

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.008

王玉孝, 沈婷, 李国英. 组合型混凝土面板堆石坝应力应变特性分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 56-62. (WANG Yuxiao, SHEN Ting, LI Guoying. Stress and deformation properties of combined CFRD[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 56-62. (in Chinese))

# 组合型混凝土面板堆石坝应力应变特性分析

王玉孝<sup>1,2</sup>, 沈婷<sup>3</sup>, 李国英<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 青海黄河上游水电公司工程建设分公司, 青海 西宁 810008; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 组合型面板堆石坝是在下游底部设置混凝土坝与面板堆石坝形成的复合坝。以某 150 m 级面板坝工程为依托, 采用三维非线性有限元方法, 系统研究了组合型面板坝堆石坝体、混凝土坝以及防渗体系的应力应变特性。结果表明, 与常规面板堆石坝相比, 该组合坝型在堆石坝体变形方面虽没有显著改变, 但由于缩短了面板和垂直缝长度, 面板应力应变状况得到了有效改善, 且通过将混凝土坝坝顶宽度设置成大于趾板宽度, 可有效避免由高趾板引起的周边缝变位过大问题。目前 200 m 级高面板坝最突出问题是面板的结构性裂缝和挤压破坏, 而该组合坝型可以有效改善面板应力状态, 为超高面板坝的建设提供了新的思路。

**关键词:** 组合面板堆石坝; 常规面板堆石坝; 应力应变特性; 有限元

**中图分类号:** TV641.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2018)05-0056-07

我国面板堆石坝的建坝水平已达到 200 m 级, 面板坝筑坝技术正在由 200 m 级向 300 m 级发展<sup>[1-4]</sup>。150 m 级面板坝技术成熟, 大坝安全可靠, 坝体实测变形与理论计算基本吻合; 200 m 级高面板坝技术渐趋成熟, 已建 200 m 级面板坝总体情况良好, 虽然不同程度地出现了面板挤压破坏、面板裂缝、坝体变形和渗漏量偏大等问题, 但通过适当工程措施后运行良好; 而 250~300 m 级面板坝, 由于 200 m 级面板坝出现的一些问题以及理论研究相对滞后, 工程界对其坝体安全性尚存一些质疑<sup>[2-5]</sup>。

由于 200 m 级面板坝存在的最突出问题是面板的结构性裂缝和挤压破坏问题<sup>[3-4]</sup>, 为了提高面板安全性, 提出了在大坝上游下部设置高混凝土坝与面板堆石坝形成组合坝的研究思路, 以期改善高面板坝面板应力状态不佳问题, 为面板坝筑坝技术发展提供新思路<sup>[6]</sup>。

## 1 组合型面板坝概况

如图 1 所示, 组合型面板坝是在大坝上游下部设置高混凝土坝, 以连接坝基和面板; 而常规面板坝则是通过设置厚度在 2 m 以内的混凝土薄板, 即趾板来连接坝基和面板。较之常规面板坝, 组合型面板坝增大了混凝土、钢筋工程量, 但减小了坝体填筑工程量, 降低了趾板岸坡高度, 从而减少了底部岸坡趾板开挖量和边坡支护工程量, 缩短了面板和接缝长度, 减少了深水面板面积, 降低了面板检修难度。目前, 虽然在不利地形地质条件时常规面板坝工程也会通过设置高趾墙来弥补地

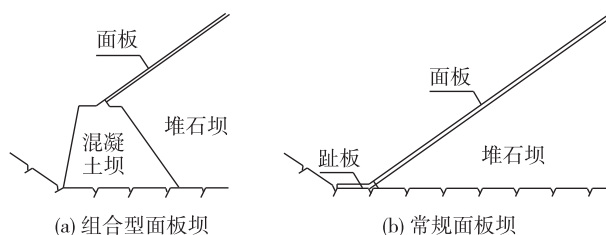


图 1 组合型面板堆石坝与常规面板坝

Fig. 1 Plinth types of combined and conventional rock-fill dams

收稿日期: 2017-11-28

作者简介: 王玉孝(1980—), 男, 甘肃庆阳人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水利水电工程建设管理和技术研究。

E-mail: 1587593166@qq.com 通信作者: 沈婷(E-mail: tshen@nhri.cn)



### 3 计算成果与分析

有限元网格划分如图 3 所示。考虑混凝土坝坝段与基岩的共同作用,基岩深度方向和上、下游方向延伸范围为 1.5 倍混凝土坝坝高。基底为固定约束,四周边界均为法向约束。

#### 3.1 堆石坝变形

堆石坝最大剖面坝左 0+174.5 顺河向水平位移和沉降分布分别见图 4~5。竣工期上游坝体水平位移指向上游,最大值为 5.4 cm;下游坝体则指向下游,最大值 5.2 cm。蓄水后,在库水压力作用下坝体向下游变形,正常蓄水位时上游向最大水平位移减至 2.3 cm,下游向最大水平位移增至 6.0 cm。竣工期和蓄水期坝体最大沉降分别为 40.8 和 43.8 cm,最大沉降发生在坝轴线 1/2 坝高处,量值约占最大坝高的 0.3%。

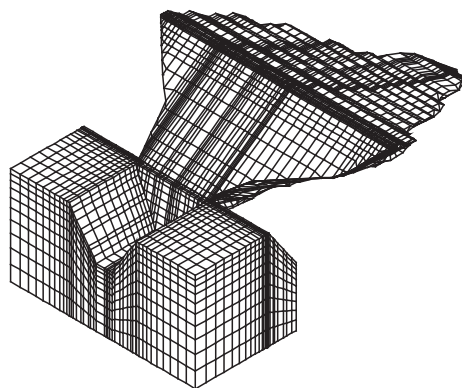


图 3 组合型面板坝三维有限元网格

Fig. 3 3D FEM meshes of combined rock-fill dam

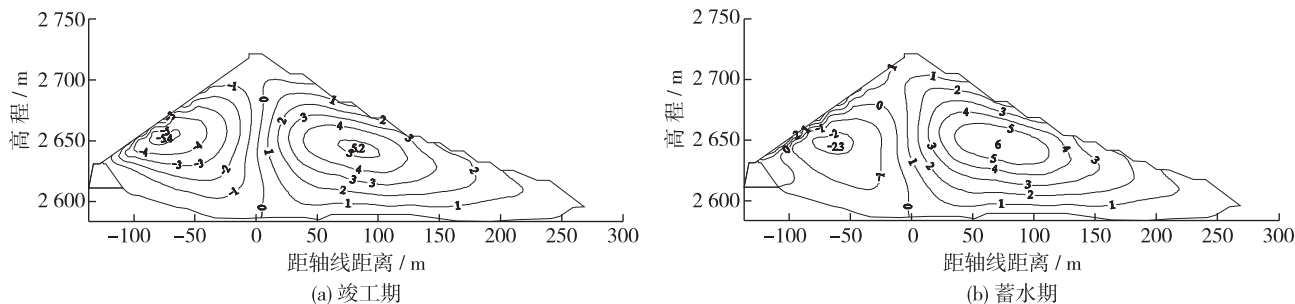


图 4 堆石坝最大剖面坝体顺河向位移(单位: cm)

Fig. 4 Horizontal displacement of largest profile of rock-fill dam (unit: cm)

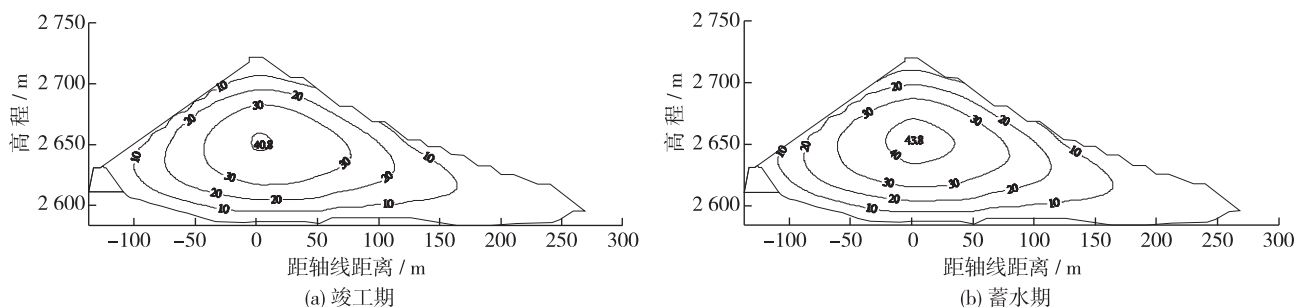


图 5 堆石坝最大剖面坝体沉降(单位: cm)

Fig. 5 Dam body settlement of largest profile of rock-fill dam (unit: m)

组合型面板坝与常规面板坝坝体的变形极值见表 2。相比常规面板坝,组合型面板坝坝体变形总体有所降低,蓄水期沉降率由 0.31% 降至 0.29%,下降幅度约为 6%。可见组合型面板坝堆石坝体的变形性状与常规面板坝差别不大。对于组合型面板坝,混凝土坝坝高是控制性参数,随混凝土坝坝高增加,坝体变形降幅增大。不过当混凝土坝坝高不超过面板坝坝高的 40% 时,组合型面板坝与常规面板坝应力变形性状差别不大<sup>[13]</sup>。

表 2 堆石坝坝体变形极值

Tab. 2 Maximum deformation of rock-fill dam

| 坝型  | 竣工期上游向<br>变形/cm | 竣工期下游向<br>变形/cm | 竣工期<br>坝体沉降/cm | 蓄水期上游向<br>变形/cm | 蓄水期下游向<br>变形/cm | 蓄水期<br>坝体沉降/cm |
|-----|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 常规坝 | 7.5             | 7.0             | 43.3           | 5.0             | 7.4             | 46.2           |
| 组合坝 | 5.4             | 5.2             | 40.8           | 2.3             | 6.0             | 43.8           |

3.2 面板应力变形

面板蓄水期轴向变形和挠度分布见图 6。水压力作用下面板发生挠曲变形,左、右两岸面板均向河谷中央位移,指向左岸和右岸位移最大值均为 0.84 cm,面板挠度指向坝内,最大值为 11.30 cm,位于河谷中央 0.6h(h 为坝高)处。

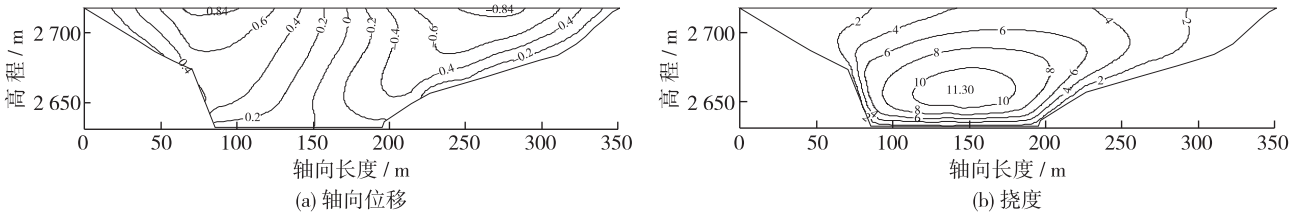


图 6 面板蓄水期轴向变形与挠度(单位: cm)

Fig. 6 Axial deformation and deflection of slab during full storage period (unit: cm)

面板蓄水期轴向和顺坡向应力见图 7。面板轴向以受压为主,两岸存在一定的受拉区,最大压、拉应力值分别为 4.71 和 0.78 MPa。面板顺坡向完全受压,最大压应力值为 6.38 MPa。

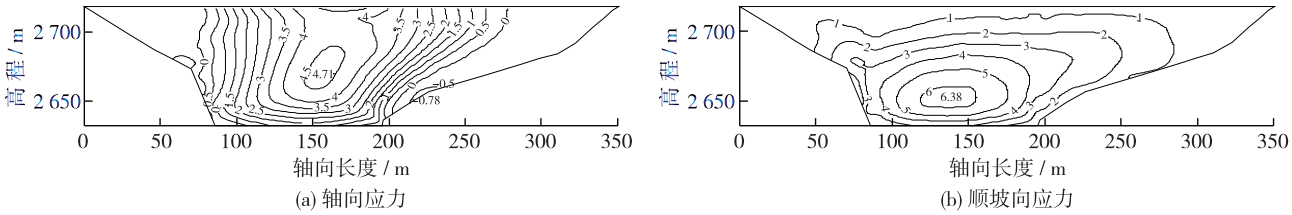


图 7 面板蓄水期轴向应力与顺坡向应力(单位: MPa)

Fig. 7 Axial stress and longitudinal slope stress of slab during full storage period (unit: MPa)

组合型面板坝与常规面板坝面板的应力变形极值见表 3。相比常规面板坝,组合型面板坝面板变形有所减小,蓄水期面板挠曲率由 0.13%降至 0.08%,下降幅度达 38%;面板板内压、拉应力均有所降低,轴向压应力极值下降幅度为 27%,顺坡向压应力极值下降幅度为 23%,轴向拉应力极值下降幅度为 32%,顺坡向拉应力则降为零。

综上所述,组合型面板坝面板的应力变形分布规律虽和常规面板坝接近,但面板的应力状态却有明显改善,无论是拉应力,还是压应力数值都明显比同等坝高常规坝小得多。

表 3 面板应力变形极值(蓄水期)

Tab. 3 Maximum values of stress and deformation of slab during full storage period

| 坝型  | 向右岸变形/cm | 向左岸变形/cm | 挠度/cm | 轴向压应力/MPa | 轴向拉应力/MPa | 顺坡向压应力/MPa | 顺坡向拉应力/MPa |
|-----|----------|----------|-------|-----------|-----------|------------|------------|
| 常规坝 | 1.27     | 1.56     | 19.5  | 6.43      | -1.15     | 8.27       | -0.16      |
| 组合坝 | 0.84     | 0.84     | 11.3  | 4.71      | -0.78     | 6.38       | /          |

### 3.3 混凝土坝应力变形

混凝土坝顺河向位移和垂直向正应力分布分别见图 8~9。混凝土坝工作性态受双向控制,施工期受大坝的填筑荷载影响,向上游变形,最大值 0.24 cm,运行期受库水压力为主,向下游变形,最大值为 0.33 cm。垂直向,施工期和蓄水期坝体完全受压,最大垂直正应力分别为 1.46 和 2.31 MPa。施工期和蓄水期混凝土坝自身基本受压,拉应力区仅限很小范围,施工期分布于两岸坝头下游面,蓄水期分布于两岸坝头上游面,且拉应力数值较小,最大值低于 0.3 MPa。该大体积混凝土结构虽工作条件复杂,但应力状态良好,满足要求。

除了应力问题,稳定也是混凝土坝需要关注的问题之一。合理考虑下游堆石压力是稳定分析的重点。本工程采用有限元计算出的堆石压力而非规范要求的主动土压力对混凝土坝的稳定进行了复核计算。计算结果显示各工况下该混凝土坝的沿坝基面抗滑稳定安全系数均满足规范要求。

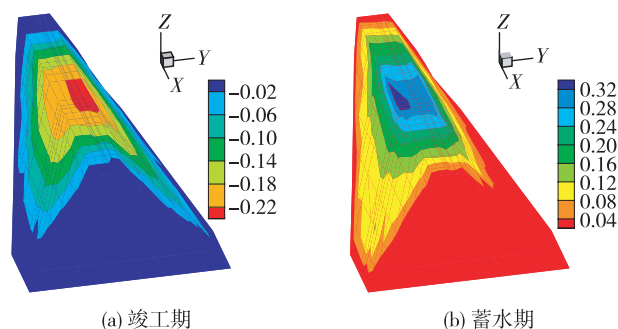


图 8 混凝土坝顺河向变形(单位: cm)

Fig. 8 Horizontal deformation of concrete dam (unit: cm)

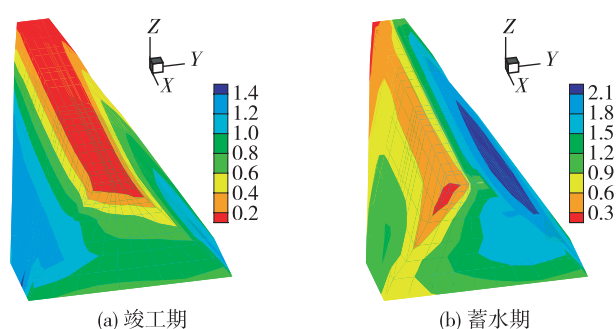


图 9 混凝土坝垂直向正应力(单位: MPa)

Fig. 9 Vertical normal stress of concrete dam (unit: MPa)

### 3.4 接缝变形

面板周边缝的剪切变位基本指向河谷中央,最大值为 5.2 mm,沉陷变位指向坝内,最大值为 14.1 mm,周边缝均处于张开状态,最大值为 7.0 mm。最大剪切和张开均发生在河谷左岸陡倾段,最大沉陷发生在混凝土坝所在水平段。

面板垂直缝总体为河谷中央处于压紧状态,两岸处于拉开状态,最大张开值为 3.9 mm,位于河谷左岸陡倾段与较缓段转折处。

组合型面板坝与常规面板坝周边缝的三向变位极值见表 4。相比常规面板坝,组合型面板坝周边缝三向变位有不同程度降低,相比沉陷变位,剪切变位和张开变位降低明显,沉陷、剪切和张开极值降幅分别为 21%, 70% 和 40%。本工程混凝土坝坝顶宽度采用趾板后向下游延伸 2 m,计算结果显示河床段周边缝沉陷变位量值并不大,在允许范围内。

表 4 接缝变位极值(蓄水期)

Tab. 4 Displacements of peripheral joints and vertical joints during full storage period

| 坝型  | 周边缝   |       |       | 垂直缝   |
|-----|-------|-------|-------|-------|
|     | 剪切/mm | 沉陷/mm | 张开/mm | 张开/mm |
| 常规坝 | 17.5  | 17.9  | 11.6  | 6.4   |
| 组合坝 | 5.2   | 14.1  | 7.0   | 3.9   |

## 4 结 语

组合型面板堆石坝的应力变形性状与常规面板堆石坝存在一定差异。与常规面板堆石坝相比,组合型面板堆石坝总体表现为坝体、面板的变形有所减小,面板压、拉应力有所降低,周边缝剪切和张开位移有所减小。

本研究工程混凝土坝坝高 60 m,坝体变形、面板应力和接缝变形均在正常范围内,该组合型面板坝技术上成立。另外,由于坝址底部 60 m 高度范围河谷极其狭窄,之上则较为开阔,因此这种地形条件使得组合型面板坝施工、工程量、投资等与常规面板坝差别不大,从技术经济方面综合考虑,该组合型面板坝可行。

组合型面板堆石坝,虽然底部设置混凝土坝,增大了混凝土工程量,但可减少底部狭窄河谷岸坡趾板开挖量,缩短面板和垂直缝长度,有效改善面板的应力状态,可见该坝型存在一定技术优势,尤其是在不规则地形、狭窄峡谷等不利条件时,值得进行深入研究,希望通过文中研究工程的建设,推动面板坝建坝技术的发展和完善。

面板是面板堆石坝的主要防渗结构,是面板堆石坝成败的关键所在。由混凝土坝与面板堆石坝组成的复合坝坝型为250~300 m级面板堆石坝的建设提供了一种新思路,通过在底部设置一定高度的混凝土防渗体,使得面板长度与200 m级面板坝面板长度相当,从而提高250~300 m级面板堆石坝防渗面板的安全性。

## 参 考 文 献:

- [1] 杨泽艳,周建平,蒋国澄,等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电, 2011, 37(2): 18-23. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, JIANG Guocheng, et al. Development of concrete faced rock-fill dam in China[J]. Water Power, 2011, 37(2): 18-23. (in Chinese))
- [2] 杨泽艳,周建平,苏丽群,等. 300 m级高面板堆石坝适应性及对策研究综述[J]. 水力发电, 2012, 38(6): 25-29. (YANG Zeyan, ZHOU Jianping, SU Liqun, et al. Review on the research of adapt ability and countermeasures of 300 m-level high CFRD[J]. Water Power, 2012, 38(6): 25-29. (in Chinese))
- [3] MA Hongqi, CHI Fudong. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rock-fill dams[J]. Engineering, 2016(2): 332-339.
- [4] 徐泽平,邓刚. 高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1226-1234. (XU Zeping, DENG Gang. Development of high CFRD and key technologies for building super-high CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1226-1234. (in Chinese))
- [5] 徐泽平. 超高混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题[J]. 水力发电, 2010, 36(1): 51-53. (XU Zeping. Key technical problems on the construction of super-high CFRD[J]. Water Power, 2010, 36(1): 51-53. (in Chinese))
- [6] 陆希,徐宏璐. 镶嵌组合坝混凝土坝体结构体型探讨[J]. 西北水电, 2014(6): 30-33. (LU Xi. XU Honglu. Study on concrete dam structural outline of embedded composite dam[J]. Northwest Hydropower, 2014(6): 30-33. (in Chinese))
- [7] 安盛勋. 混凝土面板堆石坝潜没式混凝土高趾墙设计[J]. 西北水电, 2009(2): 18-21, 30. (AN Shengxun. Design of submerged concrete high toe wall of CFRD[J]. Northwest Hydropower, 2009(2): 18-21, 30. (in Chinese))
- [8] 傅中志,王占军,陈生水. 潜没式高趾墙土压力与稳定计算方法[J]. 水利水电工程学报, 2014(3): 1-8. (FU Zhongzhi, WANG Zhanjun, CHEN Shenshui. Calculation method for earth pressure and stability of high submerged toe walls of concrete faced rock-fill dams[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(3): 1-8. (in Chinese))
- [9] 李振纲. 吉音水利枢纽工程混凝土面板坝高趾墙设计[J]. 水力发电, 2011, 37(10): 44-47. (LI Zhengang. High toe wall design of Jiyin CFRD[J]. Water Power, 2011, 37(10): 44-47. (in Chinese))
- [10] 武维新. 龙首二级(西流水)水电站工程混凝土面板堆石坝设计特点[J]. 甘肃水利水电技术, 2005, 41(4): 358-359, 397. (WU Weixin. Design features of CFRD for Longshou II (Xiliushui) hydropower station[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2005, 41(4): 358-359, 397. (in Chinese))
- [11] PORTA G, GRAHAM R. Constructing the Karahnjukar face slab Karahnjukar Hydroelectric Project-Iceland[C]//JIA Jinsheng. Modern Rock-fill Dams-2009. Beijing: China Water and Power Press, 2009: 463-470.
- [12] MODARES M, QUIROZ J E. Structural analysis framework for concrete-faced rock-fill dams[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): 04015024.
- [13] 沈婷,李国英. 镶嵌式面板堆石坝应力应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊2): 266-271. (SHEN Ting, LI Guoying. Stress-strain characteristics of embedded concrete face rock-fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Suppl2): 266-271. (in Chinese))

## Stress and deformation properties of combined CFRD

WANG Yuxiao<sup>1,2</sup>, SHEN Ting<sup>3</sup>, LI Guoying<sup>3</sup>

(1. *Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*; 2. *Engineering Construction Branch Company, Qinghai Yellow River Upstream Hydropower Company, Xining 810008, China*; 3. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** Embedding a concrete dam at the upstream bottom of the conventional CFRD's slab is called combined "CFRD". Studies and analysis of stress and deformation properties of the combined CFRD using 3D finite element method based on a 150 m high dam are introduced in this paper. The analysis results show that the rock-fill deformation of the combined CFRD is not much different from that of the conventional CFRD. However, because the length of the dam slab and the vertical joints are reduced, the stress state of the dam slab is improved. By extending the dam crest width of the concrete dam, the deformation of the peripheral joints can be controlled. At present, the most prominent problem existing in the 200 m high concrete-faced rock-fill dams is the structural cracks and crushing failure of the dam slab, and the combined CFRD can effectively improve the slab stress state. So the combined dam has some technical advantages, especially under the conditions of irregular terrain, narrow valleys and other adversity. Therefore, this new dam type can provide a new idea in the design of the high CFRD.

**Key words:** combined CFRD; conventional CFRD; stress and deformation property; FEM