

基于实测数据的隧道开挖松动圈统计研究

于长一^{1,2,4,5,6}, 刘瑞建², 刘世纲^{2,3}, 曹永华^{1,2,4,5,6}, 徐宾宾^{2,3}, 刘桂泽^{1,2,4,5,6}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 3. 中交一航局第三工程有限公司, 辽宁 大连 116083; 4. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222; 5. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222; 6. 中交集团岩土工程重点实验室, 天津 300222)

摘要: 隧道的松动圈范围对隧道支护起决定性作用, 而目前对隧道松动圈的实测统计还处于空白。为此统计了 47 条隧道, 177 个断面的松动圈实测数据, 根据对比分析实测数据, 铁路、公路隧道规范建议的锚杆长度基本能满足实际情况, 但在高地应力和软岩大变形隧道中, 锚杆和锚索长度需要根据实测动态调整确定。其次, 采用不同的方法计算了 47 条隧道的围岩压力, 根据实测松动圈数据修正的芬纳公式反算得到的围岩压力是普氏理论、太沙基理论、铁路隧道规范和基于实测松动圈厚度计算的围岩静压力的 10 余倍。在软岩大变形、高地应力隧道中, 可采用修正的芬纳公式反算得到地层压力, 由此计算得到的支护参数偏于保守, 有利于工程安全施工。其他方法可在一般的深埋隧道中用于围岩支护压力计算。本文结果可为软岩大变形、高地应力隧道支护计算提供有效的指导和参考。

关键词: 松动圈; 锚杆; 围岩压力; 高地应力; 软岩大变形

中图分类号: U655.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2025)02-0054-08

doi: 10.7640/zggwjs202502008

Statistical research on tunnel excavation loose zone based on measured data

YU Chang-yi^{1,2,4,5,6}, LIU Rui-jian², LIU Shi-gang^{2,3}, CAO Yong-hua^{1,2,4,5,6}, XU Bin-bin^{2,3}, LIU Gui-ze^{1,2,4,5,6}

(1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 3. No.3 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116083, China; 4. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300222, China; 5. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China; 6. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, CCCC, Tianjin 300222, China)

Abstract: The range of loose zone in tunnels plays a decisive role in tunnel support, and currently, the measured statistics of loose zone in tunnels are still blank. For this purpose, the measured data of 47 tunnels and 177 sections of loose zone was collected. Based on comparative analysis of the measured data, the recommended bolt length in railway and highway tunnel specifications can basically meet the actual situation. However, in high in-situ stress and soft rock large deformation tunnels, the length of anchor bolts and cables needs to be dynamically adjusted and determined based on the measured data. Secondly, different methods were used to calculate the surrounding rock pressure of 47 tunnels. Based on the measured loose zone data, the modified Finner formula was used to reversely calculate the surrounding rock pressure, which was more than 10 times the calculated value obtained from Proctor's theory, Terzaghi's theory, railway tunnel specifications, and the static pressure of the measured loose zone thickness. In soft rock tunnels with large deformation and high in-situ stress, the formation pressure can be calculated using the modified Finner formula, which results in conservative support parameters and is beneficial for safe construction of the project. Other methods can be used for calculating the surrounding rock support pressure in general deep buried tunnels. The results of this paper can provide effective guidance and reference for the calculation of support for soft rock tunnels with large deformation and high in-situ stress.

Key words: loose zone; anchor bolt; surrounding rock pressure; high in-situ stress; soft rock large deformation

收稿日期: 2024-04-10 修回日期: 2024-05-28

基金项目: 天津市科技计划项目 (20JCJCJC00220); 国家自然科学基金项目 (52171273, 52108335)

作者简介: 于长一 (1988—), 男, 辽宁大连人, 博士, 高级工程师。主要从事岩土工程数值和理论计算研究工作。E-mail: yu_longone@163.com

0 引言

隧道开挖后, 周围的岩体由于应力释放在隧道周边产生松动圈, 为了能够有效抑制松动圈的发展, 可采用锚杆支护。且为了能够保持围岩稳定, 还需提供初步支护等措施。现场实测松动圈有多种方法, 如地震波法、多点位移计法、钻孔摄像技术等, 这些方法为隧道的修建提供了可靠的数据支撑。理论方面^[1]主要采用强度准则, 如基于 Mohr-Coulomb 准则提出了修正的芬纳公式、基于 Hoek-Brown 准则提出的松动圈计算公式等, 这些方法可结合岩石强度参数计算得到松动圈半径, 概念明确。但其参数较多, 参数取值对结果影响较大。另外松动圈的计算也可采用拟合的经验公式计算, 如傅洪贤等^[2]给出了隧道跨度、埋深、围岩强度与松动圈的拟合公式, 并与实测结果进行对比, 效果较好。但是经验公式往往缺少大量验证, 且可能存在地域和岩性的局限性。目前松动圈的数据都是集中在各个工程项目上, 没有进行统计分析, 更缺乏宏观应用。此外, 锚杆作为隧道施工支护的主要手段, 其长度设计与围岩松动圈的厚度息息相关, 通常要求锚杆长度超出围岩松动圈厚度, 这样可为松散岩体提供足够的锚固

力, 进而增加围岩的整体承载能力。另外隧道设计时采用的荷载结构法, 其荷载计算值可有多种理论, 如基于松动土压力的普氏、太沙基等理论; 还有基于弹塑性力学的修正的芬纳公式等; 也有 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》的统计经验公式法。这些方法各有所长, 但针对高地应力和软岩大变形隧道, 不同方法的计算结果差别较大。徐强等^[3]基于修正的芬纳公式反算了深埋黄土隧道围岩压力, 但只计算了 1 条隧道, 其普适性需要进一步验证。

综上所述, 在隧道施工中松动圈的实际情况缺乏宏观统计, 且针对松动圈数据的详细分析和应用分析也相对较少。为此, 本文开展隧道实测的松动圈统计研究, 为隧道的锚杆支护、初支荷载计算等提供可靠数据支撑和分析方法。

1 松动圈实测统计

为了能够有效分析松动圈实际情况, 本文统计了 II—V 级围岩 47 条隧道, 177 个断面的松动圈实测数据, 其中 II 级围岩 3 条隧道, 7 个断面, III 级围岩 9 条隧道, 28 个断面, IV 级围岩 16 条隧道, 35 个断面, V 级围岩 33 条隧道, 107 个断面, 如表 1 所示。

表 1 隧道松动圈统计
Table 1 Tunnel loose zone statistics

数据来源	围岩级别	断面个数	隧道跨度/m	隧道高度/m	埋深/m	松弛深度/m
荆西隧道 ^[4-5]	II	1	12.30	8.00	100	2.50~3.50
广州地铁 21 号线 8 标科学广场站—苏元站区间隧道 ^[6]	II	3	6.80	5.40	—	1.10
里洋隧道 ^[7]	II	3	—	—	20	3.00
茅山隧道 ^[8]	III	1	17.33	11.98	40	2.50
米仓山隧道 ^[9]	III	9	10.00	5.00	400	1.40~1.80
青岛胶州湾海底隧道 ^[10]	III	5	16.43	13.18	30	1.00~1.30
水开区间地铁 ^[11]	III	1	8.00	8.00	22	1.80
老木峪 2 号隧道 ^[12]	III	2	10.25	7.00	100	0.90~1.05
石门隧道 ^[13-14]	III	4	16.50	5.50	100	0.72~0.83
大跨洞室 ^[15]	III	1	10.00	12.00	—	3.20
石牛岭隧道 ^[16]	III	4	18.20	12.41	—	1.80~2.10
引水隧洞 ^[17]	III	1	13.00	13.00	1 600	1.90
小相岭隧道 ^[18]	IV	1	14.80	12.73	300	5.00
荆西隧道 ^[4-5]	IV	1	12.30	8.00	100	2.50~3.50
中河隧道 ^[19]	IV	1	11.77	8.80	205	6.00~7.00
成兰铁路某隧道 ^[20]	IV	4	14.80	12.73	300	6.50~7.30
安胜区间地铁 ^[11]	IV	1	8.00	8.00	14	2.30
安青区间地铁 ^[11]	IV	1	8.00	8.00	25	3.00
某隧道 ^[21]	IV	1	4.00	5.20	—	2.10
石门隧道 ^[13-14]	IV	4	—	—	—	0.81~1.21

续表 1

数据来源	围岩级别	断面个数	隧道跨度/m	隧道高度/m	埋深/m	松弛深度/m
里洋隧道 ^[7]	IV	3	9.25	6.00	20	1.50~3.10
鸿尾 I 隧道 ^[7]	IV	1	—	—	30	1.00~1.50
重庆某隧道 ^[23]	IV	5	—	—	400	1.50~2.50
41 采区回风联络巷 ^[16]	IV	2	2.80	2.76	—	1.10
牛王盖隧道 ^[2]	IV	3	14.20	9.00	—	0.90~1.50
石牛岭隧道 ^[16]	IV	2	18.20	12.41	—	2.40
铜旬高速某隧道 ^[23~24]	IV	1	12.88	7.00	115	0.80~1.60
青岛胶州湾海底隧道 ^[10]	IV	4	16.43	13.18	30	1.00~1.30
小盘岭隧道 ^[25]	IV—V	9	10.25	7.50	220	4.50~6.00
后祠隧道 ^[26]	IV—V	1	19.60	14.1	100	6.00~9.00
茶镇隧道 ^[27]	V	1	10.25	6.80	100	1.00~2.00
楼山公路隧道 ^[28]	V	1	17.25	5.00	100	2.00
云屯堡隧道 ^[29]	V	4	7.47	7.47	50	12.00~13.00
茂县隧道 ^[29]	V	2	6.46	6.46	50	12.00
跃龙门隧道 ^[29]	V	4	6.12	6.12	50	14.00
四川某公路隧道 ^[30]	V	1	12.00	10.00	310	1.50~1.70
铜旬高速某隧道 ^[23~24]	V	1	12.88	7.00	90	0.80~2.00
中河隧道 ^[19]	V	1	11.77	8.80	280	7.00~8.00
早胜三号隧道 ^[3]	V	4	15.50	13.08	140	7.00~17.00
姜路岭隧道 ^[31]	V	6	13.00	10.00	200	4.00~6.00
中义隧道 ^[32]	V	2	6.60	6.00	800	4.30
鹤上隧道 ^[33]	V	1	16.69	5.66	15	1.40~1.80
通省隧道 ^[34]	V	12	16.20	7.00	400	4.00~5.00
荆西隧道 ^[4~5]	V	2	12.30	8.00	100	5.60~6.80
乌鞘岭隧道 ^[35~36]	V	27	12.38	10.35	445	1.10~7.90
龙潭隧道 ^[37]	V	1	10.00	5.00	28	7.00
沙嫩山隧道 ^[38]	V	2	8.34	10.01	120	8.34
沙嫩山隧道 ^[38]	V	2	13.73	11.24	120	13.73
丰沙铁路 8 号隧道 ^[39]	V	1	5.40	6.50	100	1.00~1.50
鹧鸪山隧道 ^[40]	V	1	13.42	10.49	1 000	5.60~6.20
大梁隧道 ^[41]	V	4	17.00	10.00	100	3.60~6.00
会富莱隧道 ^[42]	V	1	8.42	10.20	200	5.50~6.50
达隆一 ^[42]	V	1	8.42	10.20	200	6.00~7.00
达隆二 ^[42]	V	1	8.42	10.20	200	5.50~6.00
沙嫩一隧道 ^[42]	V	1	8.42	10.20	200	5.50~6.00
黄龙隧道 ^[43]	V	1	12.25	7.00	100	1.50
胡麻岭隧道 ^[44]	V	4	13.20	11.50	295	1.00~4.00
某隧道 ^[21]	V	2	4.00	5.20	—	1.70
石门隧道 ^[13~14]	V	2	—	—	—	1.53~2.00
鸿尾 I 隧道 ^[7]	V	2	—	—	30	1.80~2.80
桥矿东一 B 组轨道上山上部变电所洞室 ^[45]	V	2	4.20	4.30	—	1.70

注：表中隧道跨度、宽度、松弛深度统一调整为保留 2 位小数，埋深因为在文献中给出的数据通常只给到个位，此处与原文献保持一致。

图 1 绘制了 II—V 级围岩条件下的 47 条隧道、177 个断面的松动圈实测数据汇总。II 级和 III 级围岩松动圈厚度全部在 1~3 m，IV 级围岩松动圈厚度大部分在 1~3 m，极少数在 4~8 m，而 V

级围岩松动圈厚度大部分在 4~8 m，其次是 1~3 m，部分范围在 12 m 以上，围岩级别和松动圈厚度的关系非常紧密，围岩越松散，其松动圈厚度越大，且在受高地应力条件下，其松动圈要大很多。

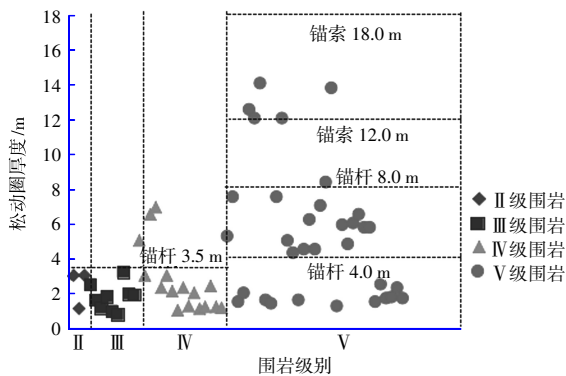


图1 隧道松动圈实测数据汇总

Fig. 1 Organization of tunnel loose zone measurement datas

JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范》第一册土建工程中,三车道隧道的II、III和IV级围岩的锚杆最长为3.5 m,V级围岩的锚杆最长为4 m,如图1所示II、III、IV级围岩的松动圈厚度多数并未超出规范给出的锚杆最大长度,但在V级围岩中,大部分松动圈的厚度超过了锚杆最大长度,因而此规定基本能满足绝大部分II、III和IV级围岩隧道的支护需要,但难以满足V级围岩隧道实际需求。Q-CR 9512—2019《铁路挤压性围岩隧道技术规范》中建议,软岩大变形隧道可采用8~12 m以内的长锚杆或12~18 m的长锚索进行加固。从实测数据显示,该规范可满足实际工程需求。

2 基于松动圈围岩压力分析

目前,松动圈计算都是采用基于弹塑性力学进行分析的,如采用修正的芬纳公式计算松动圈半径^[46-47]:

$$R_1 = R_0 \left[\frac{(P + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{P_1 + C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

式中: P 为围岩压力, kPa; P_1 为隧道的支护力, kPa; C 为围岩的黏聚力, kPa; φ 为围岩内摩擦角, ($^\circ$); R_0 为隧道半径, m; R_1 为松动圈半径, m。

当隧道不是圆形断面时,为了能够应用理论进行分析,需对非圆形隧道按照式(2)转化:

$$R_0 = \left[\left(\frac{B}{2} \right)^2 + h^2 \right] / (2h) \quad (2)$$

式中: R_0 为转化后洞室的半径, m; B 为实际隧道的跨度, m; h 为实际隧道的高度, m。

式(1)中的围岩压力可采用现场实测值或理论计算值,如根据《铁路隧道设计规范》围岩顶部的拱顶垂直压力:

$$P = \gamma h_q \quad (3)$$

$$h_q = 0.45 \times 2^{s-1} \omega \quad (4)$$

$$\omega = 1 + i(B - 5) \quad (5)$$

式中: P 为拱顶垂直压力, kPa; γ 为围岩重度, kN/m³; B 为隧道跨度, m; s 为围岩级别; i 为 B 每增减 1 m 时的围岩压力增减率,当 $B < 5$ m 时,取 $i = 0.2$, $B > 5$ m 时,取 $i = 0.1$; ω 为宽度影响系数。

普氏理论计算拱顶压力如式(6):

$$P = \frac{\gamma}{f} \left[\frac{B}{2} + h \tan(45^\circ - \varphi/2) \right] \quad (6)$$

式中: f 为普氏系数。

太沙基理论计算拱顶压力如式(7):

$$P = \frac{a_1 \gamma - C}{K \tan \varphi} \left[1 - e^{-K(\tan \varphi)n} \right] + q e^{-K(\tan \varphi)n} \quad (7)$$

式中: a_1 为地下结构上部土层塌落宽度之半, m; n 为地下结构的相对埋深, $n = H/a$; H 为隧道埋深, m; a 为地下结构的外缘尺寸宽度之半, m; K 为土压力系数; q 为地面附加荷载, kPa。

研究表明^[28],普氏理论和《公路隧道设计规范》计算的围岩压力比数值模拟都要小一些,并且数值模拟得到的围岩压力用于计算公式(1)中修正的芬纳公式的松动圈半径,计算值与实测值比较吻合。下面将式(1)变形,假设支护力 $P_1 = 0$,可得到地层压力 P :

$$P = \left(\frac{R_1}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \frac{C \cot \varphi}{1 - \sin \varphi} - C \cot \varphi \quad (8)$$

岩石力学支护理论在确定松动压力时,将塑性区内的岩石重量作为支护荷载,塑性区包含松动圈,故在确定松动压力时以松动圈数值为基准较为确切。当有准确的松动圈数据时,其松动压力最大值可按照围岩静压力计算:

$$P = \gamma h_q \quad (9)$$

式中: h_q 为塑性圈厚度, m。

假设围岩的物理力学参数如表2所示,分别采用式(4)、式(7)一式(9)计算表1中隧道的围岩压力,如图2所示。

表2 围岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

围岩级别	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	计算摩擦角/ ($^\circ$)
II	23	150	50	70
III	22	70	39	60
IV	21	25	28	50
V	20	12.5	22	40

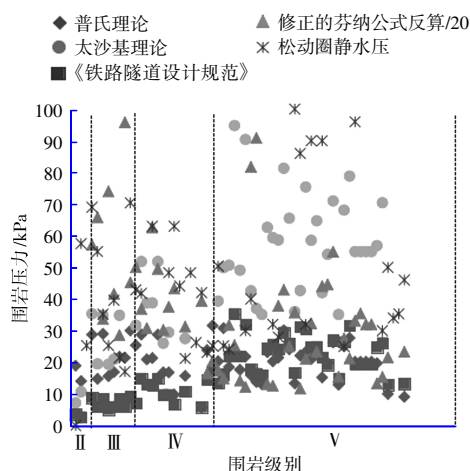


图2 围岩压力计算对比

Fig. 2 Comparison of surrounding rock pressure calculation

图2中展示了不同围岩级别的隧道采用修正的芬纳公式反算得到的围岩压力/20、普氏理论、太沙基理论、《铁路隧道设计规范》计算结果和基于实测的松动圈厚度计算的围岩静压力，其中修正的芬纳公式反算得到的围岩压力计算结果偏大很多，故缩小为计算值的1/20绘制。在II、III和IV级围岩中，按《铁路隧道设计规范》计算得到的围岩压力最小，其次是普氏理论，再次是太沙基理论，最大是基于实测的松动圈厚度计算的围岩静压力。在V级围岩中，普氏理论计算得到的围岩压力最小，其次是《铁路隧道设计规范》，再次是基于实测的松动圈厚度计算的围岩静压力，最大是太沙基理论。根据实测的松动圈数据，采用修正的芬纳公式反算得到的围岩压力比其他3种方法至少大一个数量级。这种差别主要是在于修正的芬纳公式是基于弹塑性力学，而普氏和太沙基理论是基于松动围岩压力的极限平衡状态，其围岩压力属于下限值。另外差别来自于高地应力，实际工程中，很多时候面临软岩大变形隧道、高地应力隧道，其围岩压力主要以实测为准，与理论计算差别非常大。当没有条件进行地应力测试时，软岩大变形隧道或高地应力隧道可采用修正的芬纳公式反算得到地层压力，由此计算的支护参数偏于保守，有利于工程安全施工。而其他方法计算的围岩压力值偏小，使得在软岩大变形隧道中其支护参数偏弱，不利于支护的稳定和控制围岩变形。一般的深埋隧道可采用普氏理论、太沙基理论、《铁路隧道设计规范》和基

于实测的松动圈厚度计算的围岩静压力。

3 结语

本文首先统计了47条隧道，177个断面的松动圈实测数据，根据实测数据分析了铁路、公路隧道规范的锚杆支护长度，从实际情况来看，铁路、公路隧道规范建议的锚杆长度基本能满足实际应用需求，但在高地应力和软岩大变形隧道中，锚杆和锚索长度需要根据实测数据动态调整确定。其次采用不同的方法计算了47条隧道的围岩压力，根据实测松动圈数据修正的芬纳公式反算得到的围岩压力是普氏理论、太沙基理论、《铁路隧道设计规范》的10余倍。在软岩大变形、高地应力隧道中，其地层压力可采用修正的芬纳公式反算得到，由此计算得到的支护参数偏于保守，有利于工程安全施工。其他方法计算的围岩压力值偏小，在软岩大变形隧道中应用时会导致其支护参数偏弱，不利于支护的稳定和控制围岩变形，一般深埋隧道可采用普氏理论、太沙基理论、《铁路隧道设计规范》和基于实测的松动圈厚度计算的围岩静压力计算围岩压力。本文数据和分析结果可为各类隧道施工的动态支护设计计算提供可靠的方法和思路。

参考文献:

- [1] 刘刚,肖勇卓,朱俊福,等. 围岩松动圈理论计算方法的评述与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 46-56.
LIU Gang, XIAO Yong-zhuo, ZHU Jun-fu, et al. Overview on theoretical calculation method of broken rock zone[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 46-56.
- [2] 傅洪贤,赵勇,谢晋水. 铁路双线隧道围岩爆破松动范围测试分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(5): 54-58.
FU Hong-xian, ZHAO Yong, XIE Jin-shui. Test analysis on the broken rock zone of the surrounding rock blasting for railway double-line tunnel[J]. China Railway Science, 2010, 31(5): 54-58.
- [3] 徐强,刘勇,宋玉香,等. 基于松动圈理论深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 10054-10060.
XU Qiang, LIU Yong, SONG Yu-xiang, et al. A method for calculating surrounding rock pressure of deep loess tunnel based on loose broken rock zone theory[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 10054-10060.
- [4] 舒忠磊. 小净距隧道松动圈计算方法及空间效应研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2018.
SHU Zhong-lei. Study on calculation method of loose zone and excavation spatial effect of small spacing tunnels[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2018.
- [5] 舒忠磊,林从谋,常方强,等. 突水突泥影响下隧道围岩松动圈变化测试与分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 545-550.

- SHU Zhong-lei, LIN Cong-mou, CHANG Fang-qiang, et al. Test and analysis on variation of loose zone of surrounding rock in tunnel under influence of water and mud inrush[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2018, 39(4): 545-550.
- [6] 俞定,张继春,王圣涛,等.基于声波测试原理的爆破荷载对地铁隧道围岩扰动研究[J].路基工程,2018(3):136-141.
- YU Ding, ZHANG Ji-chun, WANG Sheng-tao, et al. Study on the disturbance of the surrounding rock of metro tunnel by blasting load based on sonic wave testing principle[J]. Subgrade Engineering, 2018(3): 136-141.
- [7] 郑学贵,丁浩.小净距隧道围岩松动圈测试与分析[J].公路交通技术,2005(1):95-98.
- ZHENG Xue-gui, DING Hao. Test and analysis of loose rings of surrounding rock of tunnels with small clear spacing[J]. Technology of Highway and Transport, 2005(1): 95-98.
- [8] 邵学富,朱菊辉,童立元.大跨浅埋公路隧道CRD法施工围岩松动圈量测与分析[J].交通标准化,2008(1):26-29.
- SHAO Xue-fu, ZHU Ju-hui, TONG Li-yuan. Test and analysis on loosening zone of surrounding rock of big-span shallow overburden tunnel constructed by CRD method[J]. Communications Standardization, 2008(1): 26-29.
- [9] 陈绪文,黄磊,邹逸伦.岩爆隧道柔性支护快速施工技术[J].隧道建设(中英文),2018,38(7):1212-1219.
- CHEN Xu-wen, HUANG Lei, ZOU Yi-lun. Rapid construction technology of flexible support for rockburst tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(7): 1212-1219.
- [10] 王全胜.青岛海底隧道断层破碎带注浆加固圈的拟定与验证[J].公路交通技术,2018,34(S1):165-170.
- WANG Quan-sheng. Formulation and inspection of grouting reinforcement ring in fault crushing zone of Qingdao subsea tunnel[J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34(S1): 165-170.
- [11] 王博.地铁区间隧道围岩松动圈范围及其预测研究[D].北京:北京交通大学,2022.
- WANG Bo. Study on range and prediction of surrounding rock loose zone of metro tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [12] 黄向韬.隧道围岩松动圈范围识别技术的研究[D].湘潭:湖南科技大学,2018.
- HUANG Xiang-tao. Study on identification technology of surrounding rock loose zone in shale tunnel[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2018.
- [13] 王睿,袁崇洋,党发宁,等.基于完整性系数的声波法围岩松动圈测试[J].公路交通科技,2018,35(6):74-79.
- WANG Rui, YUAN Dong-yang, DANG Fa-ning, et al. Testing loose circle of surrounding rock using acoustic method based on integrity coefficient[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(6): 74-79.
- [14] 代敬辉.石门隧道围岩松动圈确定方法及应用[J].施工技术,2019,48(11):101-104,144.
- DAI Jing-hui. Definition method and application of surrounding rock loosening circle of Shimen Tunnel[J]. Construction Technology, 2019, 48(11): 101-104, 144.
- [15] 刘永胜,朱思源,杨小林,等.多次爆破对大跨度洞室围岩的损伤累积及松动圈范围研究[J].爆破,2022,39(1):9-15,35.
- LIU Yong-sheng, ZHU Si-yuan, YANG Xiao-lin, et al. Study on damage accumulation and broken rock zone range of surrounding rock of large span chamber caused by multiple blasts[J]. Blasting, 2022, 39(1): 9-15, 35.
- [16] 易帅.多次爆破荷载下巷道围岩松动圈的扩展规律[D].湘潭:湖南科技大学,2018.
- YI Shuai. The expansion law of the surrounding rock loose circle in the roadway under multiple blasting loads[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2018.
- [17] 李平宏,陈宗刚,薛有平,等.大洞径隧道钻爆法开挖松动圈超声波长观孔检测应用实例[J].西北水电,2012(3):9-12.
- LI Ping-hong, CHEN Zong-gang, XUE You-ping, et al. An example of detection by ultrasonic wave through long-term observation hole in loose ring of large-diameter tunnel excavated by drilling and blasting method[J]. Northwest Hydropower, 2012(3): 9-12.
- [18] 郑星,邓守春,罗超文,等.某隧道围岩模量和松动圈厚度测试[J].科学技术与工程,2020,20(2):770-778.
- ZHENG Xing, DENG Shou-chun, LUO Chao-wen, et al. Wall tunnel modulus and loose ring thickness test of a tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(2): 770-778.
- [19] 张煜.基于软化效应的软弱围岩隧道松动圈研究[D].西安:西安工业大学,2022.
- ZHANG Yu. Research on loose circle of tunnel with weak surrounding rock based on softening effect[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [20] 万策.基于松动圈理论的软岩大变形隧道支护技术研究[D].西安:西安工业大学,2020.
- WAN Ce. Research on support technique of large deformation tunnel with soft rock based on loose circle theory[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020.
- [21] 刘蒙,唐海,马谕杰,等.基于视电阻率法测试技术的隧道围岩松动圈测定[J].矿业工程研究,2022,37(4):58-64.
- LIU Meng, TANG Hai, MA Yu-jie, et al. Measurement of loose zone of tunnel surrounding rock based on apparent resistivity method[J]. Mineral Engineering Research, 2022, 37(4): 58-64.
- [22] 田明显,王艳磊,腾俊洋,等.地质因素对隧道围岩松动圈的影响分析:以重庆某隧道为例[J].隧道建设,2016,36(4):390-397.
- TIAN Ming-yu, WANG Yan-lei, TENG Jun-yang, et al. Analysis of influence of geological factors on loose zone of surrounding rock: A case study of a tunnel in Chongqing[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(4): 390-397.
- [23] 梁艳.基于H-B准则的隧道围岩松动圈分析研究[D].西安:西安工业大学,2015.
- LIANG Yan. Analysis and research of broken zone of tunnel surrounding rock based on H-B criterion[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.
- [24] 王睿,袁崇洋,张进增,等.基于Hoek-Brown强度准则的隧道围岩松动圈分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(3):58-

63.
WANG Rui, YUAN Dong-yang, ZHANG Jin-zeng, et al. Analysis on broken zone of surrounding rock in tunnel based on Hoek - Brown strength criterion[J]. Journal of Safety Science And Technology, 2017, 13(3): 58-63.
- [25] 骆建军, 陈保忠, 宋扬, 等. 碳化泥质板岩大断面隧道围岩松动圈测试研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 1047-1055.
LUO Jian-jun, CHEN Bao-zhong, SONG Yang, et al. Experimental research on surrounding rock loose circle of carbide argillaceous slate large cross section tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 1047-1055.
- [26] 钟元庆. 采用三台阶工法开挖的原位扩建隧道现场监测及分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 170-179.
ZHONG Yuan-qing. Field monitoring and analysis of in-situ tunnel extension by three-bench method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 170-179.
- [27] 王睿, 梁艳, 寇君淑. 茶镇隧道围岩松动圈范围测量与研究[J]. 西安工业大学学报, 2014(10): 815-818.
WANG Rui, LIANG Yan, KOU Jun-shu. Measurement and research on loose zone of surrounding rock in Chazhen tunnel[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2014(10): 815-818.
- [28] 刘立宏. 大断面原位扩挖隧道围岩松动圈范围计算方法研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36(6): 28-34.
LIU Li-hong. Study on calculation method of loose zone range of surrounding rock of large cross-section in-situ expanded tunnel[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2022, 36(6): 28-34.
- [29] 李明亮. 高地应力条件下的隧道围岩松动圈分布规律研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
LI Ming-liang. Research on distribution law of loose circle of tunnel surrounding rock under high stress[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017.
- [30] 杨平庆, 邵蔚, 王长柏, 等. 缓倾泥页岩互层隧道开挖的围岩松动圈形态研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(5): 48-51, 110.
YANG Ping-qing, SHAO Wei, WANG Chang-bai, et al. Surrounding rock loose ring shape in interbedded tunnel of gently inclined mudstone and shale[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(5): 48-51, 110.
- [31] 郭鸿雁. 姜路岭炭质页岩隧道围岩松动圈测试与分析[C]//2015年全国公路隧道学术年会论文集. 中国公路学会隧道工程分会, 广东省公路学会, 2015: 107-111.
GUO Hong-yan. Testing and analysis of loose zone in surrounding rock of Jiangluling carbonaceous shale tunnel[C]//Proceedings of the 2015 National Academic Conference on Highway Tunnels. Tunnel Engineering Branch of China Highway Society, Guangdong Highway Society, 2015: 107-111.
- [32] 吴君, 李贵民. 破碎易泥化围岩隧道松动圈测试研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(30): 163-164.
WU Jun, LI Gui-min. Research on tunnel loose zone tests of crushable surrounding rocks[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(30): 163-164.
- [33] 周扬水, 吴从师, 张庆彬. 隧道围岩爆破松动圈测试分析[J]. 采矿技术, 2005, 5(3): 63-64.
ZHOU Yang-shui, WU Cong-shi, ZHANG Qing-bin. Test and analysis of loosening zone in tunnel surrounding rock blasting[J]. Mining Technology, 2005, 5(3): 63-64.
- [34] 沈峰, 钟威, 刘桂兵, 等. 通省隧道大变形围岩松动圈测试与分析[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(3): 366-369.
SHEN Feng, ZHONG Wei, LIU Gui-bing, et al. Test and analysis on loose circle of surrounding rock to large distortion region of Tongsheng tunnel[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(3): 366-369.
- [35] 钱伟平, 楼文虎. 乌鞘岭隧道变形整治中围岩松动圈测试技术应用[C]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集(下册), 2006: 784-789.
QIAN Wei-ping, LOU Wen-hu. Application of testing technique of relaxation zone of surrounding rock masses of Wushaoling tunnel during deformation treatment[C]//Proceedings of the second national academic conference on geotechnical and engineering (Part II). 2006: 784-789.
- [36] 蒲有林. 乌鞘岭隧道大变形围岩松动圈测试与分析[J]. 勘察科学技术, 2007(4): 60-61, 64.
PU You-lin. Testing and analyzing on surrounding rock loose zone in large distortion region of Wushaoling tunnel[J]. Site Investigation Science and Technology, 2007(4): 60-61, 64.
- [37] 柳厚祥, 方风华. 预埋式多点位移计现场确定围岩松动圈的方法研究[J]. 矿冶工程, 2006, 26(1): 1-4.
LIU Hou-xiang, FANG Feng-hua. Study on the method to define the wall rocks loose zone with embeded displacement meter[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006, 26(1): 1-4.
- [38] 刘千里, 王永顺, 王建军, 等. 中老铁路沙嫩山隧道大变形区段松动圈发展规律及控制技术[J]. 铁道建筑, 2022, 62(11): 103-106.
LIU Qian-li, WANG Yong-shun, WANG Jian-jun, et al. Development laws and control technologies of broken zone of large deformation section in Shanenshan tunnel of China-Laos railway[J]. Railway Engineering, 2022, 62(11): 103-106.
- [39] 赵继华. 丰沙铁路8号隧道内落石分析及处理措施[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(5): 126-129, 134.
ZHAO Ji-hua. Rock-fall analysis and treatment measures for No. 8 tunnel on Fengtai to Shacheng railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(5): 126-129, 134.
- [40] 徐国文, 何川, 王均勇, 等. 基于实测松动圈的扩展卡尔曼滤波位移反分析方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1722-1729.
XU Guo-wen, HE Chuan, WANG Jun-yong, et al. Displacement-based back analysis method using extend Kalman filter considering excavation damaged zone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(5): 1722-1729.
- [41] 史克臣. 特大断面隧道高地应力条件下变形控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(5): 146-151.
SHI Ke-chen. On deformation control for extra-large section tunnel

- nels under high ground stress[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(5): 146-151.
- [42] 谭忠盛,李松涛,王建军,等. 中老铁路隧道软弱围岩大变形特征试验研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(4): 98-106.
- TAN Zhong-sheng, LI Song-tao, WANG Jian-jun, et al. Experimental research on large deformation characteristics of weak surrounding rock tunnel of China-Laos Railway[J]. China Railway Science, 2021, 42(4): 98-106.
- [43] 明凯,马建军,徐晓波,等. 十白高速黄龙隧道围岩声波测试研究[J]. 工程建设与设计, 2012(7): 162-164, 168.
- MING Kai, MA Jian-jun, XU Xiao-bo, et al. Acoustic test of rock wall in Huanglong tunnel on highway of Shiyang-Baihe[J]. Construction & Design for Engineering, 2012(7): 162-164, 168.
- [44] 赵清泊. 胡麻岭隧道斜井富水粉细砂地层松动圈测试与围岩压力计算[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(4): 17-21.
- ZHAO Qing-bo. Loose rock zone measurements and rock mass pressure calculations for a saturated fine silt stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(4): 17-21.
- [45] 高延辉. 复杂条件下埋深洞室底臃机理及支护技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- GAO Yan-hui. Research on chamber floor heave mechanism in mining area under complex mixing and its support technique[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011.
- [46] 杨宾. 基于压力拱理论隧道原位扩挖过程松动圈计算方法研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2017.
- YANG Bin. Study on calculation method of loose zone of tunnel in-situ expansion process based on pressure arch theory[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017.
- [47] 王睿. 隧道围岩松动圈确定方法及应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- WANG Rui. Research on determination method and application of surrounding rock loose circle of tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

(上接第 53 页)

- Alabama: A preliminary report[R]. Alabama: University of South Alabama, 2004.
- [2] PADGETT J, DESROCHES R, NIELSON B, et al. Bridge damage and repair costs from Hurricane Katrina[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(1): 6-14.
- [3] WANG H. Water wave pressure on horizontal plate[J]. American Society of Civil Engineers, 1970, 96(10): 1997-2017.
- [4] FRENCH J A. Wave uplift pressures on horizontal platforms[D]. California: California Institute of Technology, 1970.
- [5] PATARAPANICH M. Forces and moment on a horizontal plate due to wave scattering[J]. Coastal Engineering, 1984, 8(3): 279-301.
- [6] Wave forces on bridge decks[R]. Washington: Federal Highway Administration, 2006.
- [7] SEIFFERT B, HAYATDAVOODI M, ERTEKIN R C. Experiments and computations of solitary-wave forces on a coastal-bridge deck. Part I: Flat plate[J]. Coastal Engineering, 2014, 88: 194-209.
- [8] AZADBAKHT M, YIM S C. Effect of trapped air on wave forces on coastal bridge superstructures[J]. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2016(2): 139-158.
- [9] QU K, TANG H S, AGRAWAL A, et al. Hydrodynamic effects of solitary waves impinging on a bridge deck with air vents[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 04017024.
- [10] 张家玮,祝兵,康啊真,等. 跨海桥梁箱梁结构受波浪力作用试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 80-86.
- ZHANG Jia-wei, ZHU Bing, KANG A-zhen, et al. Experimental study on wave loads applied on box girders in coastal bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12): 80-86.
- [11] JTS 145—2015, 港口与航道水文规范[S].
- JTS 145—2015, Code of hydrology for harbour and waterways[S].
- [12] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港工程设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Handbook for design of sea harbour[M]. Beijing: China Communication Press, 2018.
- [13] MCPHERSON R L. Hurricane induced wave and surge forces on bridge decks[D]. Texas: Texas A & M University, 2008.
- [14] KULICKI J M, MERTZ D R. Guide specifications for bridges vulnerable to coastal storms[M]. Washington: Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [15] 张华昌,董胜,柳玉良,等. 斜向浪沿直立堤传播规律及对接岸斜坡堤影响[C]//中国海洋工程学会. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011: 727-731.
- ZHANG Hua-chang, DONG Sheng, LIU Yu-liang, et al. Propagation pattern of oblique waves along an upright dike and the effect on shore-connecting slope dike[C]//Chinese Ocean Engineering Society. Proceedings of the 15th China ocean(offshore)engineering symposium. Beijing: China Ocean Press, 2011: 727-731.