

压力分散型锚索承载板布置方式及其受力性能分析

林蔚勋, 张永兴, 卢黎

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 采用 FLAC^{3D} 建立压力分散型锚索在不同的承载板间距和数量下的模型, 对比其轴向应力与剪应力以及位移曲线, 总结出承载板的间距与数量对压力分散型锚索受力性能的影响规律。在此基础上, 为改善传统的压力分散型锚索各级钢绞线在变形中受力不均的缺陷, 提出了优化的承载板布置方案, 即梯级布置方案。并通过建模计算证明, 此方案可以使注浆体更不易在孔底被压碎, 也更不易产生滑移破坏, 改善了结构的受力, 提高了安全性。

关键词: 压力分散性锚索; 承载板; 数值模拟

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Analysis on the layout pattern and stress behavior of the bearing boards in the pressure-dispersive anchors

Lin Weixun, Zhang Yongxing, Lu Li

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The FLAC^{3D} program is used to build the couple models of pressure-dispersive anchors, which are in different spaces or numbers of bearing boards. By contrasting the axial stresses, shear stresses and the displacement curves, the influences of the spaces and the numbers of bearing boards to the stress behavior of the anchors are summarized. On this basis, to improve the defect in uneven stress for the steel stranded wires with different length when the structure suffered from deformation, a proper proposal for the layout of the bearing boards called stepped-pattern scheme is suggested. The proposal is proved by the modeling and calculating in which the grouted body could not be crushed in the bottom and the anchors could not be slipped to failure easily. Thus the structural working behavior is enhanced and the safety margin is increased.

Key words: pressure-dispersive anchor; bearing board; numerical simulation

0 引言

压力分散型锚索, 作为一种新型的岩土工程加固技术, 已被广泛运用于实际工程中^[1,2]。国内许多专家学者对这类锚索进行了试验与理论分析, 并结合各种数值模拟方法, 对压力分散型锚索的锚固机理做了大量的研究^[3-7]。其重点都侧重于模拟某些影响因素变化下, 锚索的应力分布规律。本文将研究对象集中在承载板的布置方案上, 力求摸索出承载板这个压力分散型锚索中至关重要的设计要素对锚索受力性能的影响。比较了各种模拟方法的优劣后, 在 FLAC^{3D} 建模中以 Cable 单元模拟无粘结钢绞线, 以 Shell 单元模拟承载板, 且承载板与钢绞线结构单元共用节点以实现预应力的有效传递; 并根据各块承载板之间的锚固段具一定独立性的特

点, 分段建立锚固体及其与围岩粘连的分界面; 最后对钢绞线单元全长施加预应力来保证应力沿钢绞线分布均匀。在确保模拟方法的准确后, 通过建立不同的承载板布置方案模型, 对比分析其受力变化规律, 以期对工程设计中选用合适的承载板布置方案提供参考。更针对现有的压力均布型锚索存在的一些缺陷, 提出一种优化的梯级承载板布置方案。经模拟论证, 可以解决钢绞线张拉过程中应力不均

收稿日期: 2010-01-12; 修订日期: 2010-03-16

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (50625824); 重庆市科委科技计划攻关项目 (CSTC2008AC0077)。

作者简介: 林蔚勋 (1985 -), 男 (汉族), 福建建瓯人, 硕士。

的问题，有望在工程实践中推广应用。

1 压力分散型锚索结构形式及建模

1.1 压力分散型锚索结构形式

压力分散型锚索改变了传统的拉力型锚索的受力形式，将锚固力通过数块间隔一定距离的承载板转化为压力作用于多节锚固体上。此类锚索由于粘结应力更加均匀，并可充分利用锚固段在围岩压力作用下抗压强度较高的优势，极大地提高了锚固力。从其结构特点来看，显而易见，承载板的布置方案对其受力性能影响显著。

压力分散型锚索承载板布置方案如图 1 所示。此图以 4 块承载板等间距 1.5m 布置为例，其他布置方案与其相似，仅承载板间距或数量不同。钢绞线总数均为 12 根，图中仅为示意，并非实际根数。

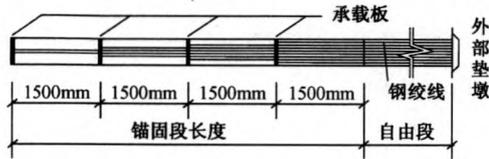


图 1 基本模型承载板布置示意图

1.2 压力分散性锚索建模

模型中岩体和砂浆体以实体单元建立，均采用摩尔库伦 (Mohr-Coulomb) 本构模型。钢绞线采用 Cable 结构单元，考虑到无粘结，参数取值应与拉力型锚索的自由段参数相同。承载板与外部垫墩采用 Shell 结构单元。锚固体与岩体之间的相互作用以 Interface 分界面来模拟。锚固体以承载板为界，分段建立，分界面依附在锚固体的各个分段上。承载板的 Shell 单元附着于每段砂浆体端头上，与外部的垫墩相应位置的节点之间建立钢绞线。Shell 单元与 Cable 单元共用端头处的节点。对 Cable 单元加载预应力的时候，力直接传递到各级 Shell 单元上，通过 Shell 单元分散为均布荷载作用于各级锚固体上，锚固体受压发生变形和位移，再经分界面传递到围岩中。此建模方式较为准确地模拟了压力分散性锚索的传力方式。

模型为一长方体，以岩体自由面的钻孔中心为坐标原点，自由面的水平方向为 X 轴，竖直方向为 Z 轴，钻孔轴向为 Y 轴。孔径取用 130mm。网格划分由锚索中心向外呈辐射状划分，内密外疏。经过试算，锚索的影响半径大致在 1m 左右，深度上锚固段之后的岩体只受拉且影响范围较小。因而模型的径向范围取边界 2.5m × 2.5m，轴向长度取锚索长度加上其后的 1m 岩土体。正面自由面不施加约

束。对径向边界四面施加法向约束及 Y 向约束，岩土体背面施加 Y 向约束。

以 4 块承载板等间距 1.5m 布置为基本模型，对比 1m 间距和 2m 间距布置的模型，再把其与 2 块承载板、3m 间距布置和 6 块承载板、1m 间距布置的模型进行对比，分析研究承载板间距变化及数量变化对压力分散型锚索受力性能的影响。自由段长度均取为 5m。按承载板数量来平均分配每块承载板所连接的钢绞线，在每根钢绞线上施加相同的预应力 200kN，使每块承载板承受均等的压力，然后进行模拟计算。

1.3 模型参数

模型的计算参数详见表 1。FLAC^{3D} 中实体单元必须采用体积模量和切变模量来计算，需将岩体和砂浆体的弹性模量和泊松比进行转换。Interface 的刚度通常取为十倍于周围介质的等效刚度，此处，取其法向刚度 k_n 与切向刚度 k_s 同为 8500 GPa/m；而其粘聚力和内摩擦角，可对岩体和砂浆的数值进行折减，取粘聚力 2.4MPa，内摩擦角 30°。Cable 单元的弹性模量取 200GPa，抗拉强度为 250kN。

基本模型参数

表 1

类型	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν	粘聚力 c (MPa)	内摩擦角 φ (°)	密度 ρ (kg/m ³)
岩体	2.2	0.28	4.2	49.5	1900
砂浆	16	0.16	3.8	54	2550
承载板	2000	0.25	—	—	7850

2 承载板间距及数量对压力分散型锚索受力性能的影响分析

2.1 承载板间距对受力性能的影响

1m、1.5m、2m 间距的计算结果应力曲线如图 2 所示。轴向应力负号为受压，正号为受拉。

对比曲线可以看到，锚固体轴向应力都在承载板处达到峰值，之后随承载板距离增加而呈指数减小，至前一级承载板后出现较小的拉应力。这是因为各块承载板之后的岩体受拉，进而牵扯锚固体也受拉。正如图 3 的承载板 1.5m 间距情况下岩体轴向应力云图所示，各块承载板前侧岩体受压，后侧岩体受拉，(深色区域为拉力，浅色区域为压力)。从此云图还可以反映出模型范围选取是合理的。

锚固体中峰值轴向应力大小均为 38 ~ 40MPa，与钢绞线传递来的应力基本平衡。剪应力曲线则是在承载板后一段微小距离内迅速增至峰值，而后急剧衰减，在前一级承载板后也出现了相反方向的应

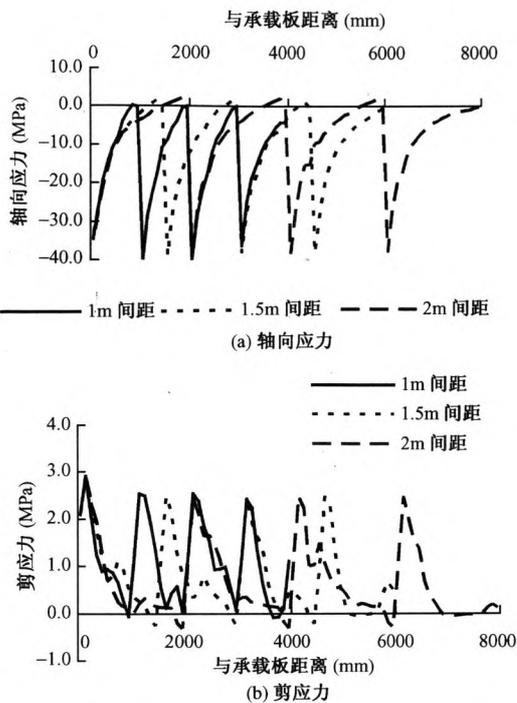


图2 不同承载板间距下的锚固体应力分布

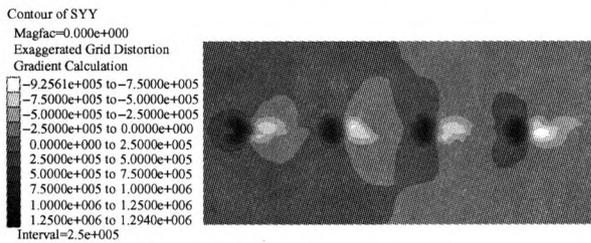


图3 岩体中的轴向应力云图

力。这与压力集中型锚索的剪应力分布规律^[8]及按弹性理论分析法得到的压力分散性锚索剪应力分布规律^[9]都是一致的。当压应力和剪应力减小至零时，可以认为锚索向岩体的传力过程已完成，我们称这个长度为有效传力长度。有效传力长度可以作为分散性锚索承载板间距设置的重要依据。在此类模型下，可以看到，有效传力长度大致在1.5m左右。2m间距下，在各节锚固段的近端（离自由段较远处），压应力和剪应力已经很小；而1m间距下，各节锚固段的近端，压应力才开始接近零，剪应力曲线有很大部分更是处在0.8~1.0MPa的范围内，说明该处以剪力增大的方式来消耗压应力，完成力的传递。综合考虑，可以认为在本模型的条件下，1.5m的承载板间距是较理想的方案。

轴向位移曲线如图4所示。各节锚固体如同多个压力集中型锚索串联在一起共同作用。三个模型中，承载板处的位移值基本是相同的，到了近端

处，1m间距的位移接近于1.5m间距的1.5倍，而1.5m间距的位移与2m间距的差距不大。特别注意到，1m间距的布置方式在最近一节锚固体上位移值显著比其他节大，说明此节的锚固体已发生极大的滑移，粘结应力不足以抵抗该节锚固体所承受的压力。由此也可以看出，在题设条件下，1.5m以上的间距较为合适。

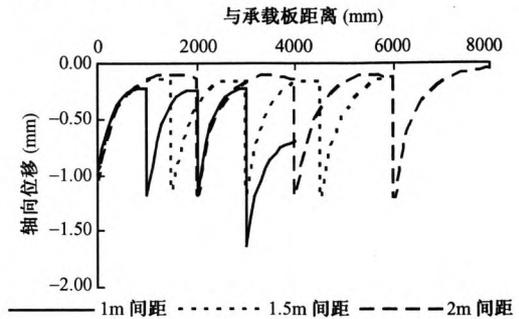


图4 不同承载板间距下的锚固体轴向位移

2.2 承载板数量对受力性能的影响

在设计压力分散型锚索时，如何确定合适的承载板数量来分散锚固力十分值得研究。定性分析看来，承载板数量少，则每节锚固体所承受的力就大，锚索更容易破坏，但施工便捷，成本相对较低；承载板数量多，则力被分散得更均匀，各节锚固体承受的力也越小，但增加了施工难度和成本，不够经济。故本节模型固定锚固段长度为6m，分别采用2块、4块、6块承载板来组成锚固体系，对比其应力变化结果如图5所示。

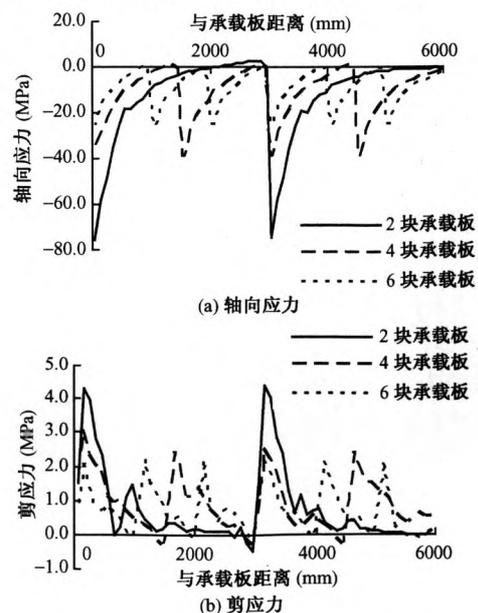


图5 不同承载板数量下的锚固体应力分布

从轴向应力图上可以清楚看到，承载板数量和应力峰值正好成反比，模型的传力方式是可靠的。随着承载板数量增加，锚固体内的压应力分布越均匀，峰值应力也越低，锚索也就越不容易失效。特别注意的是，当承载板数量减少时，每节锚固体所受压应力增大，传力长度也会增长。2块、4块、6块承载板的传力长度分别为2m、1.2m、1.0m，可见传力长度并没有随着承压板所受的压力的增大而同比例增长。也就是说，当承载板数量较少时，反而可以减小承载板间距；当承载板数量较多时，却需要增加承载板间距，以使锚固体有效地发挥作用。

而从剪应力曲线上，也可以看到，2块板、4块板、6块板平均的峰值剪应力分别为4.3MPa、2.5MPa、2.2MPa。可见，随着承载板数量增加，峰值剪应力减小的幅度变小了。这是因为每节锚固体的长度减小了，需要更多的剪应力来抵抗承载板的压力，所以6块承载板的剪应力曲线下降段都呈现出了外凸的趋势，表示剪应力发挥程度很高，这更容易导致锚索达到极限的粘结应力而滑移失效。综合看来，采用4块承载板，1.5m间距的设置是较优的方案。

图6为不同承载板数量下锚固体的位移曲线。由图可见，随着承载板数量增加，最大位移在减小，但并不成比例。2块、4块、6块承载板的最大位移值分别为3.50mm、1.16mm、0.67mm，比例为5.22:1.73:1，与三种情况下承载板所承受的压应力比值3:1.5:1相比，显然位移减小的速率更大，但速率是渐渐趋于平缓的。说明增加承载板数量可以有效控制锚索的位移，但增加到一定程度以后，效果就不再显著。

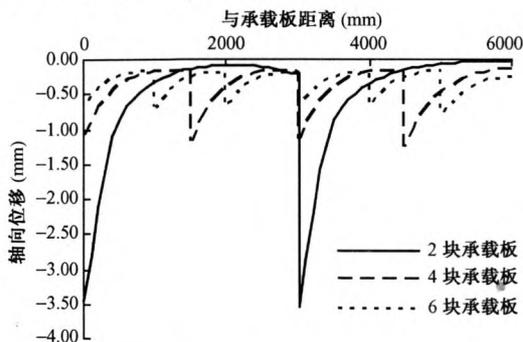


图6 不同承载板数量下的锚固体轴向位移

3 承载板布置方案的优化——梯级布置法

当各级承载板等间距布置且所连接的钢绞线数

目相同时，虽然锚固体中的轴向应力和剪应力都较为均匀，但在实际的工程中，由于各级承载板所连接的钢绞线长度有差异，当岩土体发生变形时，每根钢绞线的伸长值是相等的，应变值却是不等的，越短的应变越大，应力值也越大^[10]，因此短的钢绞线很有可能先行破坏。一旦破坏，应力重分布，次短的再发生破坏，从而导致连锁破坏。

因此，本文考虑通过改变各级承载板所连接的钢绞线数量以及各级承载板的间距，来调整出一个最合适的布置方案，使得钢绞线中的应力较均匀的同时，各级锚固体的长度又正好适合于应力扩散的有效长度。我们把这种布置方法称为梯级布置法。

为此，建立了四种模型进行对比研究：①4块承载板2.5m等间距，每块承载板连接3根钢绞线；②3块承载板3.3m等间距，每块承载板连接4根钢绞线；③由远端至近端，3块承载板间距分别为1.6m、3.4m、5m，各级承载板连接的钢绞线数目分别为2根、4根、6根；④由远端至近端3块承载板间距依次为1m、2.5m、6.5m，各级承载板连接的钢绞线数目分别为1根、3根、8根（我们把距离外部自由段较近的锚固段称为近端，反之为远端）。自由段长度均取为10m。每根钢绞线上仍施加200kN的预应力。

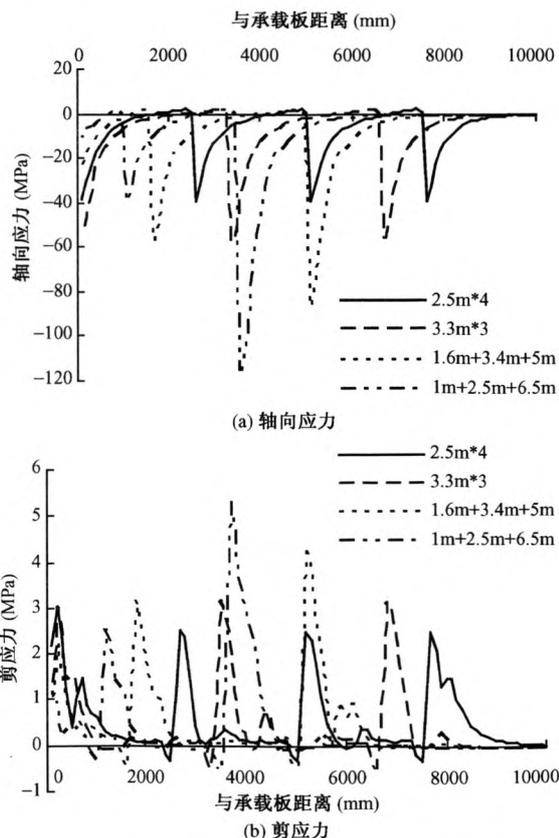


图7 承载板梯级布置锚固体的应力分布

计算结果的应力曲线如图7所示。可以看到与平均分配的布置方案相比,梯级布置法的应力都呈现出梯级增长的趋势。“1.6m+3.4m+5m”布置方案,其最大轴向应力比为1:2.33:3.55,大于钢绞线的数目比1:2:3;剪应力峰值比例则为1:1.42:1.95,小于1:2:3。“1m+2.5m+6.5m”方案的最大轴向应力比为1:3.7:10.75,大于钢绞线的数目比1:3:8;剪应力峰值比为1:2.55:5.37,小于1:3:8。这说明采用梯级布置方案时,压应力会偏向于由近端的锚固体来承受,而剪应力则由远端的锚固体来承受。这是因为远端锚固体会受到近端承载板对板后的拉应力,抵消了部分压应力;而近端的锚固体离自由段更近也就更容易产生位移。这样的应力分配使得锚固体更不易在孔底发生压碎破坏,也更不易产生整体滑移破坏,是合理的形式。但也要注意,梯级布置使得应力不如压力均分方案那样均匀,所以要控制最大压应力不超过砂浆体的抗压强度极限,且剪应力不超过砂浆体和岩体之间的粘结强度极限,这样才能发挥这种布置方案的优势。

图8所示曲线为四种布置方案下,各级钢绞线应力—收缩应变曲线。显然,梯级布置方案的曲线斜率比平均分配的斜率小,这说明在相同的钢绞线收缩应变差值下,梯级布置的分散型锚索,其钢绞线应力的差别比较小,各级钢绞线应力更均匀了。从而证明了梯级布置方案对于减小各级钢绞线受力不均是有显著效果的。

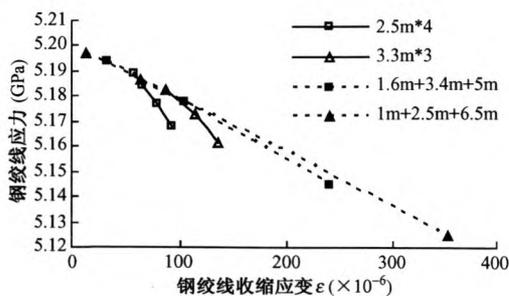


图8 钢绞线应力应变关系

4 结论

(1) 当承载板间距大于有效传力长度时,在各节锚固体的近端,轴向压应力和剪应力均已很小;而当承载板间距小于有效传力长度时,各节锚固体的长度尚不足以使压应力消耗完,使得剪应力全长处在较大数值范围内,并且最近一节锚固体容易出现滑移破坏。实际工程中的有效传力长度应根据各

级承载板所受锚固力以及围岩等情况来确定,如本文所设模型条件下,有效传力长度大致在1.5m左右。工程中往往无法对各类情况都进行锚索抗拔试验来得到这一有效传力长度,数值模拟则可解决这一需求,建议对工程所处的岩体条件先进行数值模拟,通过应力传递的模拟结果确定有效传力长度,进而由有效传力长度设计出合理的承载板间距,以充分发挥压力分散型锚索的锚固优势。

(2) 当锚固段长度固定,承载板数量较少时,各节锚固体过长得得不到充分利用;而承载板数量较多时,承载板间距又过密,剪应力沿全长的发挥程度很高,容易发生滑移破坏。且增加承载板数量可以减小锚固体的轴向位移,但增至一定数量以后,效果不再显著。由此可见,工程中常见的3~4块承载板是较为合理的数量。具体所需的数量可根据锚固段总长与各节锚固段的有效传力长度的比值来确定。

(3) 本文提出的梯级布置方案经数值模拟论证,可以使锚固体更不易在孔底发生压碎破坏,也更不易产生整体滑移破坏,充分地发挥锚固的优势。且锚索中的钢绞线应力分配更加均匀,减小了压力均布方案发生钢绞线连锁破坏的危险性。可见此方案改善了结构的受力,提高了安全性,有望在工程中推广使用,以解决现有的压力均布型锚索存在的不足。

参 考 文 献

- [1] 王晚华. 分散承压型预应力锚索在滑坡处治中的应用[J]. 公路工程, 2009, (2): 176~178.
- [2] 姚卓英. 2000 kN 压力分散型锚索在高边坡加固工程中的应用[J]. 铁道标准设计, 2009, (3): 19~24.
- [3] 罗渝, 何江达, 许有飞, 简祥. 围岩变形模量对压力分散型锚索力学性能的影响研究[J]. 红水河, 2006, (1): 66~69.
- [4] 赵付朝. 压力分散型抗浮锚杆特性及数值分析[J]. 山西电力, 2009, (S1): 16~19.
- [5] 王树仁, 何满潮, 金永军. 拉力集中型与压力分散型预应力锚索锚固机理[J]. 北京科技大学学报, 2005, (3): 278~282.
- [6] 靖洪文, 曲天智, 吴学兵, 张忠宇. 压力分散型锚杆力学特征影响因素的数值分析[J]. 西安理工大学学报, 2008, (1): 32~36.
- [7] 夏元友, 范卫琴, 芮瑞, 王艳丽. 压力分散型锚索作用效果的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2008, (11): 3144~3148.
- [8] 张爱民, 胡毅夫. 压力型锚杆锚固段锚固效应特性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, (2): 271~275.
- [9] 吴学兵, 靖洪文. 压力分散型锚索剪应力分布规律的研究[J]. 山西建筑, 2006, (6): 82~83.
- [10] 刘玉堂, 袁培中, 白彦光. 压力分散型锚索不宜作为永久性锚索[J]. 预应力技术, 2008, (3): 19~21.