(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106758856 B
(45)授权公告日 2018.07.24

(21)申请号 201710135466.6

(22)申请日 2017.03.09

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106758856 A

(43)申请公布日 2017.05.31

(73)专利权人 河南省交通规划设计研究院股份有限公司
地址 450052 河南省郑州市二七区陇海中路70号
专利权人 李斐然

(72)发明人 汤意 李斐然 张旭慧 康健 桑建设 郭晓光

(74)专利代理机构 郑州异开专利事务所(普通合伙) 41114
代理人 王霞

(51)Int.Cl.
E01D 21/00(2006.01)
E01D 2/04(2006.01)

(56)对比文件
CN 101748682 A,2010.06.23,全文.
CN 102220739 A,2011.10.19,全文.
CN 103388303 A,2013.11.13,全文.
CN 103938549 A,2014.07.23,全文.
CN 104195959 A,2014.12.10,全文.
CN 104988844 A,2015.10.21,全文.
CN 204753341 U,2015.11.11,全文.
JP 3623899 B2,2005.02.23,全文.
李斐然."二次张拉体内预应力装配式波形钢腹板梁桥的研发".《公路交通科技》.2016,(第7期),第86-90页.

审查员 潘浩

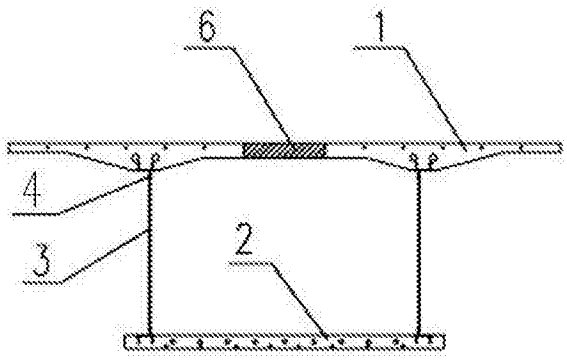
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法

(57)摘要

本发明公开了一种分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法,包括由多个工字型梁体单元纵向连接而成的组合梁,工字型梁体单元由单独预制的预制混凝土顶板、预应力混凝土底板和波形钢腹板拼接组成,每个工字型梁体单元包括一块预应力混凝土底板和至少两块预制混凝土顶板;预制混凝土顶板内预埋有上剪力连接件、顶板横向连接钢筋、顶板纵向连接钢筋和顶板预应力孔道;预应力混凝土底板为平板结构,预应力混凝土底板内预埋有先张拉预应力钢束、下剪力连接件、底板纵向连接钢筋;波形钢腹板周缘预留有螺栓孔。本发明采用分块预制拼装的结构形式进行梁体架设,各部件的体积及重量都相应较小,运输稳定,吊装安全,利于施工。



CN 106758856 B

1.一种分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法，其特征在于：主要包括以下步骤：

第一步，按桥梁设计要求，单独预制组成工字型梁体单元的预制混凝土顶板、预应力混凝土底板和波形钢腹板：

对于预制混凝土顶板，先绑扎带有横向连接筋和纵向连接筋的顶板钢筋网，再将墩顶负弯矩预应力孔道和上剪力连接件的剪力钉安装在顶板钢筋网内，之后进行浇筑；

对于预应力混凝土底板，先通过张拉设备将先张拉预应力钢束张拉至设计值，再绑扎带有纵向连接筋的底板钢筋网，同时将下剪力连接件的剪力钉安装在底板钢筋网内，安装模板，浇筑混凝土，待混凝土达到设计强度后，拆除模板，放松先张拉预应力钢束，完成先张法预应力混凝土底板的预制；

对于波形钢腹板，先冲压加工波形钢板，再在波形钢板周缘预留用于连接上、下剪力连接件的螺栓孔；

第二步，进行现场装配准备工作：

在现场完成施工的相邻桥台或桥墩之间设置移动支撑装置作为辅助施工平台，同时，将预制完成的预制混凝土顶板、预应力混凝土底板和波形钢腹板运送至施工现场；

第三步，进行组合梁工字型梁体单元的拼接装配：

按照设计要求，选择一块预应力混凝土底板、至少两块预制混凝土顶板，以及合适数量的波形钢腹板；用吊装设备将预应力混凝土底板、波形钢腹板和预制混凝土顶板依次吊装至移动支撑装置上，并用螺栓栓接方式进行预应力混凝土底板与波形钢腹板、波形钢腹板与预制混凝土顶板的连接；之后，对相邻预制混凝土顶板的横向连接筋进行绑扎、浇筑，形成顶板纵向湿接缝，完成一个工字型梁体单元的拼接装配；

第四步，进行组合梁纵向拼接装配：

将移动支撑装置依次转移至其他桥跨位置，重复第三步作业，完成纵向每一桥跨梁体的施工；绑扎相邻桥跨顶板、底板之间的纵向连接筋，并浇筑形成横向湿接缝；当横向湿接缝达到一定强度时，对位于相邻预制混凝土顶板墩顶负弯矩预应力孔道内的张拉钢束进行张拉，形成多跨连续梁体系；

第五步，完成附属设施的架设，结束施工。

2.根据权利要求1所述的分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法，其特征在于：所述上剪力连接件和下剪力连接件结构相同，均包括连接板和垂直焊接在所述连接板上的波形翼板，所述波形翼板边缘开设有连接孔，连接板的另一面焊接有预埋在预制混凝土顶板或预应力混凝土底板中的剪力钉。

3.根据权利要求1所述的分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法，其特征在于：组成所述工字型梁体单元的单个预制混凝土顶板、预应力混凝土底板和波形钢腹板的长度分别为5-30米。

分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法

技术领域

[0001] 本发明涉及桥梁建筑技术领域，尤其是涉及一种适于大型桥梁的分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法。

背景技术

[0002] 传统预制箱梁腹板多为混凝土材质，不仅重量大且易开裂，故混凝土箱梁只适合应用于小跨径(40m以下)的公路桥梁。波形钢腹板PC组合箱梁桥是20世纪80年代出现的一种新型桥梁结构，其所使用的波形钢腹板具有优良的稳定性和不抵抗轴向力的特性，使预应力能有效地加载于预制混凝土顶板和预应力混凝土底板上；此外，波形钢腹板PC组合箱梁桥施工简便，能够有效缩短工期，因此取得了桥梁工作者的广泛认同并被拓展应用于大中型桥梁(50m以上跨径)的实际工程中。

[0003] 现有波形钢腹板PC 组合箱梁多采用如下两种形式进行施工：

[0004] 一种是将整个箱梁梁体的钢筋预制混凝土顶板、钢筋预应力混凝土底板和波形钢腹板分为三个部分分别进行整体预制，之后再吊装就位，在桥位处采用螺栓连接拼装。中国专利“拼装式预应力混凝土组合箱梁”(申请号200620126505.3)就公开了上述结构的预制件，并着重介绍了波形钢腹板与顶板、底板的连接方式。但是，由于这种结构的箱梁顶板、底板和腹板均为一体式结构，单个预制构件的重量仍然很重。例如桥宽为16.75m的波形钢腹板箱梁桥，其每延米的重量高达10t以上，施工时即便分别吊装单个预制构件仍然十分困难。其次，为方便运输，预制构件的长度通常不会很长，上述整孔架设结构仅限于小跨径的桥梁，对于大跨径的桥梁，顶板和腹板还是会采用分段预制的形式。另外，该专利没有考虑实际施工时预应力钢束的施加时机和预留孔道等情况，且对于负弯矩区的处理措施也未加论述，如果缺乏应对梁体荷载变形的措施和具体施工工艺方面的详细考虑，施工的可行性较差。

[0005] 另一种是将顶板、底板和波形钢腹板固定连成工字结构的预制拼装单元，在现场将多个工字结构的拼装单元进行横向和纵向拼接后完成桥梁施工，如中国专利“二次张拉预应力装配式波形钢腹板组合梁及其施工方法”(申请号201510255113.0)就公开了上述结构的工字形预制件，并于相应的时机施加二次预应力，实现工字形预制件的横向拼装。上述预制的拼装单元体积大，吨位重(例如单个预制工字形单元每延米的重量即可达5t左右)，而且自身的稳定性也较差，易造成运输成本和吊装成本上升；在安装过程中对起吊设备要求较高，吊装安全性较低；由于拼装单元中的波形钢腹板与顶板和底板之间固定连接，因此该预制拼装单元内的各部件不可调整、不可替换，增加了后期维护的难度；同时伴随着交通量的日益增大，梁体的承载能力无法适应新情况下的交通状况。

发明内容

[0006] 本发明提供一种分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法，目的在于解决现有波形钢腹板PC 组合箱梁应用于大型桥梁时容易出现运输、吊装和后期维护

等方面的问题。

[0007] 为实现上述目的，本发明可采取下述技术方案：

[0008] 本发明所述的分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法，主要包括以下步骤：

[0009] 第一步，按桥梁设计要求，单独预制组成工字型梁体单元的预制混凝土顶板、预应力混凝土底板和波形钢腹板：

[0010] 对于预制混凝土顶板，先绑扎带有横向连接筋和纵向连接筋的顶板钢筋网，再将墩顶负弯矩预应力孔道和上剪力连接件的剪力钉安装在顶板钢筋网内，之后进行浇筑；

[0011] 对于预应力混凝土底板，先通过张拉设备将先张拉预应力钢束张拉至设计值，再绑扎带有纵向连接筋的底板钢筋网，同时将下剪力连接件的剪力钉安装在底板钢筋网内，安装模板，浇筑混凝土，待混凝土达到设计强度后，拆除模板，放松先张拉预应力钢束，完成先张法预应力混凝土底板的预制；

[0012] 对于波形钢腹板，先冲压加工波形钢板，再在波形钢板周缘预留用于连接上、下剪力连接件的螺栓孔；

[0013] 第二步，进行现场装配准备工作：

[0014] 在现场完成施工的相邻桥台或桥墩之间设置移动支撑装置作为辅助施工平台，同时，将预制完成的预制混凝土顶板、预应力混凝土底板和波形钢腹板运送至施工现场；

[0015] 第三步，进行组合梁工字型梁体单元的拼接装配：

[0016] 按照设计要求，选择一块预应力混凝土底板、至少两块预制混凝土顶板，以及合适数量的波形钢腹板；用吊装设备将预应力混凝土底板、波形钢腹板和预制混凝土顶板依次吊装至移动支撑装置上，并用螺栓栓接方式进行预应力混凝土底板与波形钢腹板、波形钢腹板与预制混凝土顶板的连接；之后，对相邻预制混凝土顶板的横向连接筋进行绑扎、浇筑，形成顶板纵向湿接缝，完成一个工字型梁体单元的拼接装配；

[0017] 第四步，进行组合梁纵向拼接装配：

[0018] 将移动支撑装置依次转移至其他桥跨位置，重复第三步作业，完成纵向每一桥跨梁体的施工；绑扎相邻桥跨顶板、底板之间的纵向连接筋，并浇筑形成横向湿接缝；当横向湿接缝达到一定强度时，对位于相邻预制混凝土顶板墩顶负弯矩预应力孔道内的张拉钢束进行张拉，形成多跨连续梁体系；

[0019] 第五步，完成附属设施的架设，结束施工。

[0020] 所述上剪力连接件和下剪力连接件结构相同，均包括连接板和垂直焊接在所述连接板上的波形翼板，所述波形翼板边缘开设有连接孔，连接板的另一面焊接有预埋在预制混凝土顶板或预应力混凝土底板中的剪力钉。

[0021] 组成所述工字型梁体单元的单个预制混凝土顶板、预应力混凝土底板和波形钢腹板的长度分别为5-30米。

[0022] 本发明提供的分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法，采用将工字型梁体单元的预制混凝土顶板、预应力混凝土底板和波形钢腹板单独预制，再现场进行拼接施工的方式。本发明对现有的整体预制的工字形构件在竖向上进一步进行分块，一方面充分利用了波形钢腹板的“褶皱效应”实现箱梁化整为零，将预制构件体积充分减小，使构件体积小，更加易于运输和吊装，有利于桥梁的快速架设，同时避免了整体预制的工字

形构件自身稳定性差的问题；另一方面利用了波形钢腹板特有的弱“梁端效应”，在顶板内设置有后张拉预应力钢束，底板内设置直线型先张拉预应力钢束，用于抵抗混凝土收缩徐变产生的应力，与施工过程完美配合，实现施工的最大便捷。此外，底板取消了底板承托，采用平板结构，不仅可减轻底板自重，同时能消除传统混凝土箱梁底板承托位置应力传递不流畅的缺点，同时预制时较为方便；顶板和底板上预埋有用于与波形钢腹板连接的剪力连接件，相邻的顶板和底板在桥梁施工现场可以通过浇筑湿接缝方式进行横向和/或纵向的拼接以获得各种要求的桥宽、桥跨。由此可见，本发明将工字型梁体单元中的顶板、底板和腹板分解开进行预制，有效减轻了各预制件的体积及重量，降低运输及吊装难度；其次，由于波形钢腹板通过螺栓与顶板和底板连接，若后期交通量增大时，还可以通过对波形钢腹板的更换实现对梁体高度的调整或方便后期维护，达到增加桥梁结构承载能力的目的；再次，上述预制件之间活动相连，可以重复安装与拆卸，因此可在桥梁拆除后还能将部分预制件重复利用，为桥梁结构的可循环发展提供了一种有效思路。具体来说，本发明的优点可以体现在以下几点：

[0023] (1)本发明采用分块预制拼装的结构形式进行梁体架设，各部件的体积及重量都相应较小，不仅能有效保证预制件在运输过程中的稳定性，而且容易保证吊装过程中构件的安全性，利于施工。

[0024] (2)本发明中的波形钢腹板可进行拆卸安装，方便后期对梁体的维护及检查，同时可对受损伤的波形钢腹板进行更换，实现调整梁体高度、增加桥梁结构承载能力的目的；桥梁整体拆卸后部分组件可以重复利用，降低了桥梁建造成本，缩短了施工周期。

[0025] (3)本发明除波形钢板的高度可变外，其他混凝土构件均为标准件，具备大规模标准化生产的条件。

[0026] (4)本发明充分利用了波形钢腹板组合箱梁“弱梁端效应”的特点，预应力体系大部分集中在采用了先张法预应力的底板上，仅在相邻跨的顶板之间张拉少量的墩顶负弯矩预应力钢束，大大减少了现场钢束张拉作业量；组合箱梁全部采用体内预应力钢束，避免采用造价高、易腐蚀的体外预应力钢束；箱梁拼装时，仅需在形式简单的移动支撑装置上进行，不需要在周边设置专门的拼装场，非常适合城市桥梁的快速施工。

附图说明

[0027] 图1、图2是本发明中工字型梁体单元的结构示意图。

[0028] 图3是图1、2中预制混凝土顶板的结构示意图。

[0029] 图4是图1、2中预应力混凝土底板的结构示意图。

[0030] 图5是本发明中上、下剪力连接件的结构示意图。

[0031] 图6、图7是本发明的施工过程示意图。

[0032] 图8-13是对本发明进行原理性说明的相关附图。

具体实施方式

[0033] 本发明所述的分块预制的先张法预应力波形钢腹板组合箱梁的施工方法，主要包括以下步骤：

[0034] 第一步，单独预制组成工字型梁体单元(如图1、2所示)的预制混凝土顶板1、预应

力混凝土底板2和波形钢腹板3。

[0035] 具体地，预制如图3所示的预制混凝土顶板1时，先绑扎顶板钢筋网，根据设计要求确定横向连接筋1.1和纵向连接筋1.2的位置和数量，再将墩顶负弯矩预应力孔道1.3和上剪力连接件1.4的剪力钉安装在顶板钢筋网内，然后安装限位模板，浇筑混凝土；待混凝土达到设计强度后，拆除限位模板。

[0036] 预制如图4所示的预应力混凝土底板2时，先在张拉台座上的预定位置固定预应力钢束2.1并张拉至设计值，再绑扎带有纵向连接筋2.2的底板钢筋网，同时将下剪力连接件2.3的剪力钉安装在底板钢筋网内，安装模板，浇筑混凝土，待混凝土达到设计强度后，拆除模板，放松直线型先张拉预应力钢束2.1，完成先张法预应力混凝土底板2的预制，大大减少现场钢束张拉工程量。

[0037] 预制波形钢腹板3时，先冲压加工波形钢板，再在波形钢板周缘预留用于连接上、下剪力连接件1.4、2.4的螺栓孔。

[0038] 上述上剪力连接件1.4和下剪力连接件2.3均为预制成型件，为了降低预制成本，两者采用相同的结构。以上剪力连接件1.4为例，如图5所示，包括预埋在预制混凝土顶板1内且端部带有防脱块的剪力钉1.4a，剪力钉焊接在连接板1.4b上，连接板1.4b另一面垂直焊接有带有连接孔的波形翼板1.4c。上述连接孔的位置与波形钢腹板3周缘螺栓孔的位置相对应，将两者对齐后，穿设固定螺栓4(如图1、2所示)，即可方便、快捷地完成预制混凝土顶板1与波形钢腹板3的拼接。

[0039] 第二步，进行现场装配准备工作：

[0040] 在现场完成施工的相邻桥台或桥墩5之间设置移动支撑装置5作为辅助施工平台(如图6所示)，同时，将预制完成的预制混凝土顶板1、预应力混凝土底板2和波形钢腹板3运送至施工现场。

[0041] 第三步，进行组合梁工字型梁体单元的拼接装配：

[0042] 上述预制件拼接后能够组成如图1、2所示的工字型梁体单元。单箱室结构(如图1所示)和双箱室结构(如图2所示)的底板均为单独一块预应力混凝土底板2，不进行拼接，顶板则由至少两块预制混凝土顶板1拼接而成，其结构简单、施工方便，现场拼接工作量较少；其中，混凝土顶板1的数量根据桥宽及其他设计要求进行选择。

[0043] 具体地，先用吊装设备将预应力混凝土底板2、波形钢腹板3和预制混凝土顶板1依次吊装至移动支撑装置5上，用固定螺栓4将下剪力连接件2.3与波形钢腹板3、上剪力连接件1.4与波形钢腹板3分别连接，完成由预制混凝土顶板1、预应力混凝土底板2和波形钢腹板3的竖向装配施工；之后绑扎相邻预制混凝土顶板1之间的横向连接筋1.1，并浇筑形成预制混凝土顶板纵向湿接缝6，完成工字型梁体单元的拼接装配。

[0044] 由于拼装上述工字型梁体单元时，在竖直方向不需要较强的刚度支撑，因此移动支撑装置5可采用安装有支撑架的平板车。

[0045] 第四步，进行组合梁纵向拼接装配：

[0046] 将移动支撑装置5依次转移至其他桥跨位置，重复第三步作业，完成纵向每一桥跨梁体的施工；绑扎相邻桥跨顶板、底板之间的纵向连接筋1.2、2.2，并浇筑形成横向湿接缝7(如图7所示)；在横向湿接缝7达到一定强度时，张拉位于相邻桥跨的墩顶负弯矩区顶板预应力孔道1.3内的墩顶负弯矩张拉钢束，用于抵抗相邻跨径箱梁的墩顶负弯矩，形成多跨连

续梁体系。

[0047] 第五步，完成附属设施的架设，结束施工。

[0048] 为了减少现场浇筑湿接缝的工作量，提高施工效率，组成工字型梁体单元的单个预制混凝土顶板1、预应力混凝土底板2和波形钢腹板3的长度分别为5-30米。

[0049] 以下是对本发明的预应力混凝土底板采用先张法预应力，并将波形钢腹板组合工字梁进行竖向拼接这种施工方法的可行性、合理性所做出的具体原理性说明：

[0050] 1.第1状态：

[0051] 如图8所示的预应力混凝土底板，其内设置的张拉预应力钢束所施加的预应力为N，则预应力混凝土底板上的截面上应力为：

[0052] $-\sigma_0=N/b_4t_4$ （1）

[0053] 2.第2状态：

[0054] 当上述预应力混凝土底板组合成为工字形波形钢腹板组合梁时，其工字形断面结构如图9所示。

[0055] 在预应力混凝土底板上施加预应力N，对组合截面中性轴的弯矩为：

[0056] $M=N(t_4/2+h_2)$ （2）

[0057] 由上下截面的面积矩相等可得：

[0058] $b_1t_1h_1+h_2t_2\frac{h_2}{2}=b_3t_3\frac{h_3}{2}+b_4t_4h_4$ （3）

[0059] 组合梁全截面的面积为：

[0060] $A=b_1t_1+h_2t_2+h_3t_3+b_4t_4$ （4）

[0061] 整个截面的惯性矩为：

[0062] $I=\frac{b_1t_1^3}{12}+b_1t_1h_1^2+\frac{t_2h_2^3}{12}+t_2h_2\left(\frac{h_2}{2}\right)^2+\frac{t_3h_3^3}{12}+t_3h_3\left(\frac{h_3}{2}\right)^2+\frac{b_4t_4^3}{12}+b_4t_4h_4^2$ （5）

[0063] 波形钢腹板组合梁由于腹板的不抵抗轴力，在抗弯承载力计算时可不考虑腹板的作用，相当于无腹板截面，因此设定：

[0064] $t_2=t_3=0$，$t_1=t_4=t$，$h_4=t_4/2+h_2$，$h_1=t_1/2+h_2$

[0065] 则：$b_1h_1=b_4h_4$，$A=(b_1+b_4)t$，$M=Nh_4$，$I=\frac{(b_1+b_4)t^3}{12}+b_1h_1(h_1+h_2)t=\frac{At^2}{12}+\frac{b_4h_4^2}{b_4}A$

[0066] 顶板的应力：$\sigma_1=\frac{N}{A}\left(1-\frac{12h_1h_2}{t^2+12h_1h_4}\right)=\frac{N}{A}\frac{t^2}{t^2+12h_1h_4}$ （6）

[0067] 令高厚比$n_1=h_1/t$，$n_2=h_2/t$

[0068] 则顶板的应力：$-\sigma_1=\frac{1}{1+12n_1n_4}\frac{N}{A}$ （7）

[0069] 底板的应力：$-\sigma_2=\frac{N}{A}\left(1+\frac{12n_1^2}{1+12n_1n_4}\right)$ （8）

[0070] 对于一般的组合梁断面有$b_3 \le b_1$；$t \le h_1$；$t \le h_4$，可得

[0071] $$-\sigma_1 = \frac{N}{A}\frac{1}{1+12n_1n_4} \le 0.077\frac{N}{A} \quad (9)$$

[0072] $$-\sigma_2 = \frac{N}{A}\left(1+\frac{12n_3^2}{1+12n_1n_4}\right) \ge 1.923\frac{N}{A} \quad (10)$$

[0073] 以30m跨径的波形钢腹板组合梁为例。若$t=0.2m$ $h_1=0.84m$ $h_3=1.16m$，此时n_1=4.2，n_4=5.8，带入式(9)和(10)得：

[0074] $$-\sigma_1 \approx 0, \quad -\sigma_2 \approx N/(A/2) = N/b_4t_4 \quad (11)$$

[0075] 当桥梁的跨径进一步增大时，n_1和n_4进一步增大，式(10)满足

[0076] $$-\sigma_2 \approx -\sigma_0 \quad (12)$$

[0077] 由此可见，第1状态和第2状态下，预应力混凝土底板的应力近似相等。也就是说，先期在预制底板阶段施加的预应力，在叠合成波形钢腹板组合梁后仍基本保持不变。因此称波形钢腹板组合梁采取竖向分层拼装前后受力可基本保持不变的这种力学特征为叠合受力不变性。这种特性为波形钢腹板组合梁的竖向分层拼接提供了基础。

[0078] 在上述分析的基础上，再来讨论普通钢-混组合工字梁和波形钢腹板组合工字梁的竖向拆分与拼装过程中应力的变化。其中，将预应力作为唯一考虑的外力：

[0079] 1．竖向拆分过程：

[0080] 图10为普通钢-混组合工字梁进行竖向拆分的示意图。

[0081] 图11为波形钢腹板组合工字梁进行竖向拆分的示意图。

[0082] 2.先张法预应力+竖向拼接过程：

[0083] 图12为普通钢-混组合工字梁采用先张法预应力及进行竖向拼接时的示意图。

[0084] 图13为波形钢腹板组合工字梁采用先张法预应力及进行竖向拼接时的示意图。

[0085] 对比上述图例可以看出，对于波形钢腹板组合工字梁来说，在底板施加预应力就好像是一个独立的过程；但是普通钢-混组合的情况是完全不同的。因此，施工中可在预制混凝土底板时施加全部或部分预应力，然后将预制混凝土底板、波形钢腹板和预制混凝土顶板竖向分层拼装，这样能大大减少现场的钢束张拉工作量，提高工厂预制化程度。

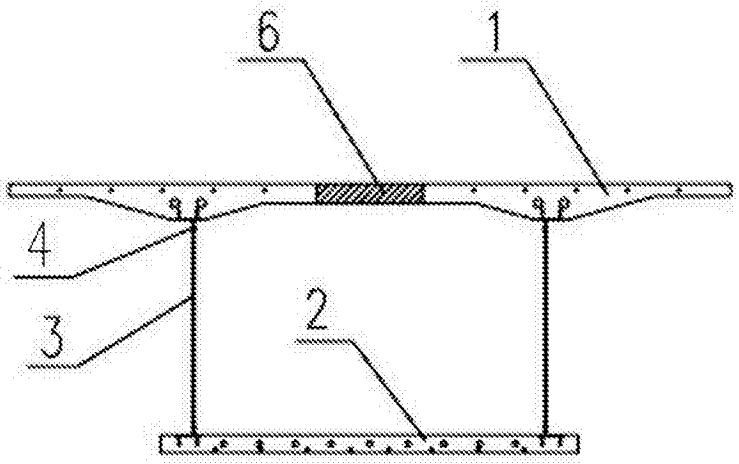


图1

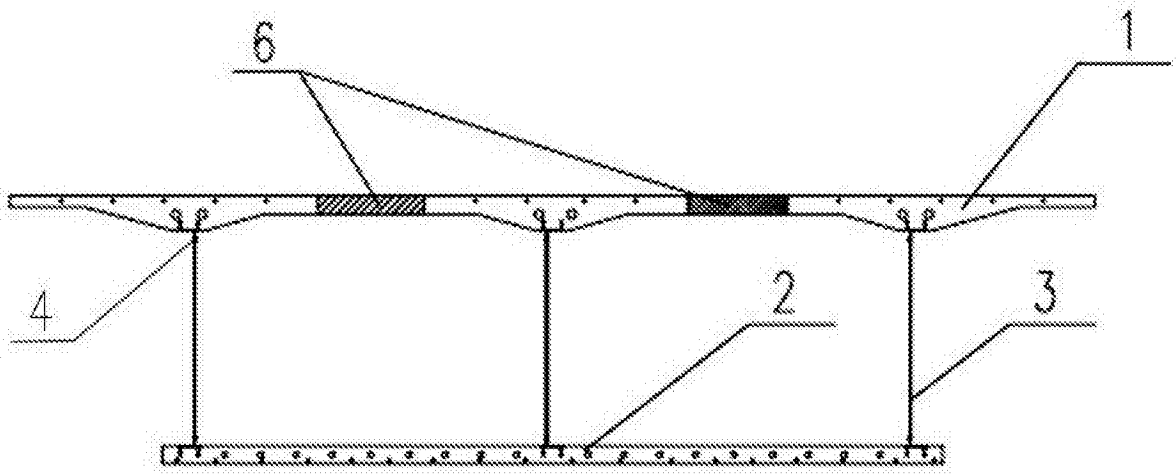


图2

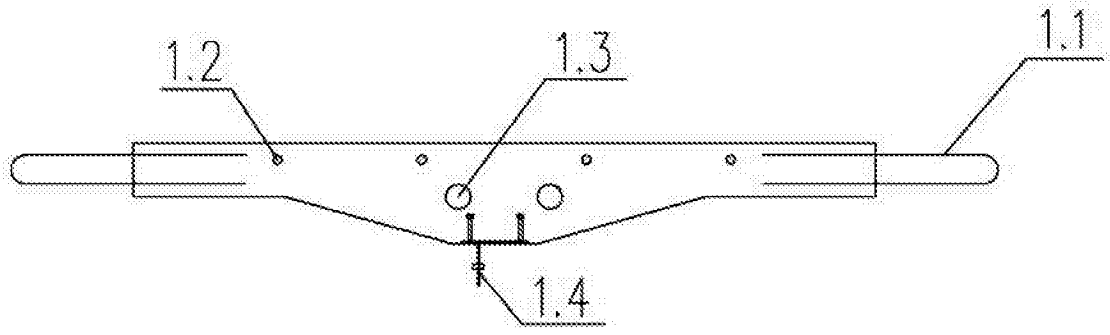


图3

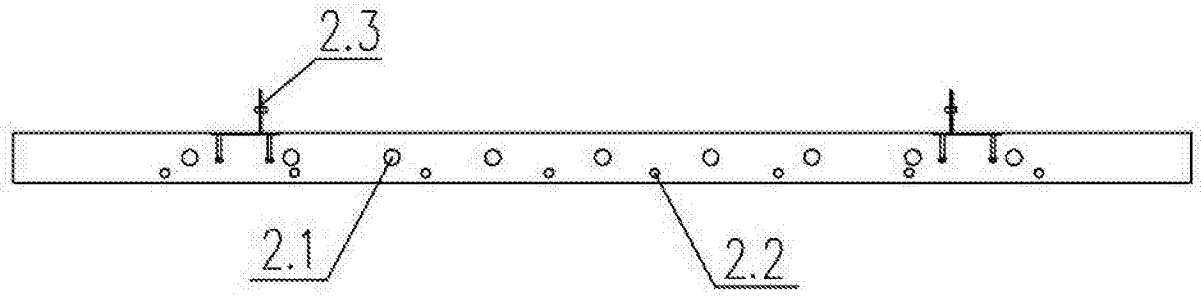


图4

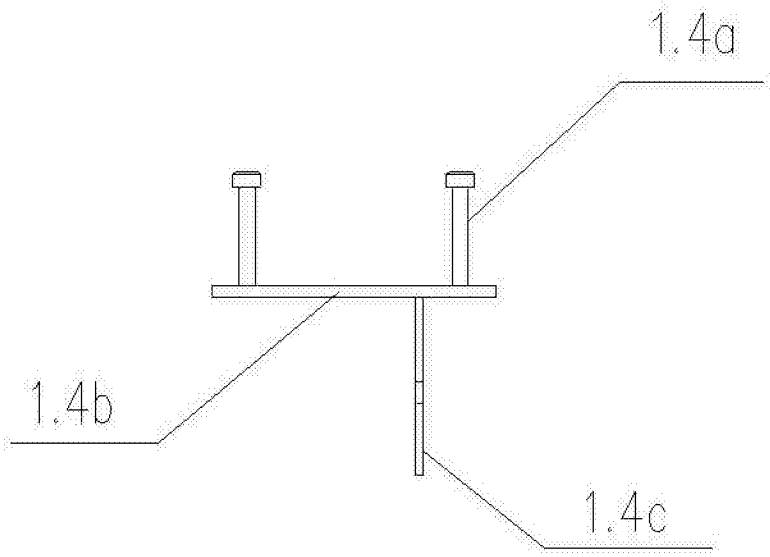


图5

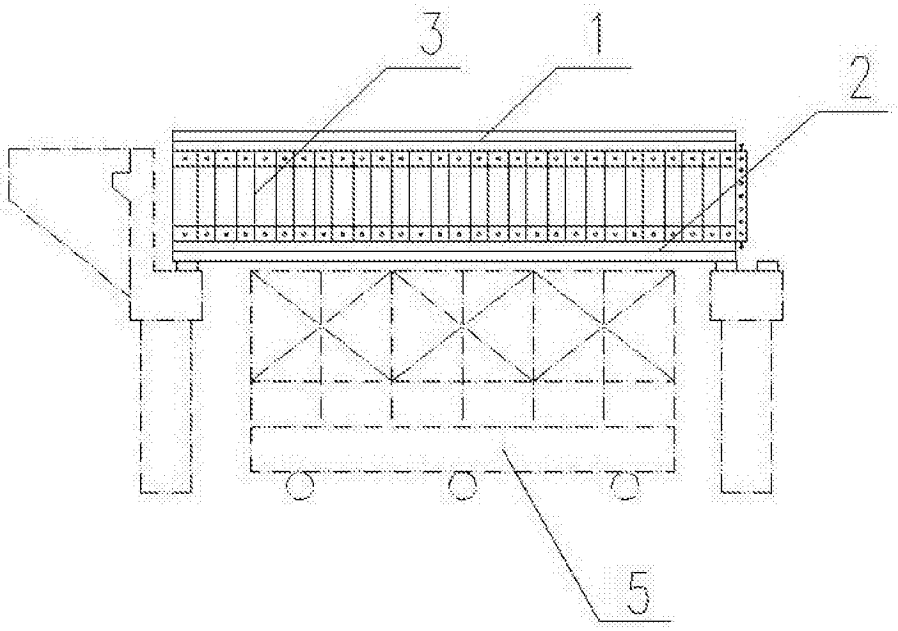


图6

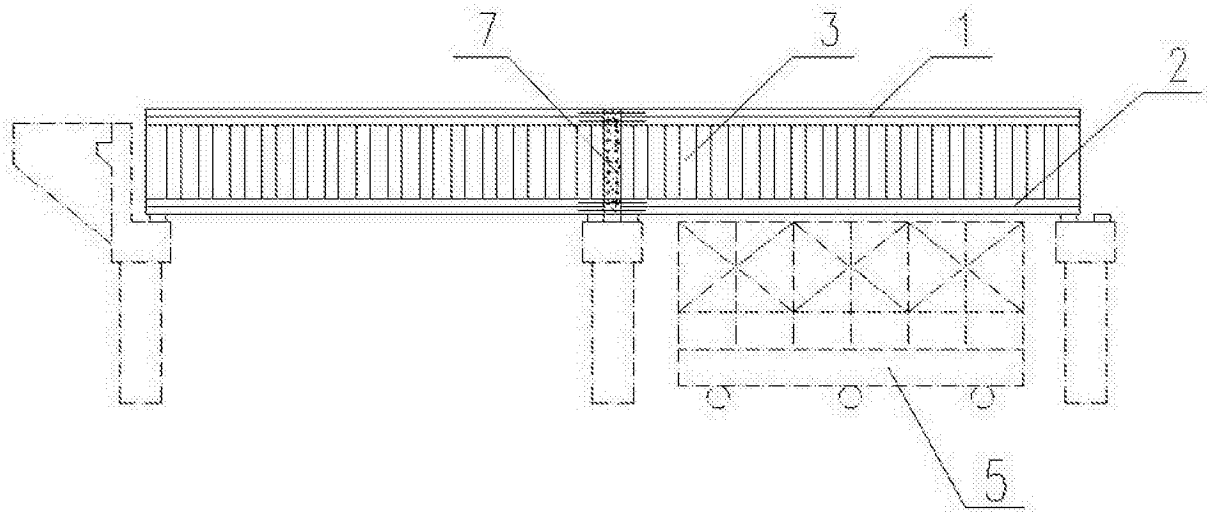


图7

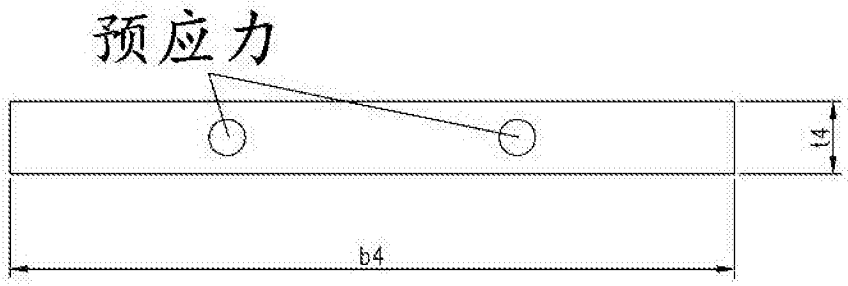


图8

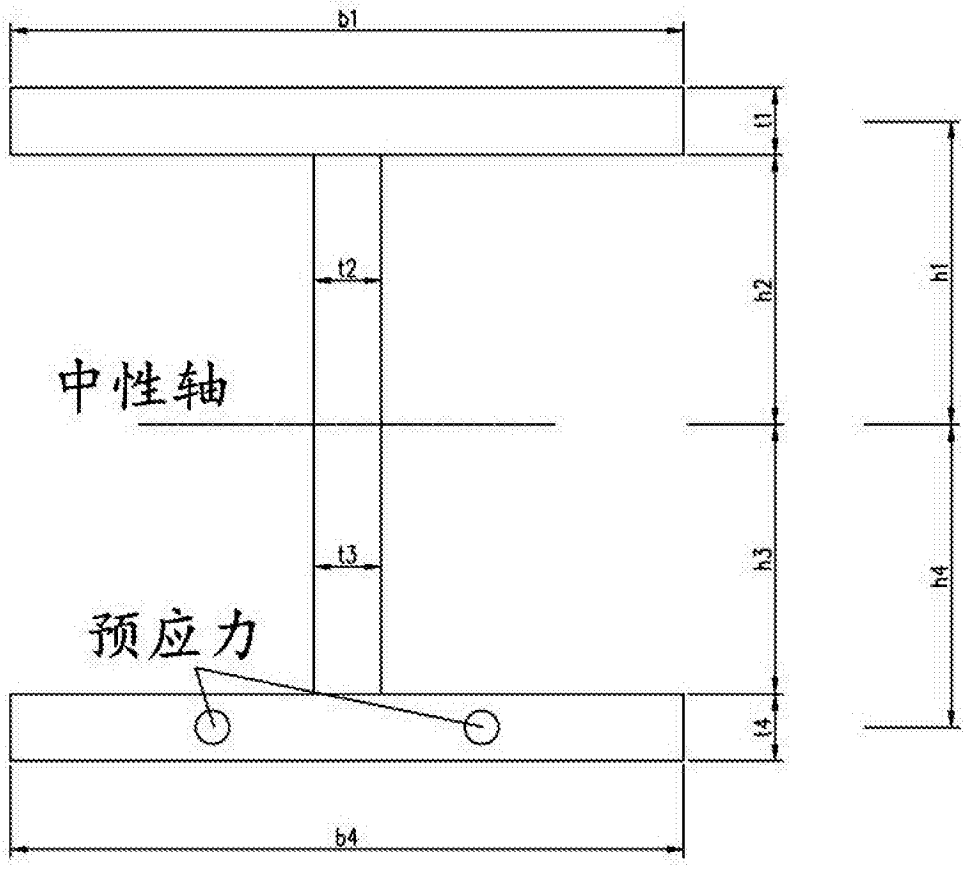

b1
t1
t2
h2
h1
中性轴
t3
h3
h4
预应力
t4
b4

图9

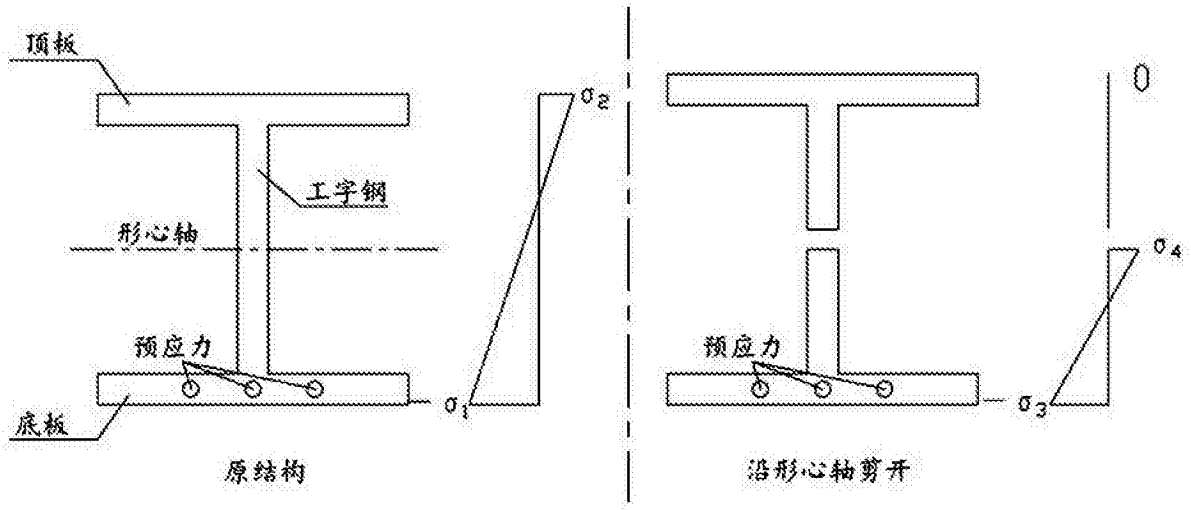

顶板
工字钢
形心轴
预应力
底板
σ2
σ1
原结构
0
σ4
σ3
沿形心轴剪开

图10

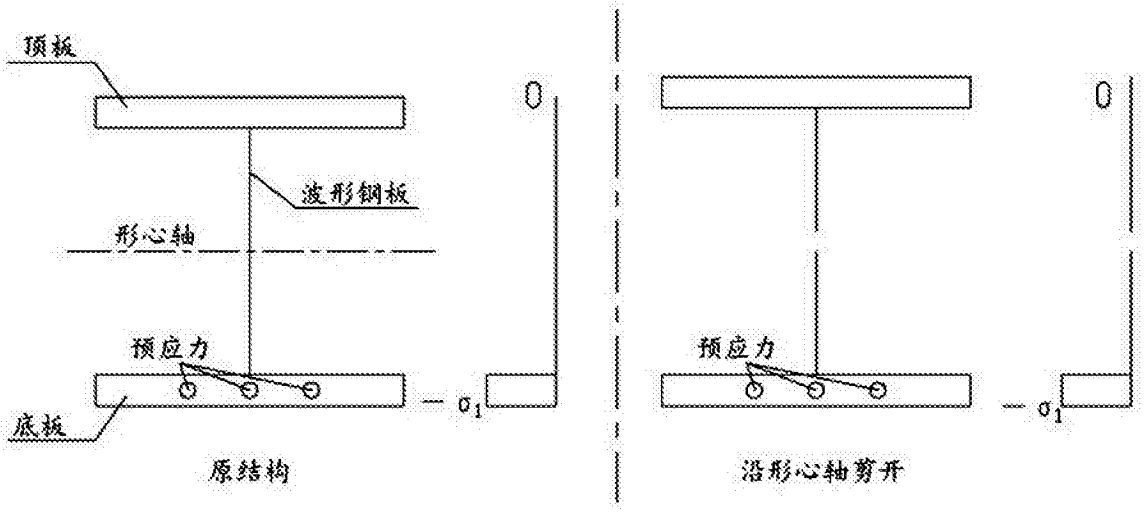


图11

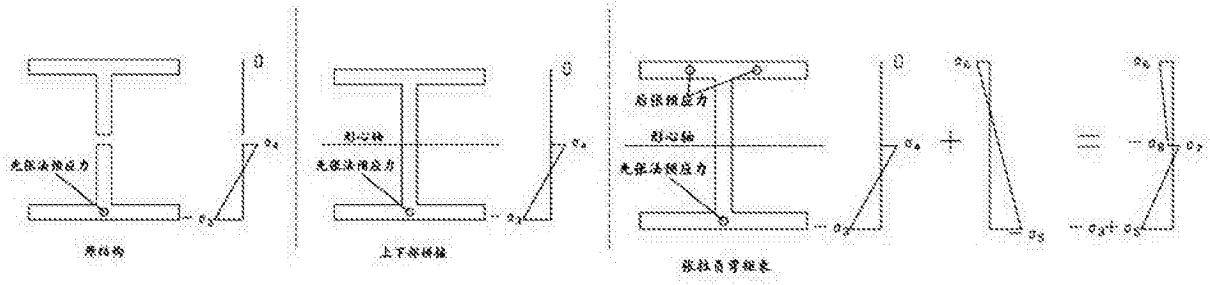


图12

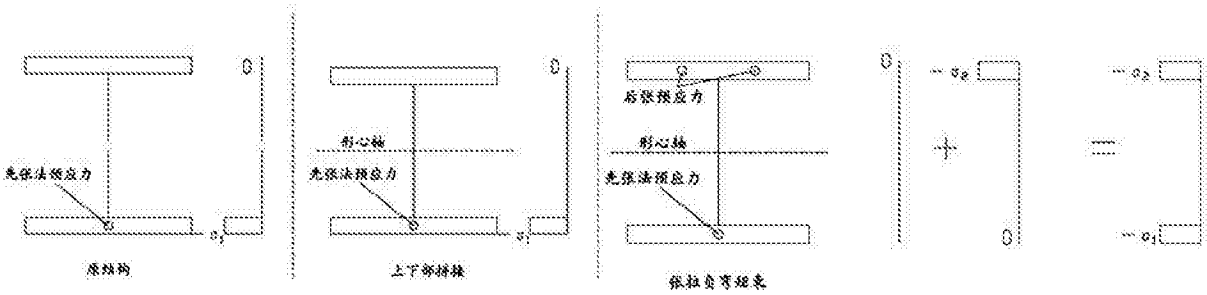


图13