

DOI: 10.7672/sjgs2026030122

# 雄安国贸中心地下防水材料搭接可靠性研究\*

刘彬<sup>1,2</sup>,熊浩<sup>3</sup>,袁瑞<sup>2</sup>,田益<sup>2</sup>,张鸣<sup>2</sup>,崔建<sup>3</sup>

(1. 北京雨中情建筑工程有限公司,北京 102600; 2. 雨中情防水技术集团股份有限公司,陕西 西安 710016;  
3. 雄安雄商发展有限公司,河北 保定 071700)

[摘要] 以雄安国贸中心项目为依托,对地下工程应用不同防水材料之间的搭接可靠性进行研究,开展耐水性、热老化、耐腐蚀性、抗冻性试验,分析防水材料接缝剥离强度和不透水性,验证不同防水材料搭接的安全可靠性。研究表明,地下室底板防水层采用黏结搭接和专用胶带搭接方式均可满足规范要求;地下室侧墙与底板防水层搭接时,采用高粘抗滑水性沥青基防水涂料黏结搭接(搭接方式IV)更可靠;地下室顶板与侧墙卷材采用热熔搭接和高粘抗滑水性沥青基防水涂料黏结搭接(搭接方式VII)更可靠。

[关键词] 地下室;卷材;涂料;防水;搭接;耐久性;可靠性

[中图分类号] TU57

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0122-05

## Research on the Overlap Reliability of Underground Waterproofing Materials in Xiong'an International Trade Center

LIU Bin<sup>1,2</sup>, XIONG Hao<sup>3</sup>, YUAN Rui<sup>2</sup>, TIAN Yi<sup>2</sup>, ZHANG Ming<sup>2</sup>, CUI Jian<sup>3</sup>

(1. Beijing Yuzhongqing Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 102600, China;

2. Yuzhongqing Waterproof Technology Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China;

3. Xiong'an Xiongshang Development Co., Ltd., Baoding, Hebei 071700, China)

**Abstract:** Based on the project of Xiong'an International Trade Center, the overlap reliability between different waterproof materials used in underground engineering is studied. The water resistance, thermal aging, corrosion resistance and frost resistance tests were carried out to analyze the water impermeability and joint peeling strength of waterproof materials, and the safety and reliability of overlap joints of different waterproof materials were verified. The research results show that the waterproof layer of the basement bottom plate can meet the requirements of the specification by using bonding overlap and special tape overlap. When the waterproof layer of the basement side wall is overlapped with the waterproof layer of the bottom plate, it is more reliable to use the high-viscosity anti-skid water-based asphalt waterproof coating bonding overlap (overlap mode IV). It is more reliable to use hot melt overlap and high-viscosity anti-skid water-based asphalt waterproof coating bonding overlap (overlap mode VII) for basement top plate and side wall membrane.

**Keywords:** basement; membrane; coating; waterproofing; overlap; durability; reliability

### 1 工程概况

雄安国贸中心是超大商业综合体项目(见图1),占地面积13.33万m<sup>2</sup>,总建筑面积106.29万m<sup>2</sup>,地上部分建筑面积67.18万m<sup>2</sup>,地下部分建筑面积39.11万m<sup>2</sup>,项目规划包含商业街区、能源中心、航站楼、城市通廊、公共交通枢纽、地面市政配

套建筑等,地下结构层次多、形式复杂,最深处达32.65m。该项目地处白洋淀水系核心区域,基底为富水砂层,地下水位高,施工环境复杂多变,为结构自防水与外设防水层安全可靠性带来挑战。

### 2 试验研究

本工程作为国家重点项目,为确保防水层在复杂地下环境长期使用安全可靠性,施工前对地下室底板、侧墙、顶板等部位防水材料不同搭接方式进行耐久性试验,选择科学合理的搭接方式。

\* 2024年河北省建设科技研究指导性计划项目(2024-2112)

[作者简介] 刘彬,工程师,E-mail:960400399@qq.com

[收稿日期] 2025-08-12



图1 雄安国贸中心项目效果

Fig. 1 Effect of Xiong'an International Trade Center

## 2.1 主要材料

本试验主要材料选用雨水情牌防水卷材和防水涂料,包括 1.2mm 厚非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材(P 类)、1.5mm 厚自粘聚合物改性沥青防水卷材(无胎, II 型, PE 膜)、4mm 厚种植屋面用耐根穿刺防水卷材、高粘抗滑水性沥青基防水涂料(I 型)、非固化橡胶沥青防水涂料,对各类材料搭接方式进行编号,如表 1 所示,其中 I, II 号为地下室底板防水材料搭接方式, III, IV 号为地下室侧墙与底板防水材料搭接方式, V, VI, VII 号为地下室顶板与侧墙防水材料搭接方式。

## 2.2 试验方法与试件制作

### 2.2.1 试验方法

不同条件下的接缝剥离强度和不透水性试验方法与参照标准如表 2 所示。

### 2.2.2 试件制作

进行接缝剥离强度和不透水性试验时,应切除距外层卷头 2 500mm 卷材后均匀裁取试件,按照表 1 搭接方式进行搭接,裁样尺寸与数量如表 3 所示。

## 2.3 试验结果分析

### 2.3.1 耐水性

耐水性是防水材料在特定环境条件下抵御水渗透、侵蚀及长期浸泡而不发生性能劣化,保持有效防水功能的指标。根据 GB 55030—2022《建筑与市政工程防水通用规范》对地下工程用的防水材料要求,浸水试验条件不应低于  $23^{\circ}\text{C}\times 7\text{d}$ ,接缝剥离强度不得小于无处理时的 80%,接缝不透水性达到 0.2MPa 压力下 30min 不透水。本工程处于白洋淀水系,基底为富水砂层,地下环境复杂,建成后处于常年浸水环境中,为验证材料在长期浸水环境下接缝剥离强度和不透水性变化,试验条件分为无处理和浸水处理  $23^{\circ}\text{C}\times 7\text{d}$ ,  $23^{\circ}\text{C}\times 14\text{d}$ ,  $23^{\circ}\text{C}\times 28\text{d}$ ,  $23^{\circ}\text{C}\times 56\text{d}$ ,  $23^{\circ}\text{C}\times 112\text{d}$ 。

耐水性试验结果表明, I ~ VII 号搭接方式下试件在浸水最长时间(112d)后,接缝不透水性均满足要求。不同搭接方式下试件浸水后接缝剥离强度变化曲线如图 2 所示,由图 2 可知, I, II, IV, V, VI, VII 号搭接方式下试件在所有浸水环境下的接缝剥离强度均可达到无处理时的 80% 以上, III 号搭接方式下试件在浸水 28d 后接缝剥离强度小于无处理时的 80%。

### 2.3.2 热老化性

通过热老化试验可模拟材料在高温下的性能变化,预测其在实际使用中的耐久性和稳定性。《建筑与市政工程防水通用规范》要求聚合物沥青类防水卷材热熔搭接时接缝剥离强度  $\geq 1.5\text{N}/\text{mm}$ ,  $70^{\circ}\text{C}\times 7\text{d}$  热老化后接缝剥离强度  $\geq 1.2\text{N}/\text{mm}$ ; 聚合

表 1 防水材料搭接方式

Table 1 The overlap methods of waterproofing materials

编号	搭接方式	搭接宽度/mm	主要材料	备注
I	黏结搭接	80	非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材	—
II	胶带黏结搭接	80	非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材	—
III	黏结搭接	100	自粘聚合物改性沥青防水卷材与非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材	自粘聚合物改性沥青防水卷材黏结至非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材背面
IV	高粘抗滑水性沥青基防水涂料黏结搭接	100	自粘聚合物改性沥青防水卷材与非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材	将高粘抗滑水性沥青基防水涂料涂刷至非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材背面,自粘聚合物改性沥青防水卷材黏结至高粘抗滑水性沥青基防水涂料表面
V	热熔搭接	100	种植屋面用耐根穿刺防水卷材与自粘聚合物改性沥青防水卷材	热熔种植屋面用耐根穿刺防水卷材黏结至自粘聚合物改性沥青防水卷材表面
VI	非固化橡胶沥青防水涂料黏结搭接	100	种植屋面用耐根穿刺防水卷材与自粘聚合物改性沥青防水卷材	将非固化橡胶沥青防水涂料涂刷至自粘聚合物改性沥青防水卷材表面,种植屋面用耐根穿刺防水卷材黏结至非固化橡胶沥青防水涂料表面
VII	高粘抗滑水性沥青基防水涂料黏结搭接	100	种植屋面用耐根穿刺防水卷材与自粘聚合物改性沥青防水卷材	将高粘抗滑水性沥青基防水涂料涂刷至自粘聚合物改性沥青防水卷材 PE 膜表面,热熔种植屋面用耐根穿刺防水卷材黏结至高粘抗滑水性沥青基防水涂料表面

表2 试验方法与参照标准

Table 2 Test methods and reference standards

项目	试验条件	试验方法	参照标准
接缝剥离强度	热老化	将制备和养护完成的大块试件水平放入规定温度的试验箱中,试验温度为(70±2)℃,连续处理至试验时间,处理结束后取出在标准试验条件下放置2h后裁切成试验试件,立即进行试验	T/CWA 302—2023《建筑防水材料工程要求试验方法》
	浸水处理	将制备和养护完成的大块试件放入符合规定的三级水中,试件应浸没在液面以下至少20mm,试件之间应隔开放置,在(23±2)℃条件下连续浸泡至试验时间,按7d/次的频率换水。处理结束后取出擦干表面明水后裁切成试验试件,立即进行试验	T/CWA 302—2023《建筑防水材料工程要求试验方法》
	耐腐蚀性	将制备和养护完成的大块试件放入采用规定的三级水和化学试剂(化学纯)配制均匀的溶液中,试件应浸没在液面以下至少20mm,试件之间应隔开放置,在(23±2)℃条件下连续浸泡至试验时间,按7d/次的频率换水。处理结束后取出擦干表面明水后裁切成试验试件,立即进行试验	T/CWA 302—2023《建筑防水材料工程要求试验方法》
	冻融循环	将制备和养护完成的大块试件放入15~25℃水中充分浸泡168h,按试验设定温度和次数冷冻4h,在15~25℃水中融化2h的循环制度进行冻融循环。处理结束后取出擦干表面明水,将试件在(23±2)℃条件下放置24h后裁切成试验试件,立即进行试验	JC/T 984—2011《聚合物水泥防水砂浆》
接缝不透水性	热老化	将制备和养护完成的大块试件水平放入规定温度的试验箱中,试验温度为(70±2)℃,连续处理至试验时间,处理结束后取出在标准试验条件下放置2h后裁切成试验试件,立即进行试验	T/CWA 302—2023《建筑防水材料工程要求试验方法》
	浸水处理	将制备和养护完成的大块试件放入符合规定的三级水中,试件应浸没在液面以下至少20mm,试件之间应隔开放置,在(23±2)℃条件下连续浸泡至试验时间,按7d/次的频率换水。处理结束后取出擦干表面明水后裁切成试验试件,立即进行试验	T/CWA 302—2023《建筑防水材料工程要求试验方法》
	耐腐蚀性	将制备和养护完成的大块试件放入采用规定的三级水和化学试剂(化学纯)配制均匀的溶液中,试件应浸没在液面以下至少20mm,试件之间应隔开放置,在(23±2)℃条件下连续浸泡至试验时间,按7d/次的频率换水。处理结束后取出擦干表面明水后裁切成试验试件,立即进行试验	T/CWA 302—2023《建筑防水材料工程要求试验方法》
	冻融循环	将制备和养护完成的大块试件放入15~25℃水中充分浸泡168h,按试验设定温度和次数冷冻4h,在15~25℃水中融化2h的循环制度进行冻融循环。处理结束后取出擦干表面明水,将试件在(23±2)℃条件下放置24h后裁切成试验试件,立即进行试验	JC/T 984—2011《聚合物水泥防水砂浆》

表3 裁样尺寸与数量

Table 3 Cutting size and quantity

项目	试件尺寸/mm	数量/个	
接缝剥离强度	无处理	搭接前 400×200 试件 50×200	2 5
	热老化	搭接前 400×200 试件 50×200	2 5
	浸水	搭接前 400×200 试件 50×200	2 5
	耐腐蚀性	搭接前 400×200 试件 50×200	2 5
	冻融循环	搭接前 400×200 试件 50×200	2 5
	接缝不透水性	无处理	搭接前 300×200 试件 300×300
热老化		搭接前 300×200 试件 300×300	6 3
浸水		搭接前 300×200 试件 300×300	6 3
耐腐蚀性		搭接前 300×200 试件 300×300	6 3
冻融循环		搭接前 300×200 试件 300×300	6 3

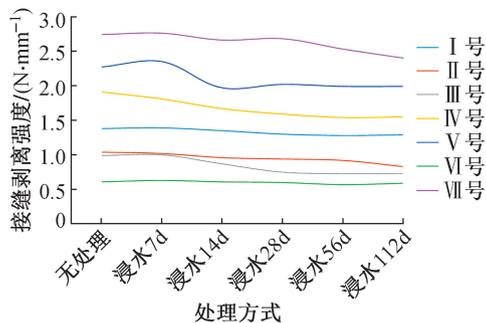


图2 不同搭接方式下试件浸水后接缝剥离强度变化曲线  
Fig. 2 The change curves of joint peeling strength after immersion of specimens under different overlap modes

物沥青类防水卷材黏结搭接时接缝剥离强度 $\geq 1.0\text{N/mm}$ ,70℃×7d热老化后接缝剥离强度 $\geq 0.8\text{N/mm}$ ;合成高分子类防水卷材黏结搭接时接缝剥离强度 $\geq 1.0\text{N/mm}$ ,70℃×7d热老化后接缝剥离强度 $\geq 0.8\text{N/mm}$ ;合成高分子类防水卷材胶粘搭接时接缝剥离强度 $\geq 0.6\text{N/mm}$ ,70℃×7d热老化后接

缝剥离强度 $\geq 0.5\text{N/mm}$ 。所有防水卷材不透水性均需满足 $0.2\text{MPa}$ 压力下 $30\text{min}$ 不透水。为验证防水材料长期热老化后搭接可靠性,将热老化试验条件设置为无处理和热老化 $70^\circ\text{C}\times 7\text{d}$ , $70^\circ\text{C}\times 14\text{d}$ , $70^\circ\text{C}\times 28\text{d}$ , $70^\circ\text{C}\times 56\text{d}$ , $70^\circ\text{C}\times 112\text{d}$ 。

热老化试验结果表明, I ~ VII号搭接方式下试件接缝不透水性均满足要求。不同搭接方式下试件热老化后接缝剥离强度变化曲线如图3所示,由图3可知,除VI号搭接方式外,热老化后其他搭接方式下试件接缝剥离强度均出现明显衰减,尤其是III号搭接方式下试件接缝剥离强度由无处理时的 $1.05\text{N/mm}$ 衰减至热老化 $112\text{d}$ 时的 $0.31\text{N/mm}$ ,出现持续衰减态势,不满足规范要求。I, II, IV, V, VII号搭接方式下试件热老化后接缝剥离强度仍满足规范要求。VI号搭接方式下试件热老化后接缝剥离强度出现增长趋势,主要因为非固化橡胶沥青防水涂料热老化后黏度降低、内聚力变大,导致接缝剥离强度增大。

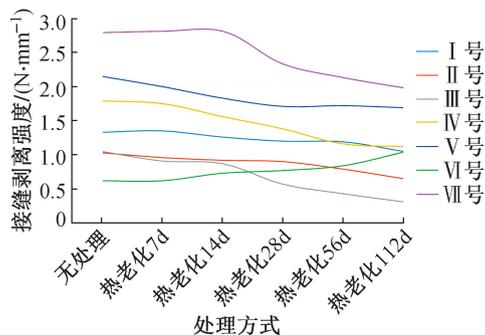


图3 不同搭接方式下试件热老化后接缝剥离强度变化曲线

Fig. 3 The change curves of joint peeling strength after thermal aging of specimens under different overlap modes

### 2.3.3 耐腐蚀性

本工程处于富水砂层,地下水压力大且地下室长期处于浸水环境,如果防水材料没有足够的耐腐蚀性,长期受到水环境侵蚀,将导致防水层出现破损、开裂等现象,降低防水层使用年限。为验证本工程防水材料处于腐蚀环境中的可靠性,对防水材料开展耐腐蚀性试验,试验方法为将制备完成的大块试件分别放入配制不同浓度的化学试剂中,试件应浸没在液面以下至少 $20\text{mm}$ ,隔开放置,在 $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下连续浸泡至试验时间,按 $7\text{d/次}$ 的频率换水。试验条件分为浸入质量分数 $(5\%\pm 1\%)$ 的 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液、浸入质量分数 $0.1\%$ 的 $\text{NaOH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液及浸入质量分数 $(10\%\pm 2\%)$ 的

$\text{NaCl}$ 溶液。为验证材料在复杂环境下的可靠性,通过增加试验时间和改变溶液浓度测试防水材料接缝剥离强度及不透水性,将试验时间设置为 $28, 56, 84\text{d}$ ,增加试验条件包括浸入质量分数 $(10\%\pm 1\%)$ 的 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液、浸入质量分数 $(15\%\pm 1\%)$ 的 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液、浸入质量分数 $0.3\%$ 的 $\text{NaOH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液、浸入质量分数 $0.5\%$ 的 $\text{NaOH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液、浸入质量分数 $(20\%\pm 2\%)$ 的 $\text{NaCl}$ 溶液、浸入质量分数 $(30\%\pm 2\%)$ 的 $\text{NaCl}$ 溶液。

耐腐蚀性试验结果表明,在多种腐蚀性介质浸泡后,试件接缝剥离强度及不透水性均满足规范要求,本文给出如表4所示代表性结果。

### 2.3.4 抗冻性

冻融循环对防水材料结构和性能有较大的破坏作用,在高频的温度变化环境下,材料耐久性将出现大幅度衰减。本工程所处北方地区冬季寒冷,最低气温可达 $-20^\circ\text{C}$ ,防水材料在低温或冻融循环环境下将出现翘边、开口等现象,随着循环次数的增加,破坏情况加剧。为验证本工程防水材料在冻融循环环境下的性能,分别在 $-15, -20, -25^\circ\text{C}$ 低温环境下进行 $25, 50, 100$ 次冻融循环试验,研究防水材料接缝剥离强度和不透水性。

抗冻性试验结果表明,在不同冻融循环环境下试件接缝剥离强度和不透水性均满足规范要求,本文给出如表5所示代表性结果。

## 3 结语

1)地下室底板防水材料非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材采用黏结搭接(搭接方式I)和专用胶带搭接(搭接方式II)均可满足规范要求。

2)地下室侧墙与底板防水层搭接时,采用自粘聚合物改性沥青防水卷材与非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材直接黏结搭接(搭接方式III)时热老化后接缝剥离强度衰减约 $70\%$ ,由无处理时的 $1.05\text{N/mm}$ 衰减至 $70^\circ\text{C}\times 112\text{d}$ 热老化后的 $0.31\text{N/mm}$ 。采用高粘抗滑水性沥青基防水涂料黏结搭接(搭接方式IV)时接缝剥离强度在 $70^\circ\text{C}\times 112\text{d}$ 热老化后为 $1.12\text{N/mm}$ ,经验证自粘聚合物改性沥青防水卷材与非沥青基高分子自粘胶膜防水卷材搭接时采用高粘抗滑水性沥青基防水涂料黏结搭接(搭接方式IV)更可靠。

3)地下室顶板与侧墙防水层搭接时,种植屋面用耐根穿刺防水卷材与自粘聚合物改性沥青防水卷材热熔搭接(搭接方式V)和采用高粘抗滑水性沥青基防水涂料黏结搭接(搭接方式VII)均可满足规范要求,采用非固化橡胶沥青防水涂料黏结搭接

表 4 耐腐蚀性试验结果

Table 4 Test results of corrosion resistance

搭接方式 编号	试验项目	时间/d	试验结果								
			(5%±1%)	(10%±1%)	(15%±1%)	0.1%NaOH+	0.3%NaOH+	0.5%NaOH+	(10%±2%)	(20%±2%)	(30%±2%)
			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液	Ca(OH) <sub>2</sub> 饱和溶液	Ca(OH) <sub>2</sub> 饱和溶液	Ca(OH) <sub>2</sub> 饱和溶液	NaCl 溶液	NaCl 溶液	NaCl 溶液
I	接缝剥离强度/ (N·mm <sup>-1</sup> )	28	1.32	1.30	1.32	1.42	1.36	1.33	1.36	1.32	1.35
		56	1.36	1.33	1.28	1.28	1.33	1.27	1.30	1.34	1.32
		84	1.33	1.30	1.26	1.32	1.31	1.25	1.28	1.30	1.29
II	接缝剥离强度/ (N·mm <sup>-1</sup> )	28	1.08	0.96	0.92	0.96	0.98	1.02	1.06	1.02	1.04
		56	0.90	0.88	0.86	0.76	0.77	0.82	0.96	1.06	1.03
		84	0.70	0.66	0.60	0.74	0.72	0.72	0.99	1.04	1.05
III	接缝剥离强度/ (N·mm <sup>-1</sup> )	28	1.06	1.00	0.96	1.08	1.06	1.00	1.12	1.14	1.08
		56	0.96	0.92	0.86	1.02	0.99	0.96	1.08	1.12	1.10
		84	0.89	0.84	0.82	0.98	0.95	0.94	1.12	1.04	1.08
I	接缝不透水性 (0.2MPa 压力下 30min)	28	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
		56	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
		84	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
II	接缝不透水性 (0.2MPa 压力下 30min)	28	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
		56	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
		84	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
III	接缝不透水性 (0.2MPa 压力 下 30min)	28	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
		56	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
		84	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格

表 5 抗冻性试验结果

Table 5 Test results of frost resistance

搭接方式 编号	试验项目	冻融循环 次数/次	试验结果		
			-15℃ 低温环境下	-20℃ 低温环境下	-25℃ 低温环境下
I	接缝剥离强度/(N·mm <sup>-1</sup> )	25	1.33	1.36	1.29
		50	1.26	1.33	1.28
		100	1.31	1.34	1.26
II	接缝剥离强度/(N·mm <sup>-1</sup> )	25	1.06	1.00	1.01
		50	0.96	1.01	0.89
		100	0.98	0.84	0.99
III	接缝剥离强度/(N·mm <sup>-1</sup> )	25	1.06	1.00	1.01
		50	0.96	1.01	0.89
		100	0.98	0.84	0.99
I	接缝不透水性(0.2MPa 压力下 30min)	25	合格	合格	合格
		50	合格	合格	合格
		100	合格	合格	合格
II	接缝不透水性(0.2MPa 压力下 30min)	25	合格	合格	合格
		50	合格	合格	合格
		100	合格	合格	合格
III	接缝不透水性(0.2MPa 压力下 30min)	25	合格	合格	合格
		50	合格	合格	合格
		100	合格	合格	合格

(搭接方式 VI) 时无处理条件下接缝剥离强度为 0.61N/mm, 浸水 23℃×112d、酸性、碱性条件下接缝剥离强度均 < 0.6N/mm, 采用热熔搭接(搭接方式 V) 和高粘抗滑水性沥青基防水涂料黏结搭接(搭接方式 VII) 更可靠。

4) 地下室底板与侧墙防水层采用黏结搭接(搭接方式 III)、地下室顶板与侧墙防水层采用非固化橡胶沥青防水涂料黏结搭接(搭接方式 VI) 难以满

足规范要求, 在今后设计、施工时建议审慎应用。

#### 参考文献:

- [1] 李晋玲, 尚华胜, 刘金宝, 等. 防水卷材搭接剥离强度及不透水性影响因素研究[J]. 中国建筑防水, 2023(7): 20-24.  
LI J L, SHANG H S, LIU J B, et al. Factors influencing peeling strength and impermeability of waterproofing membrane overlap joint[J]. China building waterproofing, 2023(7): 20-24.

(下转第 166 页)

- of Chongqing University, 2022, 45(7): 24-36.
- [ 8 ] 蔡润泽,陈学森,赵华田,等. 大跨重载钢桁架销轴节点受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(S1): 332-342.  
CAI R Z, CHEN X S, ZHAO H T, et al. Research on mechanical behavior of truss plate-reinforced pin joints in long-span steel structure under heavy load [J]. Journal of building structures, 2025, 46(S1): 332-342.
- [ 9 ] 黄志强,王渠,韩冬冬,等. 钢-混凝土组合弯梁桥受力性能研究[J]. 公路, 2025, 70(7): 201-210.  
HUANG Z Q, WANG Q, HAN D D, et al. Study on mechanical performance of steel-concrete composite curved girder bridge[J]. Highway, 2025, 70(7): 201-210.
- [ 10 ] 闫亚杰,仲志强,陈冉,等. 单层铝合金球面壳顶升建造过程仿真分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(22): 100-106.  
YAN Y J, ZHONG Z Q, CHEN R, et al. Simulation analysis of single-layer aluminum alloy spherical shell jacking construction process[J]. Construction technology, 2024, 53(22): 100-106.
- [ 11 ] 闫亚杰,仲志强,武生文,等. 装配式铆钉在铝合金抗剪连接中的应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(21): 46-57.  
YAN Y J, ZHONG Z Q, WU S W, et al. Applied research on assembled rivets for shear connection of aluminum alloy [J]. Construction technology, 2024, 53(21): 46-57.
- [ 12 ] 胡涛,易韵仪,尹玲媛,等. 超高性能混凝土桁架节点受力性能试验与有限元分析[J]. 铁道建筑, 2025, 65(5): 76-81.  
HU T, YI Y Y, YIN L Y, et al. Experimental study and finite element analysis on stress performance of ultra-high performance concrete truss joint [J]. Railway engineering, 2025, 65(5): 76-81.
- [ 13 ] 邓宇,郭镇,张博,等. 嵌入式 H 型钢梁柱节点受力性能研究[J]. 广西科技大学学报, 2024, 35(2): 25-31.  
DENG Y, GUO Z, ZHANG B, et al. Research on mechanical behavior of embedded H-beam column joints [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2024, 35(2): 25-31.
- [ 14 ] 孙爱民,张颢,吕振林. 大型低合金钢空心磨球开裂分析[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 609-613.  
SUN A M, ZHANG H, LÜ Z L. Analysis of the cracking of low alloy steel hollow grinding balls [J]. Foundry technology, 2025, 46(6): 609-613.
- [ 15 ] 向剑,蒋立君,谭江峰,等. Q355T 型接头焊缝尺寸设计及承载能力研究[J]. 新技术新工艺, 2025(2): 48-53.  
XIANG J, JIANG L J, TAN J F, et al. Research on weld size design and bearing capacity of Q355T-joints [J]. New technology & new process, 2025(2): 48-53.
- [ 16 ] 蔡哲罕,卓卫东,王志坚,等. 矩形钢管混凝土柱-软钢板组合高墩的抗侧刚度[J]. 中国公路学报, 2024, 37(8): 158-169.  
CAI Z H, ZHUO W D, WANG Z J, et al. Lateral stiffness of rectangular concrete-filled steel tubular columns and low-yield-point steel plate composite tall pier [J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(8): 158-169.
- [ 17 ] 谭鼎融,黄永辉,曾志伟,等. 摩擦型高强度螺栓长接头传力比的计算[J]. 工程力学, 2022, 39(S1): 109-114.  
TAN D R, HUANG Y H, ZENG Z W, et al. Calculation of force transmission ratio of friction high strength bolts connections [J]. Engineering mechanics, 2022, 39(S1): 109-114.

## (上接第 126 页)

- [ 2 ] 张立,范浩然,王婧. 非固化涂料与 SBS 卷材复合防水施工技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(13): 127-130.  
ZHANG L, FAN H R, WANG J. Research on composite waterproof construction technology of non-curing coating and SBS membrane [J]. Construction technology, 2024, 53(13): 127-130.
- [ 3 ] 朱志远. “防水通用规范”与防水材料的新要求[J]. 中国建筑防水, 2023(2): 1-4, 8.  
ZHU Z Y. “General code for waterproofing” and new requirements for waterproofing materials [J]. China building waterproofing, 2023(2): 1-4, 8.
- [ 4 ] 徐洪涛,肖绪文,王茜,等. 混凝土屋面工程防水研究(七): 工程防水耐久性评定方法与建议[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(23): 75-82.  
XU H T, XIAO X W, WANG Q, et al. Research on waterproofing of concrete roofing engineering (7): Durability assessment method and suggestions for concrete roof waterproofing [J]. Construction technology, 2024, 53(23): 75-82.
- [ 5 ] 朱志远,朱晓华,王澜. 防水系统的耐久性能和可靠性[J]. 中国建筑防水, 2021(10): 1-7.  
ZHU Z Y, ZHU X H, WANG L. Durability and reliability of waterproofing system [J]. China building waterproofing, 2021(10): 1-7.
- [ 6 ] 陈兴元,李国友,汪登,等. SBS 改性沥青防水卷材耐久性评价及静态使用寿命预测研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(4): 24-28.  
CHEN X Y, LI G Y, WANG D, et al. Study of durability evaluation and static service life prediction of SBS modified asphalt waterproof membrane [J]. New building materials, 2023, 50(4): 24-28.
- [ 7 ] 徐洪涛,肖绪文,朱志远,等. 基于防水失效概率的混凝土屋面工程适应性技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(4): 29-35.  
XU H T, XIAO X W, ZHU Z Y, et al. Adaptive technology of concrete roof engineering based on probability of waterproofing failure [J]. Construction technology, 2024, 53(4): 29-35.