

· 施 工 ·



装配式挡墙箱体集束连接力学性能试验研究

陈光林¹, 邓 仁², 王 鑫², 陈中向², 蔡建国²

(1. 常州交通建设管理有限公司, 江苏 常州 213023; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为解决船闸工程现浇施工体系施工效率低、质量不可控等问题,提出将装配式结构应用于船闸挡墙工程,并在此基础上将集束搭接连接应用于装配式挡墙结构。为明确集束连接的力学性能,开展了集束连接局部构件的单向分级加载试验,观察试件破坏特征和裂缝发展规律。试验结果表明:试件破坏模式为小偏心受拉破坏,破坏位置集中在插筋端部较小范围内。研究结果可为船闸挡墙工程集束连接结构的破坏模式分析和受拉承载力计算提供理论支持。

关键词: 装配式挡墙; 集束连接; 单向分级加载试验; 力学性能

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0214-06

Experimental study on mechanical properties of cluster connection of prefabricated retaining wall box

CHEN Guanglin¹, DENG Ren², WANG Xin², CHEN Zhongxiang², CAI Jianguo²

(1. Changzhou Communications Construction Administration Co., Ltd., Changzhou 213023, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To solve the problems of low construction efficiency and uncontrollable quality of the cast-in-situ construction system in ship lock engineering, the prefabricated structures are applied to retaining wall engineering, and the reinforcement cluster connection is applied to prefabricated retaining wall structures. To clarify the mechanical performance of the connection, this paper conducts unidirectional loading tests on the specimens of the connection to observe the failure characteristics and crack development rules. The test results show that the failure mode is small eccentric tension failure, and the failure location is concentrated at the end of the inserted bar. The research results can provide theoretical support for the failure mode analysis and tensile bearing capacity calculation of the cluster connection in ship lock retaining wall engineering.

Keywords: prefabricated retaining wall; reinforcement cluster connection; unidirectional fractional loading test; mechanical property

挡墙是船闸工程中常见的构筑物,大多采用现场现浇体系施工,存在施工效率低、质量不可控等缺陷。与现浇体系相比,装配式挡墙具有能耗低、施工快等优点。装配式挡墙结构主要包括悬臂式^[1-2]和扶壁式^[3]。宁英杰等^[4]提出一种基于柱板式挡墙的装配式可绿化挡墙。顾宽海等^[5-6]提出一种适合内河护岸工程的装配式低桩承台护岸结构。目前,装配式挡墙多用于公路交通建设,

针对船闸工程的研究较少。因此,有必要推进装配式挡墙结构在船闸工程中的应用研究。

节点连接是装配式挡墙的关键技术^[7]。目前,节点连接方式主要包括套筒灌浆连接^[8-9]和浆锚搭接连接^[10-11]。姜洪斌等^[12]提出插入式预留孔灌浆钢筋连接,并给出基本锚固长度。李战利^[13]提出集束连接,通过预埋金属波纹管预留孔道并插入集束钢筋实现竖向钢筋搭接连接。集束连接具有

收稿日期: 2023-04-10

作者简介: 陈光林(1987—),男,硕士,高级工程师,研究方向为公路工程和水运工程。

减小裂缝宽度、便于施工的优越性,许多学者将其应用于不同的装配式结构体系。Chen 等^[14]将集束连接方式应用于预制剪力墙上下层剪力墙的连接节点。刘钊等^[15]将集束连接应用于装配式桥梁,包括预制桥墩墩柱之间和预制墩柱与承台之间的连接节点。国内对于集束连接在挡墙的应用研究较少,尤其是该连接形式在装配式船闸挡墙中的应用几乎空白,因此有必要开展相关试验研究。

综上所述,本文基于魏村枢纽扩容改建工程提出一种箱形结构装配式挡墙和一种新型箱体连接方式。鉴于该新型连接在钢筋布置、数量及截面形式等方面的特殊性,本文对集束连接构件进行单向分级加载试验,研究了集束连接黏结滑移的破坏模式、极限承载力等力学性能,为集束连接在船闸工程中的协同工作作用和承载力计算提供研究基础。

1 工程概况

本研究提出一种新型装配式箱形结构护岸挡墙,拟用于江苏省德胜河魏村枢纽扩容改建工程,该挡墙由 3 层预制箱体组成,在预制箱右侧两角处预留的圆形孔道采用集束连接进行箱体连接,如图 1 所示。施工方式为在上层箱体预留圆形孔道内插入下层箱体的集束钢筋,并向孔道内注入灌浆料,待灌浆料养护完成后即可将上下两个预制箱连接起来。

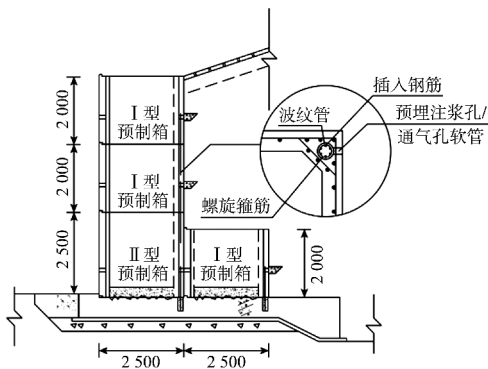
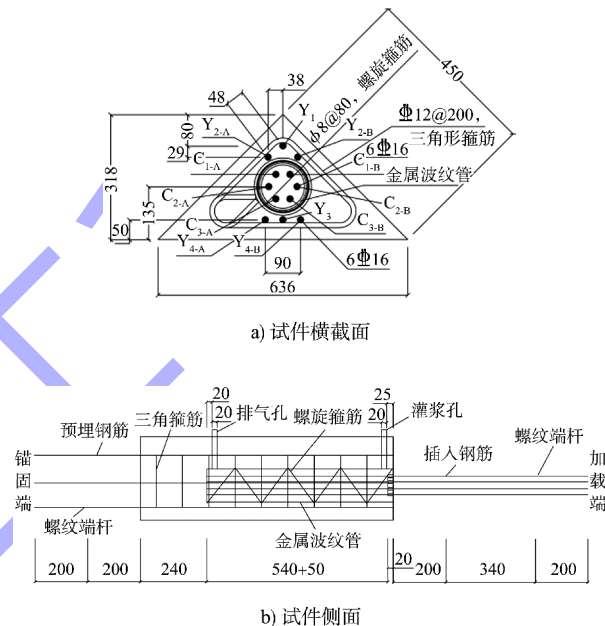


图 1 装配式箱型结构护岸挡墙 (单位: mm)

2 试验方案

2.1 试件设计与制作

本试验设计制作了 3 个钢筋混凝土构件,试件的构造尺寸及钢筋编号如图 2 所示。试件混凝土设计强度为 C50,无收缩水泥基灌浆料强度为 C60。插筋、预埋钢筋、三角箍筋的强度等级均为 HRB400;螺旋箍筋的强度等级为 HPB300,直径 8 mm,间距 80 mm,环内径 130 mm。



注: C 为插入钢筋,编号分别为 C_1 (C_{1-A} 、 C_{1-B})、 C_2 (C_{2-A} 、 C_{2-B})、 C_3 (C_{3-A} 、 C_{3-B}); Y 为预埋钢筋,编号分别为 Y_1 、 Y_2 (Y_{2-A} 、 Y_{2-B})、 Y_3 、 Y_4 (Y_{4-A} 、 Y_{4-B})。

图 2 试件尺寸、配筋及钢筋编号 (单位: mm)

试件制作如图 3 所示。1) 钢筋的绑扎。将预埋钢筋骨架置于模板内,预留圆形灌浆料孔道。2) 混凝土浇筑成型。待混凝土强度达到 75% 后,将插入钢筋放入预留孔道,让其形心与预埋钢筋形心重合,且在搭接长度外设置 20 mm 无黏结段,防止应力集中导致灌浆料局部破坏。3) 灌入灌浆料并养护成型。试件端部采用隔离套管将外围混凝土与内部结构隔离,以减小内部结构端部变形对外围混凝土的扰动。

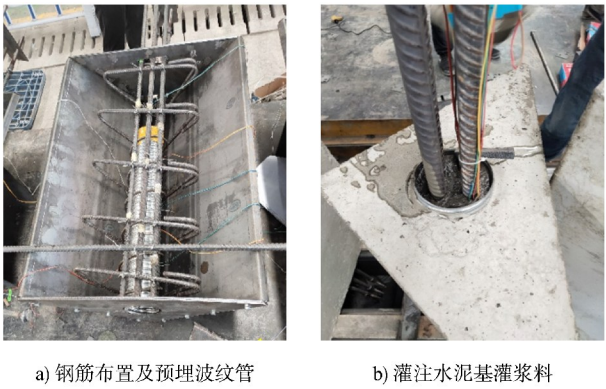


图 3 试件制作

2.2 加载装置与荷载

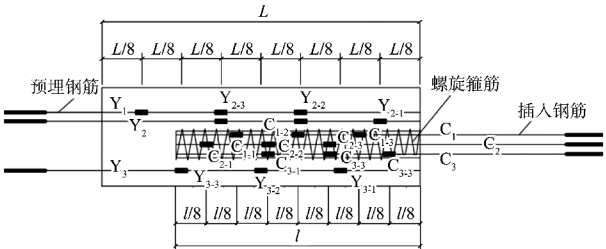
试验采用 YCW150B 型穿心式千斤顶在反力架左侧施加荷载，见图 4。加载采用荷载控制，加载速率为 128 N/s，每级加载值为 $0.1F_s$ (正常使用状态荷载值)。加载至开裂荷载附近时，每级加载值调整为 $0.05F_s$ 。试件开裂后恢复为每级加载值为 $0.1F_s$ 。在试验荷载接近承载力极限状态时，每级加载值取 $0.05F_d$ (承载力极限状态荷载设计值)。



图 4 加载装置

2.3 测点布置

通过千斤顶的数字压力表读取施加的荷载值。在试件两端钢筋端部布置 3 个水平位移计。在预埋钢筋和插入钢筋上布置应变片，以测量试件纵筋的应变变化。应变片布置见图 5。



注：L 为混凝土构件总长，l 为预埋波纹管长度。应变片编号中第 1 个数字用于标识钢筋的具体编号，第 2 个数字表示应变片的位置编号，例如 Y₁₋₁ 代表第 1 根预埋钢筋上的第 1 个应变片。

图 5 应变片布置

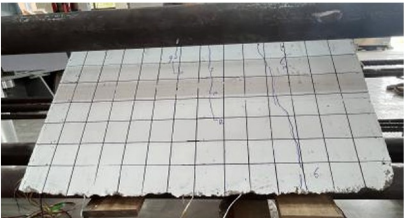
3 试验现象分析

3.1 试验现象

在荷载达到 $0.35P_u$ (最大荷载值) 前，试件无明显变化。当荷载达到 $0.35P_u$ 后，侧面可见沿插筋端部附近的横向裂缝，见图 6a)。随荷载的增加，该横向裂缝发展成主裂缝。当荷载达到 $0.8P_u$ 时，试件进入屈服阶段，且第 1 条裂缝周围出现细小裂缝，同时沿加载方向出现多条横向裂缝，混凝土加载端形成纵向裂缝及端面裂缝，见图 6b)。当达到峰值荷载时，主裂缝明显扩宽，如图 6c) 所示，附近混凝土溃碎剥落，金属波纹管暴露。此时认为试件破坏，停止加载。



a) 混凝土开裂



b) 钢筋屈服



c) 破坏临界状态

图 6 裂缝发展过程

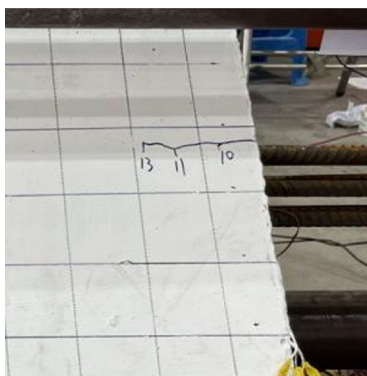
3.2 裂缝分类及破坏模式

试验中产生的裂缝形式有 3 种：第 1 种是侧面横向受力裂缝，始于试件上边缘并下延至一定高度，分布于整个表面，见图 7a)。第 2 种是纵向裂缝，主要集中在加载端，并从端部灌浆料周边延伸至混凝土侧面，见图 7b)。第 3 种是由灌浆料

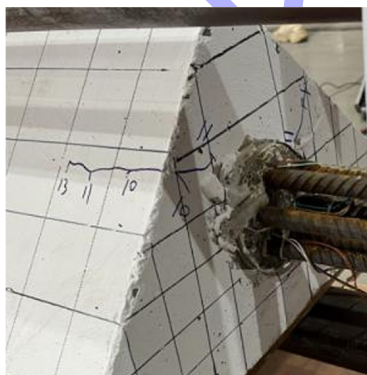
向四周延伸的端面裂缝, 见图 7c), 此类裂缝分布较为集中, 从而导致裂缝产生、发展和试件的最终破坏。



a) 横向贯穿主裂缝



b) 端部纵向裂缝



c) 端面裂缝

图 7 裂缝形式

试件破坏模式主要为混凝土剥落破坏和钢筋滑移破坏, 见图 8。当混凝土的拉应力超过其抗拉强度时, 试件表面出现裂缝, 并逐渐扩展和贯通, 最终导致试件破坏。此外, 混凝土和灌浆料的力

学性能存在差异, 搭接区域存在应力集中, 连接界面的混凝土易发生开裂和剥落破坏。



图 8 试件破坏形态

4 试验数据结果及分析

4.1 荷载-滑移曲线

各试件的荷载-滑移曲线可划分为 4 个阶段, 见图 9。 OA 段, 试件处于弹性工作阶段, 荷载-滑移曲线斜率较大, 钢筋滑移很小。当试件首次出现裂缝时, 曲线达到开裂荷载(点 A 处对应荷载), 随后进入裂缝发展阶段(AB 段)。曲线出现第 1 个拐点(B 点), 对应荷载为屈服荷载, 之后试件进入屈服阶段。进入 BC 段后, 试件刚度降低, 滑移增长较快而荷载提高缓慢。曲线出现第 2 个拐点(C 点), 试件承载力达到峰值, 试件刚度由正值变为负值, C 点对应的荷载值为极限荷载。进入 CD 段, 由于第 1 条裂缝处混凝土破坏程度较大, 曲线进入下降段, 荷载骤降而滑移量持续增大, 表明试件破坏, 丧失承载力。结果表明, 钢筋与混凝土之间的黏结力对试件的承载力和变形性能有重要影响。

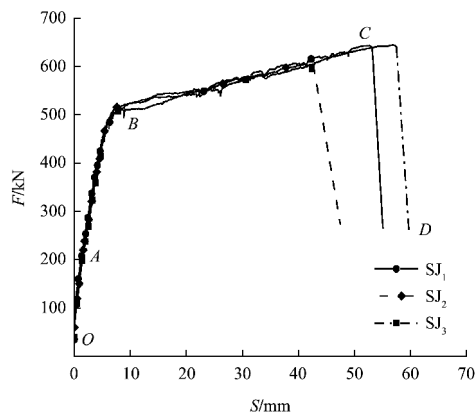


图 9 试件荷载-滑移曲线

表 1 为试件承载力试验结果, 试件屈服荷载约为极限荷载的 80%, 表明试件具有较高的屈服强度和承载能力。

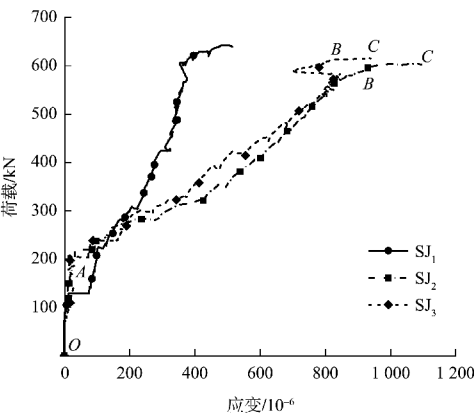
表 1 试件特征荷载和破坏模式

试件编号	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	破坏模式
SJ ₁	222	520	645	混凝土剥落破坏, 钢筋滑移破坏
SJ ₂	224	520	608	
SJ ₃	214	510	648	
平均值	220	517	647	

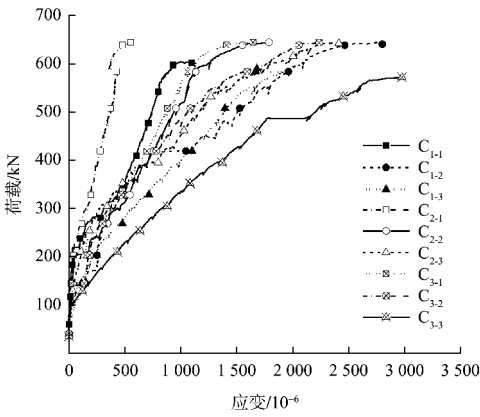
4.2 荷载-应变曲线

4.2.1 插入钢筋

插入钢筋时荷载-应变关系曲线如图 10 所示, 以应变片 C₁₋₁ 为例。试验初期 OA 段时, 荷载-应变曲线斜率极大, 插筋的应变较小。这是因为插筋和灌浆料共同承担拉力, 阻碍了插筋的自由移动。AB 段时, 插筋应变值有小幅突变, 稳定后曲线基本呈线性上升, 表明灌浆料没有垂直插筋轴向的裂缝。BC 段后, 曲线趋于水平, 荷载无法继续增加, 而插筋应变值却持续增长, 表明试件已经达到极限状态。此时, 混凝土已经产生较大的裂缝且丧失承载力, 钢筋仍承担荷载, 直到混凝土达到极限应变, 试件完全破坏。不同测点插入钢筋的荷载-应变关系曲线见图 10b), 应变值取 3 个试件的平均值。当荷载相同时, 距离加载端越近, 钢筋应变越大。这是因为随加载值的增大, 插入钢筋在灌浆料内部发生滑移, 使插入钢筋靠近受拉一侧的应变值较大。



a) 插入钢筋C₁₋₁

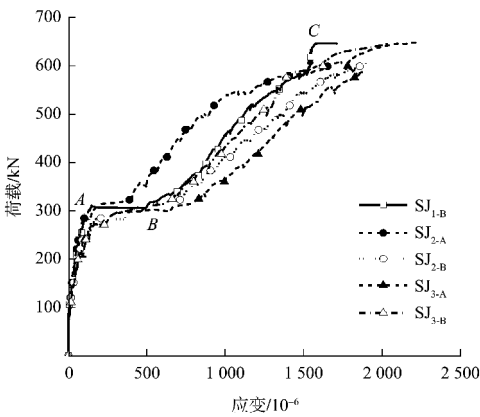


b) 不同测点插入钢筋

图 10 插入钢筋荷载-应变关系曲线

4.2.2 预埋钢筋

预埋钢筋荷载-应变关系曲线如图 11 所示, 以应变片 Y₂₋₂ 的荷载-应变曲线为例。OA 段, 该处混凝土未出现明显裂缝, 混凝土和钢筋共同受拉, 钢筋应变较小且相近。AB 段, 应变发生较大幅度突变, 这是因为混凝土裂缝开始出现在预埋钢筋一侧, 随后向插入钢筋一侧发展, 因此预埋钢筋应变突变现象较明显。BC 段, 曲线斜率基本保持不变。接近顶点 C 时, 曲线逐渐趋于水平, 此时荷载无法继续增加, 而应变继续增长, 表明试件已进入破坏阶段。不同测点预埋钢筋的荷载-应变曲线如图 11b) 所示。测点位置距插入钢筋端部越近, 相同荷载下应变越大, 且 AB 段应变突变越早且幅度越大。这是由于试件插入钢筋端部附近最早出现大量横向裂缝, 而距离插入钢筋端部较远处的混凝土横向裂缝较少且出现较晚。



a) 预埋钢筋Y₂₋₂

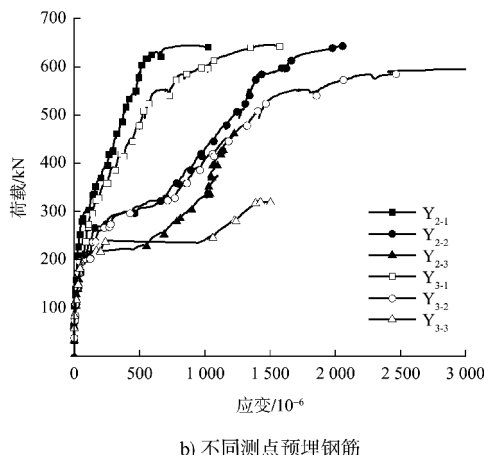


图 11 预埋钢筋荷载-应变曲线

5 理论计算与分析

设计阶段, 6 根插入钢筋和 6 根预埋钢筋共形心, 试件属于轴心受拉构件, 但考虑施工误差的影响, 实际试件属于小偏心受拉构件。因此, 采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[16]的计算方法, 按小偏心受拉构件计算该试件的正截面受拉承载力, 并与试验结果进行对比。如图 12 所示, 插入钢筋与预埋钢筋的设计形心为 O 点, 灌浆孔上侧 3 根预埋钢筋的形心位于 B 点, 考虑灌浆孔内 6 根插入钢筋的实际形心向上偏移 $e_0 = 15 \text{ mm}$, 实际形心位置为 A 点, 受拉承载力可按式 (1) 确定:

$$N_u = \frac{3f_y A_s (y_1 + y_2)}{y_1 + e_0} \quad (1)$$

式中: f_y 为钢筋材性试验实测屈服强度, 本试验中 $f_y = 434.3 \text{ MPa}$; A_s 为单根钢筋截面积; y_1 为灌浆孔下侧预埋钢筋的形心到 O 点的距离; y_2 为灌浆孔上侧预埋钢筋的形心到 O 点的距离。采用式 (1) 计算得到试件的理论受拉承载力 $N_u = 449 \text{ kN}$ 。

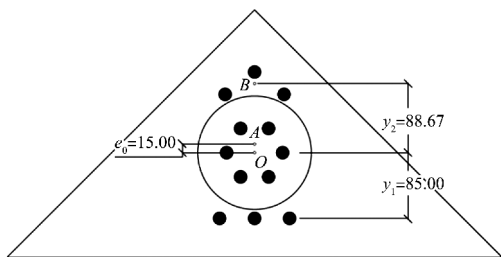


图 12 小偏心受拉计算 (单位: mm)

理论计算结果与试验结果对比表明, 预制构件的极限承载力理论值小于集束连接构件极限承载力的实测值, 说明集束连接节点的承载力高于预制构件的承载力。因此, 采用集束连接的预制构件的受拉承载力可采用式 (1) 进行计算, 计算方法中考虑的偏心量可视为安全系数, 以考虑影响施工质量的不确定因素。

6 结论与建议

1) 试件均发生小偏心受拉破坏, 破坏模式为混凝土剥落破坏及钢筋滑移破坏。破坏位置集中在插筋端部较小范围内。

2) 试件开裂荷载为极限荷载的 35% 左右, 屈服荷载为极限荷载的 80% 左右, 具有一定的塑性和变形能力。

3) 裂缝形式主要有侧面横向受力裂缝、纵向受力裂缝、端面裂缝 3 种形式, 主裂缝为侧面横向受力裂缝。试件带裂缝工作性能良好。

4) 基于试验结果, 建立了适用于装配式挡墙集束连接节点的受拉承载力计算公式, 计算结果表明集束连接具有足够的承载能力, 且具有较高的安全储备。

参考文献:

- [1] 刘曙光, 方琦, 钟桂辉, 等. 新型装配式悬臂混凝土挡土墙承载性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 937-944, 952.
- [2] 刘泽, 何硯, 黄天棋, 等. 装配悬臂式挡土墙节点承载特性试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(9): 25-33.
- [3] 章宏生, 沈振中, 徐力群, 等. 新型装配扶壁式挡土墙结构特性有限元分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 145-150, 189.
- [4] 宁英杰, 王新泉, 王正军, 等. 装配式可绿化挡墙设计及应用研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 59-66.
- [5] 顾宽海, 陈浩群, 张逸帆, 等. 装配式低桩承台护岸结构设计[J]. 水运工程, 2018(12): 186-192.
- [6] 顾宽海, 汪涛, 陈明阳, 等. 装配重力式混凝土护岸结构的设计及施工[J]. 水运工程, 2021(6): 6-12, 19.
- [7] 黄宇星, 祝磊, 叶桢翔, 等. 预制混凝土结构连接方式研究综述[J]. 混凝土, 2013(1): 120-126.