

超软吹填土地基单体地固件荷载试验研究

陈津生¹, 刁钰^{2*}, 朱东城², 陈梓霖¹, 陈丰³, 杨军³

(1. 天津鼎元软地基科技发展股份有限公司, 天津 300051; 2. 天津大学土木工程系, 天津 300072;

3. 天津市地质工程勘测设计院有限公司 天津 300191)

摘要: 地固件工法是一种新型的软土地基加固技术, 它是在土工袋的基础上改进而来的, 通过在袋内设置高强度的桁架吊带, 增强结构的整体性, 大幅度提高加固地基的性能。在处理软弱地基时, 具有柔性保形、排水成壳、应力扩散、极限承载力高等优点。在桁架带内置的四角方形地固件基础上, 改变桁架带布置形式与袋体外形, 提出了桁架带外置四角方形地固件、外置四边方形地固件、外置圆形地固件。对桁架带外置式地固件、捆绑土工袋和普通土工袋进行了抗倾覆能力测试, 试验得到了各个试件的极限荷载和抗倾覆刚度。在各类型构件的极限荷载与抗倾覆刚度的比较中均得出相似结论: 桁架带外置四角方形与外置四边方形相当, 二者优于外置圆形地固件, 各类型地固件优于捆绑式土工袋与普通土工袋。

关键词: 地固件; 软土地基; 吹填土; 极限荷载; 抗倾覆

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0101-06

Loading test research of single ground improvement unit on ultra-soft dredger soil land foundation

CHEN Jinsheng¹, DIAO Yu^{2*}, ZHU Dongcheng², CHEN Zilin¹, CHEN Feng³, YANG Jun³

(1. Tianjin Dingyuan Soft Ground Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300051, China; 2. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Geo-Engineering Institute of Investigation & Surveying Design Co., Ltd., Tianjin 300191, China)

Abstract: The Divided Box(D-Box) is a new kind of soft soil reinforcement technology, and is an improved version of soilbags, by setting high strength truss sling inside the bag. It can enhance the integrity of the structure and greatly improves the performance of reinforced foundation. When dealing with weak foundations, it has the advantages of flexible conformal, shell drainage, stress diffusion and high ultimate bearing capacity. Based on the internal quadrangular square D-Box. In this study the layout form of truss belt and the shape of bag were changed and the external quadrangular square D-Box, external quadrilateral square D-Box and external circular D-Box were proposed. The anti-overturning ability of various types of D-Box, binding soilbags and ordinary soilbags were tested. The ultimate load and anti-overturning stiffness of each specimen were obtained and similar conclusions were drawn. The external quadrangular square D-Box performs comparably to the external quadrilateral square D-Box, both of which are superior to the external circular D-Box, and all kinds of D-Boxes are superior to the binding soilbags and ordinary soilbags.

Key words: ground improvement unit; ultra-soft ground; dredged soil; ultimate bearing capacity; anti-overturning

0 引言

超软吹填土广泛分布于我国沿海地区, 其土体本身颗粒细小, 固结系数较小, 渗透性能较差, 特别是土体颗粒之间没有形成稳定结构。因此由这些超软土形成的软弱基础承载力低, 其较高的含水率和压缩特性使得未经处理的超软土地

基很难进行各类工程建设^[1]。吹填土常用的处理方法为换填法、强夯法、碎(砂)石桩法、排水固结法以及高压喷射注浆法等^[2]。但是这些传统的加固方法存在工期长、耗能大、成本较高且大型机械无法进入等问题。

地固件是一种新型的软弱地基处理技术, 具有绿色环保、快速进场、降低工程成本、减小工期的

收稿日期: 2023-04-23; 修回日期: 2024-04-30; 录用日期: 2024-05-09

基金项目: 天津市自然科学基金(21JCZDJC00590); 天津交通技术开发项目(2022-02)。

作者简介: 陈津生(1957—), 男, 天津人, 硕士, 高级工程师, 从事软土地基处理技术研究工作。E-mail: chen4668@vip.sina.com。

*通信作者: 刁钰(1982—), 男, 天津人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与地下工程的教学与科研工作。E-mail: yudiao@tju.edu.cn。

特点,在超软吹填土地基具有很好的应用前景。该技术的核心是采用具有内置桁架带的土工袋加固地基,其结构由松岗元等^[3]首次提出。与普通土工袋相比,地固件具有内部约束、形状保持、基底销栓等特殊功能,对地基的加固性能有显著提高。

陈津生等^[4]系统整理了地固件工法的设计、施工的理论经验,编译完成了《地固件设计施工手册》(第四版),并编制了《地基加固构件应用技术规程》(T/CECS 957—2021)^[5],规范了地固件应用研究的基础。刁钰等^[6]对地固件竖向载荷的受力机理开展了分析,研究表明地固件具有内外约束、排水成壳、应力扩散、柔性保形等作用。陆秋生等^[7]基于分割约束原理给出了加载后构建张力引起的内部填料强度提高的计算方法,并对处理后地基土体的承载性状和承载力特征做了理论分析。孙万里^[8]采用室内模型试验研究了地固件承载性能关键因素并进行了有限元数值模拟。陈津生等^[9]进一步提出了四边(四角)外置式桁架结构,开展了外置式桁架带方形、圆形地固件抗压试验,研究表明,外置式桁架带与内置式桁架带地固件的抗压强

度相同。

近年来地固件发展迅速,在传统地固件基础上研发了系列改进型地固件^[10],但其工作机理及性能,尤其是在超软吹填土地基上的承载和变形特性尚未开展研究。

针对上述问题,本研究在超软吹填土地基上进行了三类改进型地固件的载荷试验,见图1。图1中红色线条为桁架带,桁架带材质为超耐候聚丙烯,幅宽100 mm;蓝色线条为袋体,材质为超耐候性聚丙烯,规格190 g/m²。

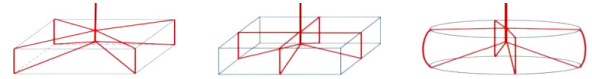


图1 各类改进型地固件示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of different types of ground improvement unit

试验前对袋体材料进行单轴抗拉试验,拉伸的袋体材料试件规格为:200 mm × 50 mm × 0.5 mm。由位移控制加载,加载速度为2 mm/min。拉伸试验基本参数见表1,最终的荷载-位移曲线如图2所示。

表1 袋体材料单轴拉伸试验基本参数

Table 1 Basic parameters of uniaxial tensile test for bag material

长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	断后长度/mm	极限荷载/N	抗拉强度/MPa	伸长率/%
200	50	0.5	226.35	1 946.9	77.84	13.2

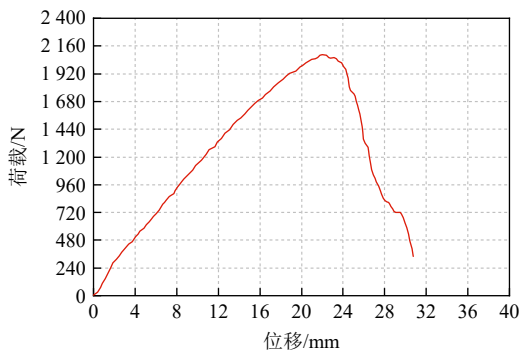


图2 袋体材料单轴拉伸试验荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curve of uniaxial tensile test of bag material

为使结果具备更广泛的对比性,本次试验也进行了捆绑式土工袋与普通土工袋载荷试验,见图3。



图3 捆绑式土工袋与普通土工袋示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of binding soilbag and ordinary soilbag

本文分析了上述试验的极限承载力、差异沉降

与抗倾覆刚度等,希望为相关的研究、设计、施工等实践活动提供借鉴。

1 试验简介

1.1 场地条件

本次荷载试验场地位于天津市南疆港南航东路与东七路交叉口的围堰吹填土地,见图4,场地覆土主要为滨海超软吹填土,其深度为6.0 m。对深度为0.2 m的吹填土进行含水率、土粒比重、不排水抗剪强度等测试,其中不排水抗剪强度通过十字板剪切试验确定。本次十字板剪切试验采用SZB-1.0便携式十字板剪切仪,板头规格为50.8 mm × 101.6 mm。场地土体性质见表2。

1.2 试验准备

试验设备如下:桁架带外置四角方形地固件1个、外置四边方形地固件1个、外置圆形地固件1个、堆载配重地固件20个、捆绑土工袋1个、普通土工袋1个、承载及观测钢板各1块,试验设备见图5。上述试验构件中,除桁架带外置圆形地固件尺寸为Φ1 500 mm × 450 mm外,其他外置型地

固件、捆绑土工袋和土工袋的尺寸均为 1 500 mm × 1 500 mm × 450 mm。

1.3 试验方案

本试验采用桁架带外置四角方形、外置四边方形、外置圆形等 3 种不同结构与形状的地固件, 以及捆绑式、普通等 2 种土工袋材料各 1 组, 上述 5 组试验点位相距 5~20 m。在地固件上方放置一观测钢板记录分级荷载下观测钢板 4 个角点的竖向位移。当观察到某级荷载下观测钢板周边土体鼓胀, 堆体迅速倾倒, 测点没入土中并被上

部倾倒地固件覆盖无法测量时, 视为此组试验结束标志。



图 4 试验点现场情况
Fig. 4 Conditions of the test site

表 2 场地土体性质
Table 2 Properties of the soil

吹填土深度/m	取土深度/m	含水率/%	土粒比重	液限/%	塑限/%	不排水抗剪强度/kPa
6	0.2	44.05	2.75	40.9	21.9	1.48



图 5 试验设备
Fig. 5 Test equipments

1.4 试验场地前期处理

本试验采用挖掘机平整试验场地, 由于场地地基软弱, 标准贯入击数为 1~2, 挖掘机无法直接进入, 因此用地固件铺设挖机施工临时路协助作业, 首先铺设一张长约 8 m、宽 4 m 的土工布, 然后设置 2 排 2 层共 4 组地固件, 其上方再放置钢板作为挖掘机临时路面使用, 如图 6 所示。20 t 挖掘机顺利入场工作, 表明地固件具有良好的超软吹填土地基加固性能。

选定位置后开挖试验点, 去除表层土约 0.4 m 后露出淤泥, 见图 7。

1.5 试验过程

将试验地固件 1 放置在试验点位上, 预压平整后放上观测钢板, 由于场地的土质承载力很低, 导致尚未加载前试验地固件 1 在自重作用下沉降过大。此时, 如图 8 所示, 测量钢板与地基之间距离不足 100 mm, 预期施加荷载后试验地固件 1 将沉入地基之中无法进行观测。



图 6 地固件作为临时道路
Fig. 6 Ground improvement unit as temporary road



图 7 清理测点表面浮土
Fig. 7 Surface cleaning of test site

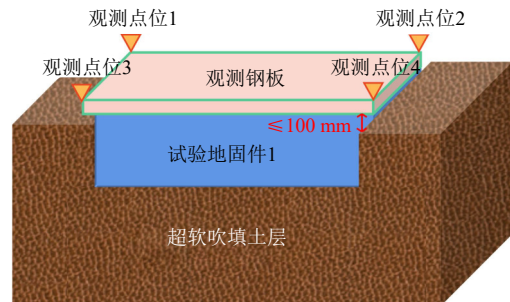


图 8 试验地固件 1 沉入地基
Fig. 8 Ground improvement unit 1 sinking into the ground

卸下观测钢板后, 按照《地基加固构件应用技术规程》^[5] 铺设试验地固件 1 使其保持水平, 而后

在其上铺设试验地固件 2。进一步将测试钢板水平放置于试验地固件 2 之上，此时开始记录 4 个观测点位的初始位置，之后用水准仪持续观测沉降，见图 9。

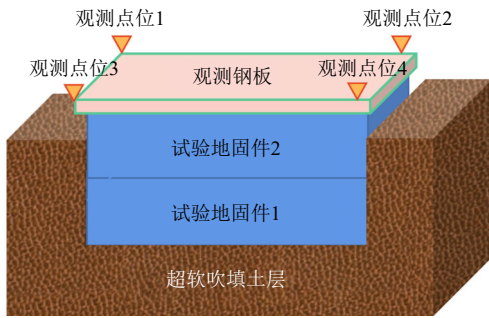


图 9 放置试验地固件 2

Fig. 9 Installation of ground improvement unit 2

当观测钢板上部加载第一个地固件时，随即出现了沉降，沉降观测按照试验设计逐步进行，半小时后完成第一级荷载沉降观测，见图 10。

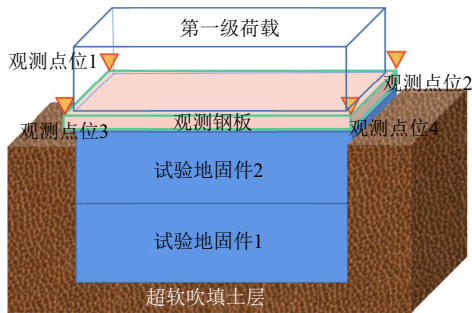


图 10 施加第一级荷载

Fig. 10 Applying the first level of loading

按照图 10 所示依次放置后续荷载。直至上述地固件系统开始出现不均匀沉降，之后土体剪切破坏停止试验，见图 11。



图 11 试验地固件在第二级荷载下倾覆破坏

Fig. 11 Overtuning under the second level of loading

2 试验结果

使用水准仪定时测得多级荷载下观测钢板 4 个角点的沉降作为各组试件的角点沉降，并依此计算

出 4 个角点的差异沉降。通过分析不同试件的极限荷载、未破坏时的最大差异沉降等指标，可比较不同地固件、土工袋工作性能的优劣。

2.1 极限荷载

将试件破坏时承受荷载的上一级荷载作为试件的极限荷载，见图 12。

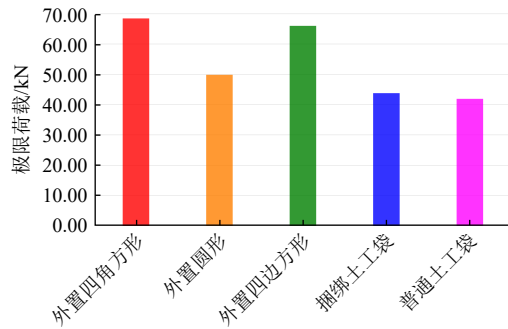


图 12 试件极限荷载

Fig. 12 Ultimate load of specimens

比较各试件的极限荷载，发现地固件的极限荷载为捆绑土工袋和普通土工袋的 1.5 倍以上，其可能的原因如下：

(1) 由于桁架带的存在，地固件在起吊时，下部出现锥形槽；同时，桁架带约束了地固件，使其具有保持上述形状的能力。土工袋和地固件受力示意图如图 13 所示，与土工袋相比，地固件底部在加载时中心不容易产生过大变形，避免了地基的冲剪破坏，能够使地基趋于整体剪切破坏，更好地发挥承载力。

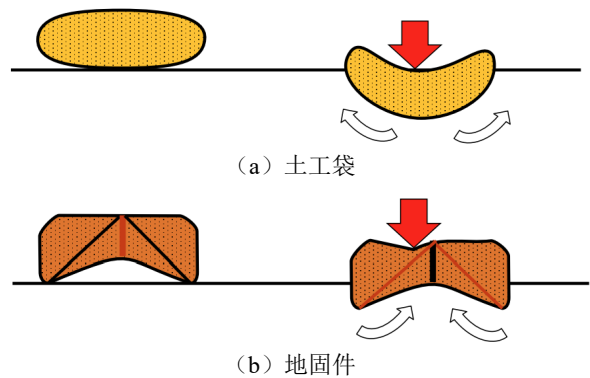


图 13 土工袋和地固件受力示意图

Fig. 13 Schematic diagrams of soilbags and ground improvement unit

(2) 由于地固件具有良好透水性能，邻近地固件底面的土体迅速排水，尤其是锥形槽内的土体排水后强度提高（见表 3），形成了锥形土销，见图 14，提高了地固件受荷时的稳定性。

3 种地固件中，外置圆形地固件的极限荷载最低，约为 50 kN；其余 2 种方形地固件（外置四边、外置四角）的极限荷载相差不大，约为

70 kN, 高出圆形地固件约 40% 左右。

表 3 试验点位加载前后土体的不排水抗剪强度

Table 3 Undrained shear strength of soil before and after test

测试深度/ m	加载前土体 不排水抗剪强度/kPa	加载后土体 不排水抗剪强度/kPa
1.0	2.07	2.19
1.5	2.52	2.77
2.0	3.10	3.98



图 14 地固件底面形成的锥形土销

Fig. 14 Tapered earth pin beneath ground improvement unit

从本次试验结果看, 所有地固件的破坏均是倾覆破坏, 因此在超软地基上, 单体地固件加载很容易发生倾覆破坏, 承载力的发挥和地固件的稳定性密切相关。同规格下方形地固件的惯性矩大于圆形, 在超软地基上抗倾覆的能力比圆形高 (具体数据详见 2.2 节), 因此能很好地发挥地基的承载能力。同规格的方形地固件面积比圆形面积大 20%, 但荷载要高出 40%, 因此由于形状、面积效应, 在超软地基上方形地固件的承载能力优于圆形地固件。

2.2 系统抗倾覆刚度分析

将极限荷载与差异沉降的比值定义为试件—土体系统的抗倾覆刚度, 系统抗倾覆刚度表征了系统抵抗差异沉降的能力。系统抗倾覆刚度越大, 承受荷载时产生的差异沉降越小, 而差异沉降是导致倾覆的决定性因素。

图 15 为试验荷载—差异沉降关系, 图 16 为系统抗倾覆刚度。

由图 16 可知, 外置桁架带 (四边) 与其变型 (四角) 的结构抗倾覆刚度最大, 圆形地固件的系统抗倾覆刚度次之, 如上所述, 主要是由于方形地固件相比于圆形地固件具有更大的惯性矩来应对偏心荷载产生的偏心弯矩。捆绑式土工袋与普通土工袋的系统抗倾覆刚度较差。图 16 表明外置四角方形与外置四边方形地固件的系统抗倾覆刚度可

达 0.11 kN/mm 以上, 是捆绑土工袋和土工袋的 2.5 倍以上。

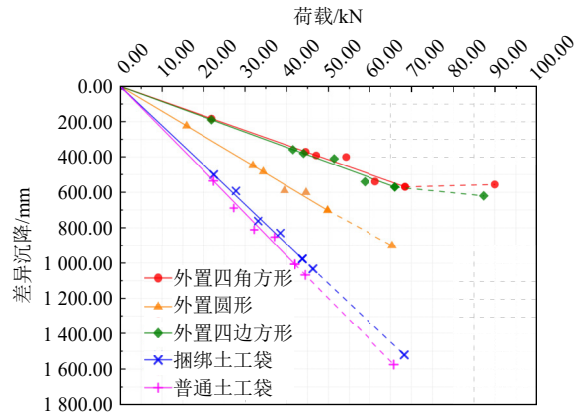


图 15 荷载-差异沉降曲线

Fig. 15 Load-differential settlement curves

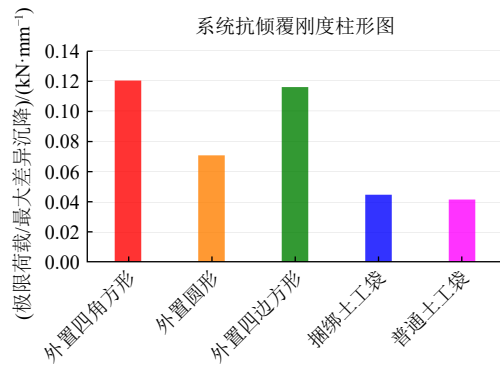


图 16 系统抗倾覆刚度

Fig. 16 Anti-overturning stiffness of the system

综上, 方形外置桁架带的结构、地固件底部的锥形槽形成的销栓土锥以及方形的几何特性, 使其获得了比同规格圆形地固件和土工袋更强的抗倾覆能力。

3 结 论

本研究在超软地基上开展了荷载试验, 比较了不同结构、形状的单体地固件与捆绑式土工袋、普通土工袋的极限荷载与抗倾覆性能。主要结论如下:

(1) 在超软地基上, 单体地固件加载很容易发生倾覆破坏, 承载力的发挥和地固件的稳定性密切相关。

(2) 地固件的极限荷载为捆绑土工袋和普通土工袋的 1.5 倍以上。

(3) 地固件自身的形状保持能力和底部的锥形槽形成的锥形土销是提高地固件受荷稳定性的关键因素。外置式地固件需要进一步改善桁架带的标准化禁锢方式, 从而获取更高的承载力和抗倾覆

刚度。

(4) 由于形状、面积效应,超软地基上方形地固件(1 500 mm × 1 500 mm × 450 mm)的承载能力和抗倾覆能力优于同规格的圆形地固件(Φ1 500 mm × 450 mm)。

工程中应根据土质状况、成本预算、载荷及设计要求、施工现场需求等特点,平衡性价比,优选不同结构、形状的地固件。

在试验过程中,标准化、精细化作业对试验结果的影响很大,如铺设时的规范作业、加载时的偏心放置等都直接影响地固件的倾覆刚度及差异沉降。今后将继续开展单体地固件在超软地基之上的长期变形性能研究,并进一步研究多个地固件体系在超软地基之上的工作机理与性能。

参考文献

- [1] 刘景锦. 超软吹填土地基真空预压加固改进机理及沉降预测研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
LIU Jingjin. Consolidation theory and settlement prediction of improved vacuum preloading method for ultra-soft hydraulic reclamation foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [2] 乐杉楠. 吹填土地区道路地基处理方案比选及效果分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
LE Shannan. The selection and effect of the road foundation treatment plan in the dredging area[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [3] 松岗元, 山本春行, 野本太. D-BOX工法的设计施工基础[M]. 日本: 森北出版株式会社, 2022.
MOTO Matsuoka, HARUYUKI Yamamoto, YEBEN Tai. Design-Construction Basis of D-BOX Method[M]. Japan: Senbei Publishing Co., Ltd., 2022.
- [4] 陈津生, 野本太, 王立祥. 地固件设计施工手册[Z]. 第四版. 天津: 天津鼎元软地基科技发展股份有限公司, 2019.
CHEN Jinsheng, TAI Nomoto, YEBEN Tai. D-Box Design and Construction Manual[Z]. 4th Edition. Tianjin: Tianjin Dingyuan Soft Ground Technology Development Co., Ltd., 2019.
- [5] 中国工程建设标准化协会. 地基加固构件应用技术规程: T/CECS 957—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Construction Method of Ground Improvement Unit: T/CECS 957—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [6] 刁钰, 陈津生, 王立祥, 等. 地固件工法与实践[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 264—270.
DIAO Yu, CHEN Jinsheng, WANG Lixiang, et al. Construction method and practice of divided box[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 264—270.
- [7] 陆秋生, 许宝田, 野本太, 等. 软土地基新型地固件加固方法[J]. 工程勘察, 2019, 47(10): 35—41.
LU Qiusheng, XU Baotian, YEBEN Tai, et al. Reinforcement technique with new reinforcement components for soft soil foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(10): 35—41.
- [8] 孙万里. 竖向荷载作用下地固件承载机理和特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
SUN Wanli. Study on bearing mechanism and characteristics of ground improvement unit under vertical load[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [9] 陈津生, 陈曦, 王立祥. 外置式桁架带地固件 1 200 吨压力试验报告[R]. 天津: 天津鼎元软地基科技发展股份有限公司, 2022.
CHEN Jinsheng, CHEN Xi, WANG Lixiang. Report on 1 200-tonne pressure test of external truss with ground fixture[R]. Tianjin: Tianjin Dingyuan Soft Ground Technology Development Co., Ltd., 2022.
- [10] 陈梓霖, 陈津生, 张越, 等. 地固件外置式束形紧固结构及其成型方法: 中国, CN202211118170.0[P]. 2022—11—29.
CHEN Zilin, CHEN Jinsheng, ZHANG Yue, et al. Ground fastener external bunch fastening structure and its moulding method: China, CN202211118170.0[P]. 2022—11—29.