

日本关西海上机场的建设 及其海底地基处理

赵振东

(国家地震局工程力学研究所)

一、概 述

正在建设中的日本关西海上国际机场位于大阪湾的海面上，其离海岸最近的距离为5公里。日本政府上下、民间历经二十年之久的酝酿、准备及设计，终于在1987年正式进入了施工阶段。施工期预定为六年，1993年正式建成，投入使用后将作为世界上第一个真正的海上机场。它将不会受到骚音和周围净空环境的影响与限制，出入港飞机可以在二十四小时昼夜起降。

1988年9月笔者有幸应邀乘船参观了一片繁忙的施工现场，热情的主人为我们这些对土木工程饶有兴趣的外国参观者详细介绍了海上机场的设计构想，施工现状及建成后的远景，并回答了我们的有关问题。

按设计要求，整个工程将先用填筑施工法建成一个面积为5110米的海上人工岛，然后再在岛上建造海上机场。环绕人工岛的护岸全长约11公里。在岛上将建有起落跑道、引导跑道、停机坪、候机楼、导航设施、后勤保障设施及通往海岸铁路的车站等，同时还将建造一座联络人工岛与海岸的铺设铁路与公路的联络桥。根据第一期工程建设计划，机场的年设计起落能力达10万次，日起落能力可达280次。

该机场的施工海域的水深为16.5米~19.0米左右。海底地基20米左右以上为软

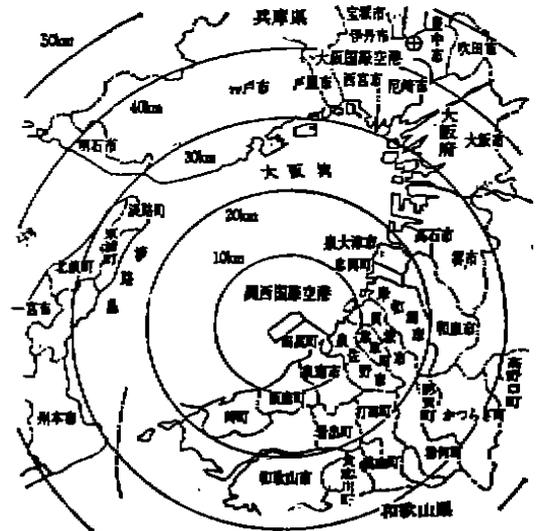


图1 日本关西海上机场位置图

弱的冲积粘土层，再往下至100米左右为粘土层与砂砾层交互而成的洪积层。这样，该海域的施工条件与日本以往建造的人工岛相比，具有海水深、面积大、填筑土石方量大等困难。据计算，除掉护岸外，护岸内的需填筑的土石方总量约为1.5亿米³，这些土石方重力载荷将作用到洪积层的深层。这样，不仅施工量大，而且也给地基处理带来新的难题。因此，海洋地基地质调查，护岸的设计与施工，填筑施工及地基沉降处理等将是机场建造中的几个关键问题。下面仅就该海域海底地基特性及地基处理的调研结果分述如下。

二、海底地基特性

在海上机场设计之初，约历经五年之久对建设海域的地质做了详细的调查。在65个地点进行了现场钻孔调查，并对孔样进行了各种各样的试验研究，基本上掌握了土质与地质特性。

1. 冲积粘土层特性

整个建设场地的地基表面20米左右的冲积粘土层大体上是由海成粘土组成，其成分大致是淤泥占40~60%，粘土占60~40%。根据液性界限与塑性界限试验而得到的塑性图，其土质大体上是高塑性无机质粘土，塑性指数 $I_p = 10 \sim 80$ ，液性界限

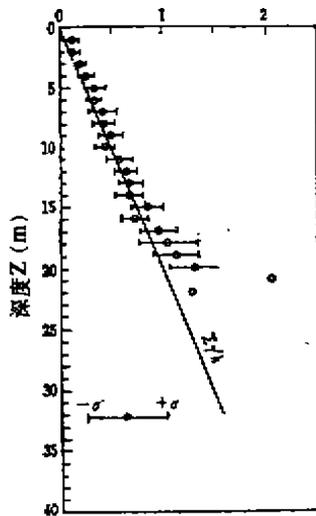


图2 压密屈服应力分布图(冲积层)

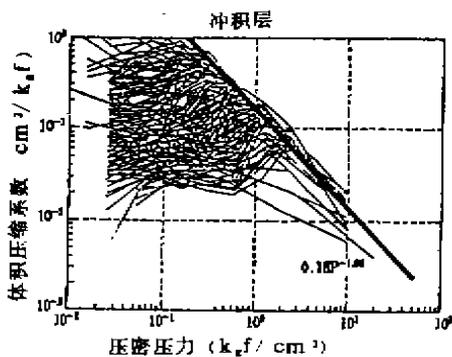


图3 体积压缩系数

$w_L = 30 \sim 120\%$ ，为一般的港湾海底的粘性土。

由单轴压缩试验得到的单轴压缩强度 q_u 值的分布是较为分散的。图3给出了压密屈服应力随深度的分布状态。 $\sum r' h$ 表示相应深度的被复土的压力，大体上为正规压密状态。

根据土质试验测定的结果，地基土的有关设计常数如下：

- 单轴压缩强度 $q_u = 0.04z$ (kgf/cm^2)
- z 为从海底平面算起的深度。
- 体积压缩系数 $m_v = 0.18 \bar{p}^{-1.08}$ (cm^2/kgf) (参考图3)。
- 压密系数 $C_c = 90$ (cm^2/d) (参考图4)。
- 强度增加率 $c/p = 0.3$ 。

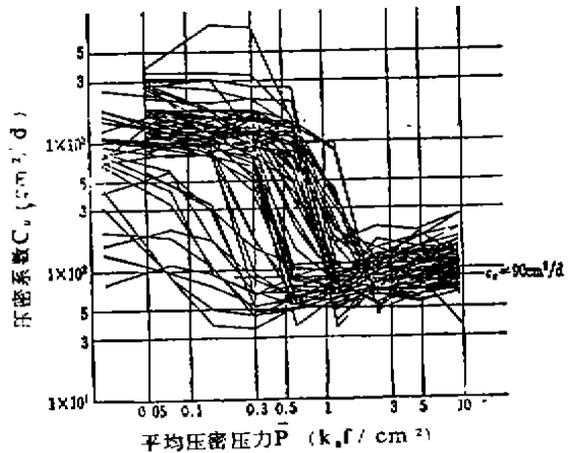


图4 压密系数

2. 洪积层特性

与冲积粘土层相比，洪积粘土层较厚，多层交迭，构成较复杂。因此，无法概括为各层均适用的统一特性，现仅将层厚较厚，且由钻孔资料已弄清其特性的两层土质特性，来概述洪积层的特性。

总起来看，该层在粒度组成上与冲积粘土层的差别不大。根据试验得到的塑性图，其液性界限为 $w_L = 70 \sim 120\%$ ，塑性指数为 $I_p = 40 \sim 80$ ，自然含水率 w_n 较低，

下式关系成立。

$$w_L > w_n$$

对于这两层有代表性的洪积层土样进行了单轴压缩试验及三轴压缩试验 (UU, CU 试验)。三者试验结果中, 以 CU 试验结果离散性最小。在深度方向上 $2C_u$ 值的分布, 大约在 $\Sigma r'/h$ 线附近或在该线偏上部分布。同时, 在整个建设场地内, 根据地点不同, 三轴试验结果的差异不大。

图 5 为洪积层的压密屈服应力的分布图, 图中给出了不同深度的压密屈服应力的平均值及标准偏差。由该图可知, 平均过压密比 (OCR) 约为 1.3, 在地基的深处 (约 120 米以下) OCR 大于 1.3, 可认为该层为过压密粘土。

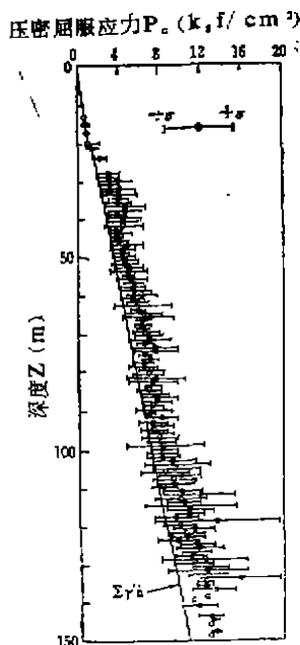


图 5 压密屈服应力 (洪积层)

三、护岸地基处理

护岸是人工岛的重要组成部分, 也是人工岛建造的关键一环, 它的结构选择是否合理、质量是否可靠, 都将影响未来人工岛的质量及其使用寿命。护岸有各种各

样的结构形式, 关西海上机场的人工岛主要采用了缓倾斜砌石护岸的结构形式, 同时在人工岛的角部也采用了嵌入式钢板制箱形结构及直立式消波沉箱形的护岸形式。在 11 公里长的护岸中, 约 8 公里采用的是缓倾斜砌石护岸形式, 因此, 下面以此为例, 简述其与地基处理有关的问题。

海底地基上层的冲积粘土层是非常软弱的, 不要说动荷载, 就是在护岸本身的重力荷载作用下, 也缺乏应有的支持力。因此, 在护岸的建造过程中, 必须采取简易有效的措施, 来增强地基的支持力。缓倾斜护岸采用的是阶段施工, 分步增加载荷的方法来达到此目的。护岸的施工过程大致可分为以下几步: 铺底砂、第一次堆积砂、第一次抛石、第二次堆积砂、第二次抛石, 形成上部缓倾斜的台座、砌石。所谓阶段施工, 即从铺底砂到第一次抛石之间要间隔六个月, 做为压密期; 第一、二两次抛石之间也要有六个月的压密期。这样, 伴随各阶段载荷的增加, 由于压密的结果, 而使地基分阶段产生沉降, 进而使地基分阶段产生沉降, 进而使地基强度不断增加。

这种分段施工法而产生的压密沉降及地基强度增加的效果, 原则上是可以通过钻孔的方法实测得到的, 但是, 如何在理论上评价这种效果, 即能否预估这些效果呢? 他们是采用 Barron 理论来评估地基的压密度、用 Boussinesq 的弹性解来分析地中的应力分布, 用以往的施工经验而总结出来的 m_v 法来预测地基沉降的。

关于地基沉降的理论计算及实际测量的结果示于图 6。总体上看, 二者的趋势是一致的。开始时, 实际沉降比理论计算的结果要快些, 时间较长后, 理论计算结果要稍大些。由于理论上的计算可以先行一步, 其计算的结果对施工过程中地基沉降的估计, 对施工期的安排有一定的指导

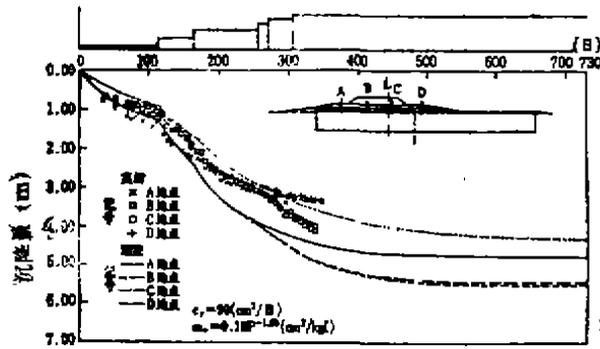


图6 地基沉降

意义，因此，计算中选用与实际相符的动力参数，是可以予估载荷过程中的有关效应的。

关于地基强度的增加效果示于图7。

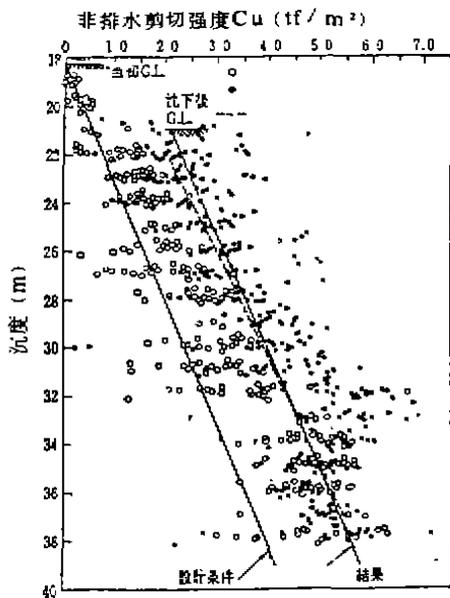


图7 地基强度

四、填筑场地的地基改良

人工岛的建设，一般是先建设护岸，然后再将护岸内的场地填平。如前述，因关西海上机场的面积大，海水较深，填筑土石方量大，因此，填筑场地的地基改良与沉降评估是人工岛建设的又一个关键问题。

为此，首先对填筑场地采用了SD改良法，来加速粘土层的压密过程。所谓SD地基改良法，就是在场地的粘土层的相应间隔内用人工的方法贯入砂桩，也称为砂桩。这样，随着其上部荷载的增加，粘土层中所产生的过剩的间隙水压可以向水平方向的砂桩中逸散，从而加速了粘土层的压密过程，这即所谓的SD法。关西海上机场的填筑地面积较大，在用SD法进行地基改良时，砂桩的间距取为2.5米×2.5米，砂桩的直径为40厘米，砂桩的总数约为100万根。这些数据是依据填筑的施工期，填筑土石层厚度，未来机场的设计和使用要求，对现有的冲积粘土层支持力的增大要求来决定的。在现有的设计条件下，大体上在机场投入使用时，冲积粘土层将完成其压密过程。

其次，填筑施工也如护岸施工一样，采用阶段施工法，即在水深为-15米、-10米、-6米时进行直投式填筑，在水深-3米时，进行扬土式填筑。为了保证各载荷阶段地基支持力的增加，在两次直投式填筑之间分别相隔六个月，这样基本上可以保证足够的压密期间。

关西海上机场人工岛的填筑土石厚度为30米，伴随填筑过程，冲积粘土层将有明显的沉降，经理论上计算，其沉降量随该地点冲积粘土层的层厚等多少有些变化，予测平均将有六米左右的沉降量，这一点有待于建成后的量测结果的验证。

关于洪积层的沉降，则较为复杂，不确定的因素较多。有关研究者曾利用有限单元法进行了分析计算，根据建设场地深层钻孔资料，予计洪积层在十年以后将有0.5米~1.0米左右的沉降。

五、结 语

我国是海岸线很长的国家，近海资源
(下转第44页)

国家地震局工程力学研究所承担，省内地震局、地质部门相配合进行的。

3. 逐步实行工程地震规范化、标准化。为坚持工程地震标准，保证质量，国家地震局正在编制“工程地震工作具体规范。”建设部门正式颁布了《建筑抗震设计规范（GBT 11—89）》，此外，水工结构，道路桥梁，城市公用设施及城市煤气热力等抗震设计规范，已经逐步形成。黑龙江省地震局规定，必须进行基本烈度复核的工程项目：城市主要水厂的输水建筑；市、地属以上粮食加工厂，大型冷库；装机容量为50万千瓦以上的火力发电厂；位于城市或城市上游一级挡水建筑物；市地级及其以上广播、电视发射台，传输台，控制中心；长途通讯枢纽工程、微波站、郊外站；铁路干线和枢纽的信号站、行车、调度、大型车站候车室；中外合资企业和投资在3000万元以上的工矿企业的主要生产厂房、动力、通讯设施。区划图中地震烈度边界附近地区投资在1000万元以上的工程项目和部分民用建筑、主要工程项目进行裂度复核；七层以上的专混建筑和十层以上的钢筋混凝土建筑，30米以上砖烟囱；200病床以上医院的病房楼、门诊楼、手术室、药库及重要的医疗设备用房；消防车库；500床位以上的招待所、宾馆和1000座位以上的礼堂、影剧院、5层及5层以上或面积在3000平方米以上的百货商店；水电部水电规字[1987]第5号文中水利电勘测设计

部门委托的工程项目。省地震局对下列项目进行地震危险性分析和设计地震动参数确定、场地地震稳定性评估；国际无线电台、卫星地面站；主要公路干线的重要桥梁、铁路干线的重要桥梁、铁路局编组站；装机容量50万千瓦以上的发电站，枢纽变电站和调度楼；煤气、供热的重要干线；大型矿区的采矿厂、炼钢厂、动力设施、通讯、调度、电子计算机房、贵重仪器房；地震时能造成严重次生灾害的化工厂、尾矿坝、危险品库、储存放射性物质的装置；核反应堆、核电站，核供热站；水利水电勘测设计部门委托的工程项目。在我国工程地震的历史很短，许多问题还有待深入研究解决，在探索中不断完善。尽快达到科学化、规范化、标准化。

四、结束语

做好工程建设中的工程地震工作，不仅能减轻地震发生时地震破坏所造成的损失，而重要的是能提高工程设施的质量和效益。是社会主义现代化建设中不可忽视的重要组成部分，是地震科技成果为国民经济服务的新领域。由于工程地震涉及地震学、地震地质学、地震工程学和社会学、经济学多学科综合因素，需要各路专家密切配合，通力协作，共同努力，才能把工程建设中的地震减灾工作推向一个新的阶段。

（上接第40页）

十分丰富。目前，海洋石油资源的开发，已取得振奋人心的成果。随着我国经济建设发展的需要，开发海洋资源势在必行。可以预见，未来将出现各种形式的海洋工程，这就需要借鉴现有的海洋开发的经

验。本文根据不完全的调研资料，概略地总结了海底地基处理方面的有关问题，若能对我国的海洋工程的开发和建设，对海底地基特性的研究及软弱地基的处理等方面有所借鉴，便是作者成此文的最大愿望。