

DOI: 10.11779/CJGE2017S1031

长沙国际金融中心软岩载荷试验及其成果分析

彭柏兴¹, 金飞², 王星华³

(1. 长沙市规划勘测设计研究院, 湖南 长沙 410007, 2. 九龙仓(长沙)置业有限公司, 湖南 长沙 410002, 3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 长沙国际金融中心是目前华中在建第一高楼, 建筑高度 452 m, 地上 93 层, 地下 5 层, 基础埋深约 40 m。场地第四系覆盖层厚度约 20 m, 基岩为白垩系泥质粉砂岩, 属极软岩。按现行 (GB50007—2011)《建筑地基基础设计规范》确定的地基承载力远低于原位试验。文章采用承压板直径分别为 $\phi 800$ mm、 $\phi 1130$ mm 的静力载荷试验与室内单轴抗压试验进行对比分析, 提出了软岩承载力的试验取值原则, 对同类地区类似岩基承载力的取值具有参考价值。
关键词: 泥质粉砂岩; 载荷试验; 承载力; 折减系数; 单轴抗压强度

中图分类号: TU458 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0156-05

作者简介: 彭柏兴(1968-), 男, 湖南常宁人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事城市工程地质勘察、设计、检测与咨询工作。E-mail: pbaix@163.com。

Experimental study on bearing capacity of soft rock of Changsha International Finance Centre

PENG Bai-xing¹, JIN Fei², WANG Xing-hua³

(1. Changsha Urban Planning, Investigation & Design, Institute, Changsha 410007, China; 2. Wharf (Changsha) Real Estate Co., Ltd., Changsha 410002, China, 3. Civil Engineering College of Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Changsha International Finance Center, the highest building under construction in Central China, is 452 meters high with structure of 93 ground layers and 5 underground layers and an embedded foundation depth of 42 meters. The rock in the building site 20 meters below the level is the Cretaceous argillaceous siltstone which is a kind of soft rock. The problem how to determine the characteristic values of subsoil bearing capacity of argillaceous siltstone is discussed by using the uniaxial compressive tests and loading tests with the diameter of 800 and 1130 mm. Through the tests and analyses, it is found that the bearing capacity evaluated by "Code for design of building foundation" (GB50007—2011) is quite lower than that from in-situ tests. In addition, the principles of determining the characteristic values of bearing capacity of soft rock is put forward, which is deserved to be applied to practical problems such as those soft rocks.

Key words: argillaceous siltstone; loading test; bearing capacity; reduction coefficient; uniaxial compression strength

0 引言

长沙国际金融中心由两栋超高层塔楼、6 层商业裙房及 5 层地下室组成。其中 T1 塔楼 93 层, 高 452 m, 基底压力标准值 1424 kN/m², T2 塔楼 65 层, 高 315 m, 基底压力标准值 1220 kN/m²。钢筋砼核心筒+组合框架结构体系, 筏板基础。场地±0.00 标高为 45.55 m, 基坑开挖深度 42.25 m, 基底标高 13.75 m。

工程场地位于长沙市司门口, 原始地貌为湘江 II 级阶地。场地内第四系松散层厚约 20 m, 由人工填土、淤泥质粉质黏土、冲积粉质黏土、粉细砂、中粗砂、圆砾、残积粉质黏土组成。基岩为白垩系泥质粉砂岩, 按其风化程度分为强风化、中风化、微风化三带。其

中, 中风化层层厚>30 m, 节理裂隙不发育, 岩芯多呈长柱状, 少量短柱状、碎块状, RQD=75%~90%。其岩石物理力学指标见表 1。

基底岩石为中风化泥质粉砂岩, 属极软岩。按 (GB50007—2011)《建筑地基基础设计规范》^[1]根据岩石单轴抗压强度计算承载力时, 其结果与原位试验结果差距很大^[2-4], 直接影响基础选型与基础投入。本文简要介绍了 T1、T2 塔楼软岩地基载荷试验^[5-6], 应用不同规范对试验数据进行了对比分析, 旨在对承载力取值原则、试验尺寸影响、抗压强度折减系数的确定等问题进行分析, 供同行参考。

表 1 中风化泥质粉砂岩的主要物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of argillaceous siltstone									
指标	天然重度 /(g·cm ⁻³)	相对密度 <i>G_s</i>	抗压强度 <i>R_c</i> /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 <i>φ</i> /(°)	凝聚力 <i>c</i> /MPa	旁压试验净比例 界限压力/kPa	旁压模量 <i>E_m</i> /MPa
样本数	347	33	268	15	15	148	148	37	37
范围值	32.04~2.59	2.62~2.75	2.02~5.00	1.98~7.12	0.23~0.33	36.5~38.8	0.20~0.67	≥4224~≥5374	≥317.85~≥637.13
平均值	2.33	2.71	3.73	3.67	0.27	37.7	0.41	≥4704	≥472.22

表 2 岩基载荷试验成果表

Table 2 Results of loading tests in rock foundation								
试验点号	试验标高 /m	压板面积 /m ²	最大加载量/kPa	最大沉降 /mm	最大回弹量 /mm	比例界限对 应荷载 kPa	比例界限 点沉降/mm	岩石抗压强度 /MPa
X1-1	15.55	0.50	7875	15.20	5.49	3500	4.03	3.34
T1-1	13.55	1.00	7500	29.85	9.76	3750	0.34	3.18
T1-2	13.65	1.00	7500	16.34	7.03	5000	13.09	3.90
T1-3	13.95	1.00	7500	17.63	5.12	5750	12.62	3.56
X2-1	16.05	0.50	7875	31.73	4.04	3940	7.22	2.54
X2-2	13.05	1.00	7500	20.32	0.20	3500	11.38	4.52
T2-1	13.65	1.00	7500	11.13	0.92	4500	6.96	2.77
T2-2	13.67	1.00	7500	3.62	1.24	4200	1.60	3.11
T2-3	13.68	1.00	7500	9.88	4.06	4350	2.52	2.62

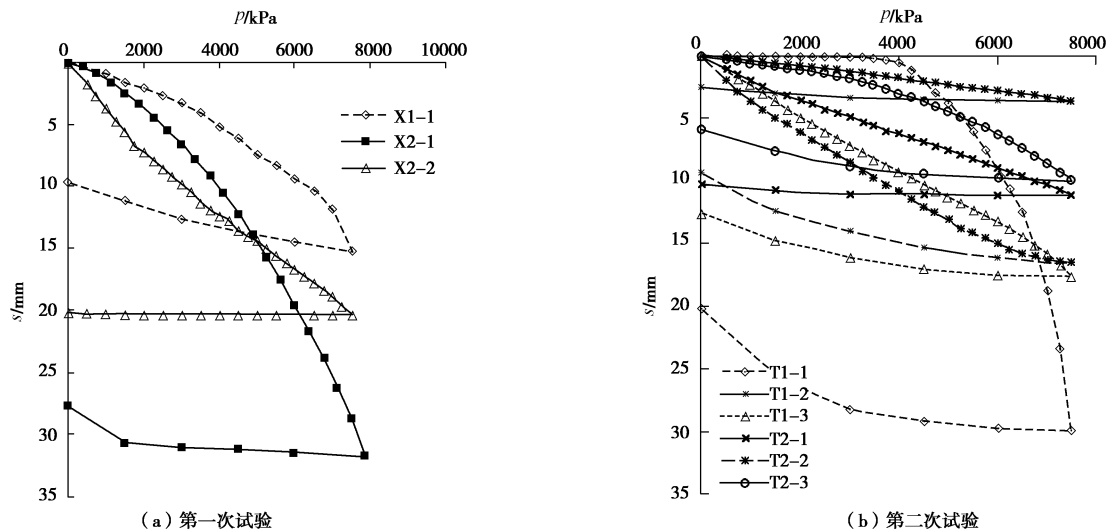


图 1 $p-s$ 曲线

Fig. 1 $p-s$ curves of loading tests

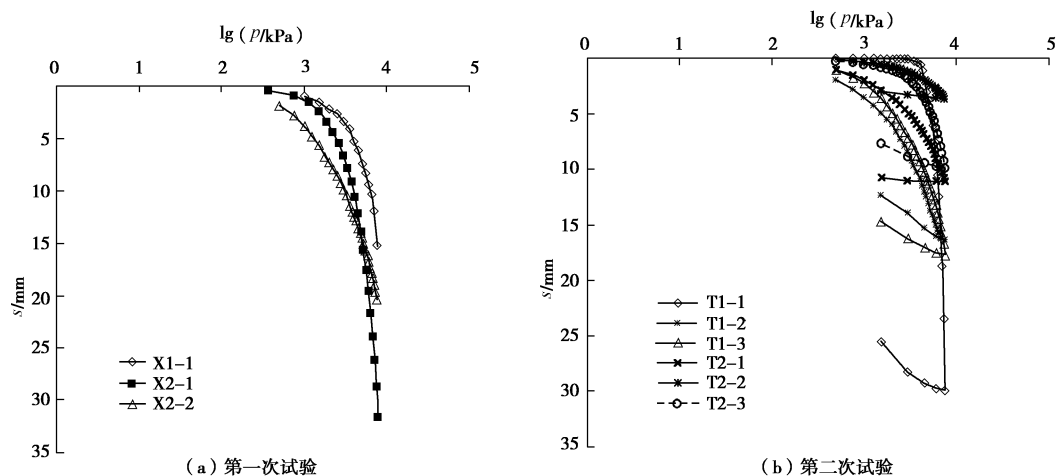
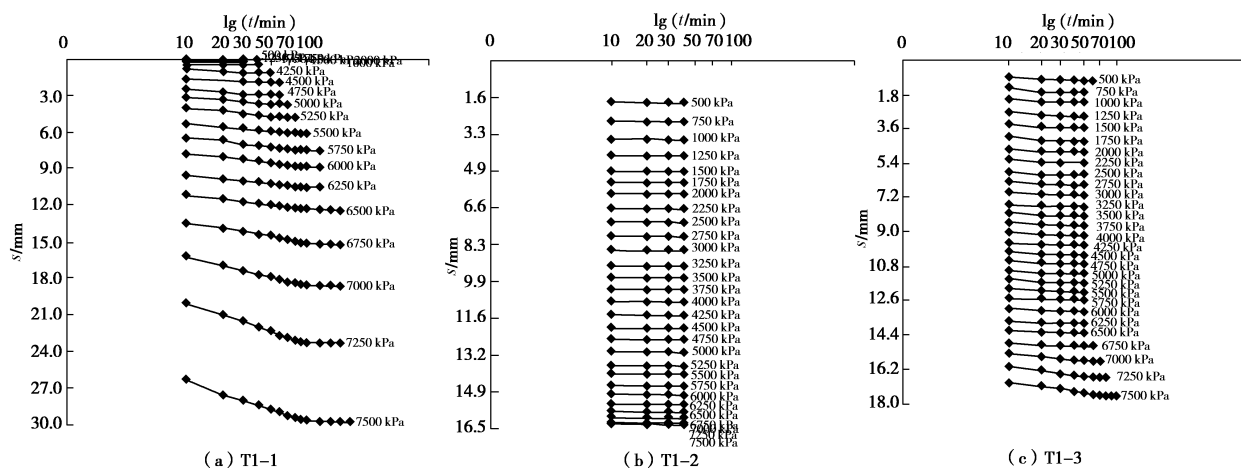
1 载荷试验概况

2012 年 7 月, T1、T2 塔楼开始第一次载荷试验(编号为 X1-1、X2-1)。试验井直径 9000~12750 mm, 井口标高 31.95 m、井底标高 15.55~16.25 m。载荷试验点位于试井中心, 直径 800 mm, 深 20 mm, C30 混凝土封底。承压板为 ϕ 800 圆形钢板, 厚 80 mm, 板上置千斤顶。采用支撑墩平台堆载反力装置, 配重采用预制钢筋混凝土梁条。X2-1 试验点因封底混凝土初凝 8 h 期间遇暴雨, 试验前采取了预压措施, 预加压力 750 kPa, 加载 10 min 后卸载。X2-1 点试验完成

后, 将试验井继续开挖 3 m, 进行了压板面积 1.0 m² 的载荷试验, 承压板为 ϕ 1130 圆形钢板、厚 80 mm, 试验编号 X2-2)。

2012 年 12 月, 基坑开挖到设计标高后, 开始第二次载荷试验(编号为 T1-1~T1-3、T2-1~T2-3)。T1、T2 塔楼均采用 ϕ 1130 圆形承压钢板、厚 80mm, 为保证较准确获取 $p-s$ 曲线上的比例界限值, 加载量级不小于 25 级。

载荷试验加至最大加载量时, 沉降仍然稳定, 未出现 GB 50007—2011 附录 H.0.8 条之终止加载现象。试验结果见表 2, 试验成果见图 1~3。

图2 $s - lgp$ 曲线Fig. 2 $s - lgp$ curves of loading tests图3 T1 塔楼载荷试验的 $s - lgt$ 曲线Fig. 3 $s - lgt$ curves of loading tests in T1

2 试验结果与分析

2.1 荷载 - 变形曲线特征

(1) 由图1可知, $p - s$ 曲线呈缓变形, 比例界限点不很明显。除 T1-2 与 T2-3 卸载回弹量稍大, 回弹率为 43.02%, 41.09% 外, 其它点卸载回弹值较小, 反映出载荷作用下软岩变形的非线性特征。

(2) $s - lgp$ 曲线(图2)除 X2-1 和 T1-1 转折点较明显外, 其它均无第二拐点, 说明除此两点载荷接近极限载荷外, 其它各点在试验载荷作用下其变形尚处弹性范围内。

(3) 根据 $p - s$ 曲线, 结合 $s - lgp$ 曲线(图3), 综合确定比例界限压力为 3500~5750 kPa, 对应沉降量 0.34~13.09 mm。说明中风化泥质粉砂岩较为致密, 压缩性低。

2.2 承载力特征值的确定

一般地, 可利用 $p - s$ 曲线的拐点, 必要时结合 s

- lgt 曲线确定比例界限压力和极限压力。

当 $p - s$ 曲线呈缓变形, 无比例界限时, 可取对应于某一相对沉降值 (s/d) 的压力为承载力特征值: 浅层及深层平板载荷试验, 取 $s/d = 0.01 \sim 0.015$ ^[1]、大直径桩端阻力载荷试验取 $s/d = 0.008 \sim 0.015$, 但均不应大于最大加载量的一半^[7]。岩基载荷未提供终止加载的荷载与总沉降的关系, 取比例界限点或极限荷载的 1/3 为岩基承载力特征值^[1]。

此外, 亦可根据岩石抗压强度按式(1)计算地基承载力特征值 f_a :

$$f_a = \psi_r \cdot f_{rk} \quad (1)$$

式中, f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值, 对黏土质岩取天然抗压强度 (kPa), ψ_r 为折减系数, 本文取 $\psi_r = 0.50$ 。

按不同方法确定的承载力特征值见表3: ①由比例界限压力点确定的特征值为 3500~5750 kPa, 是岩石天然抗压强度标准值的 0.83~1.6 倍; ②由相对沉

表 3 不同方法确定的承载力特征值

Table 3 Characteristic values of bearing capacity of rock evaluated by different ways

试验点	比例界限对应荷载		s/d=0.008 对应荷载		最大加载量/2 对应荷载		最大加载量/3 对应荷载		根据岩石抗压强度确定的承载力
	f_a	f_a/f_{rc}	f_a	f_a/f_{rc}	f_a	f_a/f_{rc}	f_a	f_a/f_{rc}	
X1-1	3500	1.05	4745	1.42	3750	1.12	2500	0.75	1670
T1-1	3750	1.18	6021	1.89	3750	1.18	2500	0.79	1590
T1-2	5000	1.30	4220	1.04	3750	0.93	2500	0.62	1950
T1-3	5750	1.69	4073	1.10	3750	1.01	2500	0.67	1780
X2-1	3940	1.55	3456	1.36	3938	1.55	2625	1.03	1270
X2-2	3500	0.83	2281	0.51	3750	0.83	2500	0.56	2260
T2-1	4500	1.62	6074	2.19	3750	1.35	2500	0.90	1385
T2-2	4200	1.35	>7500	>2.71	3750	1.21	2500	0.80	1555
T2-3	4350	1.66	7367	2.81	3750	1.43	2500	0.95	1310

表 4 线性回归分析结果表

Table 4 Analysis results of linear regression

试验点	线性回归方程	相关系数 R^2	极限承载力 p_u/kPa	$K=3$			
				f_a/kPa	f_a/f_{rc}	s/mm	s/d
X1-1	$s/p = 6.9 \times 10^{-5} s + 1.88 \times 10^{-5}$	0.996	14492	4831	1.44	14.06	0.0176
X2-1	$s/p = 7.36 \times 10^{-5} s + 8.78 \times 10^{-4}$	0.986	13587	4529	1.78	6.14	0.0077
T2-2	$s/p = 3.25 \times 10^{-5} s + 3.70 \times .510^{-4}$	0.936	30769	10256	3.31	5.69	0.0050
T2-3	$s/p = 8.24 \times 10^{-5} s + 5.19 \times 10^{-4}$	0.998	12136	4045	1.54	3.01	0.0027

降值与最大加载量综合确定的承载力特征值为 2281~3938 kPa，为岩石天然抗压强度标准值的 0.51~1.55 倍；③由于未加至极限荷载，取最大加载量的 1/3 为承载力特征值，即 2500~2625 kPa，该结果是岩石天然抗压强度标准值的 0.56~1.03 倍。

上述结果，均远高于按 GB50007—2011 的折减系数最大值 0.50。

2.3 极限承载力的推测

当土体压板载荷试验的 $p-s$ 曲线为缓变形曲线时，可以假设其符合双曲线方程：

$$p = \frac{s}{a + bs} \quad (2)$$

式中， a, b 为待定系数，其物理意义分别为 $1/K_0, 1/P_u$ 。 P_u 为压板试验的地基极限承载力， K_0 为 $p-s$ 曲线的初始切线模量^[8]。通过获取 $p-s$ 曲线，由线性回归分析可确定参数 a, b ，进而确定地基土极限承载力与初始切线模量。

由缓变形特征明显的 X1-1、X2-1、T2-2、T2-3 曲线回归分析，结果如表 4。取安全系数 $K=3$ ，得到承载力特征值为 4045~10256 kPa， $s/d=0.0027\sim0.0176$ ，该结果与 $s/d=0.008$ 及其对应的承载力特征值相近，说明变形甚小。该结果与岩石天然抗压强度标准值的比值为 1.44~3.37。

3 讨 论

3.1 s/d 的取值

众所周知， s/d 取值是一个经验值，缺乏准确的理论关系。不同规范、不同地区取值不同，GB50007—2011 取 0.01~0.015，广东省建筑地基设计规范取 0.015~0.02^[9]，对中低压缩性土，既有研究认为可取更大值，当压板面积为 0.25, 0.5, 1.0 m² 时， s/d 可取 0.04, 0.035, 0.03^[10]，是规范值的 2~3 倍。本文计算取现行规范中的最小值 0.008，具有较高的安全储备。

3.2 最大加载量的确定

浅层平板载荷试验、深层平板载荷试验及大直径桩端阻力载荷试验均采用最大加载量的 1/2 与相对沉降量之间的小值作为承载力特征值。岩基载荷试验的特征值取值原则为极限荷载的 1/3。对岩石地基而言，无论是天然地基还是桩基础，其承载力的确定标准是一样的。由表 3 可知，采用大板（ $d\geq 800\text{ mm}$ ）时，按最大加载量的 1/2 作为承载力特征值，其值大多低于按 $s/d=0.008$ 确定的承载力特征值与比例界限压力。因此，按预估荷载的 2 倍来试验是可行的。

3.3 岩石抗压强度的折减

长沙地区白垩纪泥质粉砂岩具有明显的地域特性，受钻探施工、试样加工及试验等因素影响，其岩石抗压强度严重偏低。按 $s/d=0.008$ 对应荷载或比例界限压力对应的特征值，与岩石抗压强度的比值 ψ_r 除 X2-2 外，其它均大于 1（表 3）。初步设计时，可采用岩石天然抗压强度标准值作为承载力特征值的取值依据。该值仍低于同类岩石地基的旁压试验净临塑压力（表 1）。

4 结 论

(1) 长沙国际金融中心采用 $\phi 800$ 、 $\phi 1130$ mm 承载板进行软岩地基载荷试验, $p-s$ 曲线比例界限压力点不明显, 采用相对沉降 $s/d=0.008$ 确定的承载力特征值, 既符合概念要求, 也有较高的安全储备。

(2) 采用大板 ($d \geq 800$ mm) 进行软岩载荷试验时, 采用2倍加载方式所获结果低于 $s/d=0.008$ 对应值, 结果更安全。该方法较岩基载荷试验采用3倍加载模式节约时间、人力和财力。

(3) 综合分析表明, 对长沙红层, 初步设计时可直接利用岩石天然单轴抗压强度标准值作为岩基承载力特征值的估算值。

该建筑主体已完成, 沉降观测结果均在允许范围内, 表明地基承载力取值可靠的, 值得借鉴。

参考文献:

- [1] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [2] DB 43/T010—1999 长沙市地基基础设计与施工规定[S]. 1999. (DB 43/T010—1999 Specification for design and construction of foundation in Changsha[S]. 1999. (in Chinese))
- [3] 彭柏兴, 王星华. 白垩系泥质粉砂岩岩基强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15): 2678 - 2683. (PENG Bai-xing, WANG Xing-hua. Research on bearing capacity of cretaceous argillaceous siltstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(15): 2678 - 2683. (in Chinese).
- [4] 彭柏兴, 金 飞. 长沙国际金融中心岩基承载力试验研究[J]. 工程勘察, 2015(6): 1 - 6. (PENG Baixing, Jin Fei. Experimental study on the bearing capacity of soft rock ground of Changsha International Finance Centre[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(6): 1 - 6. (in Chinese))
- [5] 湖南省勘测设计院. 九龙仓(长沙)置业有限公司长沙国际金融中心 T1 塔楼地基中风化泥质粉砂岩岩石地基承载力试验专项报告[R]. 长沙: 湖南省勘测设计院, 2013. (Hunan Institute of Survey and Design. The loading tests report for moderately decomposed argillaceous siltstone in T1 tower of Changsha international finance centre of Wharf (Changsha) real estate Co., Ltd. [R]. Changsha: Hunan Institute of Survey and Design, 2013. (in Chinese))
- [6] 湖南鑫湘物探检测公司. 九龙仓(长沙)置业有限公司长沙国际金融中心 T2 塔楼地基中风化泥质粉砂岩岩石地基承载力试验专项报告[R]. 长沙: 湖南鑫湘物探检测公司, 2013. (Hunan Xinxiang Geophysical Detection Co., Ltd. The loading tests report for moderately decomposed argillaceous siltstone in T2 tower of Changsha international finance center of Wharf (Changsha) real estate Co., Ltd. [R]. Changsha: Hunan Xinxiang Geophysical Detection Co., Ltd., 2013. (in Chinese))
- [7] JGJ 72—2004 高层建筑岩土工程勘察规程[S]. 2004. (JGJ 72—2004 Specification for geotechnical investigation of tall building[S]. 2004. (in Chinese))
- [8] 杨光华, 姜 燕, 张玉成, 等. 地基承载力确定的新方法[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 657 - 664. (YANG Guang-hua, JIANG Yan, ZHANG Yu-cheng, et al. A new method for determination of the bearing capacity of soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 657 - 664. (in Chinese)).
- [9] DBJ 15—31—2003 广东省标准《建筑地基基础设计规范》[S]. 2003. (DBJ 15—31—2003 Design code for building foundation[S]. 2003. (in Chinese))
- [10] 宰金珉, 翟洪飞, 周 峰, 等. 按变形控制确定中、低压缩性地基土承载力的研究[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(8): 72 - 80. (ZAI Jin-min, ZHAI Hong-fei, ZHOU Feng, et al. Determination of the bearing capacity of soil foundation in medium and low compressive soils using deformation control[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(8): 72 - 80. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)