33.87	2
	纳米二氧化硅溶胶	1.76	1.66	1.59	1.82	1.65	0.23	37.10	1
7 d 饱水 抗压强度 f_7 /MPa	碳酸氢钠	3.39	3.54	2.98	2.85	3.40	0.69	50.74	1
	硫酸钠	3.24	3.15	3.26	3.39	3.22	0.24	17.65	3
	纳米二氧化硅溶胶	3.45	3.24	3.12	3.34	3.02	0.43	31.62	2
14 d 饱水 抗压强度 f_{14} /MPa	碳酸氢钠	4.34	4.48	4.60	4.00	4.14	0.60	30.93	2
	硫酸钠	4.42	4.29	4.50	4.13	4.09	0.41	21.13	3
	纳米二氧化硅溶胶	3.80	4.39	4.73	4.22	4.40	0.93	47.94	1

可得随机一致性指标 $I_{CR}(\text{液}) < 0.1$ 。满足一致性判别条件。

故根据式(11)计算可得养护液最优配比综合权重向量 $W_j(\text{液}) = [0.370\ 0.322\ 0.308]$ 。

3.2.2 养护液配方优化计算

同样,根据式(13)一式(15)可得各因素水平及正交试验各方案优属度如图 3、图 4 所示。根据图 3,通过各因素水平分析可知,在固化土体养护液中碳酸氢钠的最适宜的掺量为 0.10 mol/L,硫酸钠的最适宜掺量为 0.04 mol/L,纳米二氧化硅溶胶最适宜的掺入

浓度为 2%,将上述配方设为养护液的配方 1。

表 10 判别矩阵及各因素主观权重

	3 d 无侧限 抗压强度 Q_1	7 d 无侧限 抗压强度 Q_2	14 d 无侧限 抗压强度 Q_3	主观 权重
3 d 无侧限抗压强度 Q_1	1	1	2	2/5
7 d 无侧限抗压强度 Q_2	1	1	2	2/5
14 d 无侧限抗压强度 Q_3	1/2	1/2	1	1/5

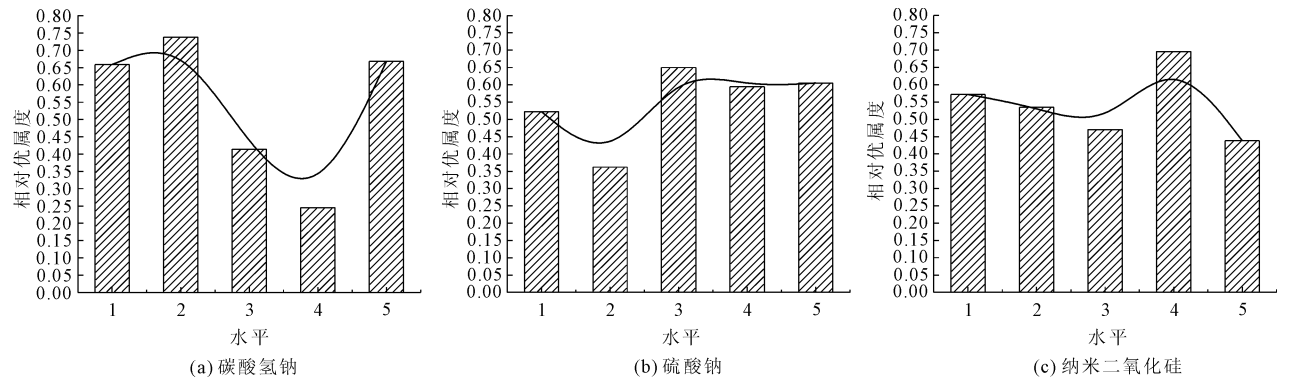


图 3 各因素水平优属度结果

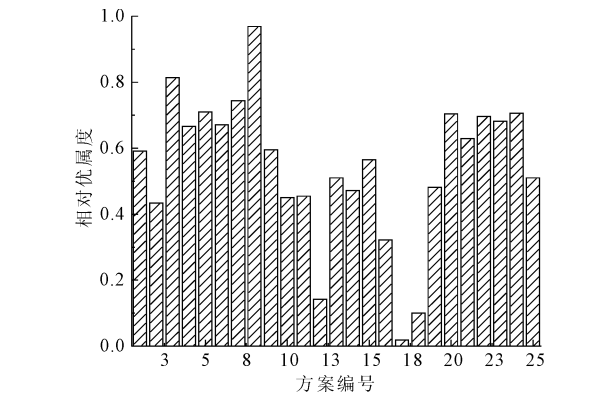


图 4 各方案优属度结果

由图 4 可得,正交试验中第 8 组的相对优属度最大,其值为 0.969,其养护液配方为:0.10 mol/L 碳酸氢钠溶液、0.04 mol/L 硫酸钠溶液、2% 纳米二氧化硅溶胶,将其设为养护液的配方 2。通过比较发现配方 1 与配方 2 相同,即养护液的最优配方为:0.10 mol/L 碳酸氢钠溶液、0.04 mol/L 硫酸钠溶液、2% 纳米二氧化硅溶胶。经计算,此养护液养护固化土体 7 d 无侧限抗压强度相较于标准养护及纯水养护分别提高 16.43% 和 13.00%,效果明显。

4 结 论

通过正交试验设计,采用以 AHP-CRITIC 主客观综合赋权方法为基础的模糊优选方法,对 MBER 固化新疆伊犁州黄土的配方和养护液的配方进行优化。得出以下主要结论:

(1) 在水泥掺量 12% 条件下,适宜于伊犁州黄土的 MBER 土体固化剂的最优配合比为 9% 石灰、2% 石膏、0.3% 硫酸钠、0.3% 硅酸钠、0.3% 明矾、1.2% 减水剂。最优配合比固化土 7 d 龄期的饱水无侧限抗压强度为 3.23 MPa,干燥无侧限抗压强度为 10.23 MPa,软化系数为 0.32。

(2) 在此基础上,进一步对固化土养护液研究得 MBER 固化土体养护液的最优配合比为 0.10 mol/L 碳酸氢钠溶液、0.04 mol/L 硫酸钠溶液、2% 纳米二氧化硅溶胶。在 MBER 最优配比固化土体条件下,其 3 d、7 d、14 d 饱水无侧限抗压强度分别为 1.88 MPa、3.76 MPa、5.22 MPa。

(3) 建议在工程实践中,根据不同的土质和养护条件,深入研究水泥基土体固化剂和养护液的配方,使其固化土的工程性能能够满足工程需求。

参考文献:

- [1] 张 路,杨正宏,曲生华. 硫酸钠对水泥硬化性能的影响[J]. 新型建筑材料,2014,41(2):28-130,56.
- [2] 刘剑平,武 涛,郝羽婷,等. Na_2SO_4 环境下 CMK-水泥土强度机理的研究[J]. 非金属矿,2018,41(5):7-10.
- [3] Lin Dengfong, Luo Huanlin, Hsiao Darnhorng, et al. Enhancing soft subgrade soil with a sewage sludge ash/cement mixture and nano-silicon dioxide [J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(7):619.
- [4] Zhang Bowen, Wei Jiang, Xu Qingzheng, et al. Experimental feasibility study of ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) as cement stabilized soil curing agent [J]. Road Materials and Pavement Design, 2022,23(3):617-638.
- [5] Najafi Kani E, Allahverdi A. Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan [J]. Journal of Materials Science, 2009,44(12):3088-3097.
- [6] Liu Jingjing, Zha Fusheng, Deng Yongfeng, et al. Effect of an alkaline environment on the engineering behavior of cement-stabilized/solidified Zn-contaminated soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017,24(36):28248-28257.

- [7] 黄 新,宁建国,许 晟,等. 固化土孔隙液 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和度对强度的影响[J]. 工业建筑,2006(7):19-24.
- [8] 任冠洲,原 华,刘 康,等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积技术反应液配方试验[J]. 中国科技论文,2020,15(9):1085-1089,1098.
- [9] 樊恒辉,高建恩,娄宗科,等. 一种水泥基土壤固化剂及其制备与应用[P]. 陕西:CN101597496. 2009-07-06.
- [10] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等. 固化土集流面无侧限抗压强度影响因素研究[J]. 农业工程学报,2006(9):11-15.
- [11] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 土壤固化剂集流面不同施工工艺比较[J]. 农业工程学报,2006(10):73-77.
- [12] 赵文君,高建恩,许秀泉,等. 不同材质水窖贮存雨水水质变化特征[J]. 水土保持学报,2010,24(1):20-23,44.
- [13] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 不同结构土壤固化剂集流面的力学与集流性能研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):224-228,234.
- [14] 张少龙,高建恩,李兴华,等. 含盐量对 MBER 土壤固化剂加固土性能的影响试验[J]. 水电能源科学,2015,33(11):133-135,139.
- [15] 韩信来,高建恩,樊恒辉,等. 黄土高原不同地区固化土强度变化规律研究[J]. 人民长江,2009,40(22):76-78.
- [16] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J]. 岩土力学,2011,32(7):1996-2000.
- [17] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等. 密度和含水率对固化土无侧限抗压强度的影响[J]. 中国水土保持科学,2006(3):54-58.
- [18] 张 通,高建恩,李兴华,等. 影响 MBER 固化土劈裂抗拉强度的因素试验[J]. 水土保持通报,2013,33(1):49-52.
- [19] 冀 璐,高建恩,郝连安,等. MBER 固化土弹性模量的试验研究[J]. 水土保持通报,2012,32(5):261-264.
- [20] 刘世皎,樊恒辉,史 祥,等. BCS 土壤固化剂固化土的耐久性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(12):214-220.
- [21] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等. 水泥基土壤固化剂固化土的微观结构特征[J]. 建筑材料学报,2010,13(5):669-674.
- [22] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 水泥基土壤固化剂固化土的物理化学作用[J]. 岩土力学,2010,31(12):3741-3745.
- [23] 张星辰,高建恩,樊恒辉,等. 纳米土壤固化剂重构黄土力学性能的试验研究[J]. 水土保持研究,2021,28(6):131-137,143.

4 结 论

(1) 以福建省地区地质地貌条件、降雨量、自然灾害等为依据,按照一级指标边坡场地安全和边坡设计安全将影响高路堤施工安全的指标进行划分。其中一级指标边坡场地安全涵盖二级指标:施工季节降雨量、自然灾害的影响、交通量、交通布控和导改措施、施工周边环境、原边坡变形等指标。一级指标边坡设计安全涵盖二级指标:地基处理、填方高度、边坡加固方式、设计资料完整性以及路基加固方法等。并基于指标体系法对指标赋予权重,得到施工安全风险评估等级。

(2) 按照提出指标以及指标体系法,对福建地区改扩建工程中两个案例进行分析,按照工程实际情况对各个指标评分,得到该工程案例的风险等级。初步验证其合理性,该成果可为类似工程风险评估提供依据。

参考文献:

[1] 交通运输部安全与质量监督管理局. 高速公路路堑高陡边坡工程施工安全风险评估指南[M]. 北京:人民交通出版社,2015.

[2] Harden J, Viberg L. Evaluation of landslide hazard [C]//Proceedings of 5th International Symposium on Landslides, 1988:1037-1056.

[3] 张 超. 高速公路路堑高边坡施工安全风险评估研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.

[4] 吴忠广,王海燕,陶连金,等. 高速公路高边坡施工安全总体风险评估方法[J]. 中国安全科学学报,2014,24(12):124-129.

[5] 叶 威,陈华斌,吴 铸,等. 山区高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估技术探讨[J]. 公路,2018,63(3):42-47.

[6] 翟友成,曹文贵,王江营,等. 基于不确定型层次分析法的边坡稳定模糊评判方法[J]. 岩土力学,2011,32(S2):539-543.

[7] 俞素平. 基于风险矩阵法的公路高边坡风险评估[J]. 长春工程学院学报(自然科学版),2018,19(1):85-89.

[8] 涂圣文,郑克梅,张 尧,等. 基于改进 CRITIC 法与云模型相结合的高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估模型研究[J]. 安全与环境工程,2019,26(03):127-132.

[9] Berggren B, Fläsik J, Viberg L. MaPPing and evaluation of landslide risk in sweden landslides [C]//Proceedings of the SiXth International SymPosium on Landslides, Rotterdam, Netherlands, 1992:873-878.

[10] Christopher Laughton. Evaluation and Prediction of Tunnel Boring Machine Performance in Variable Rock Masses [P]. The University of Texas, 1998.

[11] Brand E W. Landslide Risk Assessment in Hong Kong Landslide [C]//Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslide, Rotterdam, Netherlands, 1988:1059-1074.

[12] 彭余华,王晓玉,王 玮,等. 高速公路改扩建半幅封闭式交通组织方案参数设置方法[J]. 筑路机械与施工机械化,2016,33(6):83-88.

[13] 福建省气象局. 2021 年福建省气候公报[R/OL]. (2022.03.15)[2023-11-25]. <http://fj.weather.com.cn/zxfw/qhgb/03/3527254.shtml>.

[14] 王和林,谢旺祥,胡庆国. 改扩建高速公路高边坡施工对运营安全影响风险等级判定[J]. 中外公路,2014,34(6):9-12.

[15] 刘松玉,周 建,章定文,等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报,2020,53(4):93-110.

[16] 郑 刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2):127-146.



(上接第 179 页)

[24] Zhang Xingchen, Gao Jianen, Fan Henghui, et al. Study on the mechanism of nano-SiO₂ for improving the properties of cement-based soil stabilizer [J]. Nanomaterials, 2020,10(3):405.

[25] 石庆红,杨秀娟,赵 之,等. 工业废渣-过硫酸钠协同固化/稳定化石油污染土配比优选研究[J]. 环境科学,2023,43(4):1791-1801.

[26] 郑明新,杨婧雯. 基于 AHP-CRITIC 与 TOPSIS 的路基下穿高铁桥梁施工工法评价[J]. 安全与环境学报,2023,23(8):2563-2571.

[27] 袁晓峰,程剑星,李 峰,等. 模糊数学的优选理论在岩土工程中的应用[J]. 中国新技术新产品,2009(9):94-95.