



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY

明德 厚学
沉毅 笃行



预制拼装桥墩轻量化研究

土木工程学院

胡皓

18817840343

h834497178@126.com



南京工业大学
土木工程学院
COLLEGE OF CIVIL ENGINEERING
NANJING TECH UNIVERSITY



CONTENTS

目 录

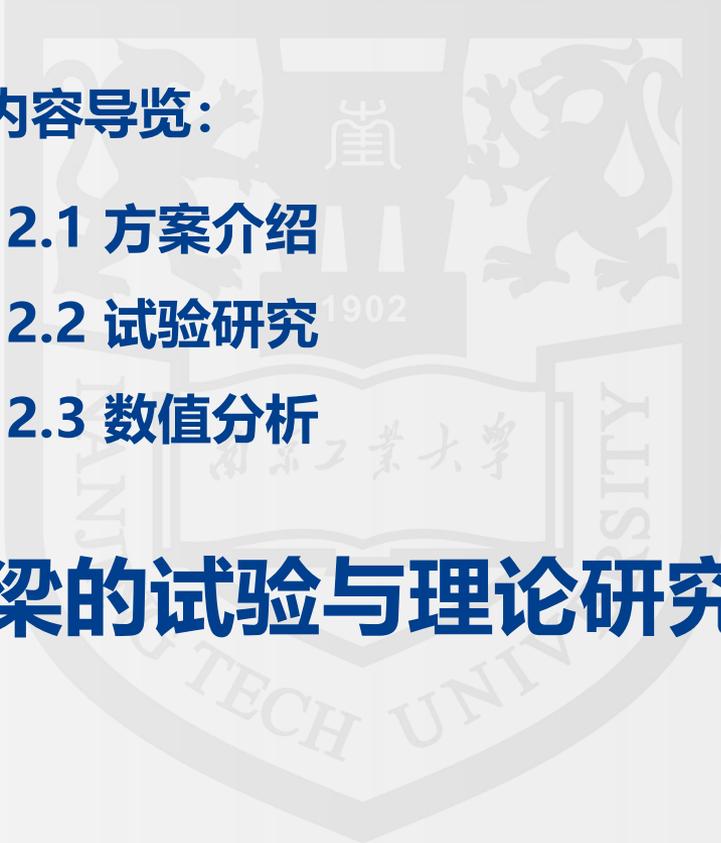
- 1 轻量化推广的意义
- 2 空心盖梁的试验与理论研究
- 3 空心立柱的试验与理论研究
- 4 工程应用



第一部分 轻量化推广的意义

- 减少现场节段拼装工序，加快现场施工进度。
- 节约材料，预制立柱盖梁均减少不少于30%的混凝土。





内容导览:

2.1 方案介绍

2.2 试验研究

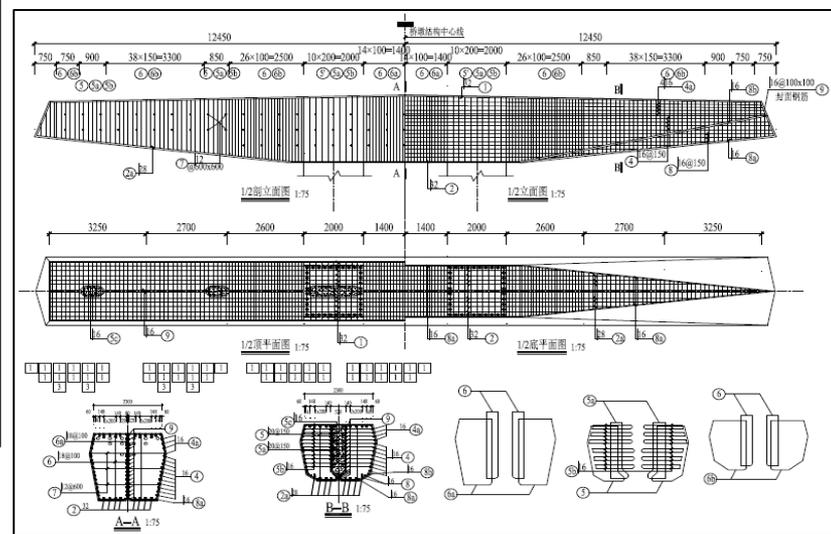
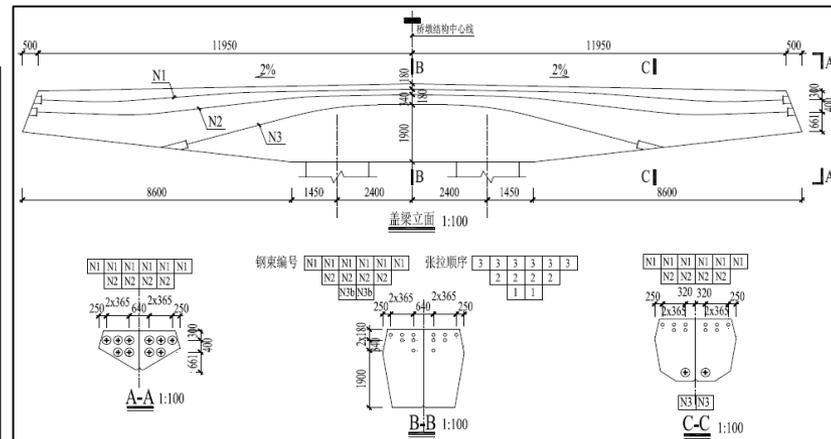
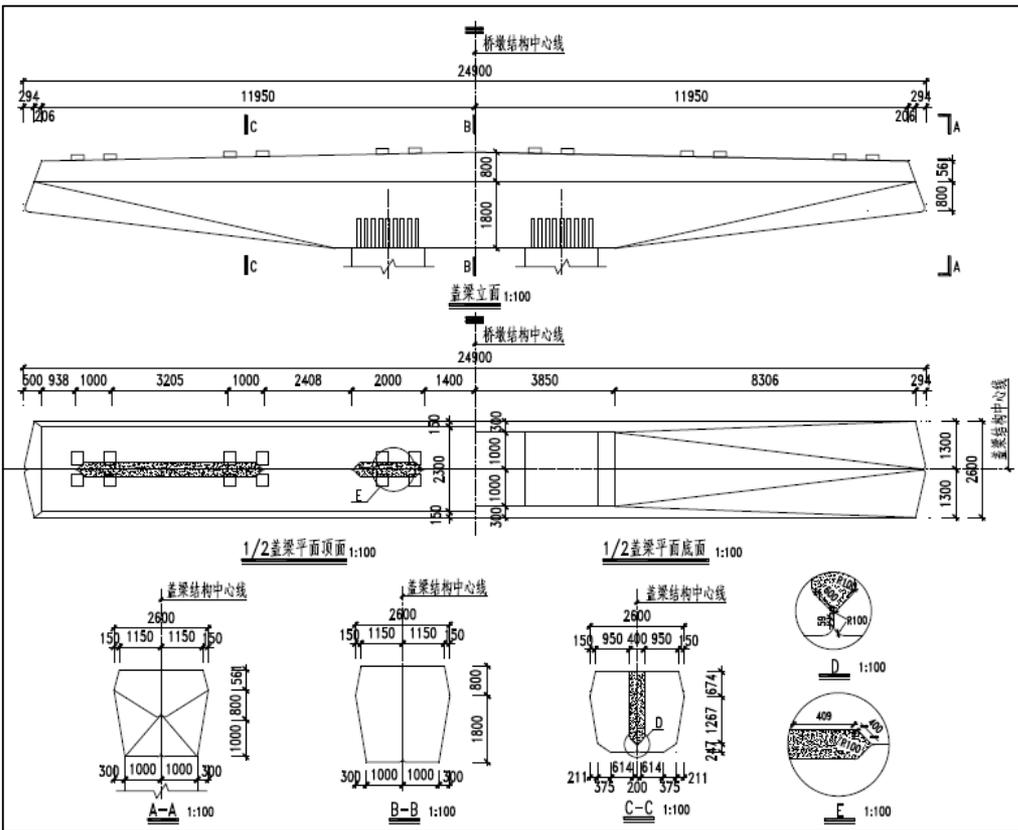
2.3 数值分析

第二部分 空心盖梁的试验与理论研究

方案介绍——分片预制盖梁方案



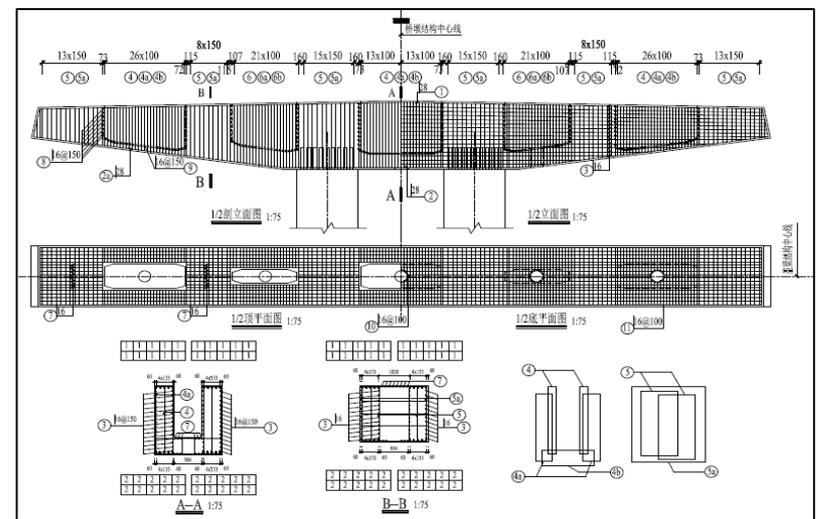
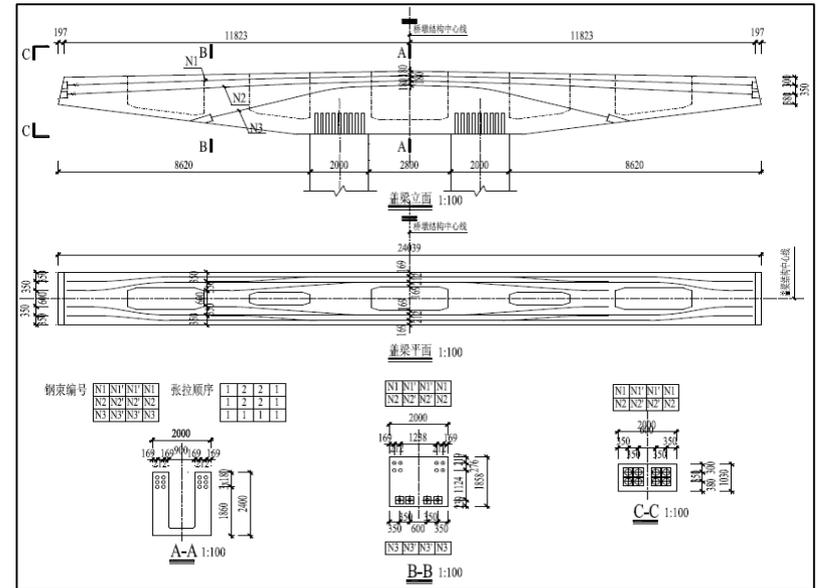
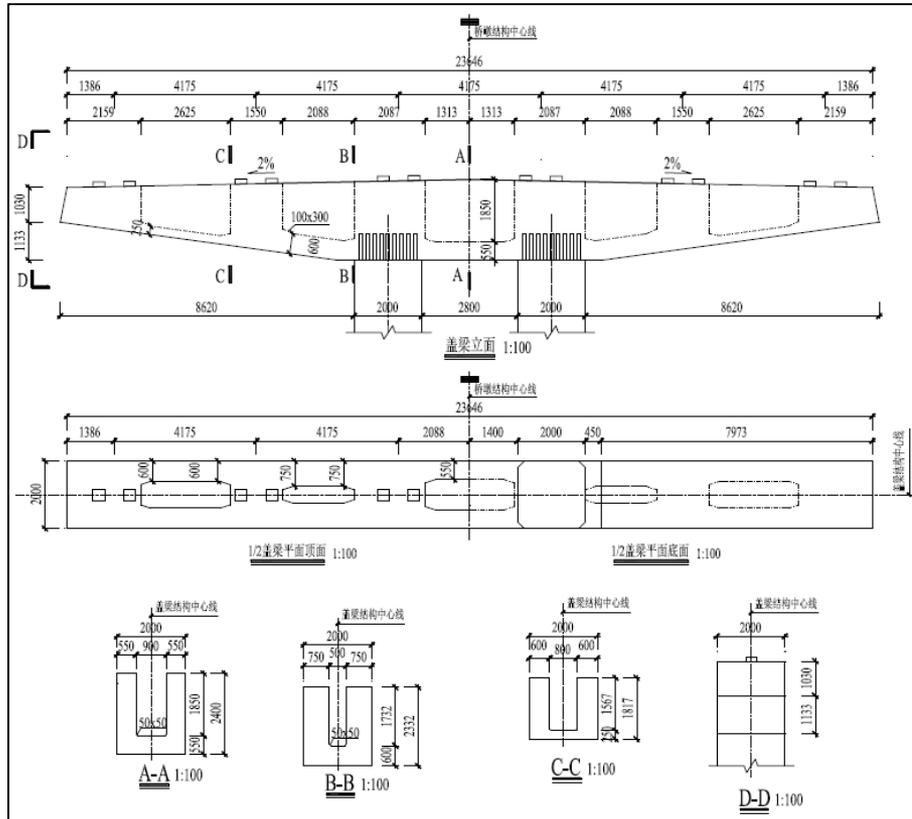
南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



方案介绍——U型截面整体预制空心盖梁方案 (C60混凝土)



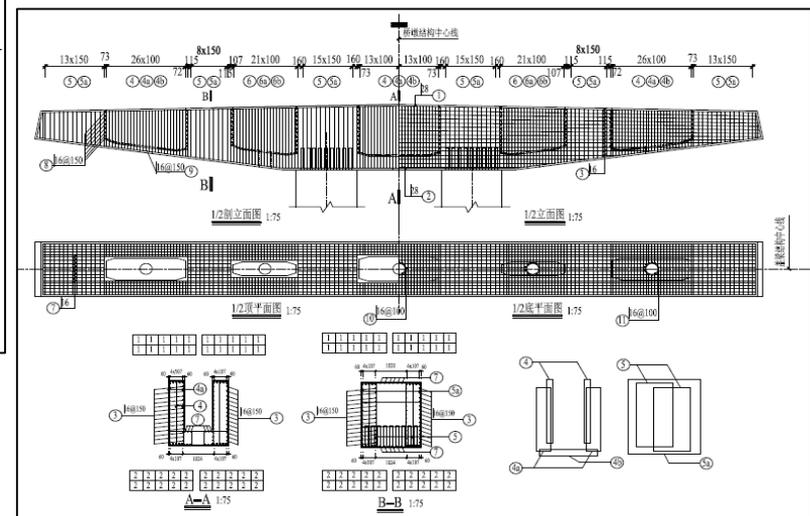
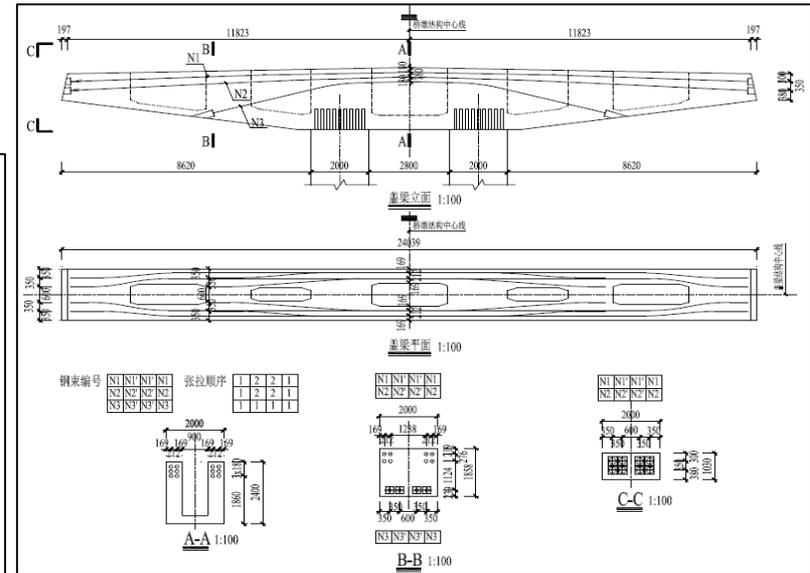
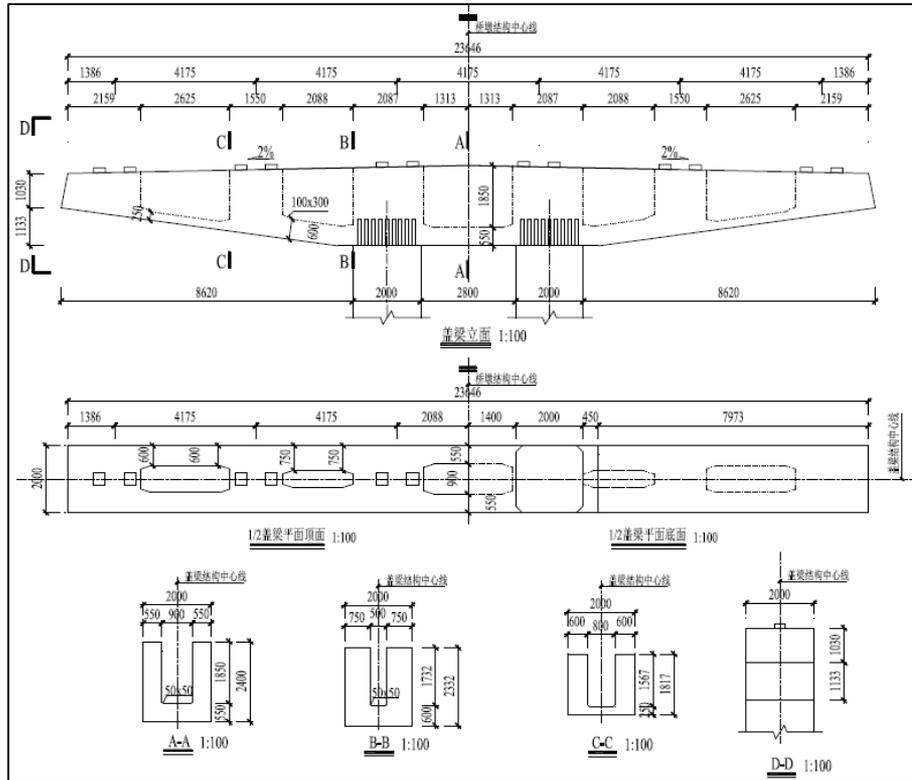
南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



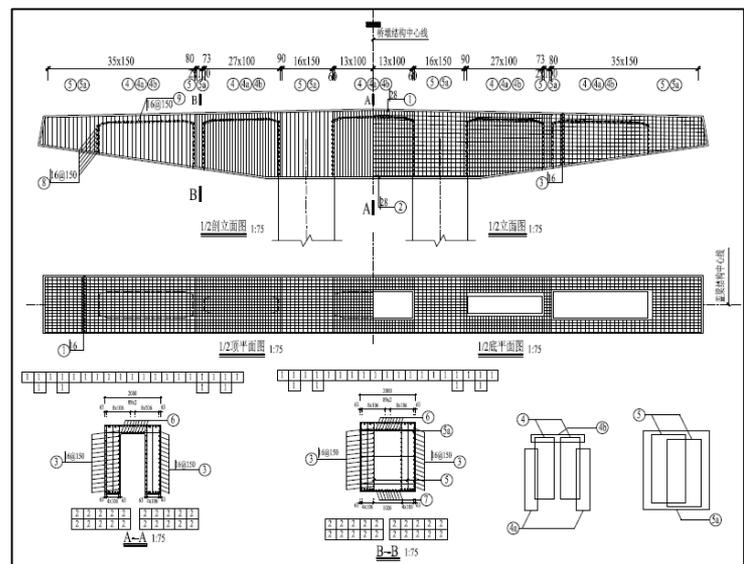
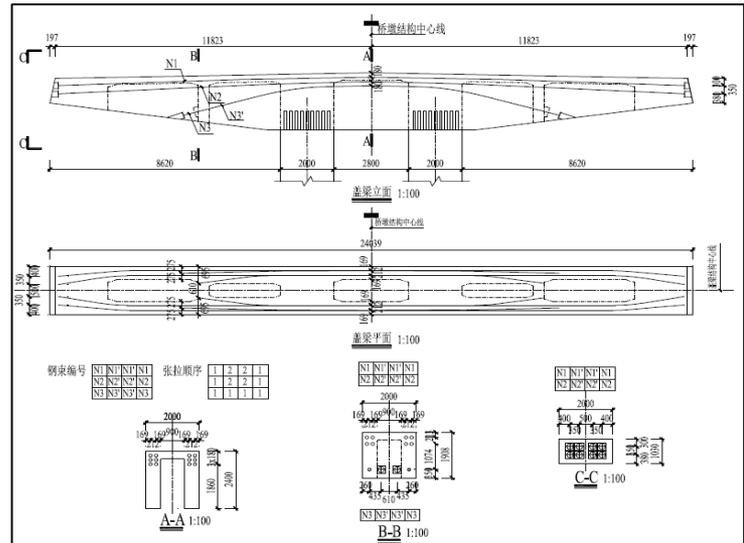
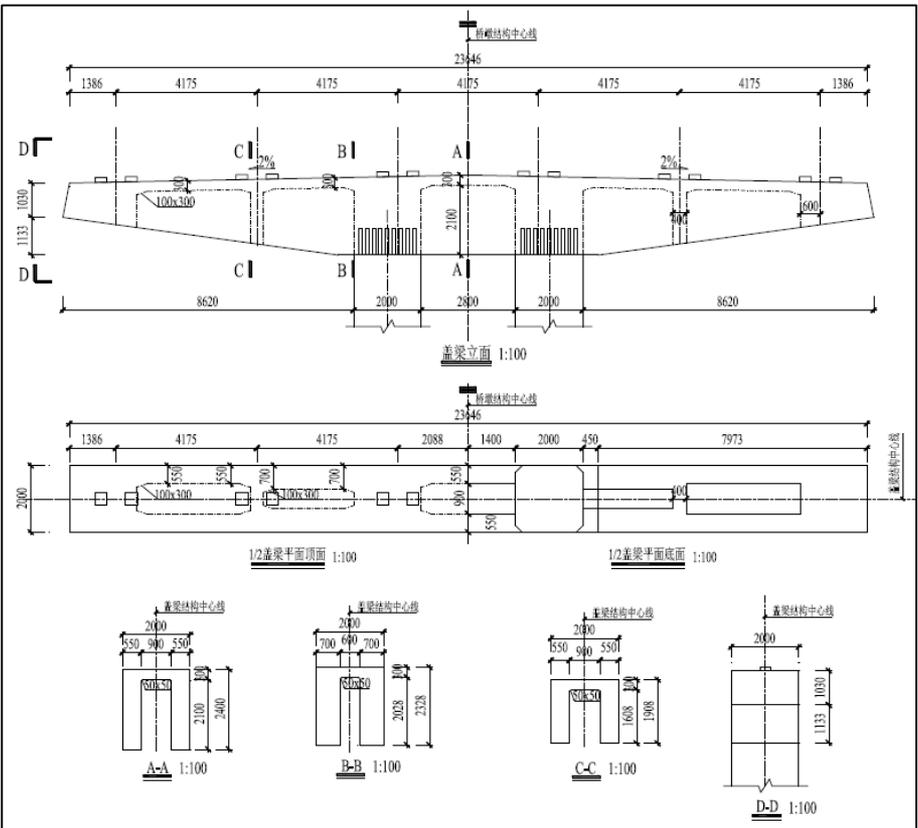
方案介绍——U型截面整体预制空心盖梁方案 (C80混凝土)



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



方案介绍——倒U型截面整体预制空心盖梁方案 (C80混凝土)



方案介绍——方案对比



国内有代表性预制盖梁材料用量统计表

项目	盖梁类型	盖梁宽 (m)	材料类型	用量	用量单位	桥面尺寸	指标	指标单位									
S26	六边形 (分三节段)	23.934	混凝土(C50)	145.6	m ³	25×30	0.194	m ³ /m ²	24.6	空心六边形 (整体预制)	24.6	混凝土(UHPC)	55.3	m ³	25×30	0.0737	m ³ /m ²
			普通钢筋	18806.9	kg		25.08	kg/m ²				普通钢筋	22344.4	kg		29.79	kg/m ²
			预应力筋	6084.5	kg		8.11	kg/m ²				预应力筋	2033.6	kg		2.71	kg/m ²
S6	六边形 (整体预制)	15.295	混凝土(C40)	65.56	m ³	16×30	0.137	m ³ /m ²	23.9	六边形切角 (中间分两段)	23.9	混凝土(C60)	119	m ³	25.5×35	0.133	m ³ /m ²
			普通钢筋	6785.1	kg		14.14	kg/m ²				普通钢筋	18195	kg		20.39	kg/m ²
			预应力筋	1561.7	kg		3.25	kg/m ²				预应力筋	5477	kg		6.14	kg/m ²
嘉闵高架	倒T形 (上下分层)	23.4	混凝土(C60)	119.1	m ³	24.7×30	0.161	m ³ /m ²	23.9	分片预制盖梁 (方案)	23.9	混凝土(C60)	119	m ³	25.5×35	0.133	m ³ /m ²
			普通钢筋	28093	kg		37.91	kg/m ²				普通钢筋	18195	kg		20.39	kg/m ²
			预应力筋	5353	kg		7.22	kg/m ²				预应力筋	5477	kg		6.14	kg/m ²
东钱湖	矩形 (整体预制)	24.156	混凝土(C60)	96	m ³	25.5×30	0.125	m ³ /m ²	23.646	C60U型空心盖梁 (方案)	23.646	混凝土(C60)	89.1	m ³	25.5×35	0.100	m ³ /m ²
			普通钢筋	10286.7	kg		13.45	kg/m ²				普通钢筋	15583	kg		17.46	kg/m ²
			预应力筋	6079	kg		7.95	kg/m ²				预应力筋	5970	kg		6.69	kg/m ²
济阳路	矩形 (整体预制)	23.5	混凝土(C60)	93.5	m ³	24.5×30	0.127	m ³ /m ²	23.646	C80U型空心盖梁 (方案)	23.646	混凝土(C80)	77.4	m ³	25.5×35	0.087	m ³ /m ²
			普通钢筋	14850	kg		20.20	kg/m ²				普通钢筋	14326	kg		16.05	kg/m ²
			预应力筋	4634.8	kg		6.31	kg/m ²				预应力筋	5970	kg		6.69	kg/m ²
湘府路	六边形 (中间分两段)	24.2	混凝土(C50)	95.9	m ³	25×30	0.128	m ³ /m ²	23.646	C80倒U型空心盖梁(方案)	23.646	混凝土(C80)	71.4	m ³	25.5×35	0.080	m ³ /m ²
			普通钢筋	9207.4	kg		12.28	kg/m ²				普通钢筋	13964	kg		15.65	kg/m ²
			预应力筋	4969	kg		6.63	kg/m ²				预应力筋	5970	kg		6.69	kg/m ²

轻量化盖梁试验参数统计表

试件编号	缩尺比	混凝土强度/用量	预应力数量	试件特征
PB-1	1: 3.08	C60 / 3.96 m ³	24根 $\Phi_s 15.2$	实心截面
PB-2	1: 3.08	C60 / 3.96 m ³	24根 $\Phi_s 15.2$	分两片
PB-3	1: 3.24	C60 / 2.35 m ³	24根 $\Phi_s 15.2$	开口朝上U型
PB-4	1: 3.24	C80 / 2.20 m ³	20根 $\Phi_s 15.2$	开口朝上U型
PB-5	1: 2.92	C80 / 3.20 m ³	20根 $\Phi_s 15.2$	开口朝下倒U



(a) 钢筋笼绑扎、模板架立



(b) 钢筋笼端面



(c) 粘贴应变片



(d) 浇筑混凝土



(e) 盖梁、墩柱拼接



(f) 张拉预应力

整体现浇盖梁试件制作



(a) 分片钢筋笼



(b) 湿接缝泡沫板



(c) 焊接横向钢筋

分片预制盖梁试件制作



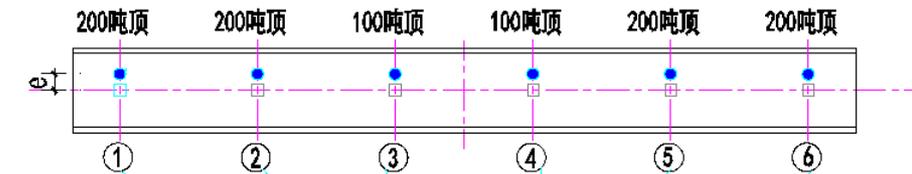
(a) U型截面盖梁



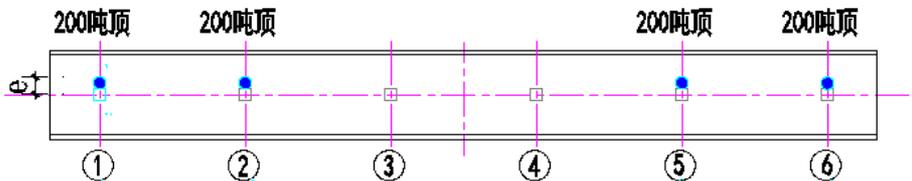
(b) 倒U型截面盖梁

空心盖梁试件制作

试验研究——加载装置和加载方案



(a) 第一、二阶段六顶加载千斤顶布置



(b) 第三阶段四顶加载千斤顶布置

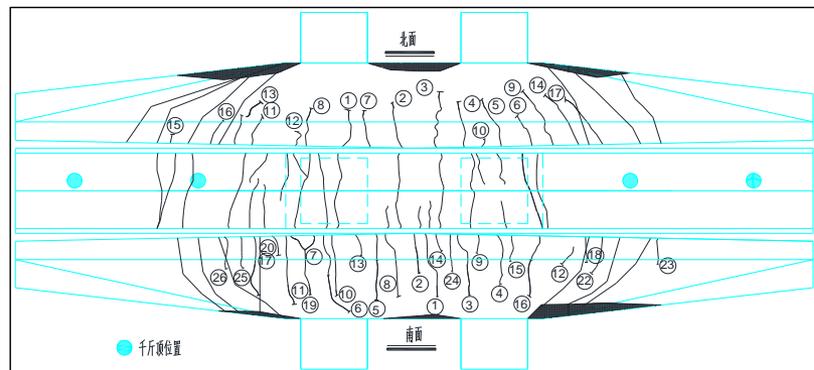
千斤顶布置及油泵接线图



加载装置示意图

工况	1号和6号千斤顶			2号和5号千斤顶			3号和4号千斤顶			备注
	PB1 /PB2	PB3 /PB4	PB5	PB1 /PB2	PB3 /PB4	PB5	PB1 /PB2	PB3 /PB4	PB5	
预加载	50	50	50	50	50	50	50	177	197	调试设备
工况1	200	181	201	196	177	197	196	177	197	一期恒载
工况2	363	329	364	349	315	315	349	315	315	二期铺装
工况3	407	368	409	377	342	361	377	342	361	准永久
工况4	440	397	445	397	362	369	397	362	369	频遇
工况5	506	456	514	438	403	415	438	403	415	标准
工况6	671	638	673	438	403	415	438	403	415	基本
工况7	738	702	740	482	443	457	—	—	—	1.1倍基本
工况8	805	766	808	526	484	498	—	—	—	1.2倍基本
工况9	872	829	875	569	524	540	—	—	—	1.3倍基本
工况10	939	893	942	613	564	581	—	—	—	1.4倍基本
工况11	1007	957	1010	657	605	623	—	—	—	1.5倍基本
工况12	1074	1021	1077	701	645	664	—	—	—	1.6倍基本
工况13	1141	1085	1144	745	685	706	—	—	—	1.7倍基本
工况14	1208	1148	1211	788	725	747	—	—	—	1.8倍基本
工况15	1275	1212	1279	832	766	789	—	—	—	1.9倍基本
工况16	1342	1276	1346	876	806	830	—	—	—	2倍基本
.....										
加载至破坏										

试验结果分析——整体预制盖梁试件



PB-1 整体实心截面试件裂缝模式示意图

- 直到加载至工况6（荷载基本效应组合），整体式盖梁试件才在两支承墩柱之间的跨中位置处顶面首先开裂。
- 继续加载，东侧及西侧悬臂根部附近顶面位置相继开裂。随着荷载进一步增大，3条主要裂缝沿着南北两侧面及跨中向下开展，并且有新裂缝不断生成、加密。
- 加载至1.7倍荷载基本组合后裂缝数量基本饱和，不再有新裂缝生成，之后3条主要裂缝继续向下开展，盖梁跨中剪力较小，因此裂缝基本沿着两侧面（d）竖直开展，靠近盖梁两侧悬臂根部的裂缝受剪力影响自初始开裂位置指向盖梁内侧斜向下开展。
- 直到加载至2.0倍荷载基本组合，盖梁悬臂根部及跨中处下缘受压区混凝土几乎同时压溃，试件呈现弯曲为主的破坏形态。



(a)



(b)



(c)



(d)

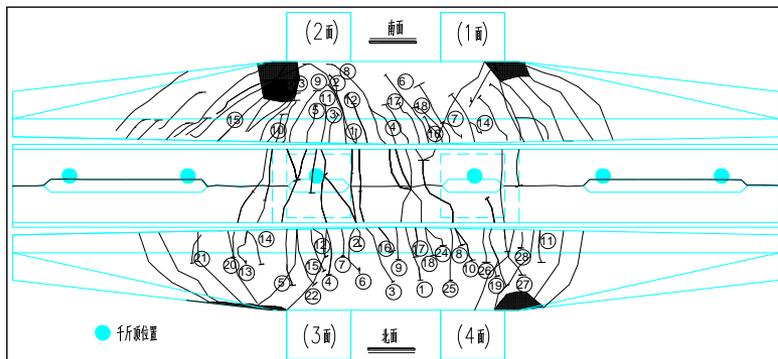


(e)

PB-1 整体实心截面盖梁试件破坏形态：

(a) 整体破坏形态；(b) 西侧；(c) 东侧；(d) 南侧；(e) 北侧

试验结果分析——分片预制盖梁试件



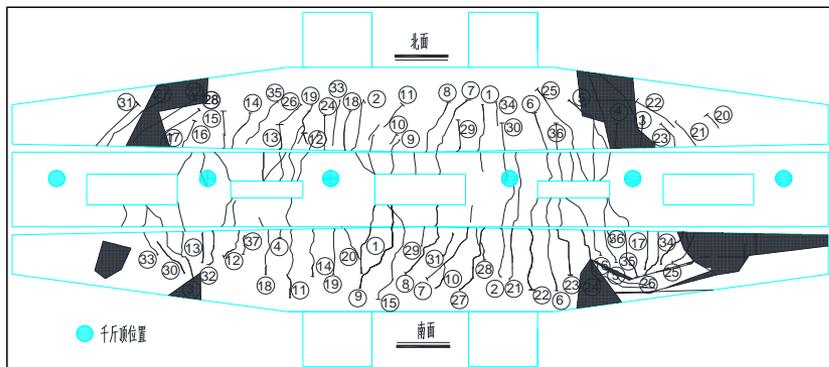
PB-2 分片预制盖梁试件裂缝模式示意图

- 加载至工况4（荷载频遇组合）不久后，分片预制盖梁试件在两支承墩柱之间的跨中位置处顶面首先开裂。
- 继续加载至工况5（荷载标准组合），东侧及西侧悬臂根部附近顶面位置相继开裂。随着荷载进一步增大，3条主要裂缝沿着南北两侧面向下开展，并且有新裂缝不断生成、加密。
- 加载至1.1倍荷载基本组合后，盖梁分片处初始开裂，并沿着顶面纵向开展。加载至1.5倍荷载基本组合后裂缝数量基本饱和，不再有新裂缝生成，之后3条主要裂缝继续向下开展，随着盖梁分片处纵向开裂，盖梁扭转刚度逐渐减小，扭转引起的剪应力增大，盖梁跨中的裂缝沿着侧面斜向下开展，靠近盖梁两侧悬臂根部的裂缝受剪力影响自初始开裂位置指向盖梁内侧斜向下开展。
- 直到加载至1.8倍荷载基本组合，盖梁悬臂根部处下缘受压区混凝土相继被压溃，与整体预制盖梁试件类似，分片预制盖梁试件也呈现弯曲为主的破坏形态。



PB-2 分片预制盖梁试件破坏形态：

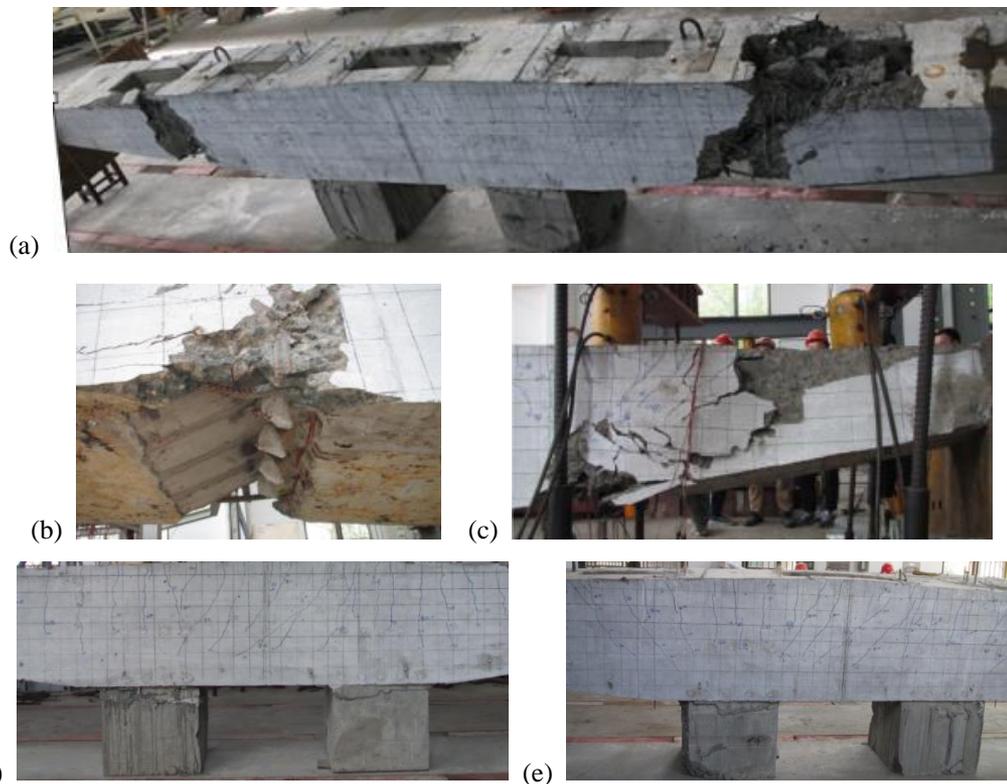
- (a) 整体破坏形态；(b) 西侧；(c) 东侧；(d) 南侧；(e) 北侧



PB-3 C60 混凝土 U 型截面空心盖梁试件裂缝模式示意图

- 加载至工况5（荷载标准组合）不久后，C60混凝土U型截面空心盖梁试件在两支承墩柱之间靠近墩柱的位置首先开裂。
- 继续加载至工况6（荷载基本组合），东侧及西侧悬臂根部附近顶面位置相继开裂，跨中裂缝宽度有所增大。随着荷载进一步增大，裂缝的数量增多加密，开裂位置也逐渐由悬臂根部往端部发展。最外侧加载点附近出现倾斜角度较大的斜裂缝，沿着最外侧空腔腹板斜向开展。
- 加载至工况11（1.5倍荷载基本组合）时，悬臂根部处裂缝基本不再开展，最外侧斜裂缝沿着最外侧加载点至盖梁底面最下排钢绞线锚固位置斜向将盖梁剪断，与斜裂缝相交的箍筋被拉断，斜裂缝下缘混凝土被压溃，使盖梁呈现剧烈的剪扭破坏形态。

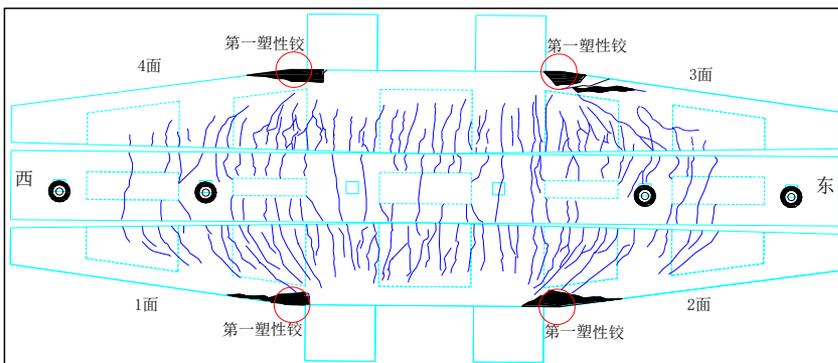
✓ 经分析判断这一脆性破坏模态是由于缩尺后盖梁底面因锚固底排钢绞线而预留的齿块挖空了截面，对盖梁截面削弱较大引起的，使此处成为盖梁的薄弱环节，并最终先于悬臂根部位置破坏。



PB-3 C60 混凝土 U 型截面空心盖梁试件破坏形态：

(a) 整体破坏形态；(b) 下排钢绞线锚固处；(c) 破坏斜裂缝；(d) 南侧；(e) 北侧

试验结果分析——U型截面空心盖梁试件（C80混凝土）



PB-4 C80 混凝土 U 型截面空心盖梁试件裂缝模式示意图

- 加载至工况3（荷载准永久组合）不久后，C80混凝土U型截面空心盖梁试件悬臂根部盖梁顶面首先开裂。
- 继续加载，两支支撑墩柱中间也出现裂缝，悬臂根部裂缝的数量增多加密，开裂位置逐渐由悬臂根部往端部发展，最远达到了外侧空腔的中间。总体而言，悬臂段裂缝有向悬臂根部下缘汇集的趋势。
- 进一步增大荷载至1.7倍荷载基本组合，悬臂段裂缝有向悬臂根部汇集的趋势。总体而言，试件呈现弯曲破坏形态。



(a)



(b)



(c)



(d)

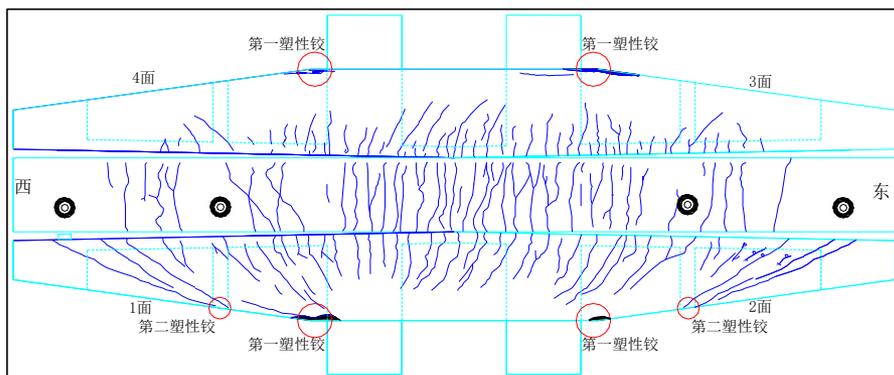


(e)



(f)

PB-4 C80 混凝土 U 型截面空心盖梁试件破坏形态：(a) 整体破坏形态；(b) 悬臂根部；
(c) 跨中底面；(d) 外侧空腔；(e) 悬臂根部空腔；(f) 跨中空腔



PB-5 C80 混凝土倒 U 型截面空心盖梁试件裂缝模式示意图

- 加载至工况3（荷载准永久组合）不久后，C80混凝土倒U型截面空心盖梁试件悬臂根部盖梁顶面首先开裂。
- 继续加载，两支撑墩柱中间也出现裂缝，悬臂根部裂缝的数量增多加密，开裂位置逐渐由悬臂根部往端部发展，最远达到了最外侧空腔的中间。
- 进一步增大荷载至1.7倍荷载基本组合，1面裂缝分布有向底部汇集的趋势，角部压碎，纵筋外露。总体而言，试件呈现弯曲破坏形态。



(b)

(c)

(d)

PB-4 C80 混凝土 U 型截面空心盖梁试件破坏形态：

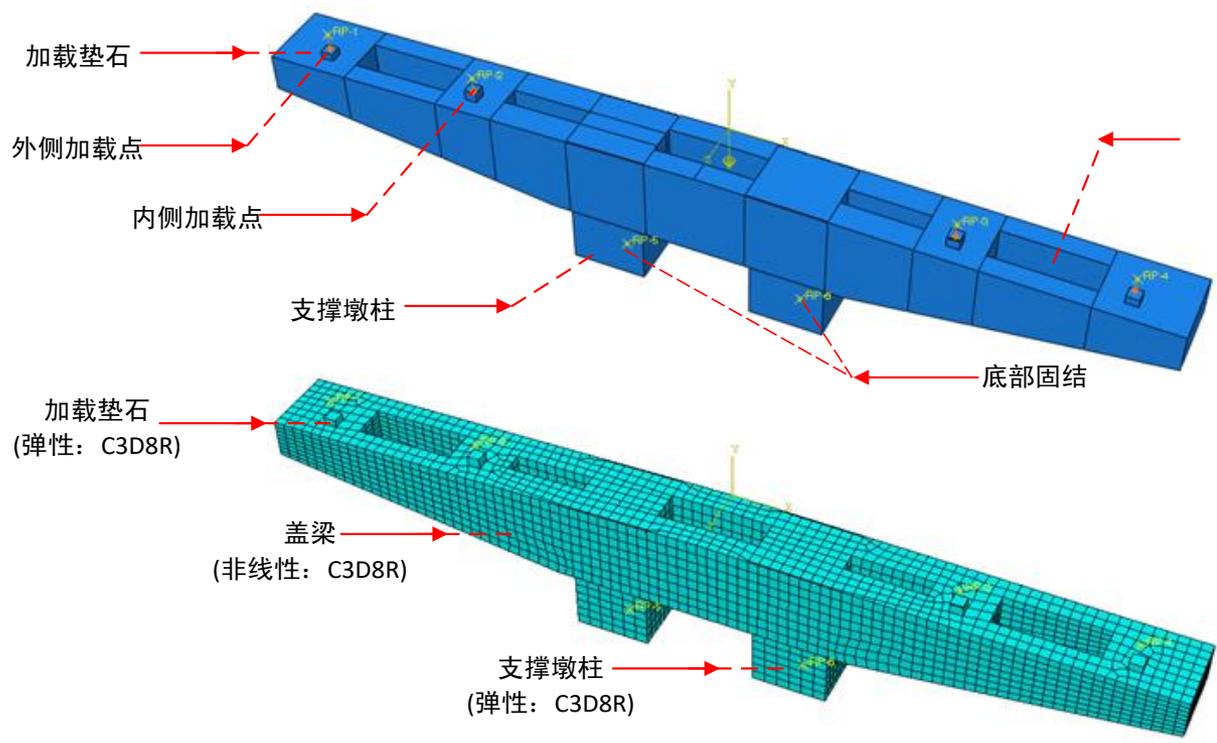
(a) 整体破坏形态；(b) 内外侧空腔间隔板；(c) 悬臂根部；(d) 跨中空腔底面

各试件承载力峰值统计表

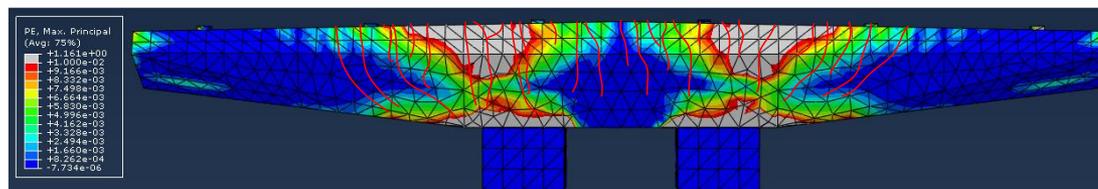
方案	东侧极限荷载 (kN)		西侧极限荷载 (kN)		基本组合 (kN)		东侧极限/基本组合		西侧极限/基本组合	
	边侧	内侧	边侧	内侧	边侧	内侧	边侧	内侧	边侧	内侧
整体预制	1606	883	1606	883	671	438	2.39	2.02	2.39	2.02
分片盖梁	1337	873	1543	1007	671	438	1.99	1.99	2.30	2.30
C60U形	1032	730	954	588	638	403	1.62	1.81	1.50	1.46
C80U形	1107	713	1107	713	638	403	1.74	1.77	1.74	1.77
C80倒U形	1133	696	1133	696	673	415	1.68	1.68	1.68	1.68

盖梁试件的力学性能比较

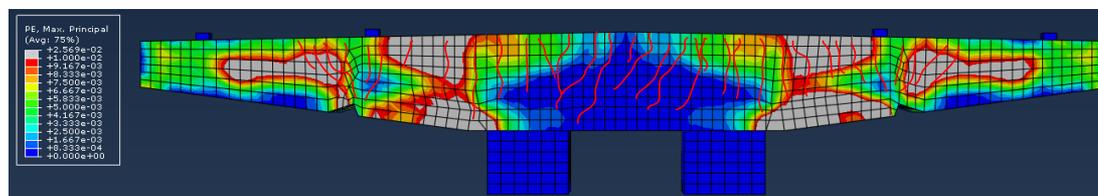
盖梁类型	承载力 (kN.m)			活载挠度 (mm)		开裂弯矩 (kN.m)	
	试验值	计算值	比值	试验值	计算值	试验值	计算值
整体实心	4174	2999	1.39	1/1849	1/852	1961	1918
分片预制	3585	2999	1.20	1/841	1/852	1389	1918
C60U型*	3001	2473	1.21	1/839	1/653	1486	1466
C80U型	3009	2415	1.25	1/897	1/589	1402	1388
C80倒U型	3417	2817	1.21	1/615	1/560	1658	1621



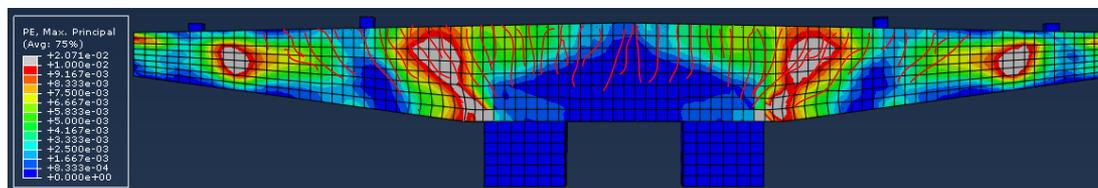
轻量化盖梁有限元模型



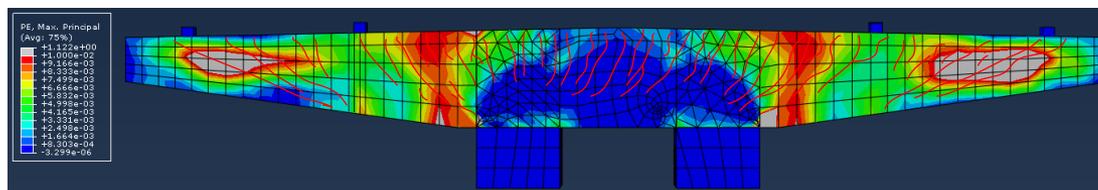
(a) 整体预制盖梁试件



(b) U型截面空心盖梁试件 (C60 混凝土)

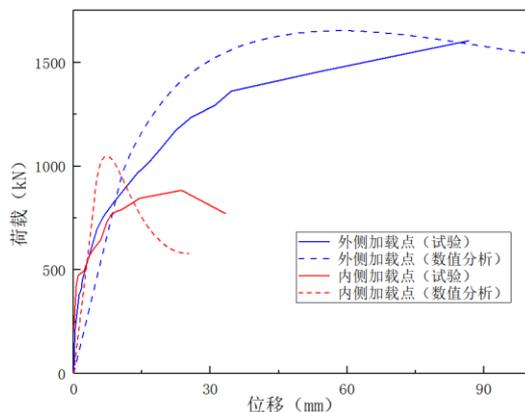


(c) U型截面空心盖梁试件 (C80 混凝土)

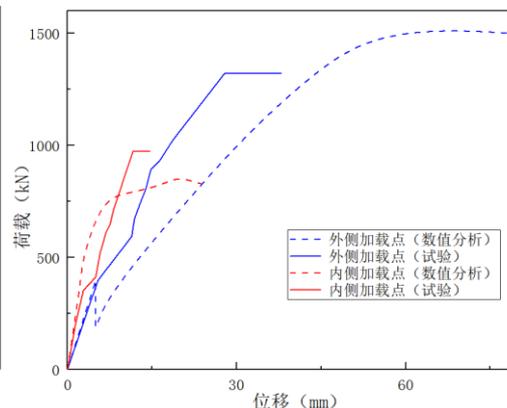


(d) 倒U型截面空心盖梁试件 (C80 混凝土)

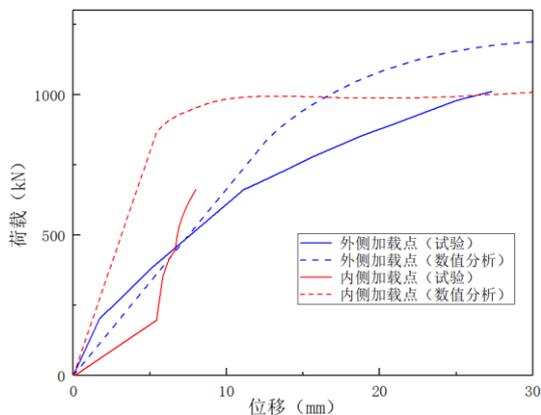
承载力峰值时盖梁试件最大塑性拉应变分布 (有限元结果与试验结果对比)



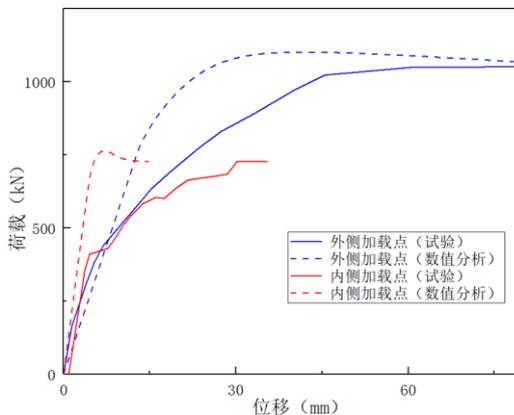
(a) 整体预制盖梁试件



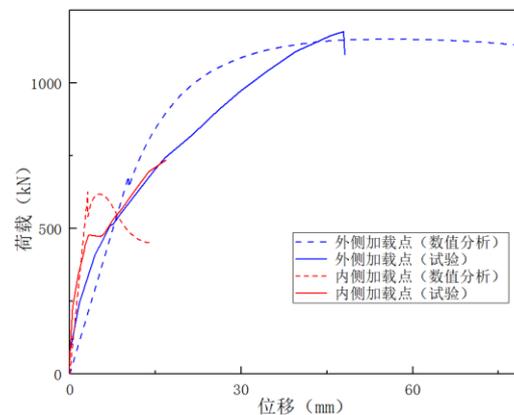
(b) 分片预制盖梁试件



(c) U型截面空心盖梁试件 (C60 混凝土)

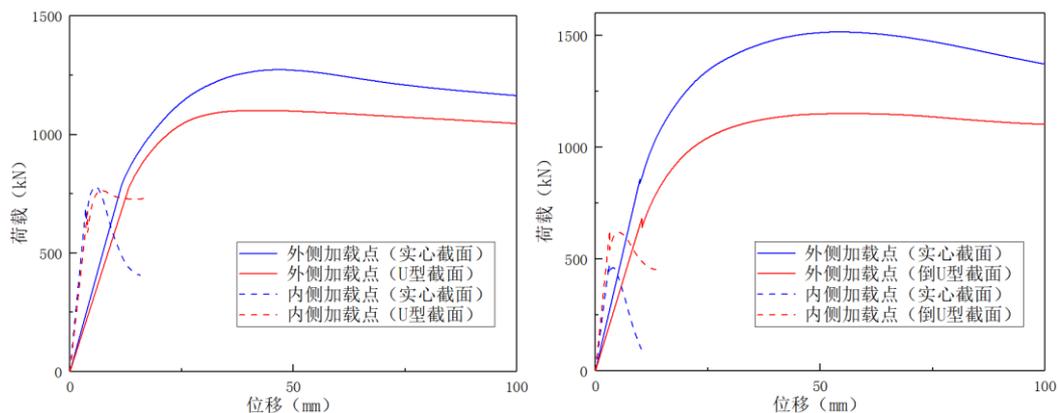


(d) U型截面空心盖梁试件 (C80 混凝土)



(e) 倒U型截面空心盖梁试件 (C80 混凝土)

各盖梁试件荷载-位移曲线 (有限元结果与试验结果对比)



(a) U型截面空心盖梁试件 (C80 混凝土) (b) 倒U型截面空心盖梁试件 (C80 混凝土)

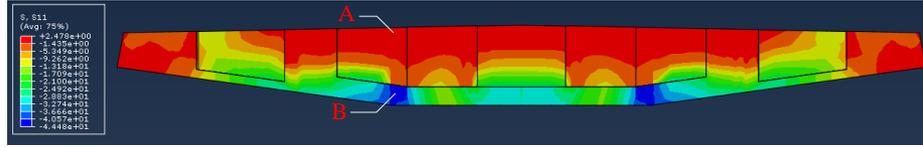
各盖梁试件荷载-位移曲线 (空心截面与实心截面对比)

根据荷载-位移曲线计算得到盖梁悬臂根部的抗弯承载力，计算结果表明：U型截面空心盖梁悬臂根部抗弯承载力较实心盖梁减小11.2%，倒U型截面空心盖梁悬臂根部抗弯承载力较实心盖梁减小17.7%。

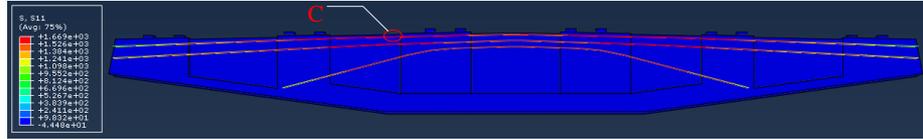
数值分析——足尺轻量化盖梁全过程受力性能分析



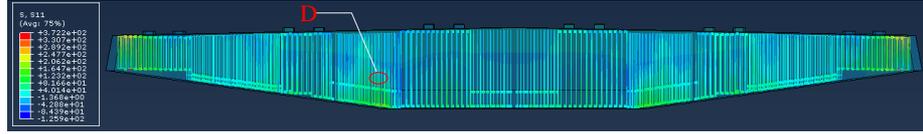
南京工业大学
NANJING TECH UNIVERSITY



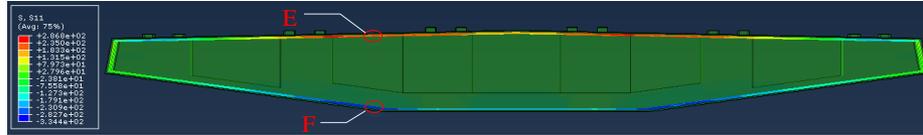
(a) 极限状态混凝土正应力



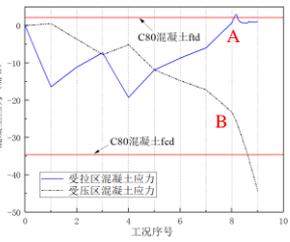
(b) 极限状态钢绞线应力



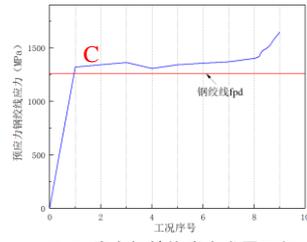
(c) 极限状态箍筋应力



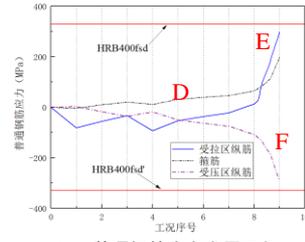
(d) 极限状态普通纵筋应力



(e) 混凝土应力发展历程



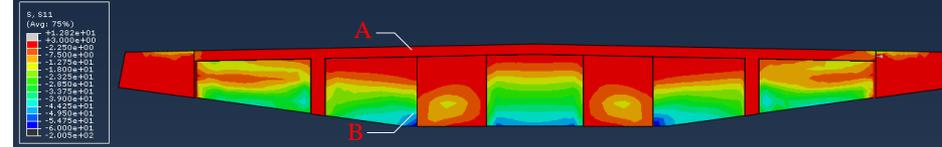
(f) 预应力钢绞线应力发展历程
工况序号说明:



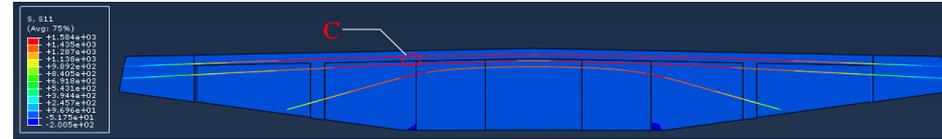
(g) 普通钢筋应力发展历程

1: 第一批预应力张拉; 2: 单侧架梁; 3: 双侧架梁; 4: 第二批预应力张拉; 5: 二期恒载; 6: 荷载频遇组合; 7: 荷载标准组合; 8: 荷载基本组合; 9: 1.7倍荷载基本组合

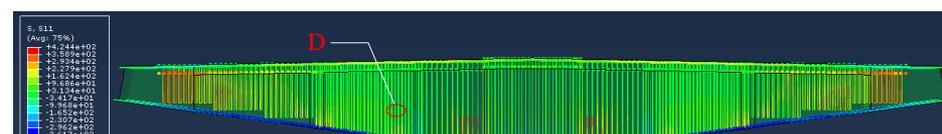
U型截面空心盖梁 (C80 混凝土) 破坏过程



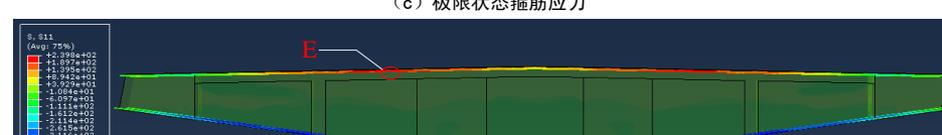
(a) 极限状态混凝土正应力



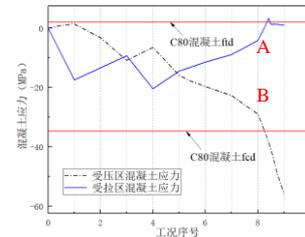
(b) 极限状态钢绞线应力



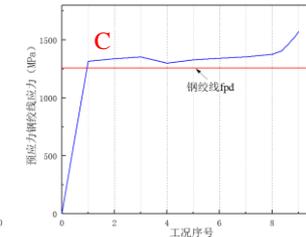
(c) 极限状态箍筋应力



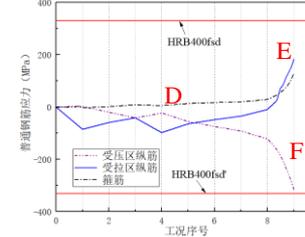
(d) 极限状态普通纵筋应力



(e) 混凝土应力发展历程



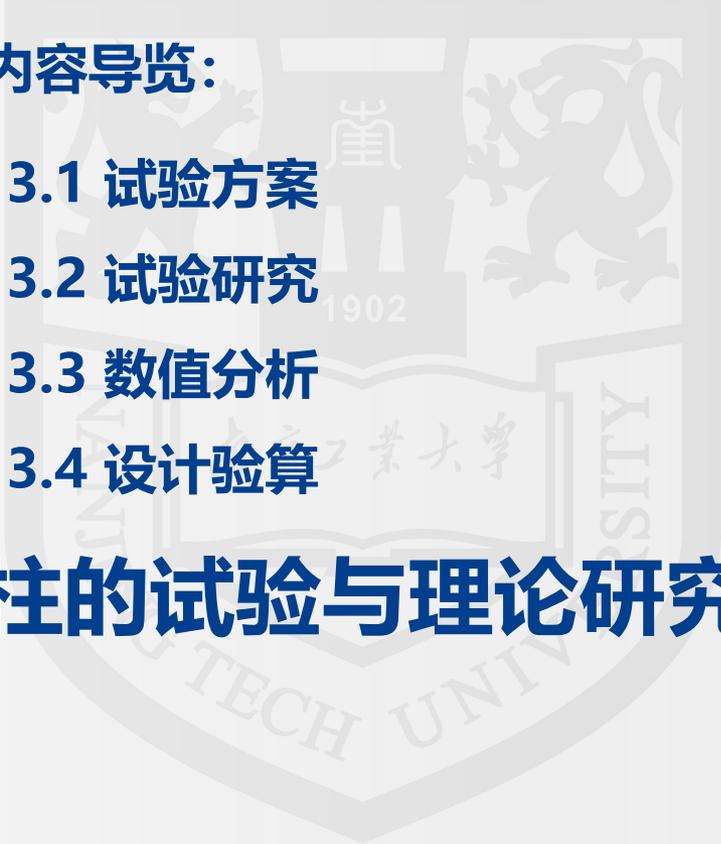
(f) 预应力钢绞线应力发展历程
工况序号说明:



(g) 普通钢筋应力发展历程

1: 第一批预应力张拉; 2: 单侧架梁; 3: 双侧架梁; 4: 第二批预应力张拉; 5: 二期恒载; 6: 荷载频遇组合; 7: 荷载标准组合; 8: 荷载基本组合; 9: 1.7倍荷载基本组合

倒U型截面空心盖梁 (C80 混凝土) 破坏过程



内容导览:

3.1 试验方案

3.2 试验研究

3.3 数值分析

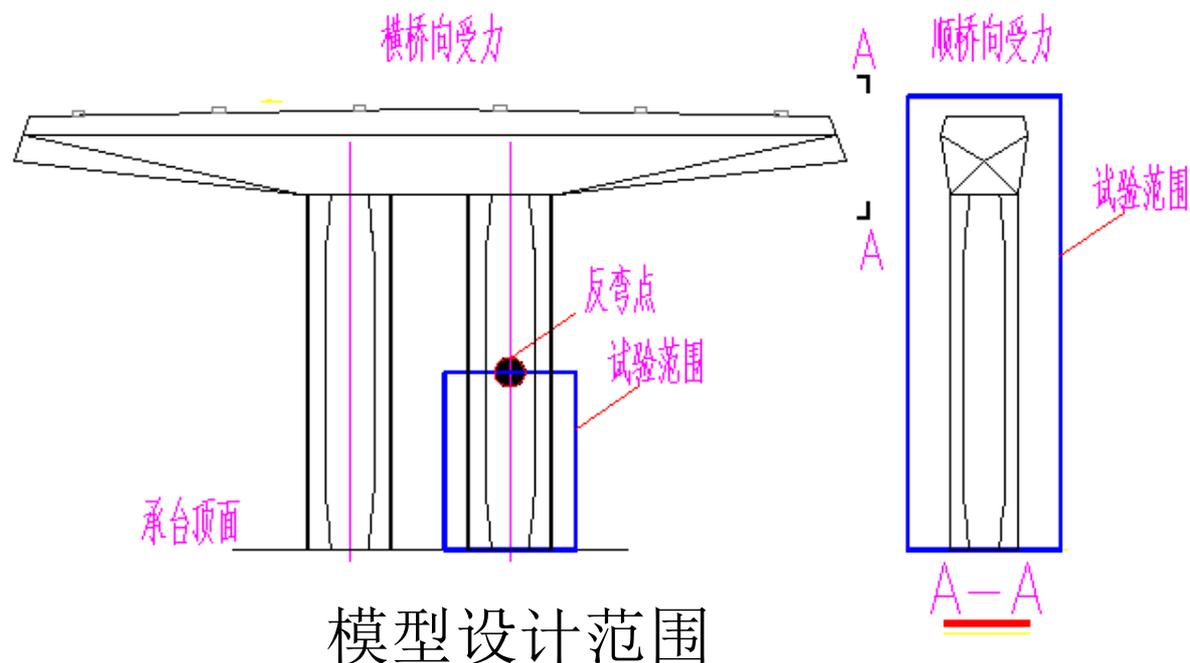
3.4 设计验算

第三部分 空心立柱的试验与理论研究

试验方案——加载设计

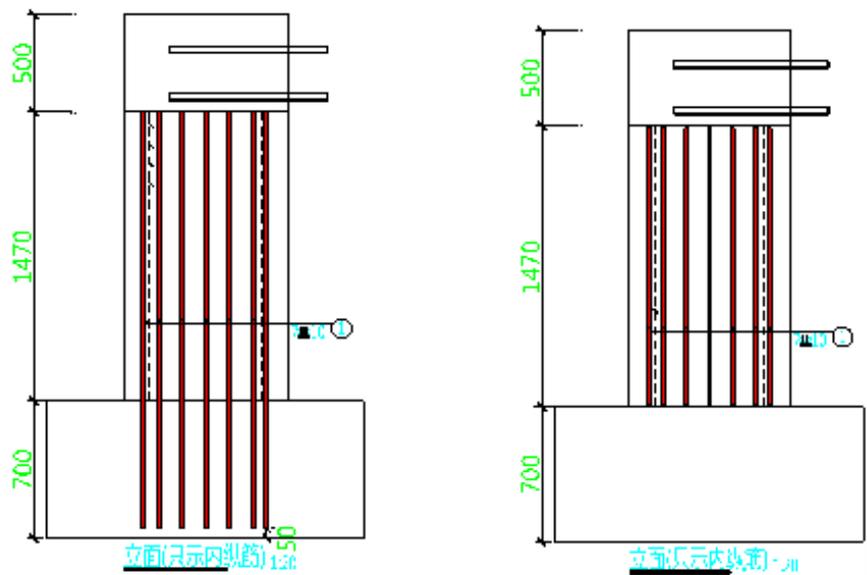


- 选取墩柱反弯点以下的5m高桥墩和承台部分进行横桥向研究；选择10m高桥墩进行顺桥向研究。原型桥墩方案设计方案是：墩高为10米，边长为2.5m、壁厚为0.4m的空心正方形截面。相似比1/3。



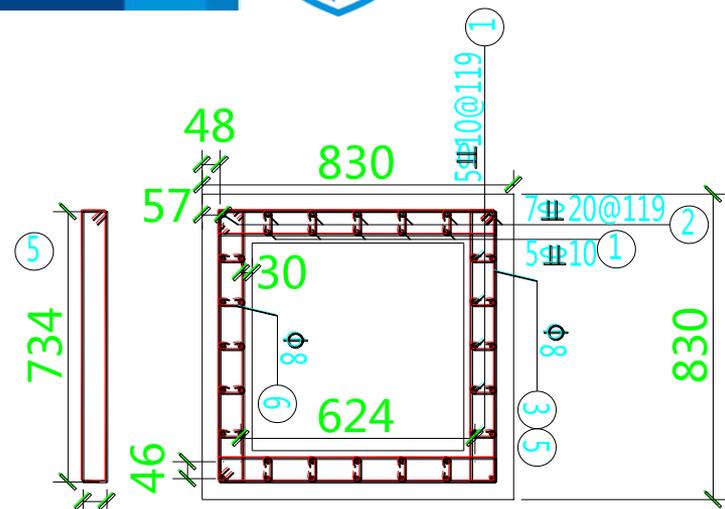
- 试件所用混凝土的强度等级均为C40，外圈纵筋采用24根直径20mm的HRB400热轧带肋钢筋，内圈纵筋采用20根直径10mm的HRB400热轧带肋钢筋。同时考虑内外圈纵筋，空心截面配筋率是2.26%。只考虑外圈纵筋，空心截面配筋率是1.87%。箍筋、拉筋都采用直径8mm的热轧光圆钢筋。塑性铰区取为0.8m，箍筋间距是100mm，体积配箍率是2.89%，方向配箍率是0.6%。其余箍筋间距是150mm，体积配箍率是1.92%，方向配箍率是0.41%。
- 原型恒载轴压力范围是9500kN~10456kN，模型轴压力选为1055~1161kN，轴压比为10.6%~11.6%。本试验选取轴压力为1161kN。

试验方案-加载设计

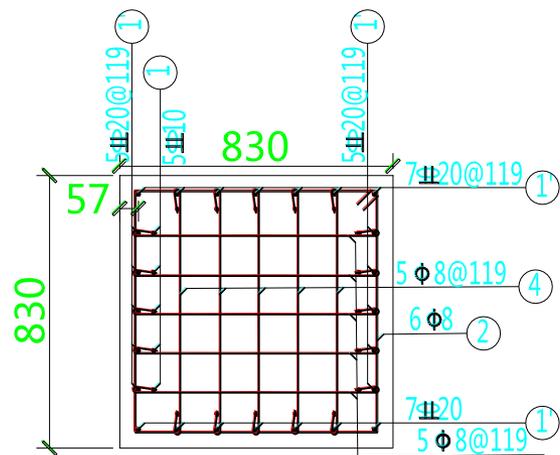


(a) 内圈纵筋贯穿承台 (b) 内圈纵筋不穿过承台

图 2.6 典型试件内圈纵筋布置图

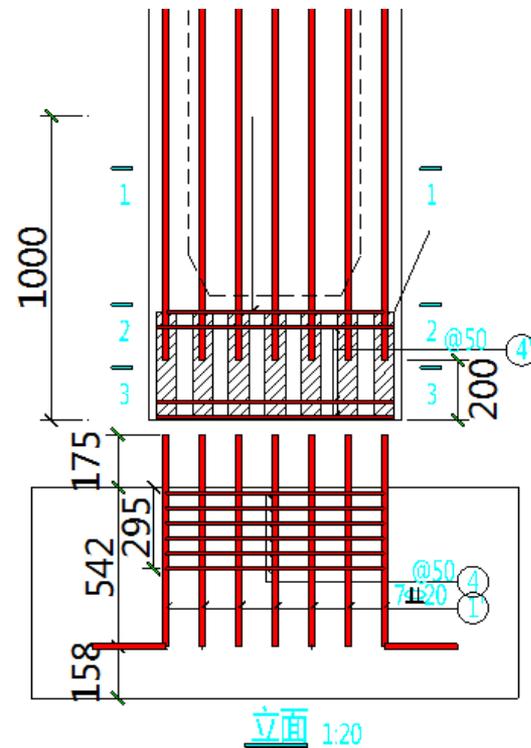
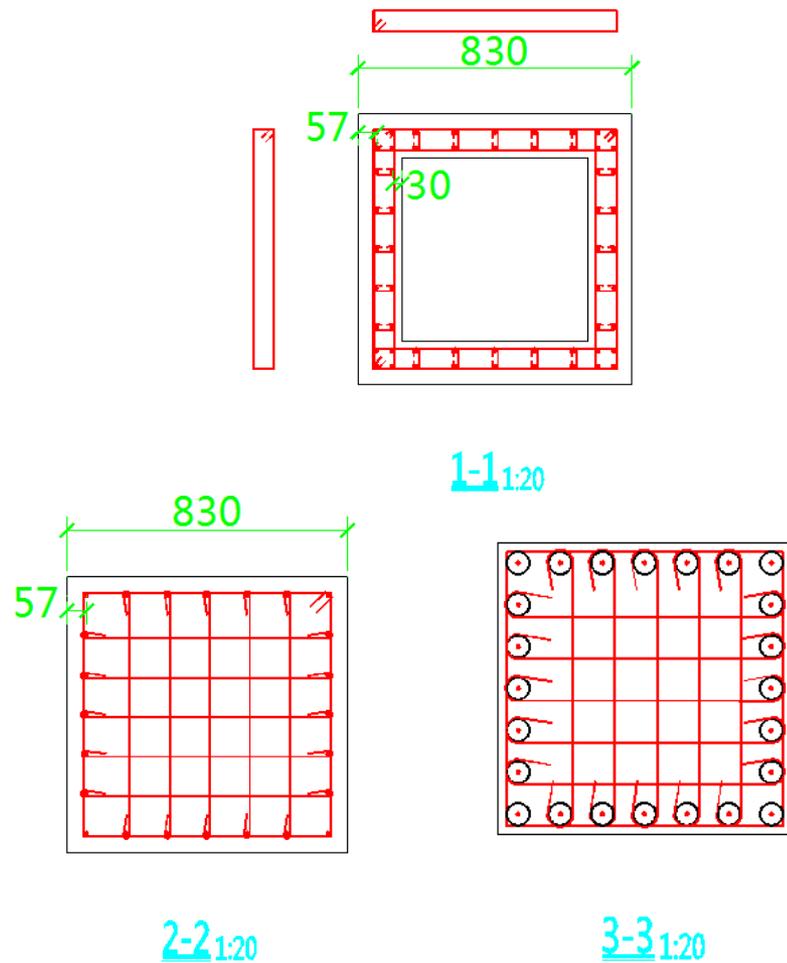


(a) 空心部分



(b) 实心部分
整体现浇立柱截面配筋设计

试验方案-加载设计



空心墩与承台配筋方案

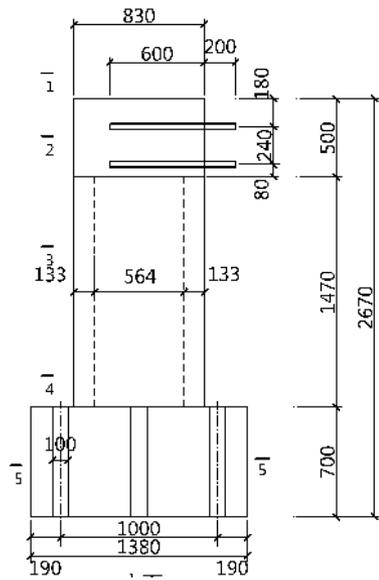
试验方案-模型试件



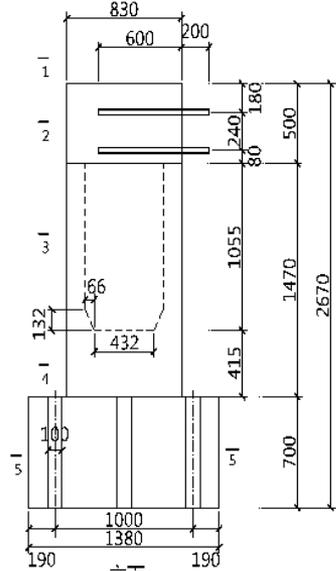
选取壁厚、实心段范围、施工方式、（无实心段、单排配筋）混凝土保护层厚度、剪力键等作为研究参数，设计7个试件。其中前2个是整体现浇桥墩，后5个是预制拼装空心桥墩。

试件汇总表

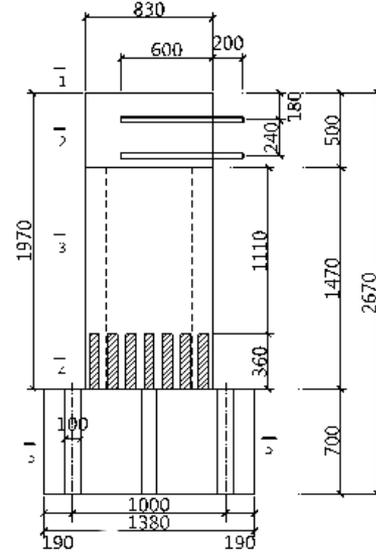
编号	试件名称	高度
试件1	现浇空心墩柱（无实心段、双排配筋）	2.67m
试件2	现浇空心墩柱（带实心段、单排配筋）	2.67m
试件3	预制空心桥墩（无实心段、单排配筋）	2.67m
试件4	预制空心桥墩（实心段预制、单排配筋）	2.67m
试件5	厚壁预制空心桥墩(壁厚15cm、单排配筋)	2.67m
试件6	大剪跨比预制空心桥墩（无实心段、单排配筋）	4.32m
试件7	小剪跨比预制空心桥墩	1.83m



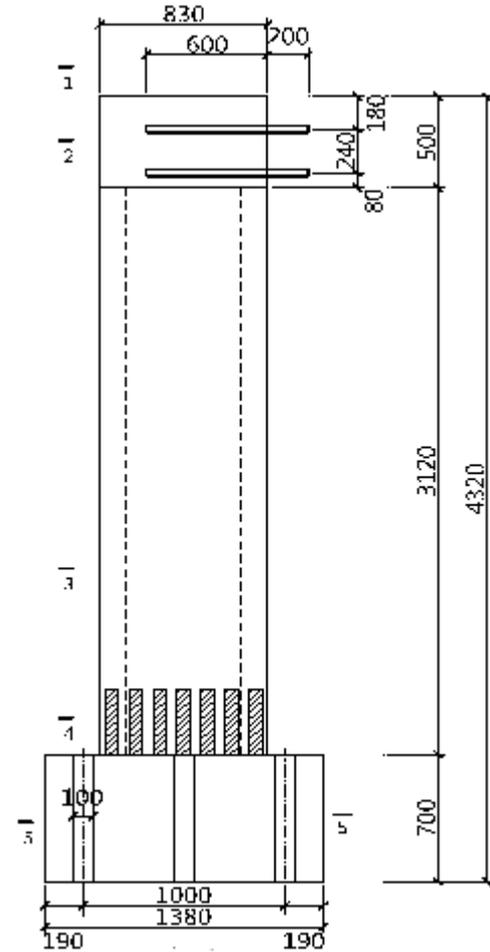
试件1



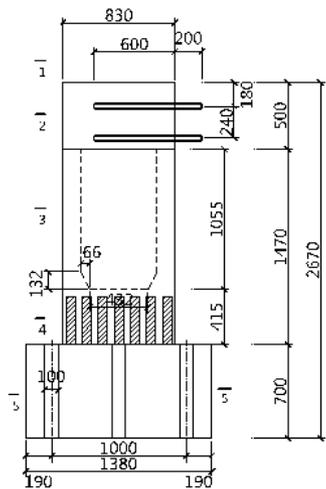
试件2



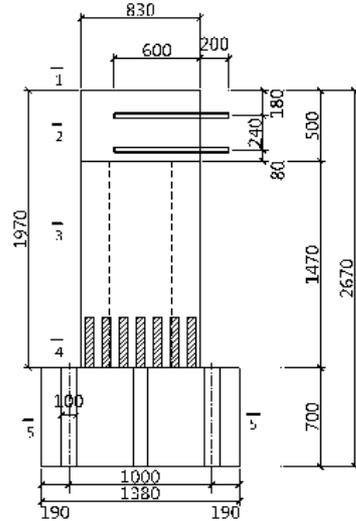
试件3



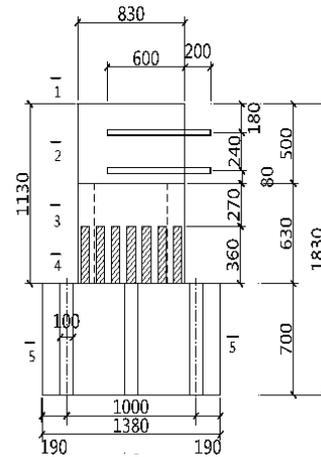
试件6



试件4



试件5

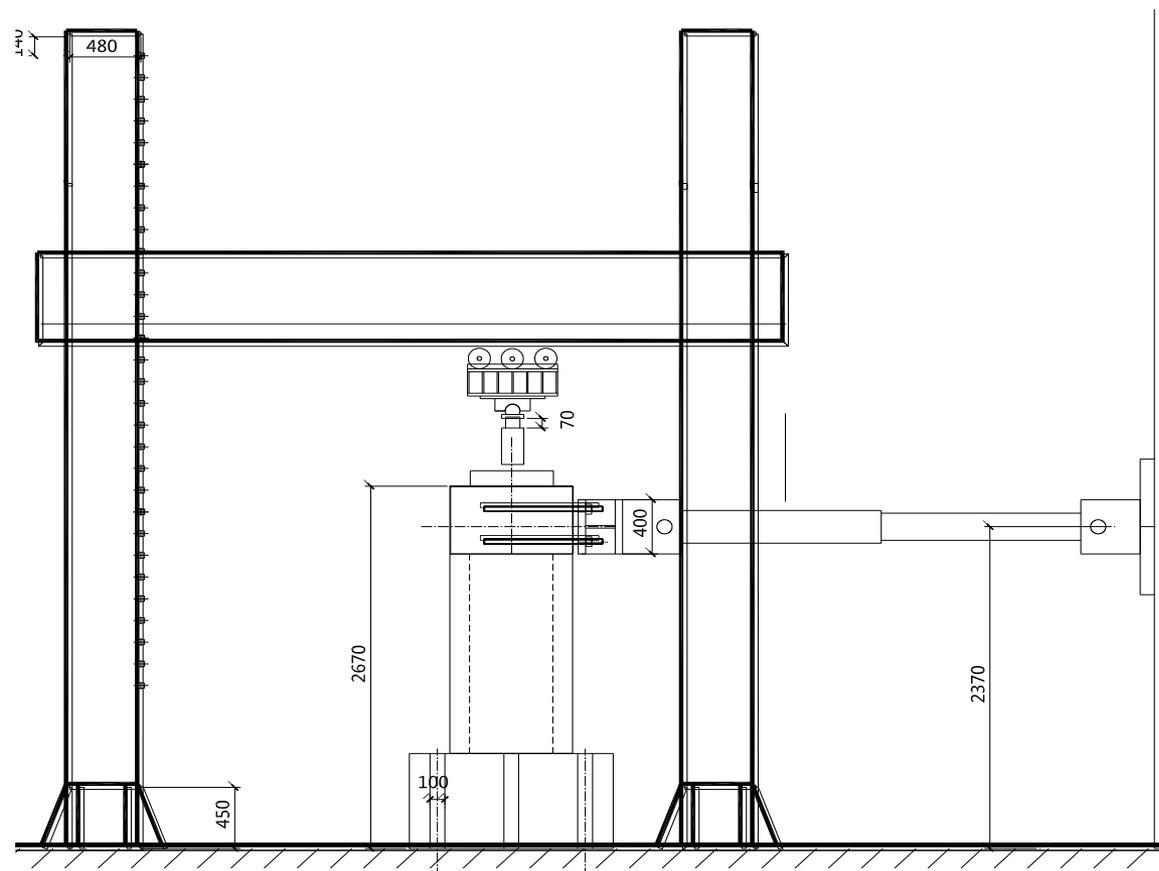


试件7

试验方案-试验装置



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



试件加载示意图

试验方案-加载制度

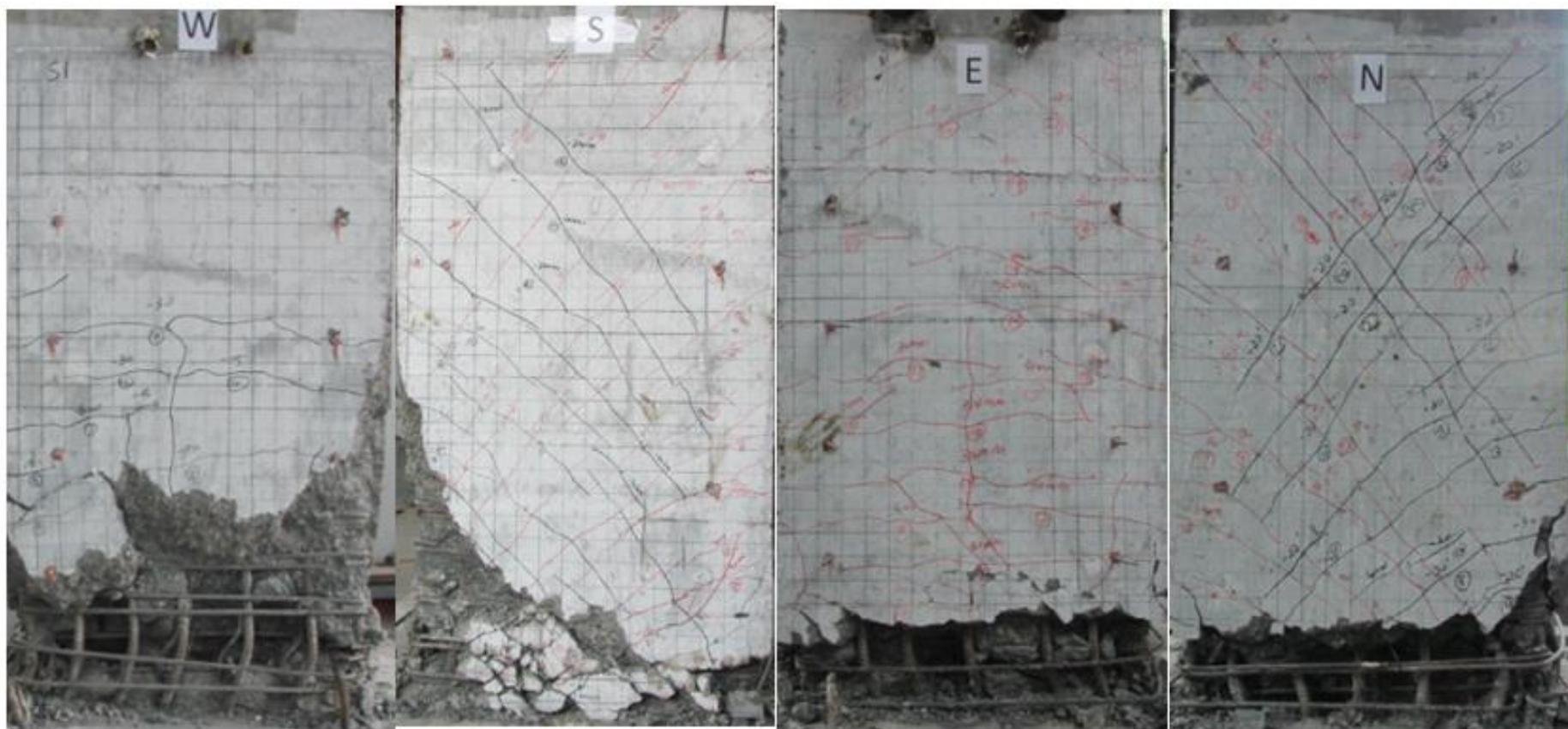


- 水平加载分为力加载和位移加载两个阶段，可以按照下面的方式执行。
- 第一阶段：力控制加载。加载时，每级荷载增量为25kN,分级加载至墩身开裂。该阶段重点研究运营期间正常使用状态的特征。
- 第二阶段：位移控制，试件在同时承受轴压和单轴弯曲循环加载方式下直至破坏。首先确定屈服位移，然后以0.5、1、1.5、2、3、4、5、6……倍屈服位移加载，每个等级循环3次，直到构件达到指定的位移或者荷载下降到最大荷载的80%，见图2.21，其中每级荷载首次达到最大值的正向和负向时，暂停观察裂缝。通过试验以获得其逐步损伤过程以及力-位移曲线，该阶段重点研究地震破坏状态下的特征。

试验结果-S1试验现象和损伤状态



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



西

南

东

北

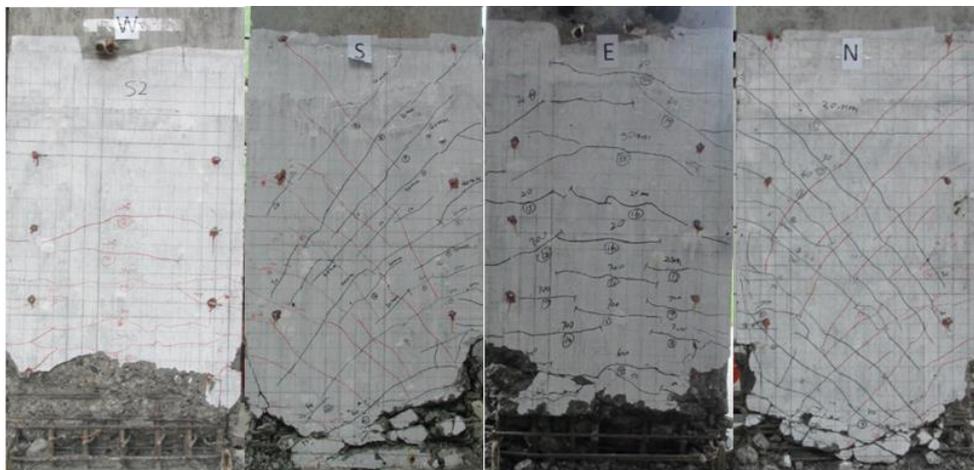
S1试件裂缝分布图

现浇空心墩柱（无实心段、双排配筋）

试验结果-S2试验现象和损伤状态



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



西 南 东 北

S2试件裂缝分布图
现浇空心墩柱（带实心段、
单排配筋）



(c) 混凝土严重破裂



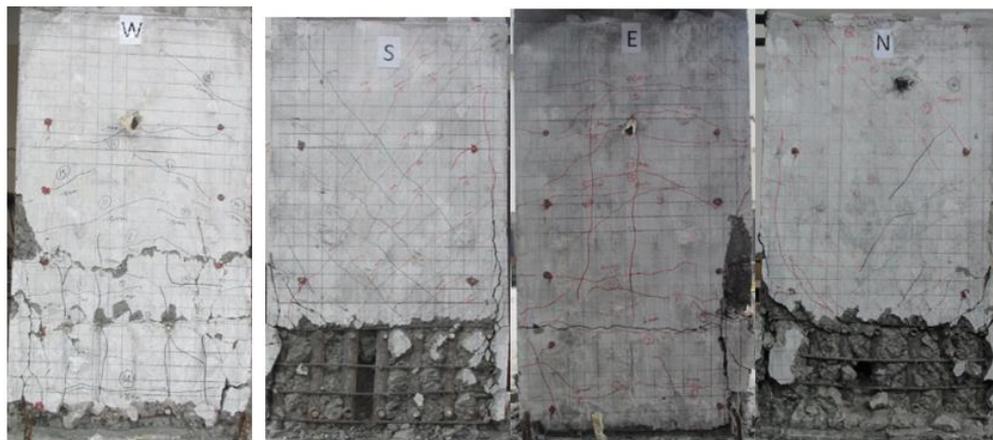
(d) 东侧纵筋断裂

局部破坏

试验结果-S3试验现象和损伤状态



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



S3试件最终破坏图
预制空心桥墩（无实心段、单排配筋）



(b) 套筒下方纵筋混凝土破碎 (c) 套筒下方纵筋断裂



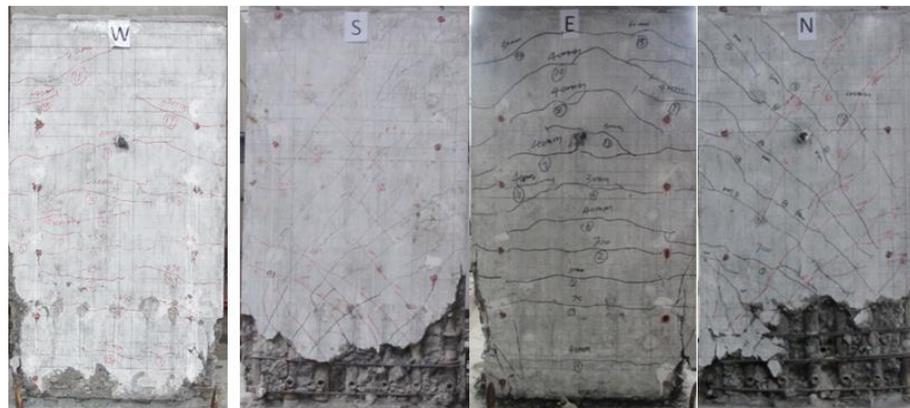
(d) 套筒下方纵筋剪断

局部破坏

试验结果-S4试验现象和损伤状态



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



西 南 东 北



(b) 套筒底部纵筋应变渗透 (c) 套筒下方纵筋受剪变形

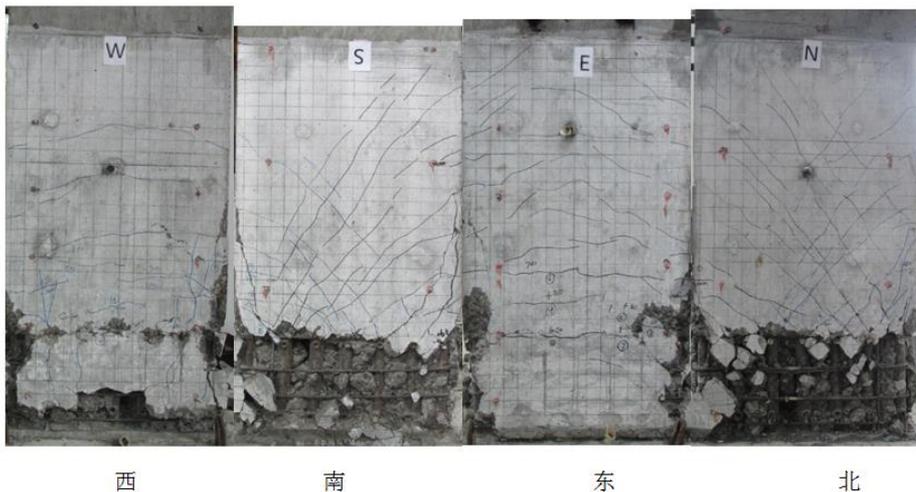
S4试件最终破坏图
预制空心桥墩（有实心段、单排配筋）

局部破坏

试验结果-S5试验现象和损伤状态



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



S5试件最终破坏图
厚壁预制空心桥墩(壁厚15cm、单排配筋)

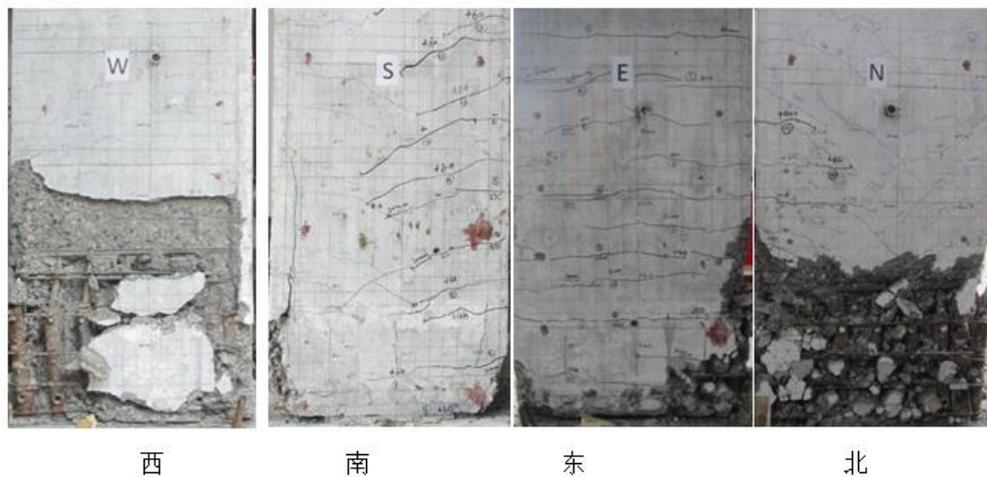


(b) 套筒下方纵筋发生应变渗透和剪切变形
局部破坏

试验结果-S6试验现象和损伤状态



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



S6试件裂缝分布图
大剪跨比预制空心桥墩（无实心段、单排配筋）

局部破坏

试验结果-S7试验现象和损伤状态



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



西



南



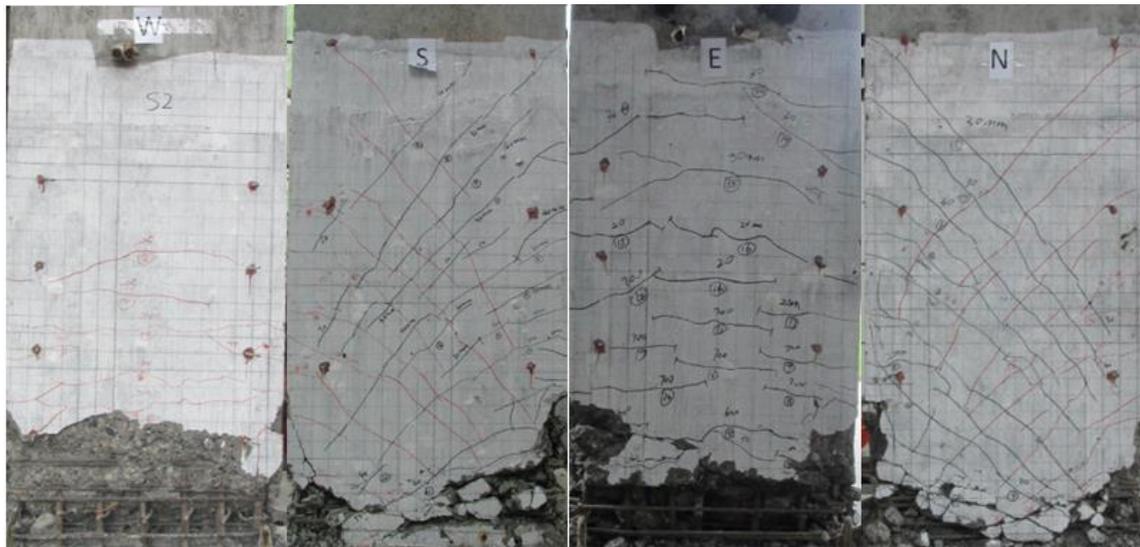
东



北



小剪跨比预制空心桥墩
局部破坏



整体现浇试件S2裂缝分布图



灌浆套筒试件S3裂缝分布图

试验结果-各个试件试验现象比较



首次开裂荷载统计表/kN

试件	正向荷载	正向裂缝位置	负向	负向裂缝位置
S1	550	墩底与承台之间	-500	墩底与承台之间
S2	550	墩底与承台之间	-500	墩底与承台之间
S3	500	坐浆料	-700	墩底和坐浆料
S4	700	承台与坐浆料界面	-625	墩身, 坐浆料-650kN
S5	600	承台与坐浆料界面	-600	墩底和坐浆料
S6	325	墩底和坐浆料	-300	墩底和坐浆料
S7	990	墩身	-800	墩身

试验结果-各级破坏状态的变形比较



各个试件的五级别状态对应偏移率 (%)

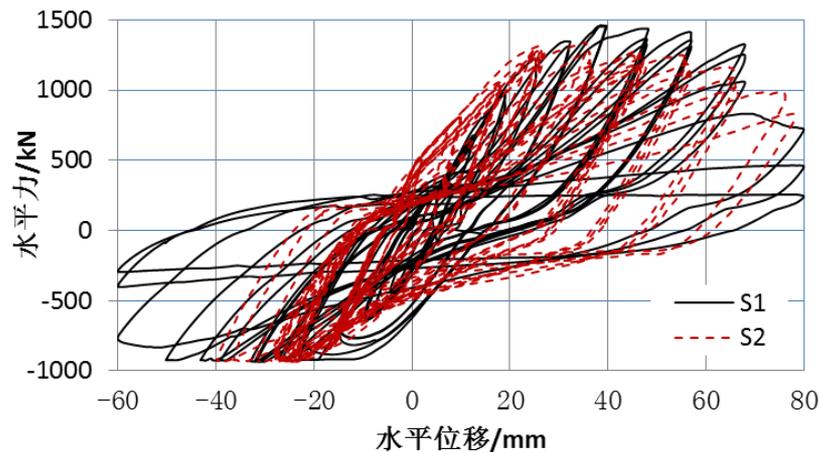
损伤级别	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
开裂	0.44	0.41	0.58	0.57	0.77	0.46	1.16
屈服	1.01	0.98	1.13	1.17	1.13	0.84	1.87
塑性铰开始形成	2.07	2.07	2.39	2.17	2.54	2.05	3.25
塑性铰完全形成	3.20	3.35	3.04	3.41	3.07	3.47	3.45
强度退化	4.15	4.15	3.47	4.28	3.59	4.11	3.52

注：偏移率=水平位移/墩高×100%

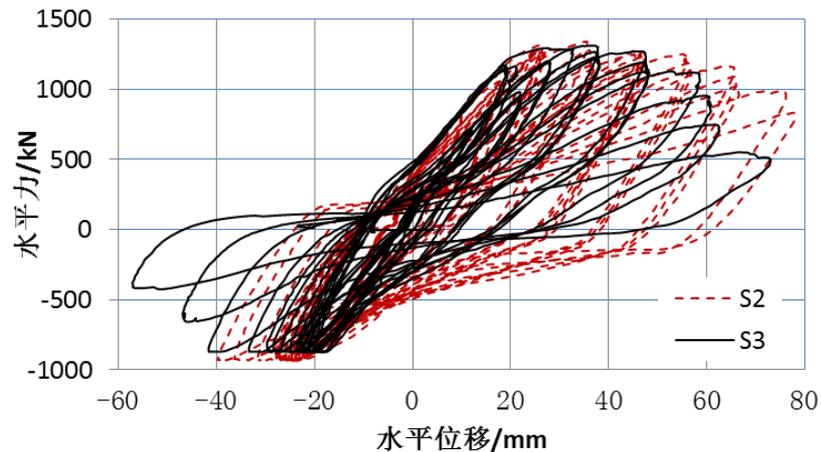
试验结果分析——荷载位移滞回曲线



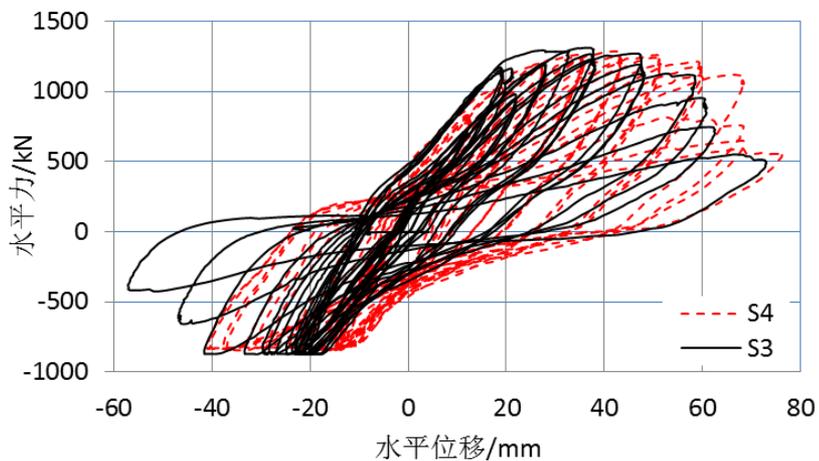
南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



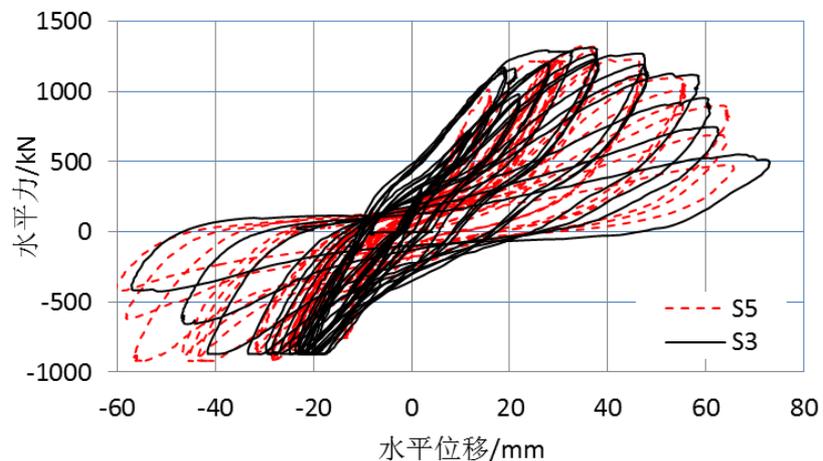
(a) S1和S2



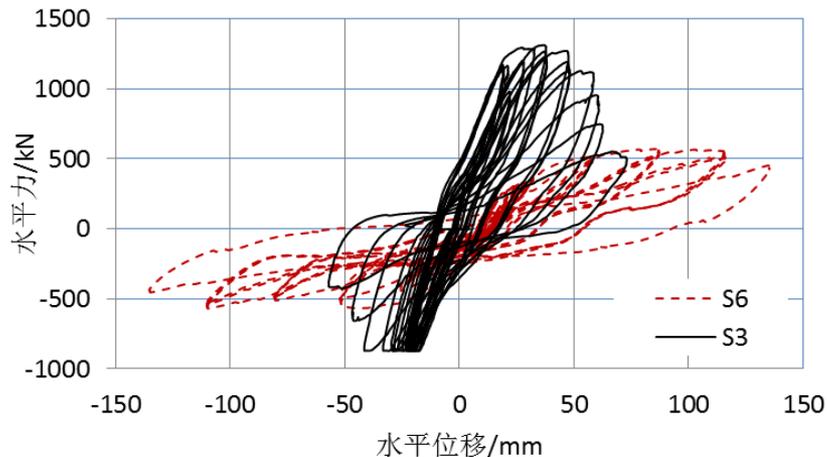
(b) S2和S3



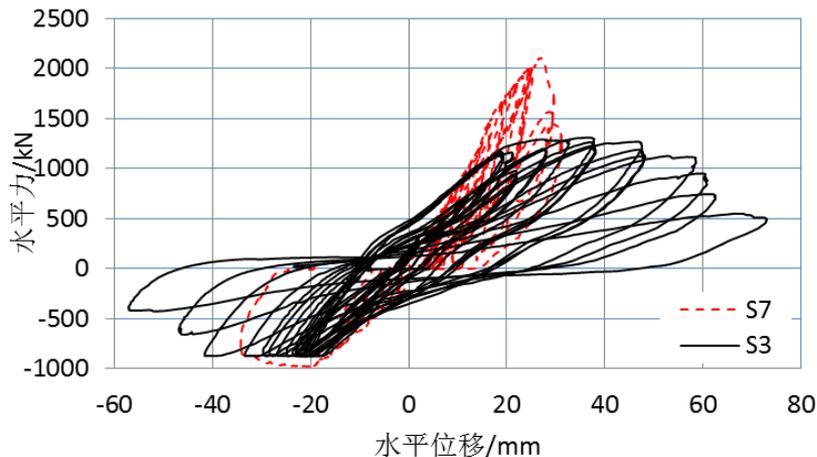
(c) S3和S4



(d) S3和S5



(e) S3和S6

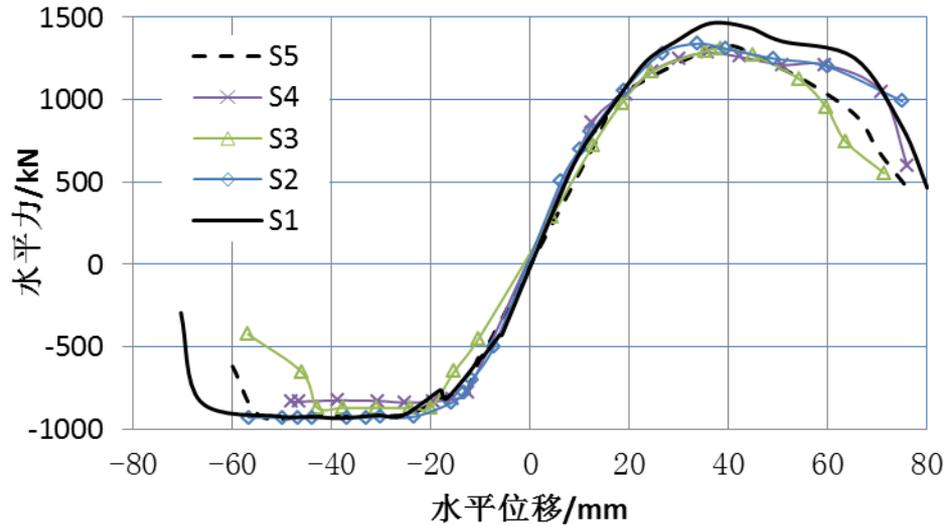


(f) S3和S7

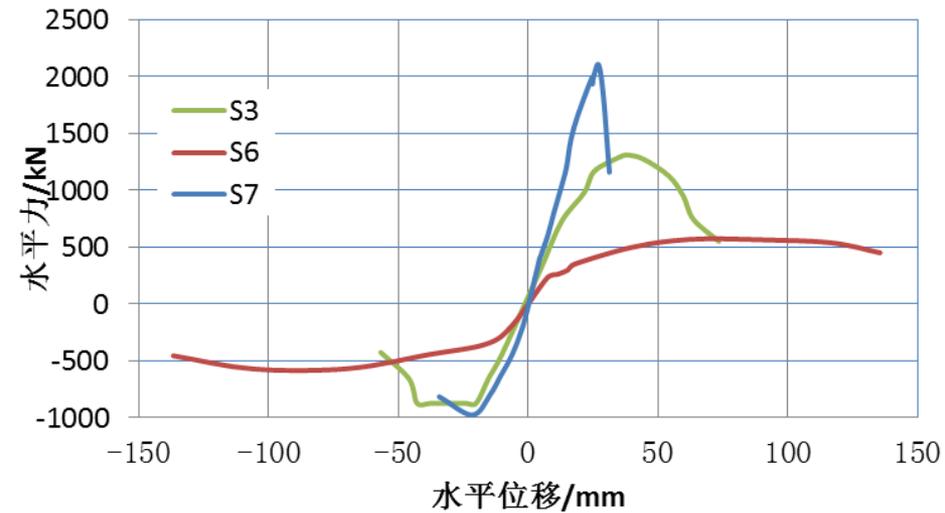
各个试件荷载位移滞回曲线

总体而言，剪跨比为2的前5个空心墩试件的滞回环形状呈弓形，捏缩现象比较明显，且从弓形逐步发展为类似反S形。剪跨比为4空心墩试件S6滞回环呈反S形。空心墩的滞回环饱满程度比实心桥墩要小。

荷载—位移骨架曲线



(a) S1, S2, S3, S4, S5试件



(b) S3, S6, S7试件

各个试件荷载位移骨架曲线

试验结果分析——特征值比较

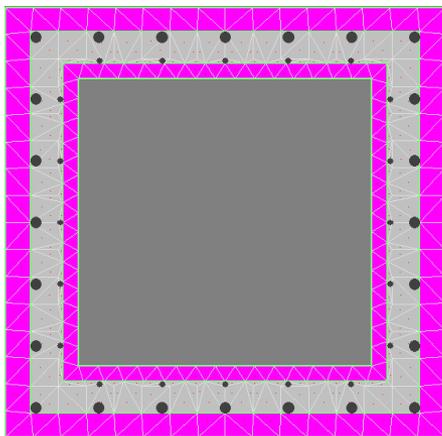


比较S1和S2，S2有实心段，所以S2的延性系数比S1高；同样比较S3和S4，S4也有实心段，所以S4的延性系数比S3高，说明混凝土墩底实心段的设置对提高整体现浇桥墩和灌浆套筒预制拼装桥墩的延性是有利的。比较不同剪跨比的试件S7，S6和S3，发现在剪跨比1-4的范围内，剪跨比越大，延性系数越高。对于不同壁厚的预制拼装试件S3和S5，发现提高壁厚可以缓解混凝土受压区的压碎，提高预制拼装桥墩的承载力和延性。

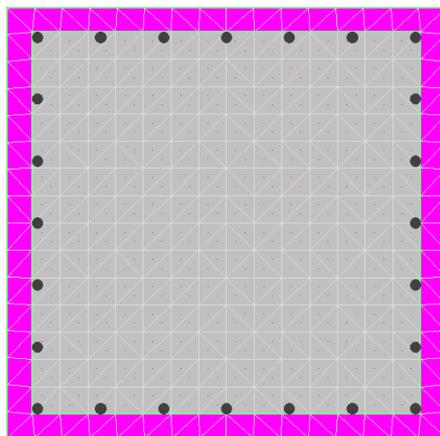
表4.1 根据纵筋应变测试结果进行的计算

钢筋应变	屈服状态		峰值荷载		峰值位移		延性系数
	位移	荷载	位移	荷载	位移	荷载	
S1	16.7	713	36.2	1200	67.1	960	4.0
S2	16.2	729	33.8	1137	69.6	910	4.3
S3	18.9	846	38.4	1092	58.2	874	3.1
S4	19.7	798	35.8	1063	71.5	851	3.6
S5	18.6	777	38.7	1124	59.7	899	3.2
S6	33.6	512	62.3	570	135	456	4.0
S7	16.3	882	27.0	1541	29.3	1232	1.8

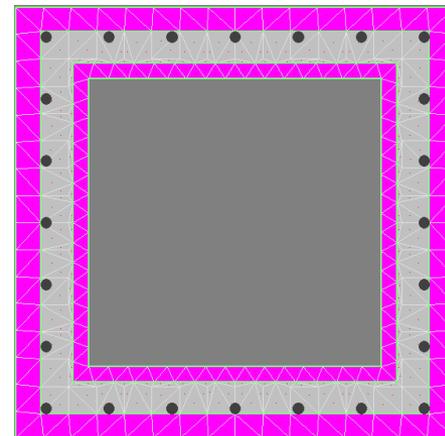
编号	试件名称
试件S1	现浇空心墩柱（无实心段、双排配筋）
试件S2	现浇空心墩柱（带实心段、单排配筋）
试件S3	预制空心桥墩（无实心段、单排配筋）
试件S4	预制空心桥墩（实心段预制、单排配筋）
试件S5	厚壁预制空心桥墩（壁厚15cm、单排配筋）
试件S6	大剪跨比预制空心桥墩（无实心段、单排配筋）
试件S7	小剪跨比预制空心桥墩



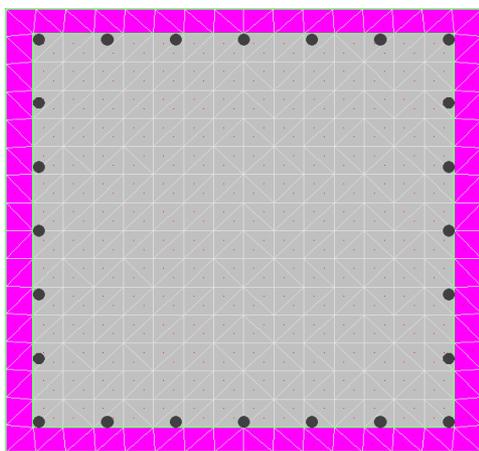
(a) 空心双层钢筋S1



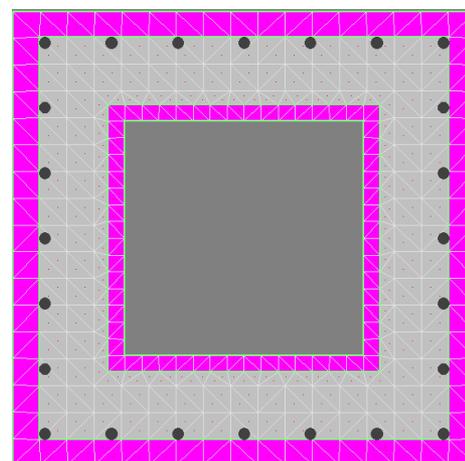
(b) 空心单层钢筋S2



(c) 空心灌浆套单层钢筋S3、S6、S7



(d) 实心段灌浆套单层钢筋S4



(e) 空心厚壁灌浆套单层钢筋S5

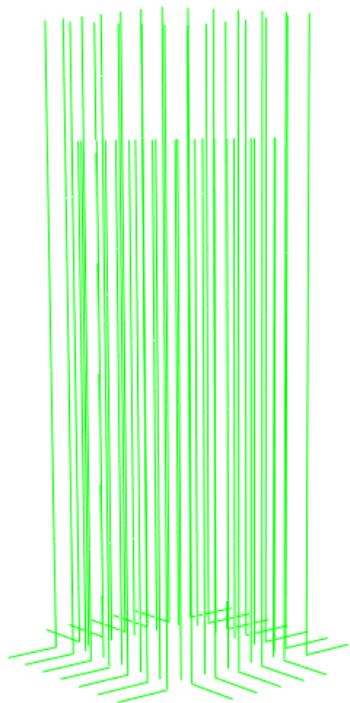
截面模型示意图



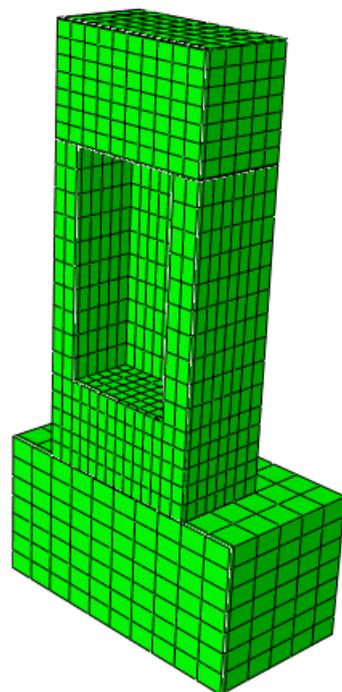
公式计算与试验结果的比值

试件名称	荷载 (公式/试验)			位移 (公式/试验)		延性系数 (公式/试验)
	屈服	峰值	极限	屈服	极限	
S1	0.88	0.89	0.89	0.53	0.41	0.77
S2	0.79	0.81	0.81	0.55	0.47	0.85
S3	0.72	0.79	0.79	0.48	0.44	0.91
S4	0.72	0.84	0.85	0.45	0.43	0.95
S5	0.87	0.88	0.88	0.48	0.47	0.98
S6	0.65	0.96	0.96	0.8	0.54	0.68
S7	1.09	1.04	1.04	0.2	0.43	——*

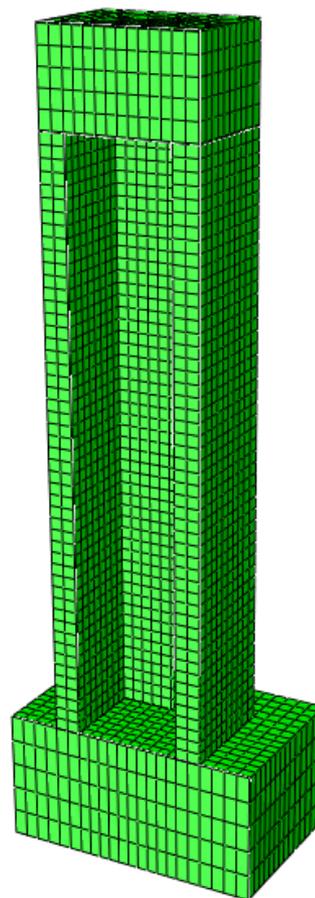
注*：剪切试件S7，不需要计算延性。



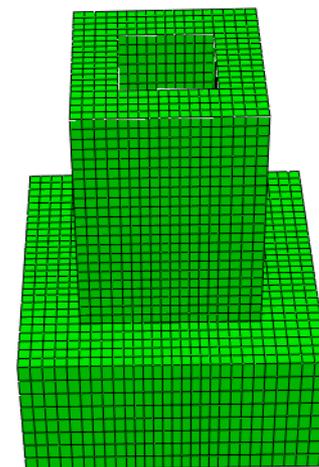
S1双排纵筋



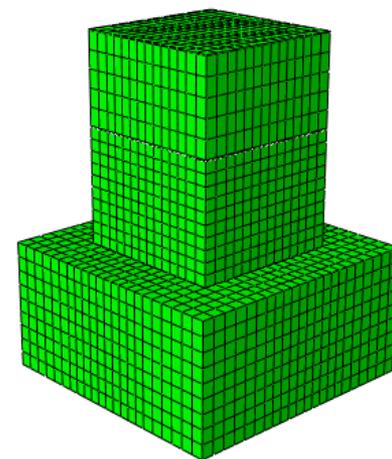
有实心段



剪跨比为4



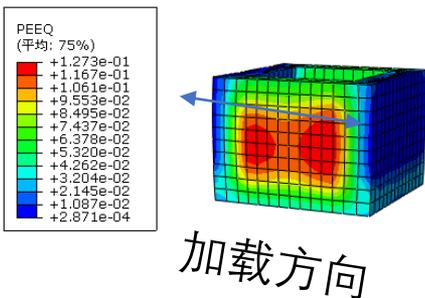
壁厚加厚



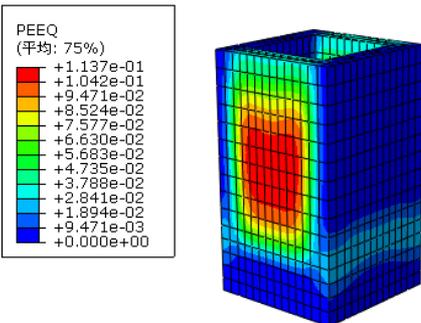
剪跨比为1

有限元模型

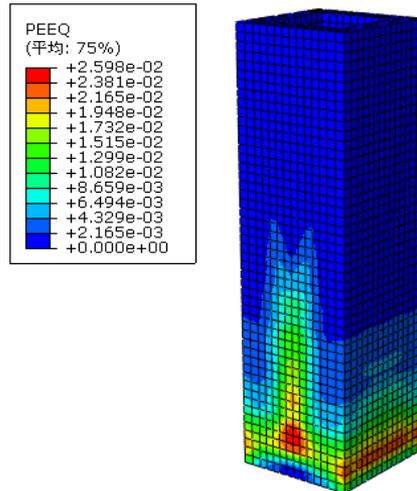
试验结果分析——有限元建模



剪跨比为1

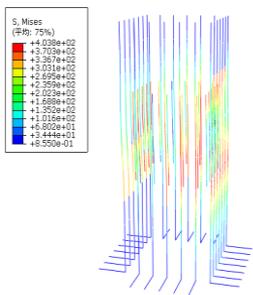


剪跨比为2

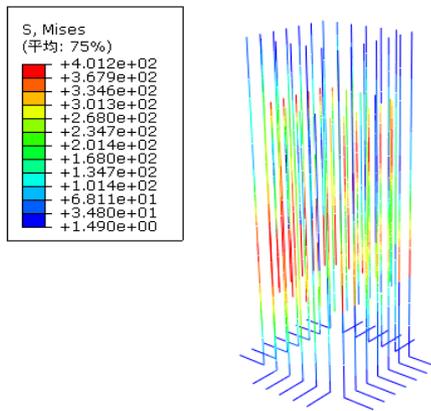


剪跨比为4

混凝土不同剪跨比的等效塑性应变分布

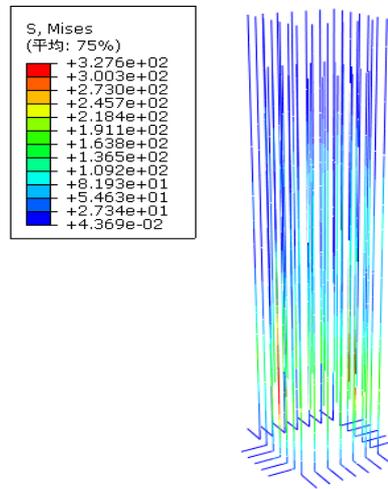


剪跨比为1



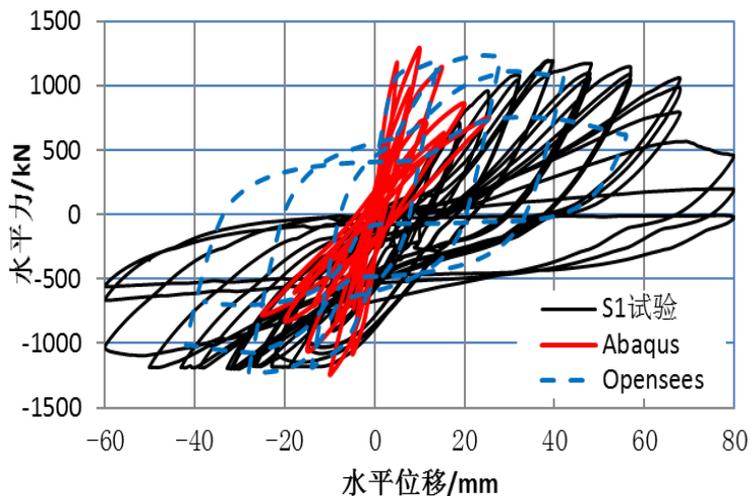
剪跨比为2

钢筋等效应力

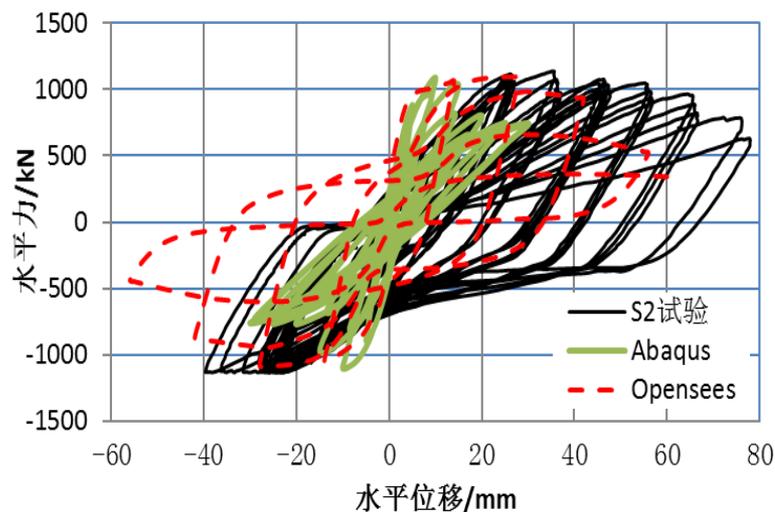


剪跨比为4

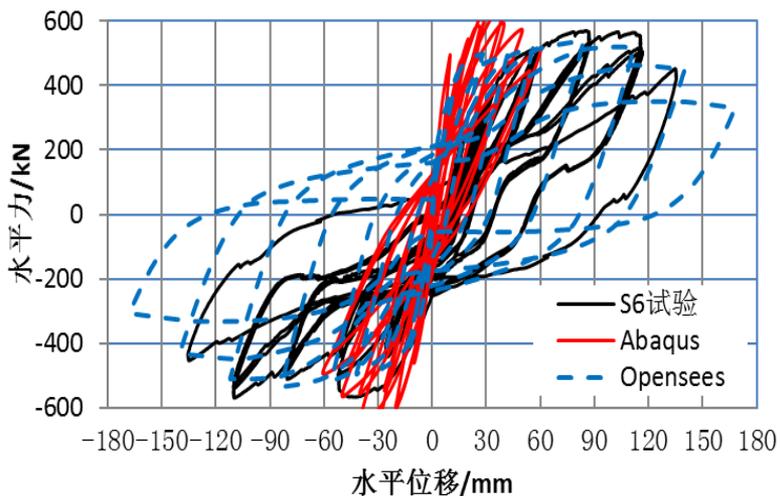
试验结果分析——典型有限元分析结果



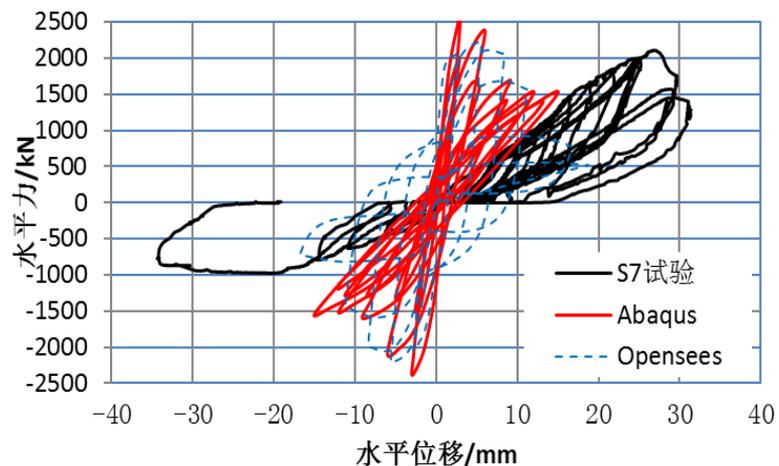
S1



S2



S6



S7

设计验算



设计验算公式与试验结果的对比

- 模型相似比1:3;
- 内力相似比1:9
- 弯矩相似比1:27
- 材料超强系数1.24
- 材料分项系数1.45

序号	试件编号	试件描述	对应原模型水平力		对应原模型弯矩	
			I	III	I	III
1	S1	现浇空心墩柱（无实心段）	2503	6007	12013	28832
2	S2	现浇空心墩柱（带实心段）	2503	5691	12013	27318
3	S3	预制空心桥墩（无实心段）	2503	5466	12013	26237
4	S4	预制空心桥墩（实心段预制）	3128	5321	15017	25540
5	S5	壁厚加厚预制空心桥墩	3003	5626	14416	27006
6	S6	大剪跨比预制空心桥墩	1502	2853	14056	26706
7	S7	小剪跨比预制空心桥墩	4004	7714	7568	14579

C-06a-0806

上海同济检测技术有限公司
混凝土抗压强度检测报告

MA 1400134281

第 1 页 共 1 页
工程连续号: 委托编号: G-HNT190165
报告编号: GHNT190180

委托性质: 送样

委托单位	上海公路桥梁（集团）有限公司			委托日期	2019.01.31
工程名称	昆阳路越江及配套道路工程			报告日期	2019.02.21
工程地址	—				
施工单位	上海公路桥梁（集团）有限公司				

样品编号	d1240	强度等级	C40	样品规格	150mm×150mm×150mm
生产单位	上海城建物资有限公司隧嘉混凝土分公司			备案证号	BH(砼)-08-20160072
工程部位	预制立柱P10L-E			稠度/mm	210
成型日期	2019.01.22	检测日期	2019.02.19	龄期/d	28
养护条件	破坏荷载/kN	抗压强度/MPa	强度代表值/MPa	折合标准试块强度/MPa	达到设计强度/%
标准养护	1129.3	50.2	49.7	49.7	124
	1084.7	48.2			
	1139.6	50.6			

样品编号	d1241	强度等级	C40	样品规格	150mm×150mm×150mm
生产单位	上海城建物资有限公司隧嘉混凝土分公司			备案证号	BH(砼)-08-20160072
工程部位	预制立柱P10L-E			稠度/mm	210
成型日期	2019.01.22	检测日期	2019.02.19	龄期/d	28
养护条件	破坏荷载/kN	抗压强度/MPa	强度代表值/MPa	折合标准试块强度/MPa	达到设计强度/%
标准养护	1084.1	48.2	48.9	48.9	122
	1092.6	48.6			
	1125.8	50.0			

取样单位	上海公路桥梁（集团）有限公司	取样人及证书编号	耿卫国 5219
见证单位	中铁武汉大桥工程咨询监理有限公司	见证人及证书编号	王亚红 32615
检测方法	JTG E30-2005	评定依据	—
说明	未经本检测机构批准，部分复制本检测报告无效。（电脑员号：2）		
检测机构信息	1. 检测机构地址：阜新路281号 2. 联系电话：35013988 3. 邮编：200092		
备注			

检测机构专用章: [Red Seal] 批准/审核: [Signatures] 检测: [Signature]

►设计验算公式与试验结果的对比

• 抗弯承载能力对比

分析原型墩，在原型轴向力10456KN作用下，根据参考JTG 3362计算得到的破坏弯矩数值；

经过试验结果与规范公式结果对比表明，在给定轴向力作用下，规范公式分析的承载能力弯矩数值计算结果比试验结果S1~S6偏小（6%至15%）。

序号	原型墩	原型墩描述	承载能力弯矩	轴向力(KN)	计算长度(m)
			III (KN.m)		
1	S1	现浇空心墩柱（无实心段）	24500	10456	9.6
2	S2	现浇空心墩柱（带实心段）	24500	10456	9.6
3	S3	预制空心桥墩（无实心段）	24500	10456	9.6
4	S4	预制空心桥墩（实心段预制）	24500	10456	9.6
5	S5	壁厚加厚预制空心桥墩	22500	10456	9.6
6	S6	大剪跨比预制空心桥墩	23500	10456	18.72
7	S7	小剪跨比预制空心桥墩	24500	10456	3.78

►设计验算公式与试验结果的对比

• 裂缝宽度对比

参考JTG 3362-2018规范6.4.3条，裂缝宽度影响系数包括钢筋应力、最外排钢筋保护层厚度 c 、纵向受拉钢筋直径，以及纵向受拉钢筋的有效配筋率。

实验模型中应力与实际结构的比值为1:1；配筋率比值1:1；保护层厚度 c ：原型结构74mm，试验模型37mm；钢筋直径 d ：原型结构40mm，试验模型20mm；

因此，按照规范条文计算，同样应力作用下，原型结构裂缝宽度/试验模型裂缝宽度=2。

考虑到试验中，肉眼可观察到的裂缝范围一般为0.02至0.06mm，我们假设观测到的开裂弯矩我们按照0.06mm取值，对应于实际结构为0.12mm，如果考虑长期影响系数1.5，即为0.18mm。

在弯矩在14000KN.m时，按照规范尚不需要验算裂缝，超过该数值时，裂缝宽度接近0.5，远大于观测到的裂缝宽度。而14000KN.m的弯矩数值与S1-S6试验模型中的数值比值在0.93至1.17之间，说明针对这些模型，按照开裂弯矩验算阈值控制设计方案基本可靠。对于小剪跨比(1:1)模型，开裂弯矩只有大剪跨比一半左右，通过计算弯曲应力计算裂缝的方式不可靠。

设计验算



设计验算公式与试验结果的对比

破坏剪力对比

(1) CJJ 166-2011 城市桥梁抗震设计规范7.4.2条计算

计算数值9073KN, 比试验值高出18%

矩形截面		
A_v	4.52	cm ²
b	2500	cm
s	10	cm
$\rho_s = \frac{4A_v}{bs}$	7.24E-04	
μ_s		
f_{yh}	280	Mpa
f_{cd}	18.4	Mpa
μ_d	2.98	
$\lambda = \frac{\rho_s f_{yh}}{10} + 0.38 - 0.1\mu_d$	0.10	λ
A_s	33600	cm ²
P_c	10456	KN
A_c	26880	cm ²
$v_c = \lambda(1 + \frac{P}{1.38 \times A_c}) \sqrt{f_{cd}}$	0.54	
h_0	2450	cm ²
$V_s = 0.1 \times \frac{A_s f_{yh} h_0}{s}$	9224.19	KN
$V_c = 0.1 v_c A_c$	1450.45	KN
$V_u = \phi(0.1 v_c A_c + 0.1 \times \frac{A_s f_{yh} h_0}{s})$	9073.44	KN

(2) JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

为实验值试验值96%. 与实验结果对比效果较好

第5.2.9条	
矩形、T形和工字形截面的受弯构件，斜截面承载力计算：	
采用公式	$\gamma_0 V_d \leq V_{cs} + V_{sb}$
	$V_{cs} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 0.45 \times 10^{-3} b h_0 \sqrt{(2+0.6P)} \sqrt{f_{cu} \rho_s f_{yk}}$
	$P = 100\rho$
	$\rho = (A_p + A_{ps} + A_s) / b h_0$
输入数据：	
Vd=	0 KN
fcu,k=	40 MPa
b=	2500 mm
h0=	2500 mm
γ0=	1.0
a1=	1.0
a2=	1.0
a3=	1.1
Ap=	0.0 mm ²
Apb=	0.0 mm ²
As=	0 mm ²
fsyk=	280 MPa
调整数据：	
箍筋d=	12 mm
支数n=	4 mm
Sv=	100 mm
面积	3360000.0 mm ²
输出数据：	
ρ=	0
P=	0
ρsv=	0.0057
Vcs=	7443 KN

验算方法和结论

• 承载能力验算

JTG 3362-2018规范5.2.2条验算抗弯

JTG 3362-2018规范

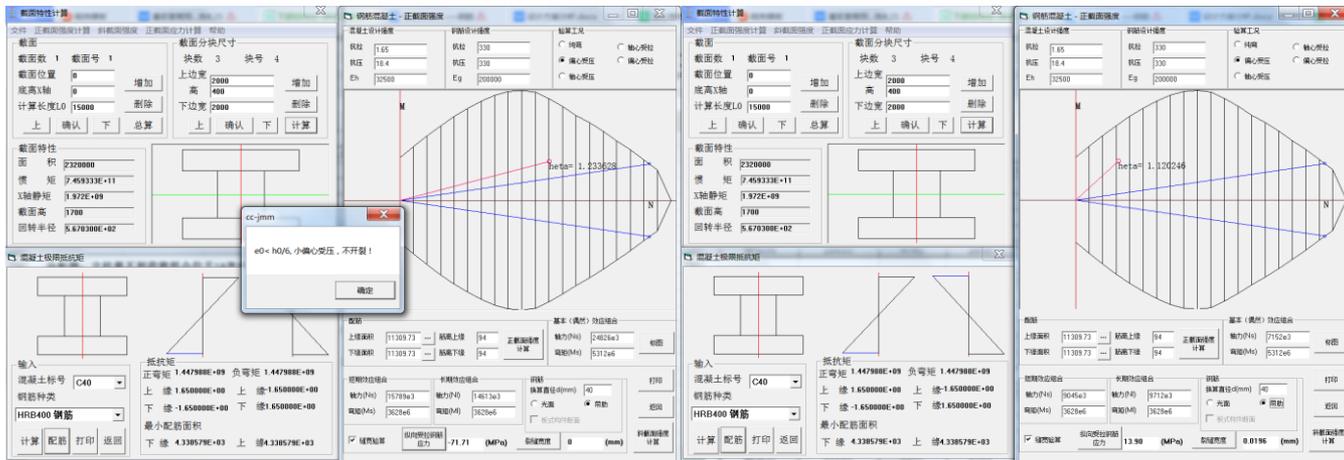
• 裂缝宽度验算

当矩形、T形和I形截面偏心受压构件满足 $e_0/h \leq 0.55$ ，或圆形截面偏心受压构件满足 $e_0/r \leq 0.55$ 时，可不进行裂缝宽度验算。

是否需要抗裂验算

B	H	e/h(顺桥向)	0.20
2	2	e/h(横桥向)	0.13

结论：由以上得，立柱正截面强度满足规范要求。e/h<0.55,立柱抗裂验算满足规范要求。



The screenshots show the software interface for calculating the cross-section properties and strength of a reinforced concrete column. The interface includes input fields for section dimensions (width B, height H, effective depth Eh), material properties (concrete strength fcd, steel yield strength fyk), and loading (axial force N, bending moment M). The results section displays the calculated section properties (area, inertia, centroidal axes) and the final design values for axial force and bending moment. A warning dialog box is visible, indicating that the eccentricity ratio e0/h is less than 0.55, and therefore, no crack width calculation is required.

空心桥墩——结论



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY

- 1) 矩形空心墩首条裂缝均出现在承台和墩身的交界处。矩形空心墩达到极限状态时，箍筋和拉筋出现较大变形或断裂现象，核心混凝土压碎。灌浆套筒预制拼装桥墩中的纵筋会发生较大弯曲剪切变形，甚至拉断剪断。
- 2) 墩底实心段的构造和增加壁厚会缓解两侧腹板混凝土剥落范围。空心截面抗剪能力较实心桥墩有一定程度削弱。
- 3) 剪跨比为1的试件套筒下方的纵筋也没有发生剪切变形，原因是墩底与承台保持全截面接 触，抗剪能力强，剪切变形集中在墩身。剪跨比为2的试件套筒下方的纵筋发生严重剪切变形，甚至剪断，主要原因是变形较大时，塑性铰区混凝土开裂压碎，同时受弯变形后空心桥墩与承台接触面积减小，导致抗剪能力显著下降。
- 4) 混凝土墩底实心段的设置对提高整体现浇桥墩和灌浆套筒预制拼装桥墩的延性是有利的。提高壁厚可以缓解受压区混凝土的压碎，提高截面承载力，提高预制拼装桥墩的延性。
- 5) 单排配筋灌浆套筒预制拼装空心桥墩与同样构造的整体现浇桥墩的裂缝特征和破坏模式不同，但是承载力特征值接近，延性略差，是可行的预制拼装桥墩方式。**塑性铰区域设置实心段、局部壁厚加厚、增加配箍率**等对改善受力性能是有益的。
- 6) 预制空心桥墩设计**可参考现有规范公式**，通过验算，本桥的预制桥墩设计满足要求。

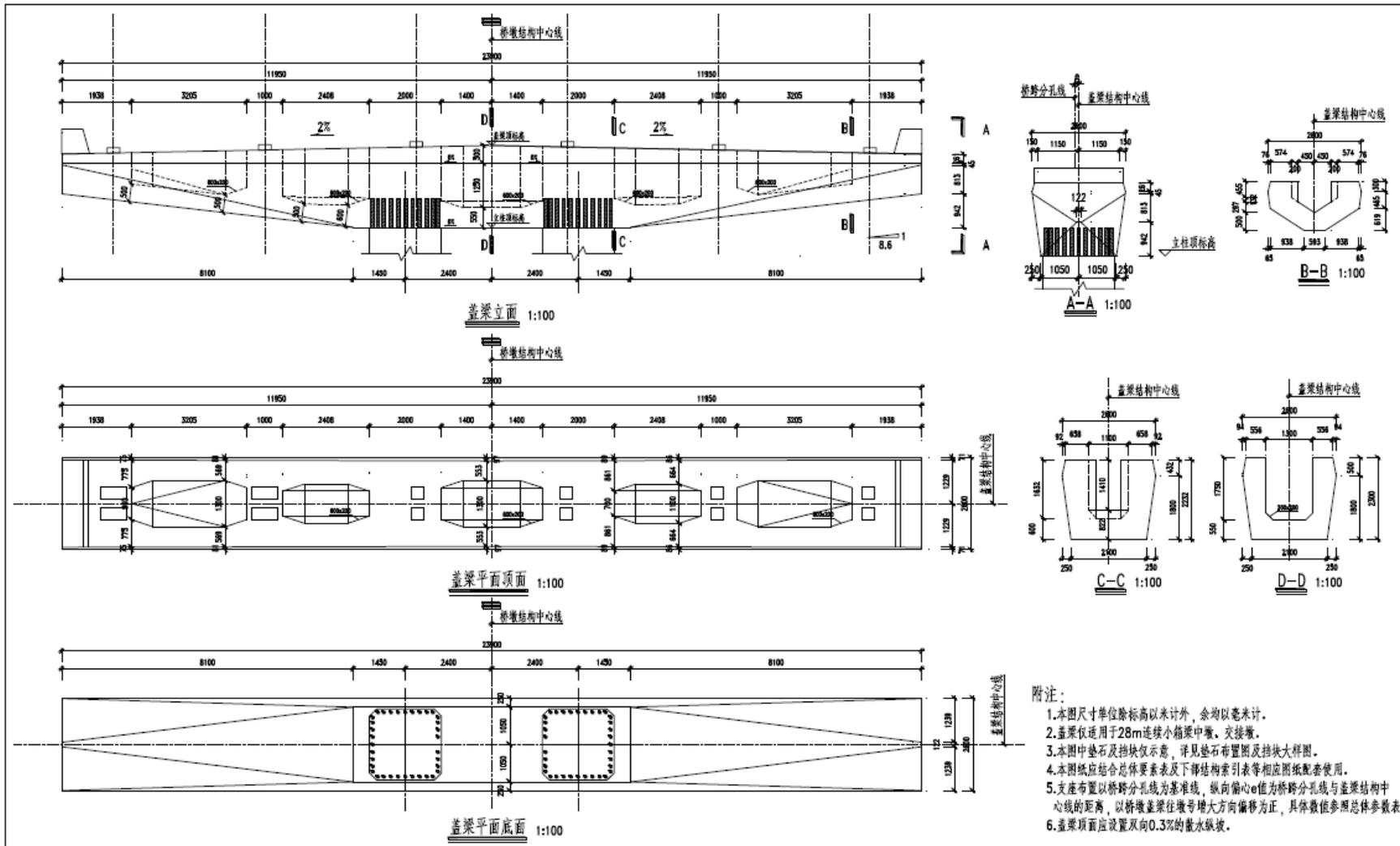


第四部分 工程应用

工程应用——构造方案



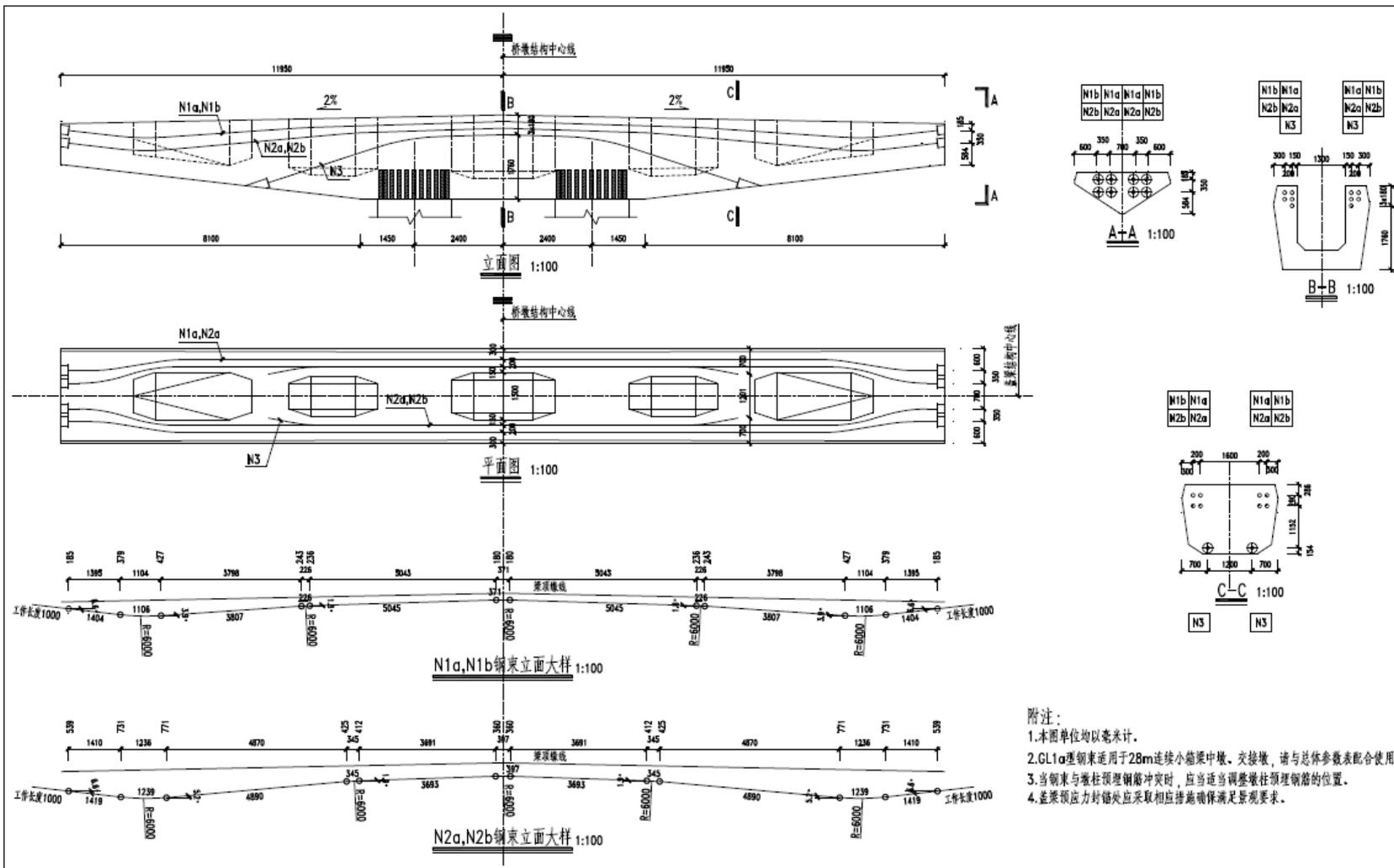
南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



工程应用——构造方案

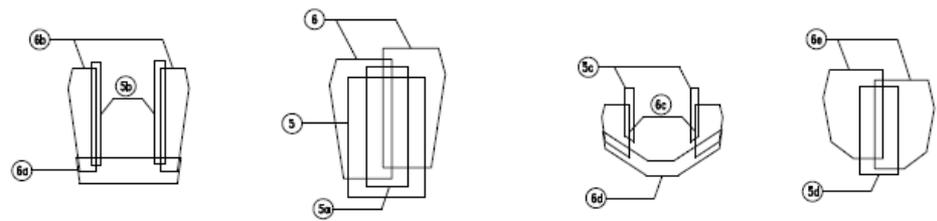
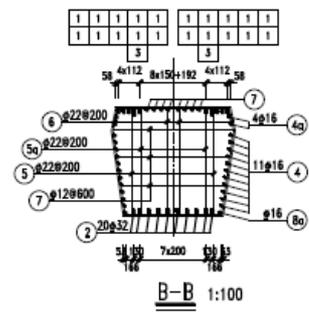
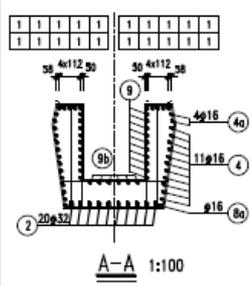
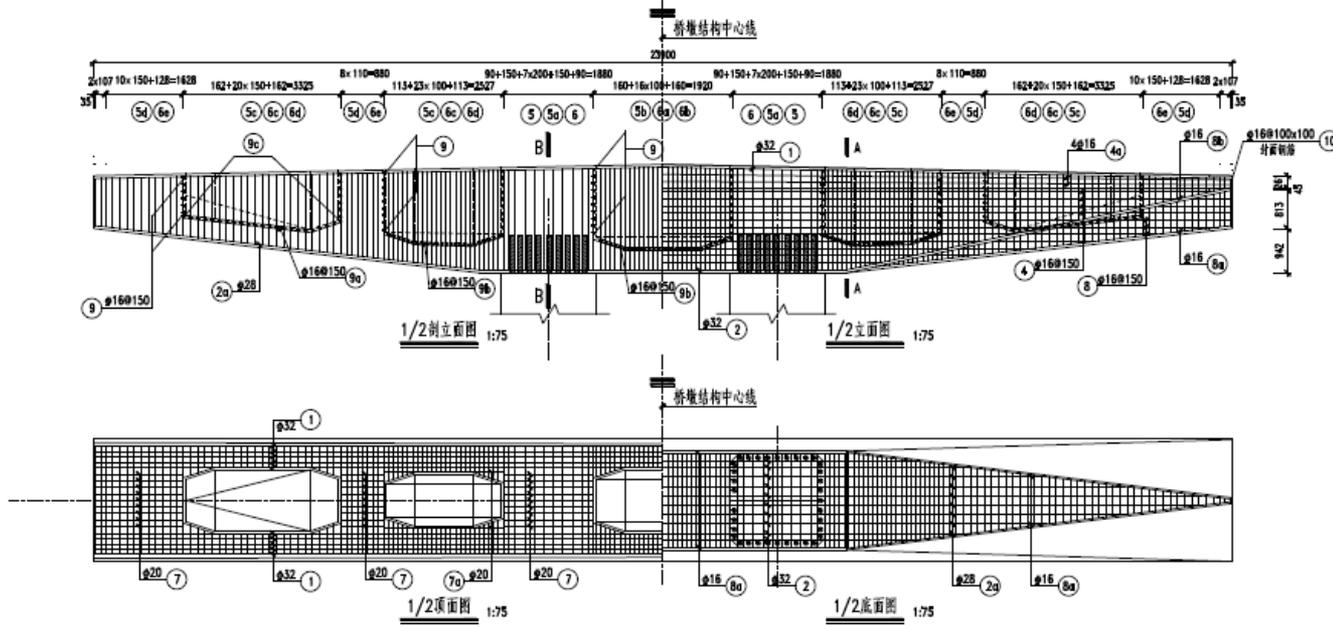


南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



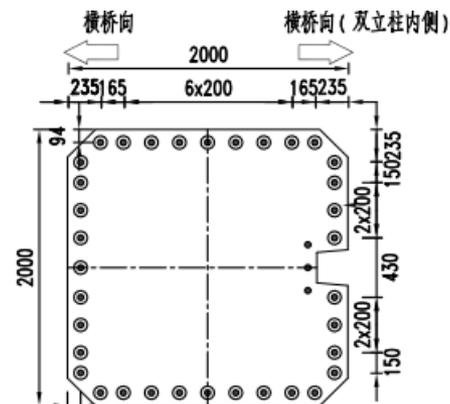
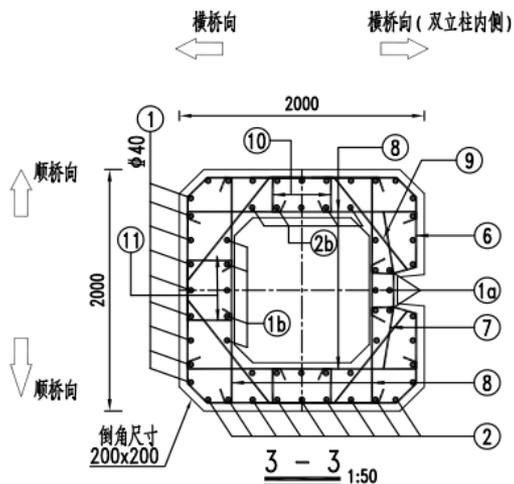
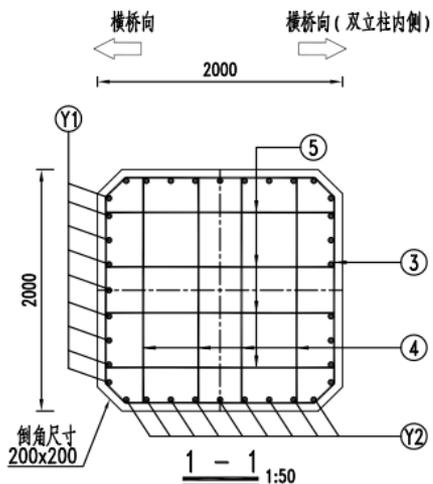
附注:

1. 本图单位均以毫米计。
2. GL1a型钢束适用于28m连续小箱梁中墩、交接墩，请与总体参数表配合使用。
3. 当钢束与墩柱预埋钢筋冲突时，应当适当调整墩柱预埋钢筋的位置。
4. 盖梁预应力锚固应采取相应措施确保满足景观要求。

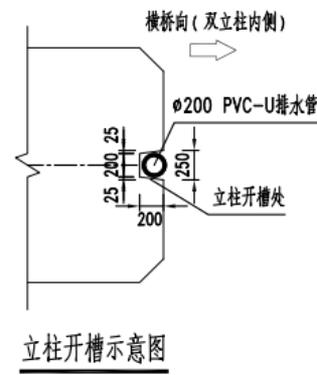
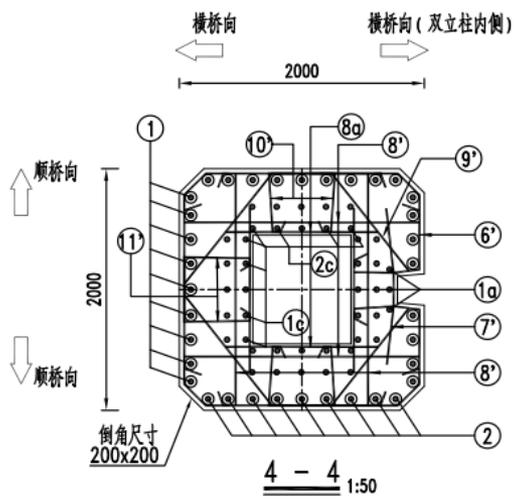
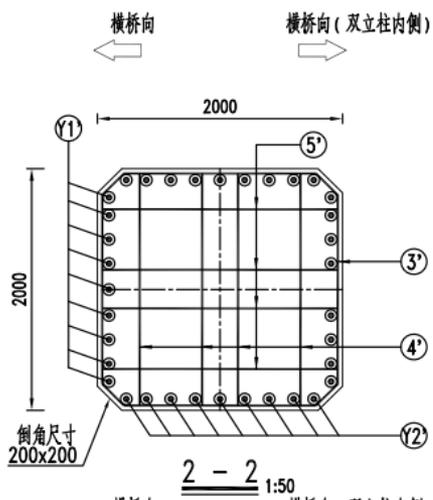


- 附注:
- 1.本图尺寸单位除标高以米计外,余均以毫米计。
 - 2.GL1型标准盖梁适用于25.5m标准桥宽,具体适用墩号详见总体参数表。
 - 3.本图中垫石及挡块仅示意,详见垫石布置图及挡块大样图。
 - 4.本图纸应结合总体要素表及下部结构索引表等相应图纸配套使用。
 - 5.支座布置以桥跨分孔线为基准线,纵向偏心e值为桥跨分孔线与盖梁结构中轴线的距离,以桥墩盖梁往墩号增大方向偏移为正,具体数值参照总体参数表。
 - 6.盖梁顶面应设置双向0.3%的排水纵坡。

工程应用——构造方案



94 立柱主筋定位布置



立柱开槽示意图

➤ 预制拼装空心桥墩的应用

➤ 示范工程-绍兴越东路

建造工艺-开发了内膜系统

建造成本-不高于实心立柱

碳排放-节约混凝土40%，
每根立柱降碳排放6t。



工程应用——空心盖梁

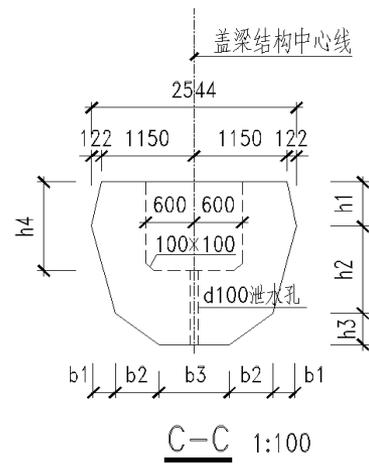
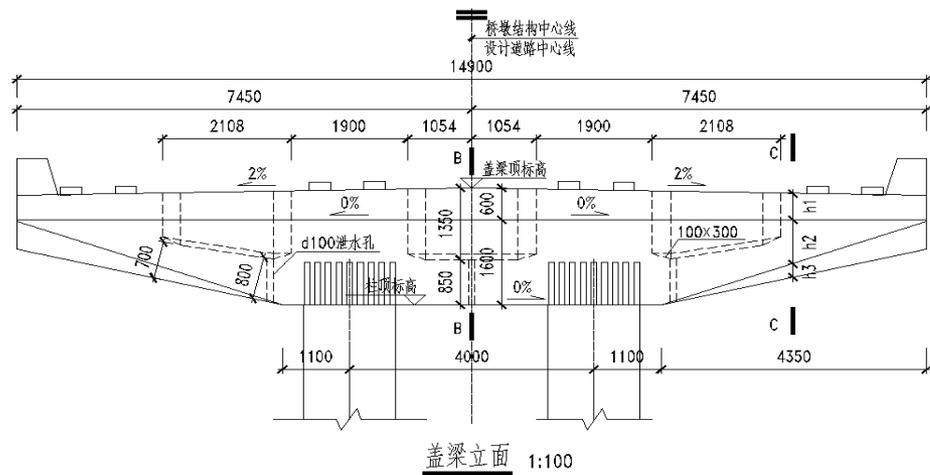


南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY

示范工程-绍兴绿云路

已完成施工图设计

节约混凝土25%



汇报结束

谢谢！