

# 水跃后波浪特性的试验研究\*

吴桢祥\*\*

(郑州工学院水利及环境工程系)

**摘 要:** 本文是对水跃后波浪特性的试验研究, 试验是在40公分平底水槽中进行。通过对实测资料的分析, 给出了跃后最大浪高的表达式。讨论了跃后波动的物理机制, 实测了跃后波浪沿程衰减过程, 分析了波形、波周期和波谱, 对消波措施也进行了初步讨论。

**关键词:** 水跃, 波浪, 消能

**中国图书分类号:** TV139

底流消能是一种较成熟的消能形式, 在中小工程甚至大型工程中得到广泛应用。作为底流消能的基础——水跃, 国内外已积累了大量的理论和实验研究成果。特别是近三十年来, 水跃的研究已从单纯讨论其时均量, 如跃长, 共轭水深等, 进入水跃内部的水流结构, 使得对这一水流现象的认识大大向前发展。本文作者在进行我国陆浑西村泄水工程的下游消能试验时发现, 水跃消能所引起的跃后波浪可达数米之巨, 常可沿尾渠传播到下游很远的地方。对窄狭河道和渠道, 巨大的波浪将会招致下游岸壁的严重淘刷、波浪的反射、爬高直接影响工程的正常运用和安全, 因此很有必要对水跃引起的波浪特性进行研究和探讨, 以便采取合理有效的消波措施。

对跃后波浪进行专门研究的文献, 最早要推 Abou-Seida 的成果<sup>(1)</sup>, 他选用波高、波周期、上下游水深、渠底坡度及重力加速度作为变量进行尺度分析, 得到关系式:

$$\frac{H}{d_2} = f\left(\frac{H}{gT^2}, \frac{v_1^2}{2gd_1}, \theta\right), \text{ 在底坡为 } 0 \sim 1/19 \text{ 和佛汝德数为 } 2.23 \sim 4.98 \text{ 范围进行水槽试}$$

验, 得出有效波高随动力因子  $\lambda = \frac{v_1^2}{2gd_1}$  的增大而增大的结论。我国水科院也曾在 60cm 宽水槽中进行跃后波浪的试验研究, 得出一套波高特性曲线<sup>(2)</sup>。郑州工学院在低佛氏数水跃的研究中对跃后波动特性也进行过实验分析<sup>(3)</sup>。这些工作为跃后波浪的研究奠定了基础。除此之外, 系统的研究文献较少见到, 其原因可能是水工消能多为三元问题, 宽阔河

\* 收稿日期: 1990.09.01

\*\* 刘国昌高工参加了该研究的测试和数据处理工作, 并给予大力协助。

道中跃后波迅速衰减,而渠道和窄狭河道中跃后波问题常发生在中小工程未给予重视。本文进行的试验研究工作仅是对这一复杂问题的初步尝试。

## 1 跃后波浪试验

跃后波浪试验是在 40cm 宽平底水槽中进行,槽长 800cm,有效槽深 75cm。槽首以平板闸门形成闸下急流,借助流量与开度的调节以形成各种出流的佛氏数,并以尾门控制下游水位,使闸后产生临界水跃。为减小波浪在尾门处的反射、增加试验长度、尾门前加设了隔栅以吸收波能。波浪要素以 KGY-5A 型双线浪高仪沿程布点施测,以 MR-30C 磁带记录仪进行磁记录, DPS-85 机进行信号分析。

试验共进行了 18 个组次,如下表所示。流量范围为  $Q=11.2\sim 44.71/S$ ,水头范围为  $H=22.3\sim 75.4\text{cm}$ ,佛汝德数范围为  $F_{r1}=2.2\sim 10.5$ 。

表 1:

组次	开度 (cm)	水头 (cm)	流量 ( $\frac{\text{m}^3}{\text{S}} \times 10^{-3}$ )	$F_r$	最大浪高 ( $\frac{\Delta_{\max}}{h_1}$ )	平均浪高 ( $\frac{\bar{\Delta}}{h_1}$ )	最大周期 (Tmax)	平均周期 (S)( $\bar{T}$ )
A	4.5	59.4	36.5	5.7	1.55	0.43		
B	4.5	22.5	21.1	3.5	0.96			
C	4.5	39.1	29.2	4.7	1.35			
D	4.5	74.3	41.3	6.8	1.88			
E	3.0	27.2	16.6	5.1	1.62	0.43	0.84	0.31
F	3.0	40.8	20.6	6.0	1.79	0.74	0.92	0.40
G	3.0	54.2	23.4	7.1	2.32	0.99	1.44	0.46
H	3.0	75.4	28.0	8.5	2.60	1.00	1.08	0.44
I	2.0	29.7	11.2	6.6	1.78	0.65	0.96	0.38
J	2.0	63.5	17.1	9.2	2.84	1.32	1.36	0.47
K	2.0	41.2	13.5	7.6	2.20	1.02	1.16	0.40
L	2.0	74.9	18.45	10.5	4.00	1.39	1.12	0.46
M	6.0	43.0	41.0	4.2	1.03	0.53	0.90	0.41
N	6.0	29.5	32.0	3.4	0.85	0.32	0.90	0.31
O	6.0	24.6	28.4	3.12	0.71	0.28	0.73	0.31
P	7.5	35.9	44.0	3.3	0.86	0.20	0.88	0.39
Q	7.5	22.3	32.8	2.5	0.62	0.27	0.94	0.31
R	10.0	24.4	44.7	2.2	0.48	0.18	1.04	0.29

图1(A) 为在水槽中前后相距21.5cm的两点实测的波动过程,(B) 为在水槽不同断面处跃后波的波动过程。可以看出水跃所诱发的波浪无论是波高或是波长和波速都是随机的,波浪在传播过程中的衰减和变形,使问题复杂化。研究跃后波浪的方法也应以试验为主。

跃后波的生成是该问题的基本点:一是水跃的能量如何传递给波,二是进入波

的能量如何分配和变化,前者是水跃与跃后水流的作用问题,后者是波的变形和衰减问题。试验中观察到水跃的激波作用主要来自:

- ①水跃主流区流向的偏折与脉动
- ②水跃旋辊产生的流量和流速脉动
- ③旋辊区水流流态的不稳定性和阵发性

正是这些因素的共同作用形成了跃后波这种特殊的水体运动形式,它也是观察水跃内部水流结构的一个窗口。

## 2 跃尾波高变化规律

跃尾波高为  $x = L_j$  处的波高值。试验发现它与下列因素有关:来流流速  $v$ , 来流水深  $h_1$ , 下游水深  $h_2$ , 重力加速度  $g$ , 水的密度  $\rho$ , 水的粘性系数  $\mu$  和表面张力系数  $\sigma$ 。上述因素可写成一般函数关系:

$$\Delta = f(v, h, h_2, g, \rho, \mu, \sigma)$$

式中  $\Delta$  为跃尾波高值。

经尺度分析,可得出无因次关系式:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta}{h_1} &= f\left(\frac{v}{\sqrt{gh_1}}, \frac{h_2}{h_1}, \frac{v}{h_1\sqrt{gh_1}}, \frac{\sigma}{h_1^2\rho g}\right) \\ &= f(Fr, \eta, Re, We) \end{aligned}$$

式中:

Fr—来流佛汝德数       $\eta$ —共轭水深比  
Re—来流雷诺数      We—韦伯数

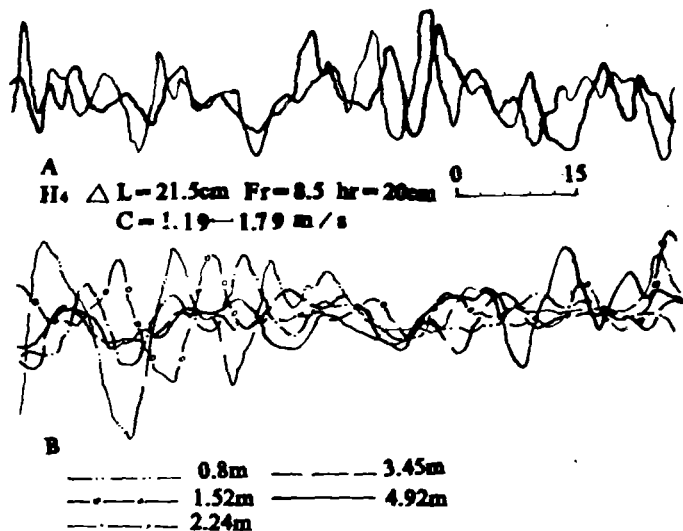


图1

若在试验中设法消去雷诺数和韦伯数的影响, 则上式可简化为:  $\frac{\Delta}{h_1} = f(Fr, \eta)$

对临界水跃情况上式进一步简化为:  $\frac{\Delta}{h_1} = f(Fr)$  即相对跃尾波高只与来流佛氏数有

关。此一结果与 Abou-Seida 所得结果相近。他所称的水流动力因子  $\lambda = \frac{v^2}{2gh_1}$  实际也是佛氏数的量度。

对实测资料分析处理, 可得出跃尾相对最大浪高与来流佛氏数的关系图 2。

从图 2 可知:

①最大相对浪高  $\frac{\Delta_{\max}}{h_1}$  随佛

氏数增加而呈直线增大, 这一关系可表示为:

$$\frac{\Delta_{\max}}{h_1} = 0.369(Fr - 1),$$

或  $\Delta_{\max} = 0.369h_1(Fr - 1)$ 。该式可用来推求跃后最大波浪高度值。浪高值的这一表达式与常用的水跃长度公式十分相似。如以陈椿庭公式表示水跃长度<sup>(4)</sup>:

$L_j = 9.4h_1(Fr - 1)$ , 则可得出跃尾最大浪高值是水跃长度的百分之三点九的结论:  $\Delta_{\max} = 0.039L_j$ 。

②图 2 的规律说明高佛氏数水跃的波浪问题比低佛氏数水跃的波浪问题要严重。上述波高值公式表明波高是单宽流量、流速和佛氏数的函数, 这一关系的物理意义可从消耗单位功率的跃体  $\psi$  的表达式得到说明<sup>(7)</sup>:

$$\psi = \frac{V}{E}$$

$$= \frac{7.68F^2 r(Fr - 1)}{v[0.25(\sqrt{1 + 8F^2 r} - 3)^3 - (0.85F^{2/8} r - 0.75)(\sqrt{1 + 8F^2 r} + 1)]}$$

$$= \psi(v, Fr)$$

该式的函数关系示于图 3。

函数式  $\Delta = f(q, v, Fr)$  与  $\psi = \psi(v, Fr)$  虽不同, 但表明  $\Delta$  与  $\psi$  均依赖于  $v$  和  $Fr$ , 这一事实证明  $\Delta$  与  $\psi$  的内在联系。Fr 增大浪高也增大, 可用消耗单位千瓦的跃体减少来解释。 $\frac{q}{v}$  增大 (即  $h_1$  增大) 浪高也增大, 说明在 Fr 不变情况下  $h_1$  增大  $v$  也增大, 从而引起  $\psi$  急剧减小之故。

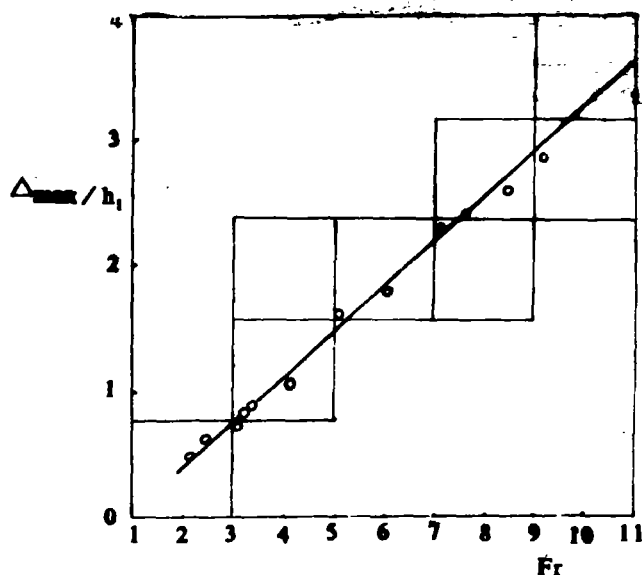


图 2

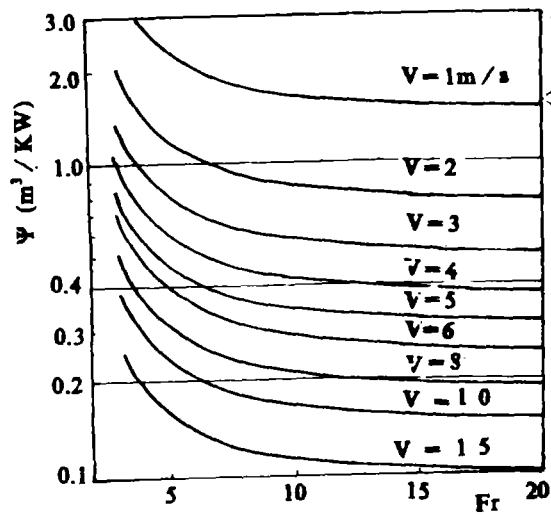


图3

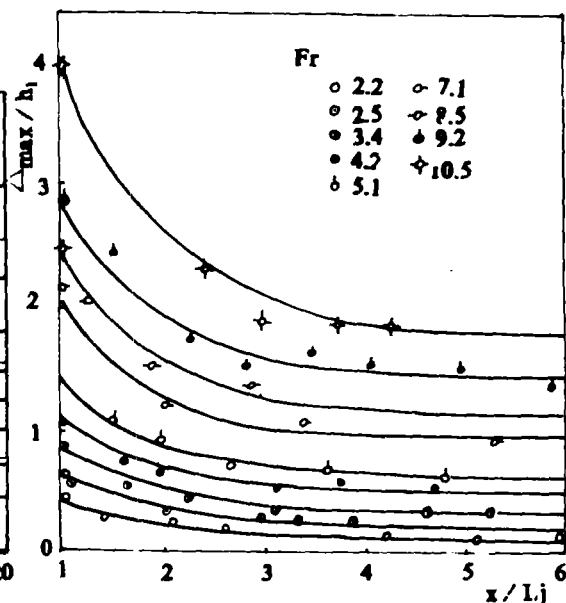


图4

### 3 跃后波的衰减

由于粘性的影响, 跃后波动能量在向下游传播的过程中逐渐衰减, 图四是以佛氏数  $Fr$  为参数, 最大相对浪高与施测点的相对距离的关系曲线。

从图4可知:

① 跃后波浪总是沿程逐渐衰减, 直至完全消失。跃后波浪急速的衰减段主要发生在相对距离  $\frac{x}{L_j} = 3 \sim 4$ , 即发生在跃尾后 2~3 倍跃长范围内。这一距离与跃后段的长度相近, 也与水跃后断面平均紊动强度的衰减距离相近<sup>[3]</sup>, 说明他们之间存在水流结构上的联系。

② 跃后波浪的衰减速度随佛氏数  $Fr$  增大而增大。但一般经  $\frac{x}{L_j} = 3 \sim 4$  的距离, 跃高均大约衰减到相应的跃尾浪高的一半。在  $\frac{x}{L_j} > 3 \sim 4$  以后, 浪高衰减速度极慢, 一直维持相当远距离。因此该段距离内的浪高可以下式估算:

$$\left(\frac{\Delta_{\max}}{h_1}\right)_{\frac{x}{L_j} > 3 \sim 4} = 0.5 \left(\frac{\Delta_{\max}}{h_1}\right)_{\frac{x}{L_j} = 1} = 0.185(Fr - 1) = 0.0196L_j$$

该估算式仅只在平底自由水跃情况下适用。若将十分之一大波平均得出新的浪高  $\Delta$

$(1/10)$ , 并和下游水深, 上游水头组成无量纲数  $\frac{\Delta(1/10)}{\sqrt{htH}}$ , 则  $\frac{\Delta(1/10)}{\sqrt{htH}}$  与  $\frac{x}{L_j}$  的关系可看出波浪沿程衰减的总情况, 如图 5 示。

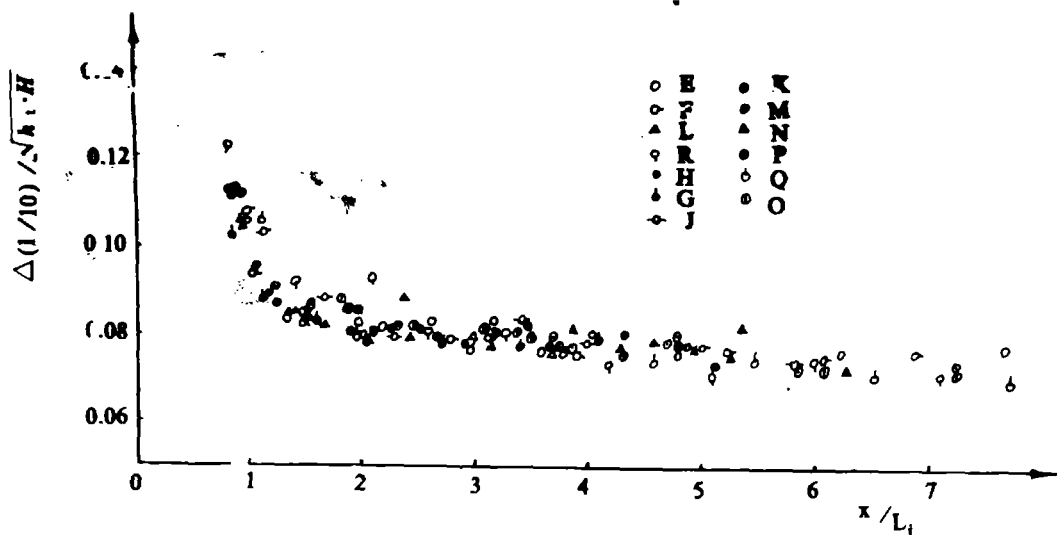


图 5

#### 4 跃后波的频域特性

水跃消能过程中, 巨大的水流旋辊使一部分能量转移成波能, 形成跃后不规则波。其波频组成相当复杂。表一列出了各试验组次跃尾波动的最大周期和平均周期, 图 6 显示这种周期的变化过程。可以看出, 跃后波的最大波周期为  $0.76 \sim 1.44\text{S}$ , 相应频率为  $0.7 \sim 1.3\text{Hz}$ , 平均波周期为  $0.29 \sim 0.47\text{S}$ , 相应频率为  $2.12 \sim 3.44\text{Hz}$ 。表示不同频率的波能量分布函数即功率谱函数, 图 7 给出跃后波的谱函数形式。跃后波的能量主要集中在  $4\text{Hz}$  以下, 主频约为  $0.5 \sim 2.5\text{Hz}$ 。跃后波在其传播过程中, 能谱变化较小。

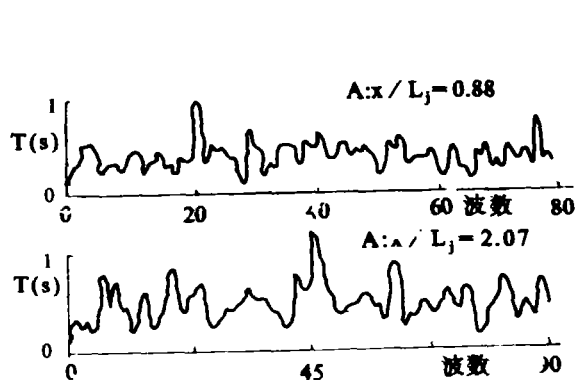


图 6

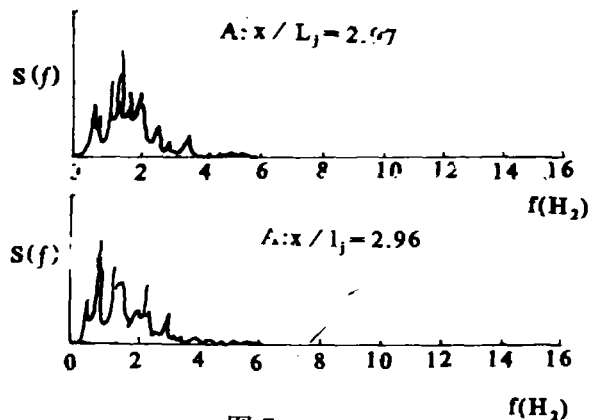


图 7

## 5 消波

为了消除跃后波浪对工程结构和运用的不良影响,有时需要做各种型式的消波工。常用的消波工有消波栅、消波肋、消波梁等,其原理都是消杀和吸收波能,抑制波动的传播和反射。陆浑水库西村泄水工程的消波试验中,开始单纯以扩大消能水体的方法消波,效果不大。后改用消波梁消波,以四道消波梁联合运用,将跃后波浪减小百分之三十<sup>[5]</sup>。除此之外,在渠岸设置消波肋墙,也起到一定的消波作用。不过这种消波措施是生波在先,消波在后,应该称之为被动式消波。如前述,既然跃后波浪的激波力来自水跃自身,假如能设法改变水跃消能中水流自身的旋涡结构、减小水跃自身的激波力,跃后波浪当会自然减小。这就需要充分发挥辅助消能工在消能、消波方面的作用。基于这一想法的消波工应称为主动消波工。黄河大峡水电站溢洪道消能方案研究中,曾将宽尾墩结构用于低水头泄水工程,下泄水流经宽尾墩进行强制收缩,入池水流由原来扁而平的急流变成窄而高的三孔射流,水流入池后产生方向、相位、尺度各不相同的紊动涡体,取代通常水跃的平轴旋滚,从而有效地扼制了消力池中的波浪,并且提高了消能率。该方案可使跃后波浪减小百分之五十到六十,收到很好的效果<sup>[6]</sup>。

研究跃后波浪的特征和运动规律,可为工程设计提供依据。而在消波方面,主动型消波工有明显的优点,有必要在理论上进行深入的探索。

## 6 结 语

6.1 平底自由水跃跃后波高最大值是佛汝德数  $Fr$  的函数,且呈直线关系:

$$\Delta_{\max} = 0.369h_1(Fr - 1)$$

如果以陈榕庭公式:  $L_j = 9.4h_1(Fr - 1)$  计算水跃长度,则跃尾最大波高值恰是跃长的百分之三点九,即:

$$\Delta_{\max} = 0.369L_j$$

6.2 佛汝德数越大,水跃的波浪问题越严重。跃后波在跃后  $\frac{x}{L_j} = 3 \sim 4$  距离内急剧衰减,这一距离与通常的水跃跃后段相接近,同时与水跃跃后断面平均紊动强度的衰减距离相接近。

6.3 跃后波的能量主要集中在  $4Hz$  以下,在跃后段内,能谱变化不大。

6.4 消波措施可分为被动型与主动型,后者通过改变水跃的紊动涡结构来达到消波和消能的目的,这是消波的良好途径。

## 参 考 文 献

- (1) Abou-Seida, M.M., Wave action below spillways, Proc of ASCE, Vol89, NoHY3 May. 1963

- (2) 沈振明, 李丰年. 关于水跃后水流流态和波动的试验研究. 水利水电科学研究院研究报告
- (3) 辛玉传. 低佛汝德数水跃特性的实验研究. 郑州工学院研究生论文. 1982
- (4) 陈椿庭. 平底水槽二元水跃长度公式的比较. 水利水电技术. 1961, 4
- (5) 吴桢祥, 王钟泰. 陆浑西村退水闸水工模型试验研究报告. 郑州工学院, 1985, 6
- (6) 吴桢祥, 吴建平. 黄河大峡水电站溢洪道单体水工模型试验报告. 郑州工学院, 1990, 6
- (7) 吴桢祥等. 西村竖井泄水道模型试验研究. 郑州水利与系统工程, 1986, 2

## A Laboratory Study on Hydraulic Characteristics of Waves Downstream from a Hydraulic Jump

Wu Zhengxiang

(Department of Hydraulic Engineering)

**Abstract:** In this paper the hydraulic characteristics of waves induced downstream from a hydraulic jump on a horizontal bed has been studied according to the data measured from model test, a formula for computing maximal wave height below a hydraulic jump is obtained. Based on the model test other statistical behaviors of waves generated below hydraulic jump are explained and some measures to eliminate the wave effect are also discussed.

**Keywords:** Hydraulic jump, wave heights.

---

(上接第 61 页)

## An Analytical Electron Microscope Study for An Unknown Phase in Rapidly Solidified Al-8Fe-4Ce-3Ti Alloy

Tang Yali Shen Ningfu Shao Guosheng

(Research Centre for Materials Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** An Al-rich phase in rapidly solidified (RS) Al-8Wt%Fe-4Wt%Ce-3Wt%Ti ribbon was studied with convergent beam electron diffraction (CBED), high resolution electron microscopy (HREM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) in an analytical electron microscope. Its space group was determined to be  $R\bar{3}m$ , and crystal system to be rhombohedral ( $a = 1.81\text{\AA}$ ,  $c = 22.9\text{\AA}$ ). The symmetry showing in high resolution image with  $[001]$  incidence is consisted with that obtained by CBED.

**Keywords:** Analytical electron microscope, Convergent beam electron diffraction, Energy dispersive X-ray spectroscopy, High-resolution electron microscopy, Rapid solidification.