

预应力碳纤维布与钢板复合加固混凝土受弯构件

翟爱良¹, 刘春伟¹, 王东海²

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 济宁市水利工程施工公司, 山东 济宁 272000)

摘要: 为提高碳纤维布利用程度,改善被加固混凝土受弯构件的受力性能,提出采用粘贴预应力碳纤维布和粘贴钢板复合加固技术. 简单介绍了对碳纤维布具有张拉与锚固功能的新型“拉锚一体化”技术和机具,对5根不同加固情况的混凝土梁进行静力加载试验,观察、分析了不同加固情况构件的破坏过程、正截面受弯承载力、荷载-挠度曲线、裂缝开展情况及破坏现象,分析这种复合加固方法的受力特点以及所加固梁的受力性能,提出了具有一定工程实用价值的技术方法与建议.

关键词: 混凝土梁; 钢板; 复合加固; 碳纤维布; 预应力

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)03-0014-07

由于碳纤维材料本身的原因,仅能作为受拉材料承受混凝土梁受拉区的拉应力,对提高受压区混凝土的强度几乎起不到任何作用. 对于钢筋混凝土受弯构件,在截面尺寸、配筋及材料一定的情况下,其正截面极限承载力是一定的,在受拉钢筋数量不足的情况下,粘贴碳纤维可以提高构件的承载力,但如果受拉区粘贴加固碳纤维的数量过多,则截面破坏将开始于受压区混凝土,过多的碳纤维不能发挥其作用. 因此,截面尺寸受限情况下,在受拉区粘贴碳纤维对提高构件正截面强度的幅度是有限的. 如果在受弯构件的受压区适当粘贴部分钢板,协助受压区混凝土受压,则可以提高受压混凝土的极限压应变,从而显著提高构件的承载力.

和非预应力碳纤维相比,预应力碳纤维结合了被动粘贴碳纤维体系和体外预应力,可以减小变形,延缓裂缝的发生,有效减小裂缝开展宽度;更加有效地利用混凝土和碳纤维材料;进一步提高受弯构件正截面极限承载能力. 但现在所用的碳纤维预应力张拉机具设备笨重、复杂、价高且不能曲面加固,实用性不强. 本文在研究分析现有文献^[1-8]及目前国内外已经开发出的几种用于混凝土梁抗弯加固碳纤维预应力体系的基础上,面向实际工程应用,研制开发了具有较好实用价值的新型旋转张拉“拉锚一体化”设备和技术,并提出采用粘贴预应力碳纤维布和粘贴钢板复合加固来提高混凝土受弯构件的受力性能.

1 新型“拉锚一体化”技术和机具简介

“拉锚一体化”装置同时对碳纤维布具有张拉与锚固功能. 底座两端设有侧板,侧板上设有可绕自身轴心旋转的钢辊;钢辊两轴端伸出侧板,其中一端为呈规则形状的旋紧端,可拉紧碳纤维布达到所需的预紧力,另一端设有螺纹和螺母. 钢辊沿轴向方向设有一凹槽,凹槽内设有压条,压条的两端设有螺栓,可连接钢辊. 底座上设有钢辊卡紧装置,侧板上设有穿筋孔,穿筋孔内设有销栓,销栓卡紧钢辊. 底座上还设有整体固定附着装置-夹板,夹板通过螺栓与底座连接. 钢辊上设有的凹槽和压条可以将碳纤维布压在凹槽内,两边的螺栓可进一步压实碳纤维布以防从锚具中滑脱. 同时,压条和凹槽使碳纤维布整体受力均匀,不会出现集中应力致使碳纤维布损坏的现象. 卡紧装置可在旋转拉紧碳纤维布后将钢辊固定卡紧,有效防止钢辊转动从而保

收稿日期: 2008-09-28

基金项目: 山东省教育厅资助项目(J05F03)

作者简介: 翟爱良(1963-),男,山东成人,教授,主要从事结构工程鉴定与加固工作. E-mail: zhaial@sdau.edu.cn

证张紧的预应力.整体附着装置可以将拉锚一体化装置锚固在需进行加固的混凝土结构上,即通过在结构端部植筋,在被加固构件底部两端安置固定专用“拉锚一体化”设备.

实际工程中,可在混凝土受弯构件两端打孔植筋以固定机具.在张拉之前将碳纤维布根据加固量大小先把碳纤维布裁剪成60 mm整数倍宽度的长条,或以60 mm叠加数层,然后在混凝土梁底面把碳纤维布铺放平整,各层布应叠加整齐,中间无空隙,每层布都要涂刷浸渍胶.进行预拉力施加作业时,将碳纤维布两端分别缠绕旋转轴0.5~1周并用压条压紧,压条两端用螺栓固定以防滑脱.

与目前国内外已经开发出的几种碳纤维布预应力机具和技术^[1-7]相比,“拉锚一体化”技术及机具具有更适合结构截面为圆形或者复杂曲线形的加固,同时具有机具小巧,加工方便、质量轻等优点^[9-11].

2 试验概况

2.1 试件制作及试验设计

本次试验共设计了5根试件,所有试件混凝土采用C20,纵筋采用 $2\Phi 12$ 钢筋,纵筋配筋率为0.7%,箍筋采用 $\Phi 8@100$ 钢筋,配箍率0.67%,架立筋 $2\Phi 8$,截面采用250 mm×150 mm矩形截面,梁长2 500 mm,经截面验算不会先发生斜截面剪切破坏.各试件加固情况见表1.

表1 加固方案

Tab.1 Blue print table of reinforcements

试件编号	加固方式	加固量	备注
B1	未加固	-	对比梁
B2	受拉区底面粘贴CFRP,U型锚固	3层CFRP	不施加预应力
B3	受拉区底面粘贴CFRP,预应力拉锚一体化机具张拉	3层CFRP	施加预应力
B4	受拉区底面粘贴CFRP,受压区两侧粘贴25 mm钢板	3层CFRP+25 mm钢板(两侧)	不施加预应力
B5	受拉区底面粘贴预应力CFRP,受压区两侧粘贴25 mm钢板	3层CFRP+25 mm钢板(两侧)	施加预应力

各加固混凝土梁底部均粘贴的碳纤维长1 800 mm,宽180 mm(总宽180 mm,按60 mm折叠3层,见图1).非预应力碳纤维加固梁(B2,B4)在两端均采取3道U型箍锚固,箍长65 cm,宽5 cm,在锚固区均匀布置,间距10 cm.普通碳纤维布粘贴施工工序均按照现行标准操作规程进行.对预应力碳纤维加固梁(B3、B5),采用自行开发的“拉锚一体化”机具对碳纤维布施加张拉力,张拉控制应力为其极限抗拉强度标准值的25%,张拉应力值均控制在1 001 MPa.对碳纤维张拉完成后,机具自动形成锚固.所粘贴的碳纤维布尺寸、非预应力碳纤维加固梁对碳纤维布的锚固方式、复合加固梁受压区两侧粘贴钢板方式及试验所用碳纤维布、粘贴碳纤维用粘结胶、粘贴钢板用建筑结构胶等均参见文献[11].钢板粘贴位置见图2.

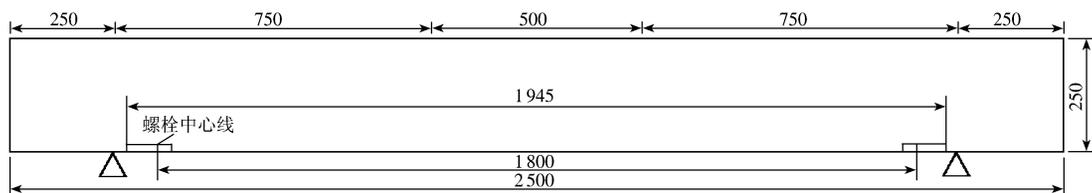


图1 碳纤维加固位置示意图(单位: mm)

Fig.1 Sketch map of CFRP on the position of girder (unit: mm)

碳纤维布断裂,梁底有混凝土碎屑掉落,同时跨中截面上部混凝土有压碎现象.梁 B4,加载至 22 kN,在距离中心 15 cm 处出现毛细裂缝,随着荷载的不断增大,此裂缝宽度明显变大,裂缝条数增多.加载至 54.2 kN,百分表读数突然变化较快.加载至 82.6 kN 时,百分表指针剧烈转动,挠度急剧增大,碳纤维布断裂,梁底有混凝土碎屑掉落,端部 U 型箍也出现破坏.同时跨中附近截面上部混凝土有压碎现象,受压钢板屈曲剥离.梁 B5,加载至 25.6 kN,在中心处出现毛细裂缝,加载至 59.8 kN,百分表读数突然变化较快.加载至 88.4 kN 时,梁左端碳纤维布断裂,梁右端出现剥离,梁底有混凝土碎屑掉落.同时跨中右 8 cm 处截面上部混凝土有压碎现象,受压钢板屈曲剥离,主要裂缝基本均匀分布.

3.2 试验结果分析

各梁受弯承载力试验结果见表 2. 由表 2 可见,粘贴碳纤维布的混凝土梁无论是否采用预应力,开裂荷载、屈服荷载(钢筋屈服时荷载)、极限荷载都有很大提高.

表 2 各梁受弯承载力试验结果

Tab.2 Experiment result of each girder carrying capacity

构件编号	开裂荷载		屈服荷载		极限荷载	
	试验值/kN	提高幅度/%	试验值/kN	提高幅度/%	试验值/kN	提高幅度/%
B1	15.8		29.6		40	
B2	20	26.58	45	52.03	61.6	54.00
B3	24	51.90	49	65.54	74.4	86.00
B4	22	39.24	54.2	83.10	82.6	106.50
B5	25.6	62.03	59.8	102.0	88.4	121.00

各混凝土梁的荷载-挠度曲线见图 4. 可见,加固后混凝土梁的极限承载能力提高而挠度减小,从反映其刚度变化的挠度曲线的斜率来看,在 20 kN 以内时,所有加固梁的变化趋势基本都是线性的,其刚度与对比梁的差别不大.但随荷载的增加,由于混凝土开裂,加之碳纤维布与混凝土之间的相互作用,使得试件刚度降低.预应力碳纤维加固梁 B3、B5 刚度增大,并且梁 B3 荷载挠度曲线后期较平缓,破坏呈明显的延性,说明预应力减缓了混凝土裂缝的开展,加固后的梁延性较好.从整个曲线图看,各混凝土梁在使用荷载阶段,斜率变化不大,说明加固梁中粘贴碳纤维布和钢板在荷载较小时并不起很大作用,随着荷载的增大,碳纤维布和钢板才充分发挥其补强作用.

试验过程中通过 XL3403G 静态应变数据采集分析系统收集的钢筋应变见图 5. 从图 5 可见,钢筋混凝土梁经碳纤维布加固后,承载能力提高,纵筋应变变小,说明承载力由碳纤维布和钢筋共同承担.从曲线斜率看,在 20 kN 以内,加固梁的钢筋应变变化基本呈线性.但随着荷载的增加,混凝土开裂,受拉区混凝土退出工作,荷载主要由碳纤维布和钢筋承担,钢筋应变变化缓慢,梁 B2、B3、B4、B5 曲线斜率比 B1 小,随着荷载增加,变化趋势都比较平缓,梁 B1 钢筋应变变化曲线陡且直.预应力加固梁 B3、B5 钢筋应变与其他梁相比,在同等荷载下,预应力梁钢筋应变较小,说明预应力使钢筋应变变化减缓.

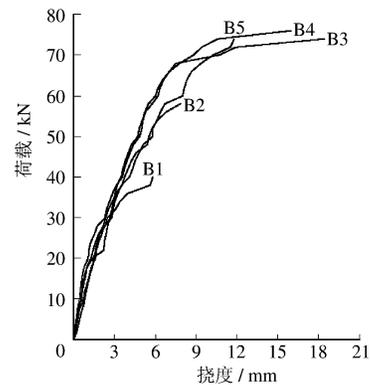


图 4 荷载-挠度曲线

Fig. 4 Curves of load-deflection

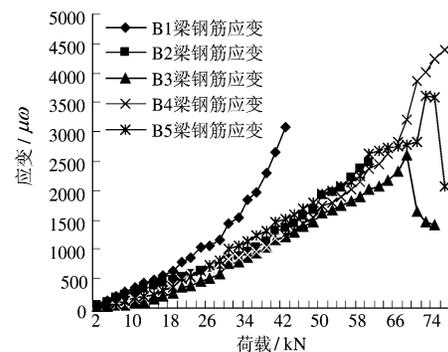


图 5 钢筋应变曲线

Fig. 5 Strain results of steel bar

各混凝土梁的荷载-碳纤维布应变曲线见图6。由图6可见,梁B3、B5的碳纤维布应变比其他梁大,说明经预应力加固后更快更好地发挥了碳纤维布的高强性能。加载初期,碳纤维布应变随荷载增加呈线性变化,随着混凝土梁开裂,受拉区混凝土退出工作,碳纤维布承担更多的荷载,应变急剧变化。

各混凝土梁的荷载-钢板应变曲线见图7。从图7可见,随着荷载的增加,粘贴钢板的应变逐渐增大,梁B5钢板的应变大于梁B4,由于预应力的作用,钢板承担了更多荷载。

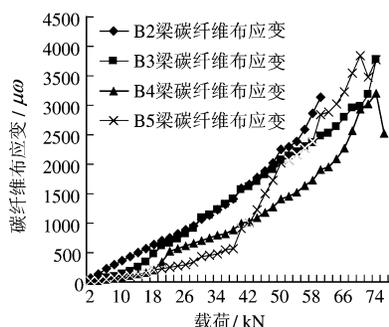


图6 碳纤维布应变比较

Fig. 6 Comparison of the strain results of CFRP

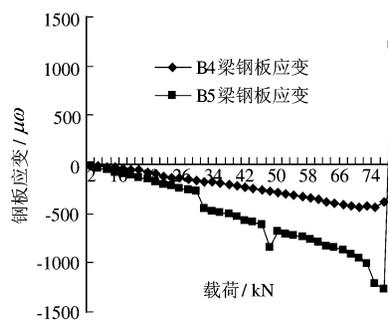


图7 荷载-钢板应变曲线

Fig. 7 Curves of load-steel plate strain

3.3 裂缝开展情况

试验全过程观察了梁的裂缝开展情况。随着荷载的增加,所有的试验梁均在纯弯段出现明显的纵向裂缝。B2梁在20 kN时开裂,B4梁在22 kN时开裂,均比B1梁15.8 kN开裂晚。B3梁开裂荷载为34 kN,B5梁开裂荷载为32 kN。预应力碳纤维布加固梁第一条裂缝出现后,裂缝呈毛细状态,裂缝宽度发展比较慢,开裂一段时间后,主要裂缝宽度才明显增大,荷载从24 kN加至34 kN,对比梁B1主要出现4条裂缝,裂缝间距较大。梁B3自开裂后,在同等荷载阶段,梁出现7条裂缝,最大裂缝宽度为0.15 mm,裂缝间距平均9 cm,与对比梁B1比较,裂缝较多、分布较密。梁B5自开裂后,荷载从22 kN增至34 kN,出现7条裂缝,最大裂缝宽度发展较小,仅为0.2 mm,裂缝间距8 cm。

试验结果表明,采用预应力碳纤维及复合加固后混凝土梁裂缝间距比较均匀,非预应力碳纤维布加固梁裂缝出现均对比梁晚;预应力碳纤维布加固梁裂缝出现也对比梁晚,与非预应力碳纤维布加固梁比较,开裂荷载进一步提高。相对于对比梁B1,普通碳纤维布加固的梁B2开裂荷载有所提高,由于碳纤维布的高强性能,也能有效抑制裂缝的开展。加固后梁的裂缝形态比梁B1有良好改善,具体表现为裂缝数量增多、裂缝间距变小、裂缝宽度减小。钢筋屈服后,对比梁B1的裂缝长度迅速延伸、宽度加宽,而复合加固后的构件,钢筋屈服后裂缝的长度和宽度增加速度明显减慢。

对碳纤维布施加预应力后,碳纤维布的高强性能得到进一步发挥,复合加固的混凝土梁对裂缝的抑制能力得到进一步增强,延缓了裂缝的出现时间及其宽度开展。相对于非预应力加固梁,复合加固梁B5第1条裂缝出现后,无论裂缝宽度和长度都开展较慢,最终破坏时梁B3、B5的裂缝分布更为均匀对称,裂缝间距小于非预应力加固梁。梁出现裂缝时,裂缝与构件轴线垂直,随着荷载的增加,毛细裂缝增多。经复合加固后,梁的整体刚度有所增强,梁的整体受力性能得到改善,从而使裂缝的分布更均匀,预应力则有效推迟了剪弯区裂缝的出现和发展。

4 结 语

(1) 研究开发的新型“拉锚一体化”技术和机具适合对碳纤维布张拉和锚固,张拉效率高,施工操作也比较方便,成本较低,具有较强的实用性;

(2) 预应力碳纤维布加固梁与非预应力碳纤维布加固梁相比,开裂荷载、屈服荷载均显著提高;复合加

固梁与仅粘贴碳纤维布单一材料加固梁相比,极限承载力显著提高,开裂荷载、屈服荷载均有一定程度提高;

(3)采用预应力碳纤维可有效延缓裂缝开展,减小裂缝宽度,预应力还能增加梁的刚度,减小变形;

(4)受压区粘贴钢板可以充分发挥其抗压作用,且与粘贴碳纤维布两种材料能够很好地一起共同工作,发挥各自的受力性能;

(5)预应力碳纤维布与钢板复合加固的混凝土梁,受拉碳纤维布应变随荷载增加较快,表明碳纤维布更早、更多地参与受力,可以更好地发挥碳纤维布的高强性能。

参 考 文 献:

- [1] 张 轲,叶列平,岳清瑞. 预应力碳纤维布加固混凝土梁截面应力及抗弯刚度[J]. 建筑结构, 2006, 36(12): 70-74. (ZHANG Ke, YE Lie-ping, YUE Qing-rui. Analysis on stress and short-term flexural stiffness of strengthened RC beam prestressed with CFRP sheets[J]. Building Structure, 2006, 36(12): 70-74. (in Chinese))
- [2] 叶列平,庄江波,曾 攀,等. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 T 型梁的试验研究 [J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 7-12. (YE Lie-ping, ZHUANG Jiang-bo, ZENG Pan, et al. Experimental study on T-reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 7-12. (in Chinese))
- [3] 张 轲,叶列平,岳清瑞,等. 预应力碳纤维布加固混凝土梁弯曲疲劳性能试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 13-19. (ZHANG Ke, YE Lie-ping, YUE Qing-rui, et al. Experimental study on flexural fatigue behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP sheets[J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 13-19. (in Chinese))
- [4] 庄江波,叶列平,鲍轶洲,等. 碳纤维布加固混凝土梁的裂缝分析与计算[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(1): 86-91. (ZHUANG Jiang-bo, YE Lie-ping, BAO Yi-zhou, et al. Crack width of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(1): 86-91. (in Chinese))
- [5] 亓路宽,杨友林,张治华,等. 部分粘贴 CFRP 加固钢筋混凝土梁的试验研究[J]. 公路, 2007(10): 21-26. (QI Lu-kuan, YANG You-lin, ZHANG Zhi-hua, et al. Experiment and study on RC beams strengthened by bonding CFRP partially [J]. Highway, 2007(10): 21-26. (in Chinese))
- [6] 彭飞飞,江世永,飞 渭. 预应力碳纤维布加固混凝土梁不卸载时的抗弯承载力[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 60-63. (PENG Fei-fei, JIANG Shi-yong, FEI Wei. Load capacity of resisting bend of concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets when it is not uninstalled [J]. Building Science Research of Sichuan, 2003, 29(3): 60-63. (in Chinese))
- [7] 尚守平,彭 晖,童 桦,等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 24-30. (SHANG Shou-ping, PENG Hui, TONG Hua, et al. Study of strengthening reinforced concrete beam using prestressed carbon fiber sheet[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 24-30. (in Chinese))
- [8] 彭 晖,尚守平,王海东,等. 用预应力 CFRP 对 RC 梁的加固工艺研究[J]. 建筑技术开发, 2003, 30(5): 21-23. (PENG Hui, SHANG Shou-ping, WANG Hai-dong, et al. Technology study of strengthening RC beam using prestressed CFRP [J]. Building Technique Development, 2003, 30(5): 21-23. (in Chinese))
- [9] 刘春伟,翟爱良. 预应力 CFRP 与钢板复合加固混凝土受弯构件的正截面承载力试验研究[J]. 建筑技术开发, 2008(9): 3-5. (LIU Chun-wei, ZHAI Ai-liang. Utilization level and carrying capacity of flexural reinforced concrete member's right section strengthened with CFRP[J]. Building Technique Development, 2008(9): 3-5. (in Chinese))
- [10] 翟爱良,刘春伟. 新型技术预应力碳纤维布加固梁裂缝与刚度分析计算[J]. 建筑技术开发, 2008(10): 1-3. (ZHAI Ai-liang, LIU Chun-wei. Analyzing crack and stiffness of strengthening reinforced concrete beam using new technique prestressed carbon fiber sheet[J]. Building Technique Development, 2008(10): 1-3. (in Chinese))
- [11] 翟爱良,刘春伟,王东海,等. 粘贴 CFRP 与粘贴钢板复合加固混凝土梁正截面承载力分析[J]. 山东农业大学学报, 2009, 40(1): 119-123. (ZHAI Ai-liang, LIU Chun-wei, WANG Dong-hai, et al. The analyse of reinforced concrete member's positive section carrying capacity which is strengthened with CFRP and armor plate [J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2009, 40(1): 119-123. (in Chinese))

Concrete structural element in bending strengthened by prestressed CFRP and steel plate composite

ZHAI Ai-liang¹, LIU Chun-wei¹, WNAG Dong-hai²

(1. *Water Conservancy and Civil Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China*;
2. *Jining Water Engineering Co., Jining 272000, China*)

Abstract: For improving the utilization level of CFRP and enhancing the mechanical capability of ruggedized concrete structural element in bending, a method of composite strengthening technology of prestressed CFRP and steel plate is put forward, and the stretching and anchor integration technology and the apparatus which can complete the corresponding functions are introduced. A static load test is fulfilled by use of five concrete girders under different strengthening conditions, and the failure process, bearing capacity of positive section, load-deflection curves and cracks' developing of concrete girder are observed and analysed in the test. More over, the stressing characteristic of the composite strengthening method and mechanical capability of the strengthened concrete girder is studied. Finally this paper provides the technical method and suggestions which are of practical use to engineering to projects.

Key words: concrete girder; steel plate; composite strengthen; CFRP; prestress

长江三峡工程正常蓄水(175米水位)验收会议在宜昌召开

2009年8月27日,长江三峡三期工程枢纽工程正常蓄水(175米水位)验收会议在湖北省宜昌市三峡工地召开。国务院三峡工程建设委员会副主任、中国长江三峡工程开发总公司总经理李永安讲话。枢纽工程验收组副组长、交通运输部副部长徐祖远主持开幕式。枢纽工程验收组副组长、水利部副部长矫勇,枢纽工程验收组副组长、专家组组长、两院院士潘家铮,枢纽工程验收组副组长、国务院三峡建设委员会三峡枢纽工程稽察组组长王武龙,枢纽工程验收组专家组副组长、全国人大常委会农委副主任索丽生,枢纽工程验收组副组长、中国长江三峡工程开发总公司副总经理曹广品以及枢纽工程验收组办公室主任、水利部总工程师汪洪等出席会议。国务院长江三峡三期工程验收委员会副主任、三峡三期工程枢纽工程验收组组长、水利部部长陈雷出席会议并作重要讲话。陈雷指出,三峡工程初期运行以来发挥了显著效益。三峡工程是治理开发长江的关键性工程,也是世界上规模最为宏大的水利水电工程。三峡工程蓄水运行以来,经受了大自然的考验,发挥了巨大效益。一是防洪效益显著。二是发电效益巨大。三是航运效益突出。同时,三峡水库蓄水以来,充分利用调节库容,为下游工农业生产和生态环境的改善创造了有利条件。陈雷指出,正常蓄水(175米水位)验收意义重大,对于三峡工程这样一个巨大、复杂、事关国计民生的工程,在投入运行之前必须进行科学、严谨、全面、系统的验收。这次正常蓄水(175米水位)验收是对三峡枢纽工程建设的全面总结,是三峡工程建设的重要里程碑,具有重大的标志性意义。他强调,要以科学严谨的态度认真做好本次验收工作。要以对党、对国家和人民高度负责的精神,严谨认真的科学态度,一丝不苟的工作作风,扎扎实实地做好各项验收工作,真正做到不辱使命,使枢纽验收工作经得住大自然的考验,经得起历史的检验。陈雷最后强调,要切实加强三峡工程运行管理和库区管理。要着眼于工程长期运用,着力强化工程调度管理和运行维护,切实用好管好这一关系国计民生的重大水利水电工程,让三峡工程更好地造福中华民族。一要加强监测维护,确保三峡工程安全运行。二要优化工程调度,充分发挥三峡工程综合效益。三要掌握泥沙规律,保证水库长期运行和下游河道稳定。四要统筹开发保护,切实加强三峡库区水资源管理。

摘自《水利部网站》