

基于模糊综合评价优化模型的边坡二次开挖稳定性评价

王登杰^{1*}, 王岩², 孙国瑞¹

¹山东大学土建与水利学院, 山东 济南

²山东高速集团有限公司建设管理分公司, 山东 济南

Email: *wangdj@sdu.edu.cn

收稿日期: 2021年6月29日; 录用日期: 2021年7月13日; 发布日期: 2021年7月28日

摘要

既有支护高边坡在二次开挖过程中稳定性较差, 利用灰色关联分析确定了边坡稳定性影响因素的评价权重, 建立了一种考虑既有支护边坡稳定性的模糊综合评价优化模型。利用优化模型对开挖前后有无支护边坡的稳定性进行评价, 发现支护结构对边坡的稳定性影响较大。通过瑞典条分法进行验证, 发现两种方法的结果较为一致, 表明该模糊综合评价模型对二次开挖过程中边坡的稳定性评价较为准确。

关键词

既有支护高边坡, 二次开挖, 灰色关联分析, 模糊综合评价

Stability Evaluation of Slope Secondary Excavation Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Optimization Model

Dengjie Wang^{1*}, Yan Wang², Guorui Sun¹

¹School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan Shandong

²Shandong Expressway Group Co., Ltd., Jinan Shandong

Email: *wangdj@sdu.edu.cn

Received: Jun. 29th, 2021; accepted: Jul. 13th, 2021; published: Jul. 28th, 2021

*通讯作者。

Abstract

The stability of the high slope with existing support is poor during the secondary excavation process. The gray correlation analysis is used to determine the evaluation weight of the factors affecting the stability of the slope, and a fuzzy comprehensive evaluation optimization model considering the stability of the existing support slope is established. The optimization model is used to evaluate the stability of the slope with or without support before and after the excavation, and it is found that the support structure has a greater impact on the stability of the slope. Validation by the Swedish strip method shows that the results of the two methods are relatively consistent, indicating that the fuzzy comprehensive evaluation model is more accurate in evaluating the stability of the slope during the secondary excavation process.

Keywords

High Slope with Existing Support, Secondary Excavation, Grey Correlation Analysis, Fuzzy Comprehensive Evaluation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高边坡的二次开挖需要破除既有的支护结构, 改变坡面原有的应力状态, 肆意开挖容易导致边坡失稳破坏。对于边坡的稳定性问题, 国内外学者有着多种多样的研究方法[1], 通过归纳整理后主要分为定性分析法和定量分析法[2]。近年来, 为解决定性或定量分析对边坡稳定性评价准确性较差的问题, 国内外学者又提出了不确定性分析方法。其中, 黄裕新等利用灰色关联分析确定了各影响因素对边坡的影响大小, 黄有堂等[3]利用模糊综合评价对高陡边坡的稳定性进行了评价。传统的模糊综合评价方法一般依靠专家评分来获得评价权重[4], 而评价权重容易受到主观因素的影响。另外, 由于不同地区的影响因素对边坡稳定性的影响不同, 评价结果与实际结果有一定的偏差。

因此, 本研究针对模糊综合评价中存在的问题, 以粘聚力、内摩擦角、重度、坡高、坡度、支护结构、边坡外形作为评判因素, 利用灰色关联分析确定边坡的评价权重[5], 进而建立了针对既有支护高边坡稳定性的模糊综合优化模型, 并依托京沪高速 K503 高边坡进行了边坡稳定性评价。

2. 二次开挖边坡的评价指标及权重的确定

模糊综合评价方法是在进行综合评价之前先将评价指标定量化, 因此准确确定评价指标及其权重是极其重要的前置环节[6]。为了使评价指标定量化更为精确, 本研究根据边坡稳定性的相关影响因素采用了 2 个评价层次、7 个二级评价指标, 同时结合灰色关联分析对各评价指标的权重进行确定。

2.1. 边坡模糊综合评价指标

根据不同因素对边坡稳定性的影响[7], 将边坡岩土体性质(V_1)、边坡外貌(V_2)和施工因素(V_3)作为一级评价指标, 将粘聚力、内摩擦角、重度、坡高、坡度、支护结构、边坡外形作为二级评价指标。将边坡的稳定性程度划分为非常稳定(I)、较稳定(II)、一般(III)、不稳定(IV)、非常不稳定(V)。具体评价指标如表 1 所示。

Table 1. Evaluation index of high slope stability
表 1. 高边坡稳定性评价指标

评价指标	评价等级					
	I	II	III	IV	V	
岩土体性质	粘聚力/kPa	>22	12~22	8~12	5~8	<5
	内摩擦角/°	>37	29~37	19~29	13~19	<13
	重度/kNm ⁻³	<10	10~17	17~28	28~40	>40
边坡外貌	坡高/m	<15	15~30	30~40	40~50	>50
	坡度/°	<10	10~25	25~45	45~55	>55
施工因素	支护结构	<2 m/排	2~8 m/排	>8 m/排	无支护	不合理支护
	坡面形态	五级坡面	四级坡面	二、三级坡面	一级坡面	不合理坡面

2.2. 灰色关联分析确定评价权重

人为评价各评价指标权重易受主观意志的影响,因此本文采用灰色关联分析探究各影响因素之间的潜在关系[8],找出影响目标的数值大小,进而确定各因素对目标值的影响大小。

1) 灰色关联分析计算步骤

将高边坡稳定性的影响因素设为矩阵 X , 安全系数设为矩阵 Y :

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j1} & x_{j2} & \cdots & x_{jj} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_i \\ \vdots \\ Y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1j} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ij} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{j1} & y_{j2} & \cdots & y_{jj} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, x_{ij} 表示第 i 个影响因素的变化值; y_{ij} 表示第 i 个影响因素变化时所对应的安全系数。

由于各影响因素的量纲不一致并且数值相差较大,本研究通过极差变化对数据进行无量纲化处理得到了新的矩阵:

$$\bar{X} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \bar{Y} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \quad (2)$$

对新的矩阵进行如下处理,形成新的差异序列矩阵 Δ , 并找出最大最小值:

$$\Delta_{ij} = |\bar{X} - \bar{Y}| \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = \max \Delta_{ij}, \Delta_{\min} = \min \Delta_{ij} \quad (4)$$

关联系数矩阵以及关联度的计算公式为:

$$L_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \alpha \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \alpha \Delta_{\max}} \quad (5)$$

$$G_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{ij} \quad (6)$$

式中, L 为关联系数矩阵; α 为分辨系数,一般取 0.5; G 为关联度; n 为计算关联度时影响因素的数量。

2) 灰色关联分析计算

利用瑞典条分法计算不同影响因素下边坡的安全系数[9],并将边坡的坡高、坡度、重度、粘聚力、内摩擦角、坡面形态以及支护结构作为子序列(X)矩阵进行灰色关联分析,将其安全系数作为母序列矩阵

(Y), 矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} 31 & 33 & 35 & 37 & 39 \\ 37 & 41 & 45 & 49 & 53 \\ 20 & 22 & 24 & 26 & 28 \\ 31 & 33 & 35 & 37 & 39 \\ 24 & 26 & 28 & 30 & 32 \\ 01 & 02 & 03 & 04 & 05 \\ 00 & 01 & 02 & 03 & 04 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 1.281 & 1.200 & 1.150 & 1.092 & 1.040 \\ 1.242 & 1.212 & 1.150 & 1.122 & 1.065 \\ 1.250 & 1.176 & 1.150 & 1.103 & 1.057 \\ 1.100 & 1.112 & 1.150 & 1.200 & 1.228 \\ 1.035 & 1.117 & 1.150 & 1.217 & 1.250 \\ 1.15 & 1.175 & 1.232 & 1.260 & 1.323 \\ 1.15 & 1.177 & 1.341 & 1.456 & 1.539 \end{bmatrix}$$

对子序列矩阵与母序列矩阵进行极差标准化处理, 处理后的矩阵为:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \end{bmatrix}, \bar{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0.664 & 0.456 & 0.216 & 0 \\ 1 & 0.830 & 0.479 & 0.342 & 0 \\ 1 & 0.617 & 0.482 & 0.238 & 0 \\ 0 & 0.092 & 0.391 & 0.781 & 1 \\ 0 & 0.381 & 0.536 & 0.845 & 1 \\ 0 & 0.142 & 0.475 & 0.643 & 1 \\ 0 & 0.070 & 0.493 & 0.796 & 1 \end{bmatrix}$$

差异矩阵为:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0.414 & 0.044 & 0.534 & 1 \\ 1 & 0.580 & 0.021 & 0.408 & 1 \\ 1 & 0.367 & 0.018 & 0.512 & 1 \\ 0 & 0.148 & 0.109 & 0.031 & 0 \\ 0 & 0.131 & 0.036 & 0.095 & 0 \\ 0 & 0.108 & 0.025 & 0.107 & 0 \\ 0 & 0.180 & 0.007 & 0.046 & 0 \end{bmatrix}$$

由差异矩阵可知 $\Delta_{\max} = 1$, $\Delta_{\min} = 0$ 。关联系数矩阵为:

$$L = \begin{bmatrix} 0.333 & 0.547 & 0.919 & 0.484 & 0.333 \\ 0.333 & 0.463 & 0.960 & 0.551 & 0.333 \\ 0.333 & 0.577 & 0.965 & 0.494 & 0.333 \\ 1 & 0.772 & 0.821 & 0.942 & 1 \\ 1 & 0.792 & 0.581 & 0.840 & 1 \\ 1 & 0.822 & 0.952 & 0.824 & 1 \\ 0.333 & 0.735 & 0.986 & 0.916 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得到的各影响因素的关联系数如表 2 所示, 边坡的稳定性影响程度的大小依次是支护结构(预应力锚索)、边坡坡面形态、粘聚力、内摩擦角、重度、坡度以及边坡的高度。

Table 2. Calculation results of correlation coefficient

表 2. 关联系数计算结果

影响因素	G_H	G_A	G_G	G_C	G_φ	G_N	G_M
关联系数	0.523	0.528	0.54	0.908	0.843	0.92	0.927

通过对灰色关联度分析所得到的各影响因素的关联系数进行归一化处理, 即可得到各评价指标的权重[10]。岩土体性质(ω_1)、边坡的外貌(ω_2)、施工因素(ω_3)以及总体的评价指标权重(ω)分别为:

$$\begin{cases} \omega_1 = [0.4, 0.37, 0.23] \\ \omega_2 = [0.5, 0.5] \\ \omega_3 = [0.5, 0.5] \\ \omega = [0.43, 0.21, 0.36] \end{cases}$$

3. 二次开挖边坡的稳定性评价模型

为准确评价边坡稳定性, 将最大隶属度原则以及模糊综合评价分数作为评价标准, 建立边坡的稳定性评价模型[11]。边坡的隶属度可以根据专家评定法以及公式法两种方法确定[12], 本文利用公式法确定边坡的隶属度, 进而得到边坡的模糊评判公式, 最终确定边坡的稳定性大小。

二级评价指标的综合评判公式为:

$$V_i = \omega_i \cdot R_i \quad (7)$$

二级评价指标的模糊评价矩阵为:

$$R = [V_1, V_2, V_3] \quad (8)$$

一级评价指标的模糊评判公式为:

$$V = \omega \cdot R = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5] \quad (9)$$

根据最大隶属度法就可以得到边坡的稳定性级别, 最大隶属度为:

$$\alpha_i = \max \{ \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 \} \quad (10)$$

边坡稳定性模糊综合评价界限为:

$$N_i = [95, 75, 55, 25, 10]$$

将计算得到的隶属度加权平均计算, 得到边坡模糊综合评价分数, 通过评价分数即可确定各边坡稳定性的大小:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i N_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (11)$$

4. 开挖前后边坡稳定性评价

为确定二次开挖过程中边坡的稳定性, 以京沪高速公路 K503 边坡为例, 采用模糊综合评价法分析开挖前有无支护、开挖后有无支护边坡 4 种工况, 分析确定 K503 边坡的稳定性。京沪高速公路 K503 边坡扩建前为五级边坡, 坡度 45°, 边坡支护结构为预应力锚索, 按扩建方案扩建后为四级边坡。区内地层主要为奥陶系和第四系上更新统松散堆积层, 岩石主要为碎石、强 - 中风化灰岩等, 整体风化程度一般, 节理裂隙及结构面发育, 岩体较破碎, 易发生滑动、崩塌等局部病害。岩土体的主要力学参数如表 3 所示。

Table 3. Geotechnical physical parameters of slope K503
表 3. K503 边坡岩土体力学参数

岩石名称	重度(kN/m ³)	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)
碎石	20.8	5	30~40
强风化页岩	21.5	33~35	30~32
中风化页岩	20~23	33~35	33~35

对开挖前边坡进行模糊综合评价, 确定边坡的稳定性状态, 岩土体性质、边坡的外貌以及施工因素的模糊矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

岩土体性质、边坡的外貌以及施工因素的综合评判为:

$$V_1 = \omega_1 \cdot R_1 = [0.32, 0.416, 0.184, 0.08, 0]$$

$$V_2 = \omega_2 \cdot R_2 = [0, 0.1, 0.1, 0.8, 0]$$

$$V_3 = \omega_3 \cdot R_3 = [0.3, 0.7, 0, 0, 0]$$

二级评价指标的模糊评价矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.32 & 0.416 & 0.184 & 0.08 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.1 & 0.8 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

一级评价指标的综合评判为:

$$V = \omega \cdot R = [0.246, 0.452, 0.1, 0.202, 0]$$

边坡模糊评价分数为:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i N_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} = 67.79$$

根据计算结果, 边坡非常稳定的概率为 0.246, 边坡较稳定的概率为 0.452, 边坡一般稳定的概率为 0.1, 边坡不稳定的概率为 0.202, 边坡非常不稳定的概率为 0。模糊综合评价结果表明, 该边坡较为稳定, 边坡模糊评价得分为 67.79。同理, 对开挖前无支护、开挖后无支护和开挖后有支护的边坡进行评价, 结果如下:

1) 开挖前无支护时非常稳定的概率为 0.138, 较稳定的概率为 0.38, 一般稳定概率为 0.1, 不稳定的概率为 0.382, 非常不稳定的概率为 0。模糊评价评分为 56.63, 得分较低, 表明开挖前无支护边坡稳定性较差。

2) 开挖后无支护边坡处于非常稳定的概率为 0.169, 较稳定的概率为 0.329, 稳定的概率为 0.172, 不稳定的概率为 0.331, 非常不稳定为 0。模糊综合评价 58.45, 开挖后无支护边坡的稳定性较差, 模糊评价分数较低。

3) 开挖后支护边坡处于非常稳定的概率为 0.313, 较稳定的概率为 0.365, 稳定的概率为 0.172, 不稳定的概率为 0.15, 非常不稳定为 0, 模糊综合评价 70.33。开挖后有支护边坡的稳定性较好, 模糊评价分数较高。

由模糊评价的结果可知, 有支护边坡的稳定性较好, 无支护边坡的稳定性相对较差, 这是因为预应力锚索支护通过锚索对坡体施加了预应力, 压实了破碎岩体, 形成了双向压力带, 增加了锚索周围的压力, 进而增加了边坡的摩擦力, 提高了坡体的力学性能。支护结构的存在可以有效抑制边坡的变形, 改善边坡的应力分布和塑性区分布, 从而提高边坡的整体稳定性。为保证边坡开挖安全, 施工时应选择合适的施工方案。根据模糊评价得分, 边坡的稳定性为: 开挖后有支护 > 开挖前有支护 > 开挖后无支护 > 开挖前无支护。开挖前边坡的稳定性小于开挖前的边坡稳定性, 这主要是由于开挖后边坡的坡度较开挖前大幅度降低。

5. 可靠性验证

为验证模糊评价模型的可靠性, 利用瑞典条分法对 K503 边坡四种工况的安全系数进行计算[13], 安全系数如表 4 所示。

Table 4. Safety factors calculated by the Swedish slice method

表 4. 瑞典条分法计算的安全系数

工况	开挖前-有	开挖前-无	开挖后-无	开挖后-有
瑞典条分法	1.38	1.13	1.15	1.43

将模糊综合评价法的模糊评价分数以及瑞典条分法的安全系数分别进行归一化处理[14], 得到边坡的稳定性变化趋势如图 1 所示。边坡稳定性大小为开挖后有支护 > 开挖前有支护 > 开挖后无支护 > 开挖前无支护, 且有支护的边坡的稳定性远好于无支护的边坡。两种方法计算的结果较一致, 验证了模糊评价模型对边坡稳定性的评价具有较好的可靠性[15]。

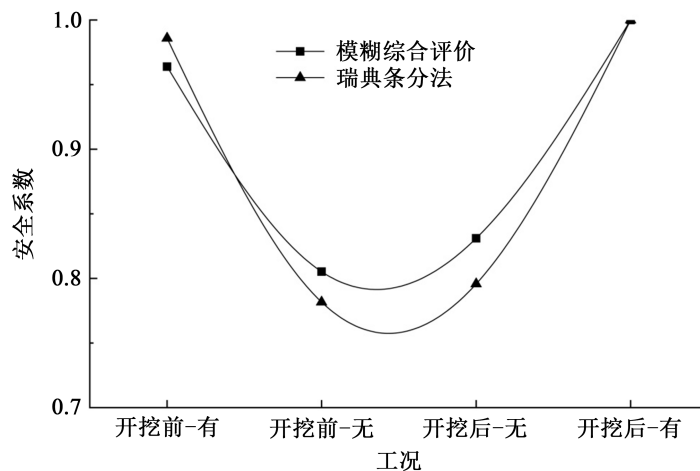


Figure 1. Change trend of slope stability

图 1. 边坡稳定性变化趋势

6. 结论

本文针对既有支护高边坡二次开挖过程的稳定性问题,通过灰色关联分析确定评价权重,建立了模糊综合评价优化模型,为边坡稳定性的计算提供了一种新的计算方法。本模型不仅将不易定量、边界不清的因素量化,而且采用了多个层次的评价指标以提高评价的精确度。采用优化模型评价开挖前后有支护或无支护边坡的稳定性,并采用瑞典条分法进行了验证,得到的主要结论如下:

边坡稳定情况为:开挖后支护 > 开挖前支护 > 开挖后不支护 > 开挖前不支护。有支护的边坡稳定性较好,无支护边坡稳定性较差,易发生失稳破坏,支护结构对边坡的影响较大。

采用模糊综合评价和瑞典条分法对边坡稳定性进行评价得到的结果较为一致,表明本文提出的模糊综合评价优化模型用于二次开挖过程边坡稳定性计算时具有良好的可靠性。

参考文献

- [1] 丁参军,张林洪,于国荣,等. 边坡稳定性分析方法研究现状与趋势[J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 112-114+212.
- [2] 周东升,杨凤芸,武帅萌. 边坡稳定性分析方法研究现状与展望[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(7): 28-30+34.
- [3] 黄有堂. 基于模糊综合评价法的高陡边坡稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [4] Goodman, R.E. and Kieffer, D.S. (2000) Behavior of Rock in Slopes. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **126**, 675-684. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:8\(675\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:8(675))
- [5] Jaeger, J.C. (1971) Friction of Rocks and Stability of Rock Slopes. *Géotechnique*, **21**, 97-134. <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.2.97>
- [6] 刘伟鹏,毛邦燕,侯伟龙. 吉尔木隧道出口边坡赤平投影稳定性分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(10): 59-64.
- [7] 刘强,胡斌,蒋海飞,等. 改进的边坡楔形体破坏稳定性分析方法[J]. 人民长江, 2013, 44(22): 69-71+78.
- [8] 邓聚龙. 灰色理论和方法[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987.
- [9] 柏俊磊,王乐华,汤开宇,等. 开挖卸荷速率变化对岩质边坡应力应变影响作用研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(6): 60-64+68.
- [10] 倪振强,孔纪名,阿发友,等. 类土质公路边坡开挖扰动破坏过程的研究[J]. 公路, 2011, 4(12): 28-33.
- [11] 黄裕新,吕波,施品贵. 基于改进灰色关联度的权重确定方法[J]. 武汉科技学院学报, 2004, 17(3): 72-75.
- [12] 赵永虎,刘高,毛举,等. 基于灰色关联度的黄土边坡稳定性因素敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(7): 94-98.
- [13] 郑红超,黄质宏. 基于灰色关联度的红黏土边坡稳定性因素敏感性分析[J]. 人民珠江, 2017, 38(1): 39-42.
- [14] 赵蒙生,周敏,代永新,等. 灰色关联度对边坡稳定性的预测分析[J]. 金属矿山, 2012, 4(10): 130-133.
- [15] 陈新民,罗国煜. 基于经验的边坡稳定性灰色系统分析与评价[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 638-641.