

台湾海峡隧道地质与地震条件分析

彭阜南¹, 叶银灿¹, 施 斌², 杨树锋³, 钱祥麟⁴, 李 珏⁵

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093;

3. 浙江大学 地球科学系, 浙江 杭州 310027; 4. 北京大学 地质学系, 北京 100871;

5. 国家地震局 地质研究所, 北京 100029)

摘 要:“台湾海峡隧道”这一伟大工程,由构想到正式调研,历经许多过程,存在许多疑难。台湾海峡的海底地质情况较复杂,且是一个多地震地区,在当前技术条件下,到底能不能修海底隧道,引起两岸许多学者的关注。根据当前已经获得的各种科技成果,在海峡北部的台湾桃园县沿海地区,分布着厚度较大、岩层水平、并已固结的第四纪砂页岩,形成良好的承力层和隔水层。海峡西端的福建平潭岛是大片的花岗岩分布区,场地开阔,是理想的隧道终端。因此,可以初步认为,从平潭到新竹一线,地质及地震条件较为稳定单一,可以考虑作为首选海底隧道线路。

关 键 词:海底隧道;地质;地震;台湾海峡

中图分类号: P54; P65

文献标识码: A

1 引 言

台湾海峡隧道的构想早在1948年台湾海峡两岸同胞中就有呼声。1948年夏台湾学生中,就有人提出“修条隧道到福建去,把大陆和台湾连结起来,永保和平”^[1],这个想法至今还在台湾学者当中谈论^①。大陆也不断有专家学者提出这个设想,甚至在80年代末向中央正式建议^②。1948年夏,国际著名海洋地质学家、已故台湾大学马廷英曾计划派人到福建着手调查,以探索台湾岛及台湾海峡的成因与两地间的地质联系,当时在台湾大学任教的郭令智亦闻此事^[2]。尔后,彭阜南与陈琴(原籍福州,现美籍,教授),秉承马廷英的想法,倡议举行台湾海峡两岸地质地震研讨会,会议由中国海洋、地震、地球物理三大学会以及国家自然科学基金委员会和福建省科协联合主办,特别得到福建省各界的支持^[3],取得圆满成功。此次会议,除了构造地质学家郭令智、石油地质学家李德生、地震学家陈运泰和曾融生外,还有现任美国教授/高级研究员的七位台湾大学校友参加。可是由于众所周知的原因,直到1998年才由清华大学吴之明、戚筱俊和方惠坚等倡议,得到本文几位作者和美籍华裔学者方晓阳的支持与共同努力,并争取到福建省各单位和台湾大学一些学者和土木文教基金会的支持与合作,同时还得到国务院台办“海峡经济科技合作中心”的赞许,在厦门市成功地召开了“台湾海峡隧道学术论证研讨会”^[4],一时间海内外媒体争相报导^[4]。然而,时隔不久,原拟本年内定期继续举行的台

收稿日期:2000-10-19; 修订日期:2000-12-10

① 黄灿辉,在厦门“台湾海峡隧道论证学术研讨会”上发言,1988。

② 唐襄澄,国家重点科技研究项目(交通部分)跨海交通工程研究(建议)(1989)及1990国家计委给唐襄澄(琼州海峡跨海工程筹备组总工)复信。

湾海峡隧道学术论证会议,因故未能开成。也有一些人在这样巨大的 21 世纪伟大工程构想面前想急于求成。对科技上的难题,特别对地学环境上的困难估计过低;对经济效益与资金筹集等问题,看得过于容易;对于广大专家学者的善意质疑和建议,事先没有思想准备。因此情绪上一时陷入低沉,遂使有关举行会议的原议程暂时搁置。

作者曾积极参与发起到召开首届台湾海峡隧道学术论证研讨会的全过程,也曾从事台湾海峡及海岸近海方面有关的地质、地震及工程地质方面的科研工作,有的还参与过领导确定三峡大坝选址的具体工程地质工作,深知面对这样一个世纪性的世界级巨大工程,其前期的科技调研与论证工作将会是相当艰巨的、长期的、细致的,工程也决非短时期内可以启动。但随着科技的进步,这个前期工作所需时间可能缩短。也许由于环境的改变,经济与社会方面的需要,将对工程方面提出要求,因此如不及时加以准备,则恐延误时机。

在这些最早期的调研与论证工作中,作者觉得首先要回答以下问题:(1)根据现今所了解的台湾海峡及其附近地区的地质环境、地震条件,能不能修成这样一条海底隧道,将会遇到一些什么样的困难,这些困难是不是“致命的”? (2)对目前这些确实存在的难题只有经过仔细分析,并估计其难度和现今的或将来的先进工程技术等问题解决之后,才能确定修建与否。

台湾海峡两岸最短的平潭—新竹间的直线距离约 126km,是英吉利海峡宽度的 3 倍,深度不均,最深为 -60m^[5]。海峡的整个地质环境不一,除个别地段了解较多外,还达不到目前论证阶段所需要的精度。

台湾和台湾海峡处于欧亚板块碰撞带的前沿,这里的地壳运动是地球上最活跃的地带,地壳的错动动力是巨大的,修建地下隧道首先遇到的是安全问题。台湾位于环太平洋地震带上,台湾海峡也是板内地震常发地区,而且地震的级别不小。1999 年 9.21 集集大震(7.3 级)给台湾造成了严重的损害,2 300 余人死亡,受伤人数超过 1 万。地震波及的范围很广,连福州、温州都有强烈的震感,是这个地区近百年来大地震。1994 年 9 月,台湾海峡南部水域中也发生了强震(7.3 级),给南澳岛附近沿海造成了一定损害。所以人们担心,建成海底隧道以后,如果未来再发生地震,万一隧道受到强地震的破坏,只要出现断裂,光是海水大量的渗入一项就是严重的问题。或者地震波冲击高速行驶的列车,使其脱轨,其危害性也不小。此外,台湾海峡地形复杂,其岩石性质、防渗性能、岩层强度和有没有瓦斯等,这些都是比陆地上要复杂得多的问题。还有,开凿这么长的隧道,还需考虑如何施工,会不会出现岩爆,石料来源、渣的出运及对海洋生态环境会不会造成影响等等。

通过近年来点点滴滴地质工作的综合,汇集了两岸地质工作者所提供的材料、讨论,甚至老渔民、老船长提供的对横断海峡某些地段海底底床的情况,补充了海图的不足,使人们有可能从辽阔的海峡海域中以便作进一步调研,找到较合适的最短最佳线路。避免在茫茫大海上无的放矢,而造成极大浪费。对上述两次大震的深入研究,也提供了一个详细分析和推断未来地震的绝好机会,并认识到在海峡的某些地段,地震的危险性并不那么可怕。

在第一次“台湾海峡隧道学术论证研讨会”中,台湾学者在会上提出建议:结合多种因素综合考虑,可以选用(人工)岛—桥—隧道相结合的固定通道方案,以利于交通、旅游、水产养殖、海洋开发、保护环境、拓展人类活动空间等综合利用,这样可以避免单调的隧道方案,以避免地下不利的地质因素。

1998 年首次台湾海峡隧道学术论证研讨会能够成功地召开,首先是得到许多师友,也包括台湾大学在内的师友的支持。作者根据现有资料,对上述问题中最关键性的地质与地震两

大根本性的问题作些剖析。

2 台湾海峡的地质条件

在古生代及其以前台湾海峡连同台湾和福建原本是亚洲古大陆的一部分。自晚中生代开始,中国被巨大的燕山运动所席卷,此时位居亚洲古大陆已被断开了的东缘——台湾,被燕山运动重新拼接和塑造。伴随燕山运动的激烈的火山和岩浆活动,中国东南沿海一带,形成一大片包括白垩纪及其以前的一套火山、火成和变质岩体构成的结晶地块。其分布遍及福建沿海、台湾海峡盆地的最底部和台湾岛的褶皱了的盖层之下的基底,后者便称之为结晶基底杂岩。三者在地性上虽同为刚性的结晶质固结岩体,但每个地区的地块中所包含的组成岩层并不相同。台湾的基底杂岩中还包括有亚洲古陆上的古生代岩层(含燧石化石大理岩),甚或更古老的岩块遗体^[6]。

燕山运动之后,在新生代亚洲古大陆东缘周边海床上形成了沉积层。沉积岩层,特别是泥质岩层属于柔性岩层,而上述的结晶质岩体,则属于刚性岩体。当两者同时受到喜山运动的推力作用时,柔性岩层容易沿着刚性地体滑动,同时产生褶皱,甚至形成很剧烈的倒转褶皱而伴生冲断层。这种双层构造中盖层的褶皱构造被称作阿尔卑斯型构造。这是台湾的地质构造特点(图1)。双层构造中的基底是向东潜入的,而且倾角比较平缓(图2)。

此时的台湾东部由于板块碰撞而处于压缩状况,结果地壳隆起,台湾西部的地壳,包括台西平原及其以西的地壳则处于拉张而下陷,并有 NNE-NS 的纵向伴随有 E-W 横向张断裂生成,而今台湾海峡的东部,开始有半地堑型断陷盆地生成。这是最原始的台湾海峡盆地。

本地区最新的弧-陆碰撞是在晚上新世开始的。菲律宾板块吕宋弧与当时大陆架,即今台湾东北部(花莲近海)的接触而展开新一代的陆弧碰撞,对陆架一侧则促使中央山脉、雪山山脉和山麓带上隆、褶皱加激,沿着双层构造的基底上界面发生向上向西的逆冲断层,而在碰撞带的弧侧则形成了今日之海岸山脉(长约 150km),现今仍以 6cm/a 的速度沿海岸山脉断裂向 NE 方向滑移。这就是今日台湾岛的阿尔卑斯构造的特点。本区没有一个向西(大陆侧)俯冲的俯冲带,却是大陆侧的古大陆板块向东潜插(图2、图3)^[7]。这样从大陆一侧延伸而来的海下隧道是不会遇到俯冲带的。按现在世界上各大海底隧道工程的实例和交通运输的要求,隧道的深度多开挖到海床下 40m。而目前所知的台湾海峡中部横断震测剖面(图4)可见,海峡水域中北段的中—西部震测剖面显示海床下岩层的最上部,自上新世底面向上,包括第四纪岩层(已经成岩)在内,约 300m 厚,均作水平状,而且不存在大断层带。这么厚的不漏水固结页岩层,足够保证隧道开挖时的场地条件。本文第一作者于 1948 年夏,带领台湾大学地质系学生,进入以页岩为顶板的瑞芳煤矿井下。瑞芳煤矿位于基隆市东偏南约 5~6km 的瑞芳镇,距海约 3~4km,表层为中中新统的砂页岩,煤层则位居下中新统的上部(该层当时称作木山层)。煤层深约 600m,为石英砂岩、暗灰色至黑色页岩伴生的深色粘土和白色泥砂的不规则纹层、亚杂砂岩和几个煤层。煤层厚度一般 10~100cm,平均厚约 40cm(张锡龄,1971)^[8]。当时采用斜坑道,供采矿者出入,斜穿中中新统砂页岩,进入煤层后,即顺走向开挖煤层,延伸入海下,在核减地面高程及水深之后,估计矿坑在海床下深约 500m,但井下斜坑则穿越海床下各种深度,当年第一作者在坑下只遇到滴水,而未闻有大量漏水。

图4为横穿台湾海峡中段 AB 线的震测剖面,图5为靠近台湾海峡的东海大陆架的震测剖面。这两个剖面有类似的构造特点,即从上新世底部至现代层层序完全呈水平状。图3、

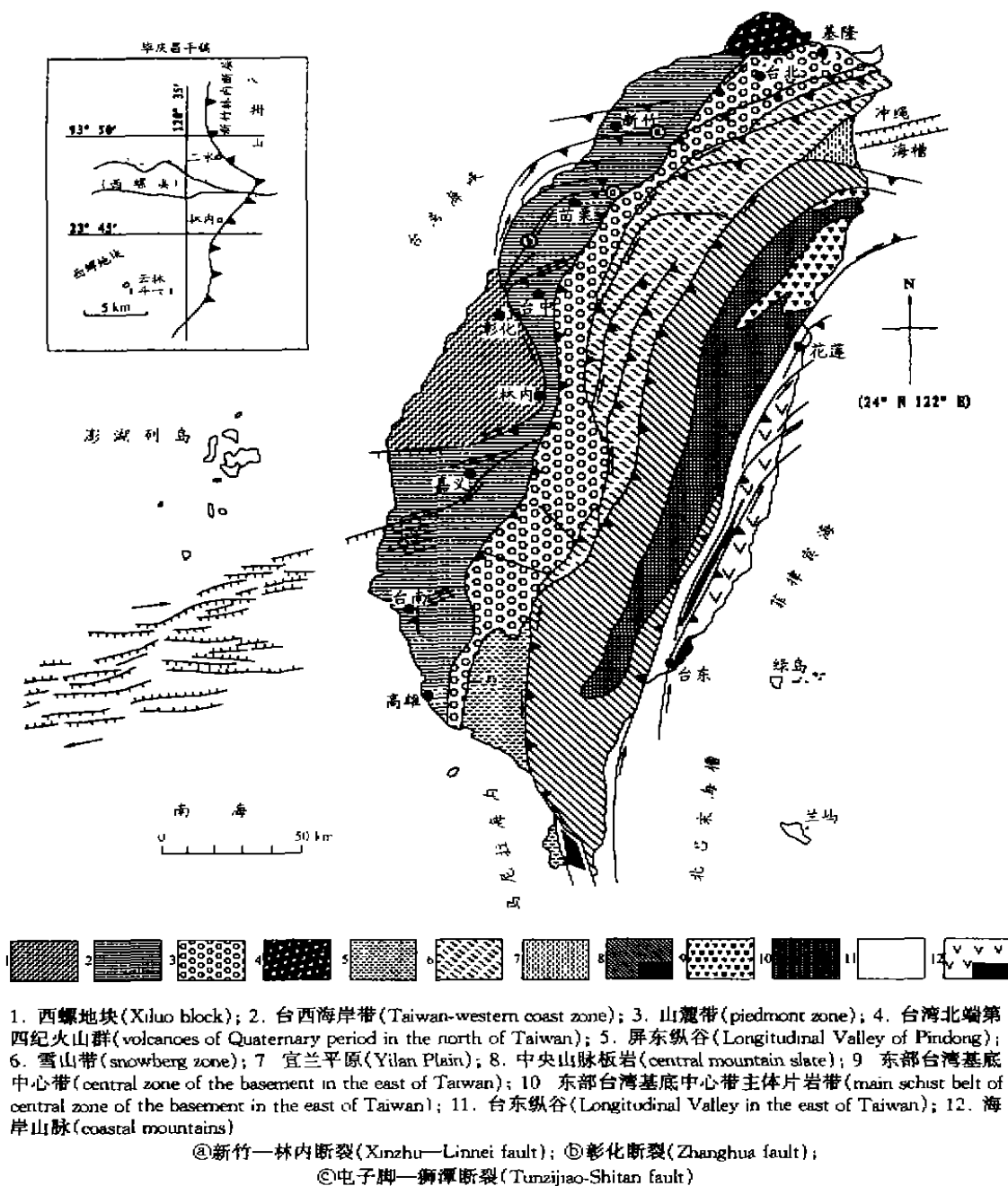


图 1 台湾地质纲要图附西螺地块简图(据文献[7])

Fig. 1 Simplified tectonic map of Taiwan with a chart of Xiluo block

(According to Biq Chungchang 1997)

4 中所揭示的海峡正断裂陷盆地以及图 5 东海南部断陷盆地均系上新世以前长期形成的。

根据王志明^[9]在临近新竹的桃园县沿海地区的观音 KY-1 号地层测井资料,上新统顶部卓兰层、下更新统头科山层及中更新统大南湾层的厚度分别为 533m、314m 及 36m。据俞何

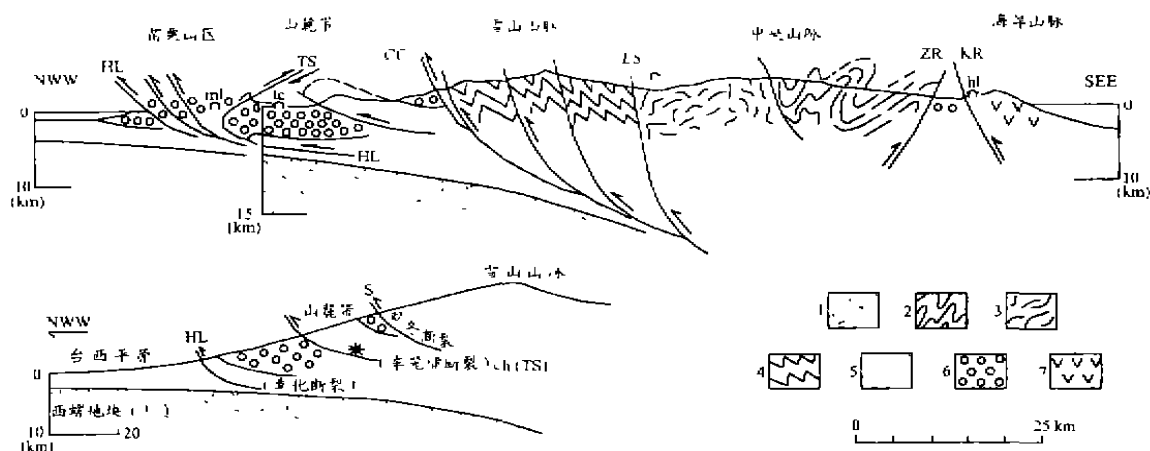


图 2 台湾地质剖面示意图 (兼图 2 之补充图)

1. 前第三纪刚性基底 (rigid basement of the Pre-Tertiary); 2. 前第三纪滑动基底 (sliding basement of the Pre-Tertiary); 3. (2) 上部之粘板岩 (已强烈变形破碎并作蛇绿岩化) (clayey slate on the top of (2); 4. (1) 的上部第三纪板岩及石英岩分离层 (tertiary slate and quartzitic belt on the top of (1)); 5. 主要为中新世及上新世地层, 分布在山麓区作迭瓦构造 (the layer of Miocene epoch and Pliocene epoch, distributed in the piedmont area in the form of imbricate structure); 6. 更新世磨砾层及造山后沉积 (分布于山系西侧) (gravel layer of Pleistocene epoch and post-orogenic sediments (distributed in the west of the mountain system)); 7. 第三系外来弧及俯冲杂岩 (exotic arc of Tertiary and under-thrust complex)

HL. 新竹—林内断裂 (Xinzhu-Linnei fault); TS. 屯子脚—狮潭断裂 (Tunzujiao-Shitan fault); CC. 潮州—车埕断裂 (Chaozhou-Checheng fault); LS. 梨山断裂 (Lishan fault); ZR. 中央山脉断裂 (fault of the central mountains); KR. 海岸山脉断裂 (fault of the coastal mountains)

ml. 苗栗 (Miaoshu); tc. 台中 (Taizhong); hl. 花蓮 (Hualien)

图 2 台湾地质剖面简图 (据文献[7])

Fig.2 Simplified geologic section of Taiwan

(According to Biq Chungchang, 1997 and with an additional chart)

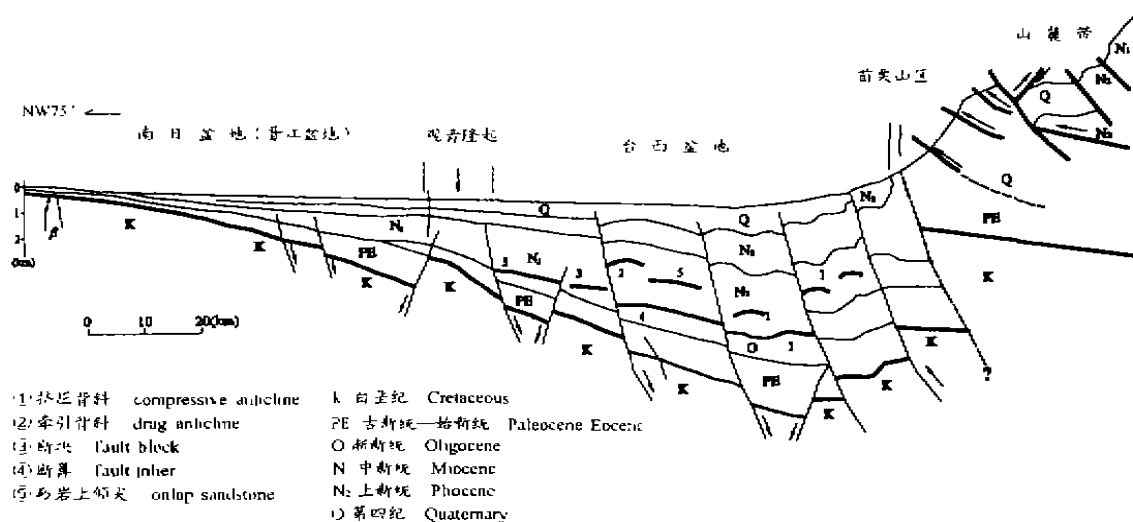


图 3 福建南日岛至台湾新竹—苗栗之间地质地震剖面图

Fig.3 Seismic geologic profile across Nann Island of Fujian province to Xinzhu-Miaoli of Taiwan

根据南海所 (1989)、俞何兴和陈汝勤 (1996) 及毕庆昌 (1997) 等图件编制

Synthetic Profile after S. China Sea Institute of Oceanography 1989,

H S. Yu & J.C. Chen 1996 and Biq Chingchang 1997, et al

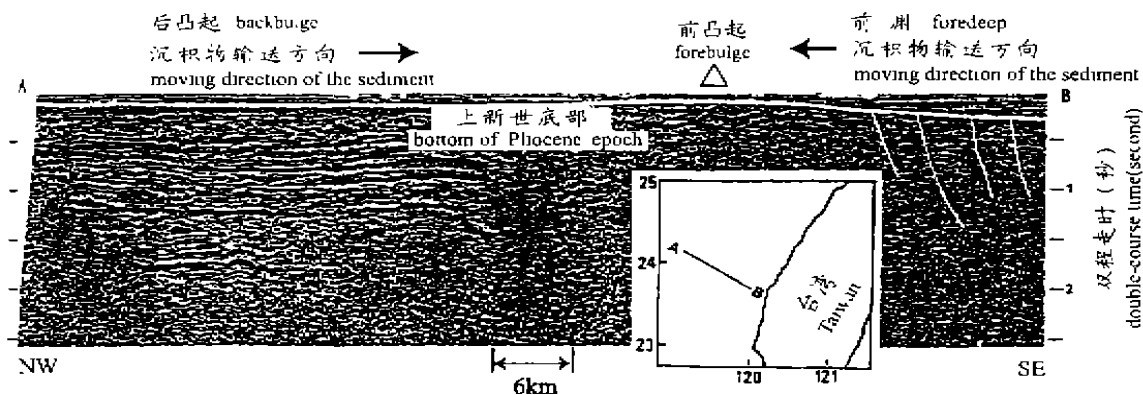


图 4 横穿台湾海峡的震测剖面(据台大俞何兴等,2000)

Fig 4 Seismic prospecting profile across the Taiwan strait (according to Yu Hexing et al, 2000)

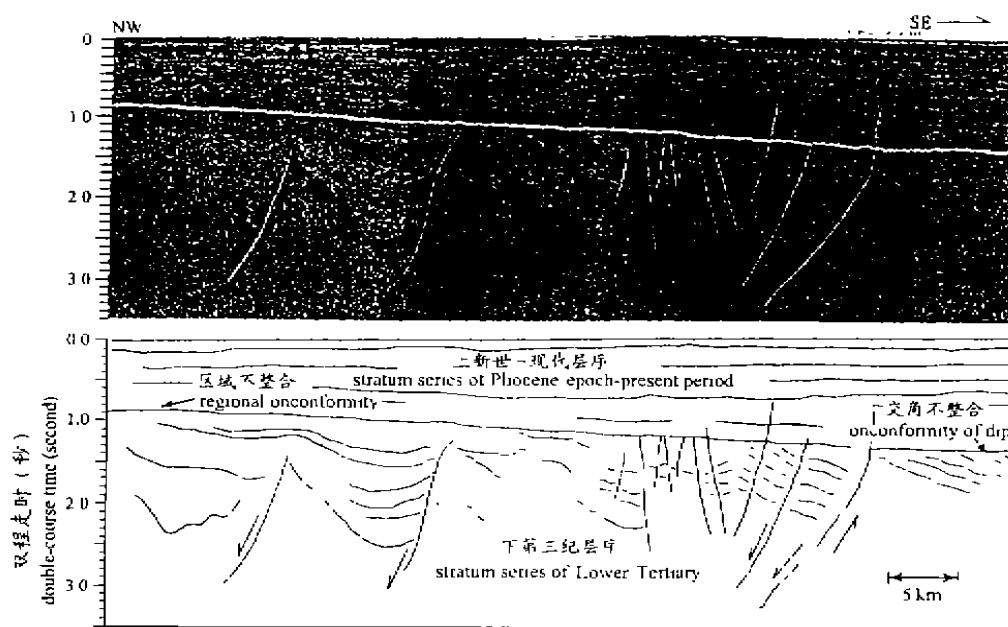


图 5 穿越东海大陆架的震测剖面(西北—东南走向)(据俞何兴等, 2000)

Fig.5 Seismic prospecting profile across continental shelf of the East China Sea
(Striking from NW-SW)(According to Yu Hexing et al, 2000)

兴、陈汝勤资料^[10],海峡中的第四纪岩层已经固结成岩,更新世为砂岩,全新世为页岩。陆上海岸带的下更新统则主要由各色砂岩,中灰色砂质页岩、淡灰色泥质砂岩和砾岩组成^[11]。图4剖面显示,这组未受断层带干扰的水平状岩层,厚度至少300m,形成良好的承力层与隔水层,可以在其中开凿海底隧道。图3则是位于图4与图5之间的横穿台湾海峡自南日岛(平潭岛附近)至新竹之间的地质地震剖面。

拟议中的平潭—新竹隧道线之西端,将有可能遇到福建沿海的滨海大断裂,但此处的基岩

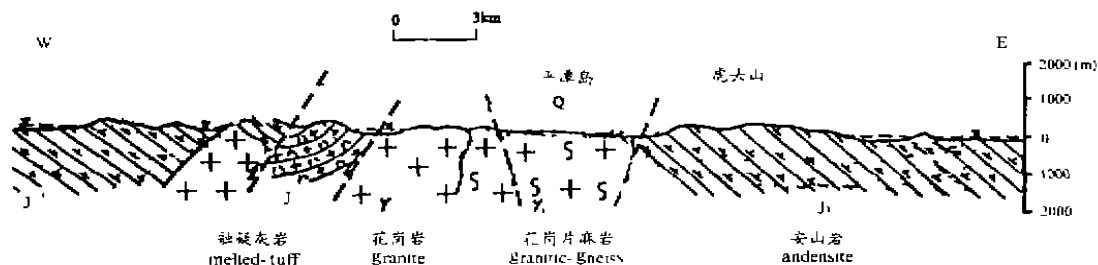


图6 平潭岛附近地质剖面图(据福建水文地质大队,1969)

Fig.6 Geologic section of the Pingtan Island, western terminal of the Imaginative north route of TST project (According to Hydraulic-Engineering Team of Fujian province, 1969)

是质地较好的花岗岩、花岗片麻岩及安山岩(图6)、只要断层的每年滑移量(必须仔细测定)在工程上可以处理的范围内,那么隧道垂直于断层走向则是比较理想的条件,而且断层两壁是花岗质岩石,工程上容易处理。

隧道西端出口处的平潭岛,该处主要是花岗岩分布地区,标准的花岗岩球状风化地貌区,场地开阔、石材丰富,是理想的隧道终端。

3 台湾海峡地震活动特征

1999年9月21日在台湾发生的 $M=7.3$ 级的强烈地震,给台湾带来严重的损害,也给福建沿海带来极大的震惊。1994年9月16日台湾海峡南部水域中发生的 $M=7.3$ 级强震,给附近的福建沿海城镇带来一定的损害。由于台湾地处这样的太平洋沿岸地震带,台湾海峡是一个地震常发地区,因此,人们怀疑将来修建台湾海峡隧道,会不会受到地震的破坏?这是完全可以理解的。但是地震的发生都是有规律的,即使在多地震地区也可找到安全地带,关键是找到其规律。

3.1 台湾地震的地质背景

除了与板块碰撞有关的消亡带有密切伴生的中及深源地震外,几乎所有的地震都与地壳上的活动断裂带密切相关。现台湾岛已查明的活动断裂,约有50多条^[12],有些断裂相连贯为一个系统(图1所示)。事实上,任何一条活动断层,在每次地震之后都会延长或连贯。从地域上看,台湾地震最多的是在台东纵谷地带(东带)及西部麓山带与台西平原交接带(西带)。东带位于弧陆碰撞带,该地域的地震属于较深的浅源地震至中源地震,而西带的地震则多属于极浅源地震。

据美国国家地震情报中心所提供的台湾地震纲要(1999)^[13],自1906年至1999年台湾共发生18次 $M \geq 7.0$ 以上地震,只有1999年的9.21集集大震为极浅源地震,台湾勘定其震源深度为7.5km,因此其破坏性极大,震中烈度达Ⅺ度(台湾的震度为7度),包括2000年6月11日南投的 $M=6.8$ 级余震,亦为极浅源地震($h=10.2\text{km}$)。在美国地震情报中心记录的18次大震中,其中有两次浅源大震,震源深度分别为10km和17km,但都发生在东部太平洋中。其他各次大震的震源深度均在33~69km,或者位于中央山脉山根之下的深处,对陆地表面的破坏较小,对西部台湾海峡的影响也不太大,这是因为菲律宾海板块不是俯冲于欧亚大陆板块之下。需再指出的是这18次大于7级的大震,其震中没有一次发生在台湾海峡之中。

关于 9.21 集集大震的震源机制和参数,据上述美国资料^[12,13]和台湾订正后的资料^①,时间为 1999/09/21, A. M. 1: 47(北京时间);震中位于北纬 23.78°,东经 121.09°;M=7.3。主震的主压应力轴为东西向(89°),倾俯角平缓(5°~19°),震源深度极浅(7.5km),主应力聚积在台湾阿尔卑斯盖层褶皱的逆冲断层之中,具体位置在车笼埔逆断层的深处,主应力促使这个已经存在的车笼埔活动断层再一次向西逆冲,断层面面向东倾斜(27°~30°),断层走向近于 NS(357°),地震断层北起苗栗的卓兰,南至雲林斗六镇的桶头桥,地震断层长达 80km,(向北延伸方向,可与屯子脚活断层及狮潭活断裂相联,毕庆昌将其归纳为狮潭—屯子脚断裂系(图 2 剖面之 TS)。

狮潭—屯子脚断裂系在台湾岛西北,作为推覆体出露在苗栗山区之东,高度较大,断层面面向西倾斜(图 1)。当此推覆体向南延伸进入中部平原区,其上部被剥蚀掉,故露头只保留推覆体下部的断层面,倾向东。因而在图 1 所示的弧状狮潭—屯子脚断裂系在平面地质图上,表现出北段断层面面向西倾斜,南段断层面面向东倾斜(请对比图 2 中两个剖面图之西段)。

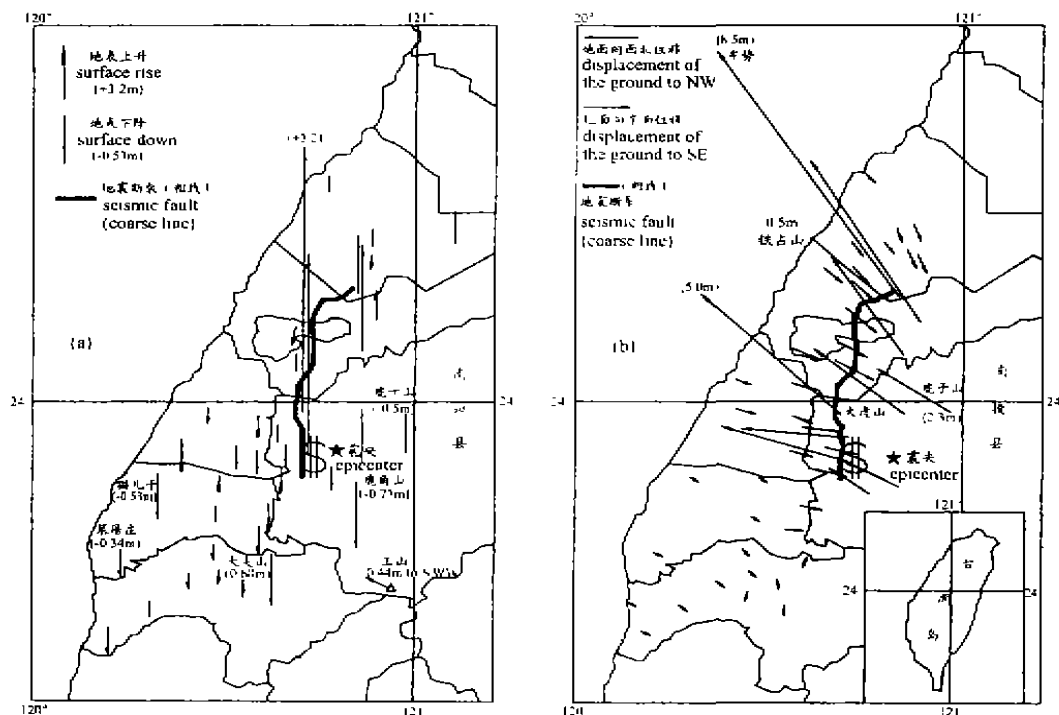
台湾中央大学应用地质研究所曾将台湾的活断层划分出 53 条,而毕庆昌则大致划分为 13 条。在台西平原出现的,西侧主要为彰化断裂,向东则为车笼埔断裂。杨洁豪于 2000 年 11 月 20 日在南京大学地球科学系报告称,他们在 9.21 大震前,用地电法测出了该断裂的准确位置,并发现该断裂在震中附近并非直线分布,而是作向西弯曲状。根据该所提供的台湾地区活断层分布图,车笼埔断裂向北与屯子脚断裂相交,再向北延伸即是狮潭断裂。因此这两家所圈的断裂可能有成因上的联系。毕氏地质图上所描绘的狮潭—屯子脚断裂向西作弧状突出,可由此 9.21 集集大震时地盘向西北方向的运动反映出来,即在 24°13'N 以北,120°50'E 以西为最大,正好和毕氏所绘的突出顶点相当。说明这并不是偶然的。

据美国地质调查局^[12,13]和刘聪桂等的资料^①,台湾 9.21 集集大震时,整个地震断裂的上盘宽约 15km 的地带,逆冲于下盘之上,最大的上冲高度达 7~8m,整体向西北的水平移动量平均达 3~4m,最大量达 8.5m(位于台中县北界东势镇),向南依次减小至 5.3m(台中县和平乡)及 5m(南投县草屯大虎山)。在断裂上盘的最东面,台湾的地理中心——虎子山三角点原点坐标向 N54°W 方向位移只有 2.8m,(台湾大学数据为 2.3m),而且高程下降 0.5m。从中心坐标点沿 NNE 走向向南,南投县鹿角山的高程下降 0.77m,地面向西移动的距离则更小,至嘉义县大尖山,高程仅下降 0.68m。地震断层东面的玉山,地面也向 NWW 移位 44cm,但高程无变化。自玉山所在的构造线向东,则未见到地面变形(图 7)。至于逆冲地震断裂的下盘(西盘),由于处于受压状况,一般只可能出现和主动盘上盘同方向(NWW)的位移。然而 9.21 集集大震时,在属于下盘的地带内,地面却有向 SE-SEE 移动的记录,而且比较广泛,其滑移量虽不如上盘推移的大,但却是自北而南,呈现出整体性移动。其中苗栗铁站山(地近海岸)及台中王田山分别向 SE 及 SEE 位移数十厘米,彰化的松柏坑及樟普寮均向 SEE 位移数十厘米^②。此外,据刘聪桂等资料^①,下盘在邻近断裂带附近的位移量,因受上盘的抵制,其位移量变得较少,但仍然存在(图 7)。

必须指出,当地盘作整体性相对移动时,局部地方便出现压缩。例如,北段东势和铁站山

① 刘聪桂,陈文山. 变脸的大地. 9.21 集集大地震. 台湾大学地质系, 1999

② 据台湾《中国时报》1999-10-09 报道台湾联勤总部测量队的新闻发布,台湾《联合晚报》1999-10-11 报道成功大学的计算报告及《中央社》台北 1999-10-20 报道台湾内政部地政司初步测量等的综合资料,并经台湾大学地质系刘聪桂等的资料校核之后引用。



(a) 东盘上升,西盘下降的矢量(up and down vector chart of east part and west part); (b) 西盘(即西螺地块向东方潜入)向东,东盘向西的位移矢量(displacement vector chart of west part and east part)

图7 台湾9.21集集大震地面变形图(转引自台湾大学地质系,并据美国地质调查所,成功大学,联合晚报等1999年资料略有增补)

Fig 7 Crustal deformation during Taiwan 9.21 Jiji earthquake, 1999

之间地面最大缩短量8.97m,中段新社头柜山至海边王田山缩短3.86m,南段虎子山至樟浦寮缩短3.02m。伴随着东西基线的地面缩短,南北向基线则发生伸长,表现在和地震断层相平行的双冬断裂南端的NS测线上伸长1.5m。同样,当地震促使断层上盘仰冲上升时,在远离上隆带的西侧,地盘发生相对下降,所有下降点所在的地壳表部,都被牵涉到整个地震幕中发生的地面运动范畴之内。远处的台西海岸,均作显著的沉降,一次性即达-0.5m。

总之,在这次集集大震时,地震断裂的上盘受到东来之逆冲推力而向西偏北推进,与此同时,西螺地块也向东推进(图7(b)中斜向东南箭头所示),并潜入地下深处。刘光夏^[14]认为:“该‘砥柱’已抵达中央山脉的西侧,”由于西螺地块的向地下深处潜入,带动了中央山脉西坡的虎子山(下沉0.5m)鹿角山(下沉0.77m)及嘉义的大尖山(下降0.68m),而止于中央山脉,最高峰玉山尚无明显下降,其他下盘各处,均有不同程度的下降,(海岸近处蔡厝庄-0.34m,猫儿干-0.53m,等等)。整个西盘是由于(26~30)阶地慢流^[15,16]带动而向东的(图8)。它是引发这次集集9.21大震的主要因素^①。

3.2 台湾海峡地震的特点

根据卓秀榕等^[17]研究,本区主压应力轴的分布以NEE-SWW方向为主,约占41.7%,其

① 2000-10-18在海峡两岸中央大学,南京大学,东南大学第四次校友学术研讨会上,钱祥麟教授利用全国GPS系统最新数据等资料,以图表论述了亚洲大陆向东南台湾方向移动的事实。

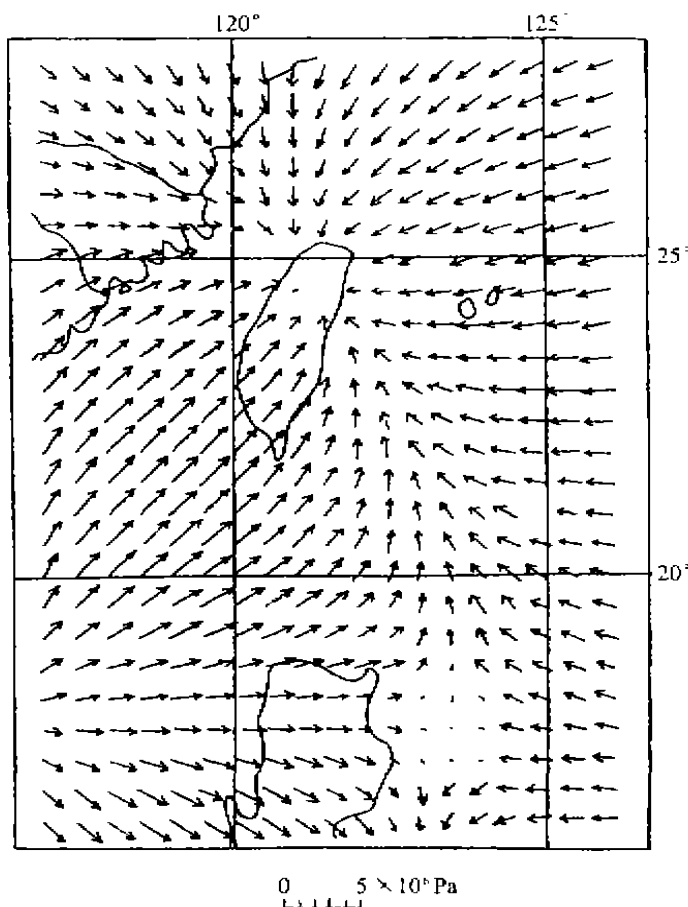


图8 台湾地区甚高阶场(26~30阶)地幔流图

(据蒋家桢,彭阜南主编,1992)

Fig.8 Rather high degree (26~30 degree) stress field of mantle convection currents under lithosphere in the Taiwan strait (According to J. Z. Jiang, Compiled by F. N. Peng, 1992)

次是 NW-SE 方向,占 29.2%,表明东西向和北西向的挤压力可能是孕育较强地震的力源所在。主压应力轴的仰角小于 20° 的约占 45.8%,小于 30° 的约占 66.7%,在 $21^\circ \sim 40^\circ$ 之间的约占 37.5%,表明主压应力轴以水平力为主,近似水平力为次,仰角大于 45° 的斜力极少,而垂直力几乎没有。

这些特征与闽—台地区的区域应力场一致,断层错动表现为剪切位错型。这与当前福建省和台湾的北西向和东西向的构造运动是一致的。他们还分析了本区的剪切应力值的分布,认为凡是属于低应力值分布地带,多数出现在地震活动带上,数值为数百万帕左右,最低可达 $3 \times 10^5 \sim 7 \times 10^5 \text{ Pa}$,而在该断裂相交之处,大多数在 $200 \times 10^5 \text{ Pa}$ 以上;海峡中的中等以下地震多发生在该活动断裂 (NE 及 NW 向) 交汇之处。从台西沿新竹—林内断裂密集分布的小震 (3~4 级) 情况看来,台湾和福建的中小地震都是聚集在活动断裂系中应力释放的结果。而且这些中小地震的烈度在海床下 40m (设想中隧道的深度) 以下的隧道建筑位置还要衰减,根据唐山地震的经验^[18],至少要衰减 1 度。

海峡中最大的一次地震是 1604 年泉州外海的 $M=7.5$ 级大震,震中位于滨海大断裂和一条通过台中市的 NW 向断裂 (不过台湾的活断层分布图上并未表露,是否存在,尚需考查) 的交汇处。其次是 1918 年南澳的 $M=7.5$ 地震,震中又恰好位于上述同一条滨海大断裂和通过南澳至台湾南端南海中的一条 NW 向大断裂的交汇点。这两次大震均与地壳型的滨海 NE 向大断裂及与之相交的 NW 向大断裂交汇有关。在沿 NE 向大断裂的相关处所设置监视点,可以设法测定断层上的地应力集中情况,断层的蠕变量及其他参数,以便监测强震的发生规律及其对工程结构物的破坏程度。

3.3 台湾海峡南部大震

台湾海峡中的第三个大震 ($M=7.3, 22.60^\circ \text{N}, 118.93^\circ \text{E}$) 于 1994 年 9 月 16 日发生于台湾

海峡南部。林思诚等^①和郑天愉等^[19]从地震参数研究认为,这次大震震中(22.60°N , 118.93°E)远离欧亚板块与菲律宾板块的边界,也不位于较大断裂之上,震后又未发现大的滑动。震源机制的张应力轴作 NS 走向,水平分布,压应力轴则作近似垂直分布,与 1999 年 9.21 台湾集集大震的特点绝然不同。廖其林等^[20,21]在研究闽南地球物理场时就发现沿台湾海峡南部以及陆上的诏安、南澳一带,地热值较高,由此推测 1994 台湾海峡南部大震的垂直压应力轴可能系热地幔流的上涌产生的。至于多次余震的分布,福建地震局认为是按 X 状的断裂面分布,而中科院地球物理所则认为从广泛的地域看,系以主震为中心作环状分布,故不存在与断裂的成因联系,其附近又没有历史地震的记载,余震不多,可能是一起“孤立事件”,系地幔流上涌或南海板块萎缩所致,而与台湾 9.21 集集地震来源于菲律宾板块的碰撞作用绝然不同。

王洪涛等^[22]对台湾海峡两岸“热-震”能态结构作了研究,廖其林等^[20,21]则从地震波观测发现在泉州以南地段,存在一个 P 波速度为 5.89km/s 的相对低速层,暗示着该区曾经有过上地幔物质上涌的事件。唐山地震之后,也找到了低速层存在,并且震前在震中区的深观测井中,发现地热升高使包装仪器的蜡纸都熔化了^[18]。我国著名的地震学家傅承义提出了地震的“红肿论”学说,可见地幔流的上涌,可以引发地震。海城-唐山地震幕中,两地同样是受到东面太平洋板块向西碰撞的动力,海城在东,受撞击应力在先,可是那里震前的莫霍面只出现有小“鼓包”上隆迹象,并未找到切割“鼓包”的断裂,亦未找到上涌的低速层。而唐山却在震前出现有低速层上涌,且有切割莫霍面的深部断裂,上下断距 $2\sim 3\text{km}$,所以唐山地震在地壳应力和热地幔上隆双重作用下其地震强度远大于海城地震。由此可见,仅只热地幔上涌引发的地震,较之多种应力偶引发的地震要小。台湾海峡南部,仅因热地幔引发的 1994 年 9.16 地震,其级别与烈度,已经是相当强大了。在台湾海峡的北部,那里的“热-震”能态结构^[1]要比海峡南部低,估计在未来单纯因热地幔流上涌而引发的地震的机率会比 1994 发生的台湾海峡南部那样大震的机率要低。

综上所述,台湾 1999 年的 9.21 地震和 1994 年在海峡中发生的 9.16 大震,二者的大地构造背景是不同的,9.21 大震以及今后可能的类似大震,其主压应力将促使“年轻”的台湾新生代盖层产生变形,释放应力。按断裂力学的观点,应力多聚积在岩体的破碎带——逆掩断裂带,而释放掉了。至于碰撞时由东而西的主压应力对台湾海峡地区的影响,则已逐渐减弱。此外,从台湾海峡盆地上第四纪以后的盖层多呈水平状也可以说明,第四纪以来的新构造运动对台湾海峡的影响远比台湾本岛的为小。不过,海峡中活动断裂的滑移,不论平时或震时,都必须密切注意,从现在起,即可着手利用全球卫星定位系统(GPS)来仔细测定。

至于海峡中未来产生的地震,从历史地震资料以及近年来地震资料统计,不论中型或较强的,多半集中在海峡南部,而且都在平潭-新竹一线以南。水域中地震的烈度,无论是在水平方向或垂直方向上都有一定的衰减。根据唐山地震的经验,坑下 -25m ,烈度(在烈度Ⅺ度区)即衰减 1 度。以这次 9.21 集集大震震中烈度Ⅺ度,对福州产生的烈度只有Ⅳ度,而国家地震局对台湾海峡厘定的基本烈度为Ⅶ度。所有台湾的强烈地震其烈度在台湾海峡内明显衰减。

关于大震时震波是否和隧道中的高速车产生共振而使其脱轨,还要看地面运动的方向,是 EW 或 NS,与列车进行方向一致或垂直或斜交。而且在大震的 P 波与 S 波传播之间尚有短暂的时间间隔,日本神户地区就利用了这个阈值,自动发出信号,停止或减缓高速列车行驶,没有

① 福建省地震局林思诚等 1994 调查该年 9 月 16 日 $M=7.3$ 级地震资料。

造成出轨事件。故造成脱轨的危险性不一定很大。唐山大震时,在地震烈度Ⅷ度以上的普通行速火车才脱轨。对于这类问题将有待地震工程和铁道部门深入研究。

4 海峡隧道可行性分析与认识

通过以上分析,可以初步认为,尽管台湾海峡中部和南部地质条件比较复杂多变、深度有时相差悬殊,岩性变化大,但是从平潭至新竹之线的地带,地质条件比较单一,不透水的水平页岩层尚有足够厚度,其间又无断裂穿割,岩质较软,宜于挖进机作业,只要有足够的强度,可以避免渗透的砂岩夹层,那么,修建隧道还是可行的。此线路上出现的暗礁较浅地带,如果利用得当,可作为人工岛的基脚,亦可利用为出渣之口。在地震方面,1999年9.21台湾集集强烈地震和1994年9.16台湾海峡南部7.3级强烈地震是两种不同的类型。前者主要是因菲律宾板块向西和西螺地块向东的相互作用。驱动西螺地块向东潜入的动力,来自甚高阶场(26~30阶)地幔流应力场。正由于西螺地块向东作低倾角潜入的特点,迫使东盘作NWW向仰冲,从而限定了这次9.21集集大地震发生时的各种特点,并对海峡地区,起到了屏障作用。后者则是由于高热地幔流上隆造成的,故其地震时的各项参数,不同于9.21集集大震,也有别于台湾海峡中的其它地震。从近百年来这两次大震发生的不同机理,启示人们今后要从更多的角度和用多种手段去预测未来地震。至于其对海峡两岸及海域中工程建筑的影响,从地震方面考虑,应以9.16型地震为主。但即使9.16型这样的强震,对平潭—新竹一线以北的影响也并不是那么严重的。

第一作者简介: 彭阜南,男,1923年生,曾任国家海洋局二所兼三所研究员,现兼任清华大学21世纪发展研究院台湾海峡隧道论证中心顾问。

参考文献(References):

- [1] 方晓阳.台湾海峡隧道工程可行性研究.北京:清华大学出版社,2000.11-44 [Fang Xiaoyang. A feasibility study on Taiwan Strait tunnel project (A multi-purpose project): A regionalization state approach: Proceedings of academic symposium on Taiwan Strait Tunnel Project. Beijing: Tsinghua University Press, 2000, 11-44.]
- [2] 彭阜南.台湾海峡及两岸地质工作的回顾与展望.见:彭阜南,等编.台湾海峡及其两岸地质地震研讨会论文集.北京:海洋出版社,1991 [Peng Funan. Looking back and forward to the geological works of the coasts of the Taiwan Strait. In: Peng Funan et al. eds. Proceedings of symposium on geology & seismology of the Taiwan Strait and its coasts. Beijing: Oceanic Press, 1991.]
- [3] 陈琴.序言.见:彭阜南,等编.台湾海峡及其两岸地质地震研讨会论文集.北京:海洋出版社,1991. [Chen Qian. Introduction. Proceedings of symposium on geology & seismology of the Taiwan Strait and its coasts. In: Peng Funan et al eds. Beijing: Oceanic Press, 1991.]
- [4] 清华大学21世纪发展研究院.“台湾海峡隧道论证学术研讨会”论文集及所附新闻报道汇编.北京:清华大学出版社,2000. [21st Century Development Institute, Tsinghua University. Proceedings of academic symposium on Taiwan Strait Tunnel Project & The collection of news about the T. S. T. Project. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.]
- [5] 国家海洋局第二海洋研究所.台湾海峡1:100万地形图.北京:国家海洋局印,1987. [2nd Institute of Oceanography, SOA. Topographic map of the Taiwan Strait, 1:1,000,000. Beijing: Published by State Oceanic Administration (SOA), 1987.]
- [6] 水涛,徐步台,梁如华,邱郁双.中国浙闽变质基底地质.北京:科学出版社,1988. [Shui Tao, Xu Butai, Liang Ruhua,

- Qiu Yushuang. Geology of the metamorphic basement of Zhejiang & Fujian provinces. Beijing: Scientific Press, 1988.]
- [7] Biq Chingchang. TAIWAN. Encyclopedia of European and Asian Regional Geology edited by Eldridge M. Moores & Rhodes W. Fairbridge and Published by Chapman & Hall, London. 1997, 711-717
- [8] 张锡龄. 台湾西北部中新统的区域地层及含油气性. 见:“海洋地质调查”东海地质译文汇编(三),地质部海洋地质调查局,1980. [Chang Xiling. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 1971, 55(10): 1838-1865]
- [9] 王志明. 台湾桃园—苗栗近海区海底地质构造及含油气性. 转引“海洋地质调查”东海地质译文汇编(三),地质部海洋地质调查局,1980. [Wang Zhiming. *Petroleum Geology of Taiwan*. 1967, 5: 81-98]
- [10] 俞何兴,陈汝勤. 台湾海峡之沉积盆地. 编译馆主编. 台湾:渤海堂文化公司印行, 1996. [Yu Hexing, Chen Ruqin. *Sedimentary Basins of the Taiwan Strait*. Culture Publishing Co. of Bohai Tang House, Taiwan, 1996.]
- [11] 中国科学院南海海洋研究所,福建海洋研究所,台湾海峡煤建组. 台湾海峡西部石油地质地球物理调查研究报告. 北京:海洋出版社, 1989. [Research Group on the Taiwan Strait, Oceanic Institute of the South China Sea. Academy of China and Oceanic Institute of Fujian. Report of the Geophysical and Petro-geologic Investigation of the West Taiwan Strait. Beijing: Oceanic Press, 1989]
- [12] Bonilla M G. A note on historic and Quaternary faults in western Taiwan. Open-File Report 99-447 Version 1.0. U.S. Dept. of the Interior USGS, 1999
- [13] National Earthquake Information Center (NEIC), USGS. Earthquake Bulletin: Taiwan and a supplement. 1999.
- [14] 刘光夏,赵文俊,吴岫云,等. 台湾地区地壳厚度的研究——三维重力反演的初步结果. 科学通报, 1990, 35(24): 1892-1895. [Liu Guangxia, et al. Research on the crustal thickness of Taiwan region——Preliminary result of the three-dimensional inversion of gravity. *Sciences Bulletin*, 35(24): 1892-1895]
- [15] 蒋家桢. 台湾海峡及其邻区岩石圈层下地幔流应力场. 东海海洋, 1992, 2: 35-42. [Jiang Jiazhen. The stress field of mantle convection currents under lithosphere in the Taiwan Strait and its adjacent region. *Donghai Marine Science*, 1992, 2: 35-42.]
- [16] 蒋家桢,李全兴,徐德琼. 东海及琉球岛弧地区岩石圈层下地幔流应力场. 东海海洋, 1983, 1: 11-18. [Jiang Jiazhen, Li Quanxing, Xu Dexiong. The Stress field of mantle convection currents under lithosphere in the region of the East China Sea and Ryukyu Arc. *Donghai Marine Science*, 1983, 1: 11-18]
- [17] 卓秀榕,桂继光,林树,等. 台湾海峡地震活动规律及断裂构造的地震学迹象. 见:彭阜南,陈运泰主编. 台湾海峡及其两岸地质地震研讨会论文集. 北京:海洋出版社, 1991. [Zhao Xurong, Gui Jiguang, Lin Shu, et al. Pattern of seismic activity in the Taiwan Strait and its seismological evidence of fault tectonics. In: Peng Funan et al, eds. Proceedings of symposium on geology & seismology of the Taiwan Strait and its coasts. Beijing: Oceanic Press, 1991]
- [18] 彭阜南. 唐山地震见闻记. 台湾中兴工程科技研究发展基金会出版, 2000. [Peng Funan. What we had seen and heard from 1976 Tangshan earthquake, Eastern China. Taiwan: Sinotech Foundation for Research & Development of Engineering Sciences & Technologies, 2000.]
- [19] 郑天愉,刘鹏程. 1994年9月16日台湾海峡地震及其构造背景研究. 地球物理学报, 1996, 39(1): 66-79. [Zheng Tianyu, Liu Pengcheng. Study of the 16 September 1994 Taiwan Strait earthquake and its tectonic setting. *Chinese Journal of Geophysics*, 1996, 39(1): 66-79]
- [20] 廖其林,王屏路,吴宁远,刘宝诚,等. 福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆炸地震研究. 地球物理学报, 1988, 31(3): 270-280. [Liao Qilin, Wang Pinglu, Wu Ningyuan, Liu Baosheng, et al. Explosion seismic study of the crustal structure in Fuzhou-Quanzhou-Shantou region. *Chinese Journal of Geophysics*, 1988, 31(3): 270-280]
- [21] 廖其林,王振明,丘锡兴,等. 福建省地壳和上地幔的初步研究. 见:彭阜南,等编. 台湾海峡及其两岸地质地震研讨会论文集. 北京:海洋出版社, 1991. [Liao Qilin, Wang Zhenming, Qiu Taoxing. Preliminary study of the crust and upper mantle in Fujian. In: Peng Funan, et al eds. Proceedings of Symposium on Geology & Seismology of the Taiwan Strait and Its Coasts. Beijing: Oceanic Press, 1991]
- [22] 王洪涛,范光禄,郭振琪,周仲豪. 板块碰撞与台湾海峡两岸“热-震”能态结构的研究. 《台湾海峡及其两岸地质地震论文集》,海洋出版社, 1991. [Wang Hongtao, Fan Guanglu, Guo Zhengqi, Zhou Zhonghao. The structure of thermal-shocks energy regime and plate collision in surrounding Taiwan Strait. In: Peng Funan, et al eds. Proceedings of symposium on geology & seismology of the Taiwan Strait and its coasts. Beijing: Oceanic Press, 1991.]

Analysis of Geologic and Seismologic Conditions of the Taiwan Strait Tunnel

PENG Fu-nan¹, YE Yin-can¹, SHI Bin², YANG Shu-feng³, QIAN Xiang-lin⁴, LI Ping⁵

(1. 2nd Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012; 2. Nanjing University, Nanjing 210093;

3 Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 4. Beijing University, Beijing 100871, China;

5. Geological Institute, State Seismological Bureau, Beijing 100029, China)

Abstract: The Taiwan Strait Tunnel (T. S. T), as a great project, has been proposed for a long time and met many challenges from the beginning of the feasibility study that has attracted attentions among scientists in both sides of the Taiwan Strait. The key question is whether this under-sea tunnel could be constructed with present technologies under such complex geologic and seismologic conditions. Results of current research indicate that sea floor in the north of the Strait along coast of Taoyuan county of Taiwan is covered by the late Tertiary to Quaternary sandy shale and shale with a thickness of more than 300m without large fault-belt, which could serve as a good bearing and impermeable layer. Along the coast of Pingtan Island, Fujian in the west of the Strait, there is an area with vast distribution of granite, which is ideal for the construction of the tunnel terminal. We therefore suggest that the shortest line with a distance of 126km from Pingtan Island, Fujian to Hsinchu, Taiwan should be considered as the undersea tunnel line for its simple and stable geological condition.

Key words: undersea tunnel; geology; earthquake; Taiwan Strait