

第四章 水利工程的设计与施工

第十一节 鱼鳞大石塘工程技术

海塘工程技术在建设过程中不断发展。最早的海塘只是就地取用的土堤。宋元间，中心城市杭州和附近经济发达地区大量采用竹笼工和石囤海塘护卫；明代砌石塘工开始在杭州湾前端海盐境内推广，清代潮灾集中海宁之后，石塘开始向海宁延续。石塘发展的 300 多年里，相继解决了塘体砌筑、基础工程、塘体消能和粉沙基础施工等关键技术，至清乾隆时规模巨大的“鱼鳞大石塘”重力型海塘终于成为护卫杭州湾的主要塘型，传统海塘工程技术至此达到最高水平，这些至今仍在运用的海塘被誉为海上长城。

一 砌石海塘的演进

钱塘江北岸正当钱塘潮的巨大冲激，其中海宁涌潮高达 3 米左右，流速高达每秒 12 米，对海塘的冲击力可达每平方米 7 吨，破坏力惊人。为制止潮流侵袭，历史上曾采用过多种海塘形制，然而最终以砌石工见长。

至迟北宋景祐时(1034~1038)在钱塘江口开始陆续修建石塘。此前，竹笼海塘屡被冲毁，“工部郎中张夏出使，因置捍江兵五指挥，专采石修塘，随损随治，众赖以安”^①。置捍江兵修筑海塘，每一指挥领兵 400 人，以军事化的方式组织石材采集和施工，以保障工程质量。至此海塘建设和管理具有准军事性质。

南宋时钱塘江口石塘石工逐渐增多。乾道九年(1173)、淳熙元年(1174)屡兴大工,钱塘江海塘的砌石塘工已经具有一定规模^②。明清时期钱塘江海塘砌石塘工逐渐成为主流塘工形式。长江口海塘自明代开始系统兴建。土石塘工并用,常有土塘常修常溃的情况,既有维修的不便,也有管理的困难。清雍正五年(1727),雍正帝以为“东南财富之区,灌溉田亩,保聚室庐全赖海塘捍卫,朕思海潮冲激,风涛旋转难定”,他反对松江一带海塘土石塘工兼用,“土塘历年经久,未免可虞,不若一概尽修石塘,为一劳永逸之计”^③。七年(1729)松江一线海塘全部改为石塘。据《清会典事例》记载工部规范:“松江一带海塘,平铺实砌,每丈用条石六十七丈,长大桩木百根,石块六面凿齐,合缝平稳;用杨桃藤、糯米为汁和灰抿缝。”^④塘体虽较浙西钱塘江海塘小,但是环长江口从此形成了系统且形制规范的砌石海塘工程。

在钱塘江西岸海盐—海宁一线经过明清两代数百年的经营,经过了无数次惨重的垮塘,终于在基础工程结构和施工技术上取得了重要突破,诞生了以鱼鳞大石塘为主体的重力型海塘工程体系。砌石海塘除了自身结构整体性外,还有许多当时难以解决的工程技术问题,如重力塘体与粉沙软基结合部的结构问题,用于基础处理的深桩和护塘木桩在施工过程中基础液化问题,由于基础渗漏而产生的海塘背水面的排水问题。正是这些工程难题的一一克服,才创造了完备的大型海塘工程,这种融主体工程、基础工程、消能防冲工程和排水工程为一

体，称之“鱼鳞大石塘”，是中国海塘工程的典型，在古代土木工程技术中具有重要地位。

(一) 直立海塘

直立海塘是类似挡土墙的海塘，迎水面大石直立砌筑，背面回填物由碎石向土料过渡，特点是石工工程量小。由于塘身断面较小，工程的抗冲性和结构稳定性差，早期的砌石海塘多采用这种塘式。

浙江上虞的王永石塘被认为是直立式海塘的典型^⑤，元至正七年(1347)建，长 1944 丈。王永石塘结构和施工都较为规范。其结构与施工过程大致如下：

① 《宋史·河渠志》记：“至景枯中，以浙江石塘积久不治，人患垫溺，工部郎中张夏出使，因置捍江兵五指挥，专采石修塘，随损随治，众赖以安。”宋景枯前浙江有砌石工海塘。又指挥为军事编制，一指挥辖 500 人。二十四史河渠志注释本，第 188 页。

② 《宋史·河渠志》，二十四史河渠志注释本，第 188~189 页。

③，④ 《清会典事例》，中华书局影印本，1991 年，第 581 页。

⑤ 汪家伦，《古代海塘工程》，中国水利电力出版社，1988 年，第 33~39 页。

石塘每 1 丈，打基桩 32 根，排列成 4 行，前后参差。桩木周长 1 尺，长 8 尺，尽入土内。基桩上干置长 5 尺、宽 2 尺 5 寸的条石，作为塘基。其上用条石纵横错置，犬牙相衔，叠砌到 5 至 8 层上以条石侧置压上。石塘后再填一丈多厚的碎石，碎石上壅土培筑土塘①。

这种早期的砌石结构已经注意了基础的加固处理，塘体三部分：基础、砌石体、回填土体，其中最耗时的是石塘基础打桩过程，施桩处理的基础，将来自上部的重力均匀分散；砌石纵横错缝砌筑，以增加塘身的抗剪强度和整体性；砌石体背部由碎石向土体过渡，呈反滤体结构。这样既增加了塘身整体重量，提高了稳定性，也减少了石材用量。这种塘式适合于潮水冲激不甚严重的地段。

上虞王永石塘在明洪武时增修过，逐渐推广至浙江绍兴一带，一直沿用至今。此类石塘，受塘身稳定的制约，一般高度在 2 米上下[见图 4—70(a)]。

(二) 斜坡式石塘

迎水面呈斜坡状，以大条石堆砌，条石后填以小石，背坡以土堆筑，塘体是土石结构，因外形而称“坡陀塘”，塘体稳定性比直立式海塘好。清代修筑这一塘工，在海宁每筑塘一丈，用银 300 两，相比鱼鳞大石塘每丈用银 17 331 两的造价要低廉得多②。

明成化十三年(1477)按察使杨渲修筑海盐石塘。“先是，塘石皆叠，砌势陡孑。仿宋王安石居鄞修筑定海塘式，砌法如斜坡，用杀潮势。石底之外俱用木桩，以固其基。初下石块用一横石为枕，循次竖砌，里用小石填心，外用厚土坚筑。”^③据此这一塘式似始于宋代定海海塘，明代这一类型塘工的筑塘程式比较规范。早期坡陀塘砌石体变化不大，断面上条石呈一横一纵形式修筑，如图 4-70(b)所示，后来逐渐演化，应为清鱼鳞大石塘的雏形。

明万历五年(1577)，修复海盐石塘，“虑湍激为患，有荡浪木桩以砥之；虑直荡堤岸，有斜阶以顺之。其累石，下则五纵五横，上则一纵二横。石齿钩连，若亘贯然。计百计撼之不摇也”^④。塘身施工更强调砌石纵横交错，使结构整体抗剪性能增强，并且这种阶梯状的外形有利于消纳波浪。按清康熙五十九年(1720)工部额定海宁石塘形制：砌石每长五尺，宽二尺，厚一尺^⑤，明代中后期海塘塘条石尺寸不应与此有太大的出入，照此估计万历海盐县的此类塘工的外形比较壮观。

斜坡式海塘坡度平缓，抗抬防浪效果优于直立式海塘，但是在强潮流的作用下，护面内外的压力差容易使块石脱落，因此应用范围有一定局限。

(三) 黄光升大石塘

嘉靖二十一年(1542)浙江水利佥事黄光升五纵五横的砌石方法，在海宁修筑了高达 10 米，塘身由 18 层条石砌成重力型海塘。这种纵横交错的骑缝叠砌法，使砌石互相牵制，较大程度增加塘体稳定和抗风浪抗冲刷的能力。新型重力海塘引起人们的注意，海塘砌石技术至此进入了新的阶段。

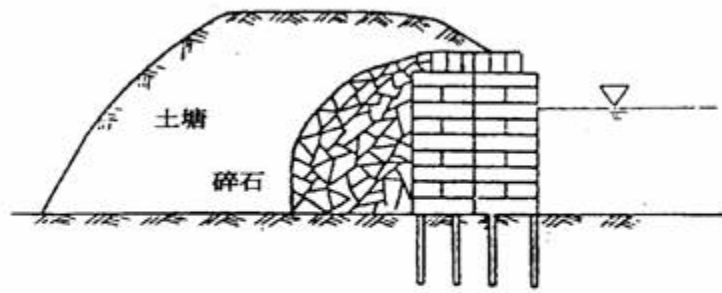
① 汪家伦，《古代海塘工程》，中国水利电力出版社，1988 年，第 33~39 页。

②清·翟清廉：《海塘录》卷 1，第 47，52 页。

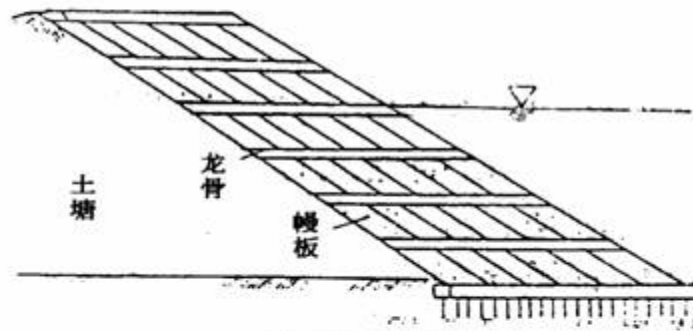
③清·翟清廉：《海塘录》卷 1，第 50 页。

④ 明·陈善：捍海塘考，引自《海塘录·艺文》卷 21，第 9~12 页。

⑤《清会典事例·工部·海塘》，中华书局本，第 579 页。



a. 直立式石塘



b. 斜坡式海塘



c. 鱼鳞大石塘

图 4-70 重力式砌石海塘的演变

黄光升字名举，福建晋江人，嘉靖二十一年主持海盐塘工建设时任浙江水利佥事。黄光升敢于修筑高度超过前人的大石塘，在于他对石塘坍塌的原因有深入的考察和总结，黄光升称：“予筑海塘，悉塘利病也。最塘根浮浅病矣，夫磊石高之为塘，恃下数桩撑承耳；夫桩浮即宣露，宣露败易矣。次病外疏中空，旧塘，石大者，郭不必其合也；小者，腹不必其实也；海水射之，声汨汨四通，侵所附之土，漱之入，涤以出，石如齿之疏豁，终拔尔。”^①黄光升阐述了修筑石塘工的关键：基桩，必须打入实土不能浮桩，这对河口地带的粉砂基础来说施工是关键；塘体，砌石形制一致，讲求砌石合缝严整。

正是在总结此前石塘的成败原因基础上，黄光升的海盐大石塘把握了基础和砌石的设计和施工主要环节。黄氏海塘的塘基处理：“先去沙涂之浮者，四尺许见实土，乃入桩。”^②超过1米的基桩，夯入滩地提高了基础承载能力，基本解决了刚性结构与软基结合。

黄光升对塘体砌石方法有大的变革：其塘体结构采用条石，“长以六尺，广厚以二尺”；条石纵横砌筑（与塘体垂直放置为纵石，平行放置为横石）；层与层之间跨缝，品字形砌筑。条石的放置事先有周密的设计：第一、二层，纵横各五；三、四层，五纵四横；五、六层，四纵五横；七、八层，纵横各四；九、十层，三纵五横；十一、十二层，纵横各三；十三、十四层，三纵二横；十五层，二纵三横；十六层纵横各二；十七层，二纵一横；十八层是塘面，一纵二横。所

用条石一律“琢必方，砥必平”，条石之间用铁锭联结，石塘背后培筑土戗。大石塘外形集坡陀塘式和直立塘式特点，在迎水面和背水面断面上砌石逐层微微内收。

黄氏在海盐成功地建成了底宽4丈，顶宽1丈，高3丈3尺，共18层的大型砌石海塘，塘体结构和施工技术开创了清代鱼鳞石塘的先河。每建筑长6尺石塘，用140块条石，其断面面积约为92.16平方米，每立方米塘身自重约248.83吨，每筑1丈，耗银300两^③，如此巨大的工程造价只修建了300多丈，此后不久又陆续加修了750丈，至今这段明海塘尚存，被称为“万年塘”。清雍正乾隆间海宁境内大规模修筑海塘过程中，这一工程型式的推广和完善，清代海塘技术方面的进步主要体现在基础处理和海塘的附属工程上，并冠以鱼鳞大石塘的专称[见图4—70(c)]。

①，② 明·黄光升：海塘议，引自《海塘录》卷20，第1—2页。

③ 《海塘录》卷1，第52页。

二 鱼鳞大石塘

清康熙后期，钱塘江海潮主流转向海宁，海盐以南的海宁海塘屡建屡毁。土塘、草塘在大浪的冲击下经常席卷而去，频繁的潮灾和连年大工，在石塘屡屡被毁，当局多次放弃石工之后，乾隆帝仍坚持兴建大

石塘。

大型石塘工程在海宁一开始就连连受挫，施工既不顺利，建成后又有许多地段很快就发生坍塘。海宁工程地址和潮流动力形态和与海盐明显不同，已有的经验显然不够。被称作“鱼鳞大石塘”的海宁大型石塘最终的完善经历了康雍乾三朝长达 60 多年的时间。

明代黄氏大石塘在塘体的条石砌筑方法、沙质地基的基础工程等方面，解决了石塘塘体稳定和软基与刚性工程结构的结合两个主要工程问题。清代鱼鳞大石塘的成功则得益于解决了粉沙地基高空隙水压力情况下的桩基施工和基础处理工程的继续完善。其中对土动力学现象的观察、对潮流运动规律的认识，是工程技术突破的重要后援。鱼鳞大石塘将传统海塘工程技术发展到了最高水平，也是古代大型水利工程建筑技术的终极。

(一) 鱼鳞大石塘的建设过程

在海盐以南的海宁，清康熙初开始在海宁尖山险工段修筑石塘，初期塘体低矮单薄。康熙五十四年(1715)台风，海宁草塘和土塘尽塌，石塘也多处坍塘，对前代石塘修复时发现建在有深桩和块石改善后的地基上的海塘可以抵御更大潮浪袭击。五十七年修大型石塘 958 丈，土塘 5106 丈，石塘段尽管比较短，但是海宁鱼鳞石塘建设由此拉开序幕。

康熙五十九年(1718)，筑海宁老盐仓鱼鳞石塘，原计划 1340 丈，实际筑 500 丈，其余 840 丈皆因是“土浮，不能置桩砌石之处”，只好仍筑土塘①。

雍正十三年(1735)台风，造成海宁、仁和二县坍塘 60 多里，石塘、草塘、土塘全部报坍，坦水部分冲毁。潮水直袭海宁县城，南门城垣临水。

乾隆二年(1737)，海宁海塘修复工程开工，以鱼鳞塘工为主。大学士嵇曾钧主持施工。

乾隆四年(1739)，停止海宁全部草塘岁修，改建石工②。

乾隆九年(1744)，海宁鱼鳞大石塘完工，共历时 8 年，继朱轼、嵇曾钧之后先后有 7 位总督或巡抚主持施工。海宁鱼鳞石塘自浦儿兜至尖山 6097 丈，17 层，高 1 丈 7 尺；海宁城南门绕城鱼鳞石塘长 505 丈，18 层，高 1 丈 8 尺。鱼鳞大石塘的护塘坝和坦水延至乾隆三十年(1764)才相继完成。

(二) 鱼鳞大石塘施工技术的突破

明嘉靖年间黄光升创造的五纵五横大石塘在海盐取得了成功，到清康熙时同样的塘式移植到海宁，却遇到了难以解决的施工问题。乾

隆时，乾隆帝执意在海宁全部取消土塘和草塘而以鱼鳞大石塘代之，工程屡次失败，后来施工技术突破的契机来自人们对高含水粉沙的土动力学现象的观测，从施工技术层面取得突破进展竟经历 60 多年。

海宁的鱼鳞石塘一开始沿用的是海盐大石塘建设的经验，强调体积硕大的塘身和条石砌筑质量。但是人们发现在海宁的桩基施工尤其困难，较之海盐的所谓铁板沙，这里松软的细沙竟更难以下桩，而长达数米的基桩很不容易打下后不久又出现浮桩。基桩浮桩成为掣肘重力塘工成功的关键环节。

康熙六十一年(1722)，浙江巡抚筑海宁老盐仓鱼鳞大石塘 1340 丈，有戴家桥段 840 丈因为不能下基桩而仍筑柴塘^③。后来老盐仓戴家桥柴塘屡屡出险。乾隆二十七年(1764)，乾隆帝因海塘工程到海宁，以已建鱼鳞大石塘的成功，力主戴家桥段全部用大石塘取代草塘和土塘。当地人告之老盐仓活沙难以下桩，为此乾隆帝到海塘工地，“皇上亲阅试以木桩，始多扞隔，寻复动摇，难以改建”^①。这次基桩试验还有更详细的描写：“三月初三日，銮舆亲历海墉，咨度经久之计，因于(海宁)城边试下木桩。始苦沙涩，旋筑以巨碇(《海塘录》原注：“夯碇重 200 斤。”)，所入不及寸许；待桩下既深，又苦沙散，不齧木。”^②由于施工中难以克服高含水粉沙地基的液化问题，变更塘式只得作罢，戴家桥段仍筑柴塘，加筑坦水保护。

①《海塘录》卷4，第7页。

②《海塘录》卷5，第12~13页。

③清·翟清廉：《海塘录》卷2，四库全书本，第12页。

但是，这段塘工的改式使乾隆帝难以释怀。此后，乾隆三十年(1765)、四十五年(1780)他两次再到海宁，坚持戴家桥柴塘一定要改为石塘。四十五年到海宁这一次，他甚至强调不要考虑开支，“申命重相勘，莫虑国帑费，庶几永安澜”③。

乾隆四十九年(1784)，乾隆再到海宁，此行是他江南之行的最后一次，戴家桥段石塘终于成功。康熙五十九年(1720)开始兴建的长达3940丈老盐仓石塘大工全部报竣，成功的喜悦极大地鼓舞了这位年逾古稀的皇帝，此行的许多诗都特别提到了戴家桥鱼鳞大石塘基桩施工的成功。海宁石塘桩基成败的转机在施工技术的改进。当时人的记载兹照录如下：

改建鱼鳞石塘初开工时仍有已钉复起之患。旋有老翁指点云，用大竹探试，俟扞定沙窝；再下木桩加以夯筑，入土甚易，因依法扞筑。又梅花桩以五木攒作一处，同时齐下，方能坚紧，不致已钉复起。试之，果有成效④。

用现代土动力学理论来解释浮桩，即为孔隙水压力产生和释放过程中的物理现象。在高含水粉沙地基下桩时，夯筑过程中的动力作用，

粉沙中已经饱和的孔隙水向四周挤压，动力作用消失后，有压力的孔隙水释放过程中对木桩底部产生顶托，桩愈深孔隙水压力愈大，即产生所谓软基液化现象。后来改进施工流程，先在下桩之处下竹竿对沙土进行扰动，孔隙水压力部分被释放出来，然后再下木桩；又将木桩改为5根一组的梅花桩，夯筑过程中有先有后的相继振动使残存的孔隙水压力同时释放出来。在动力土力学发展进程中，或许海塘施工实践中最早对液化现象进行了描述，并提供了成功解决软基施工液化的工程实例。

(三) 鱼鳞大石塘的技术特点与规范

清代建鱼鳞大石塘有国家规定的营造法式可供遵循，《大清会典事例》对海塘的建筑规程包含了海塘的塘身、塘基、塘戗三部分结构，并对建筑材料和建筑尺寸也有专门的规定。

清康熙五十九年(1720)，工部为海宁县老盐仓、上虞县夏盖山等处海塘工程特定的营造规程，是塘体和塘基修筑的规范性条款。

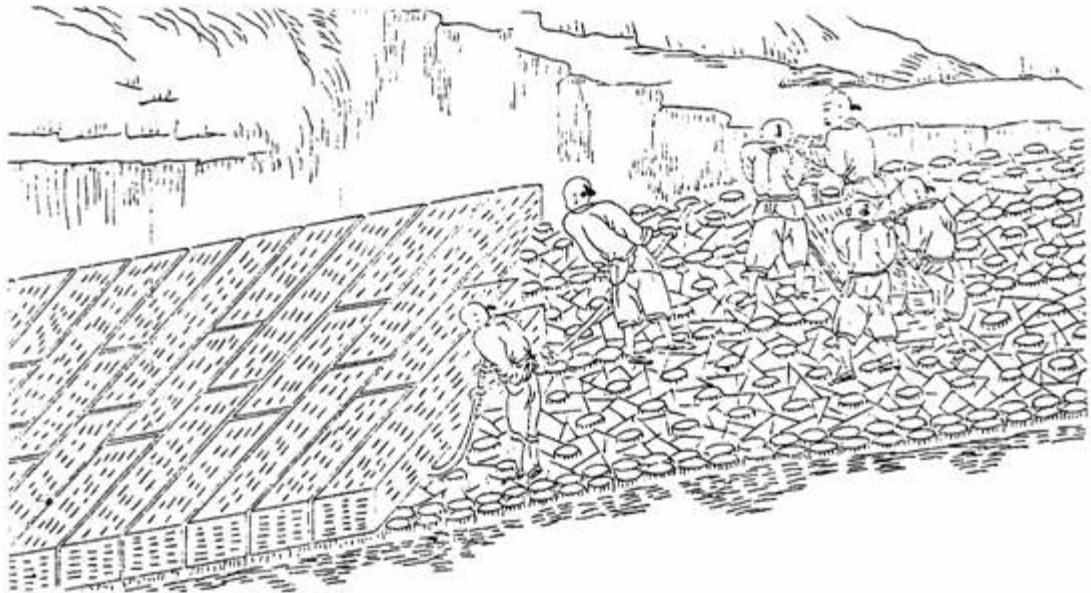
有关塘体的内容几乎与明黄光升塘式相同，即强调外形尺寸高大、条石要求整齐划一：“其大石塘之式，于塘岸用长五尺、阔二尺、厚一尺之大石。每塘一丈，砌作二十层，共高二十尺。于石之纵横侧立两相交处，上下凿成槽榫，嵌合连贯，使互相牵制难于动摇。又于

每石缝合处用油灰抵灌，铁销嵌口，以免渗漏散裂。塘身内筑土塘；计高一丈，宽二丈，使潮汐大时不致泛滥。”⑤

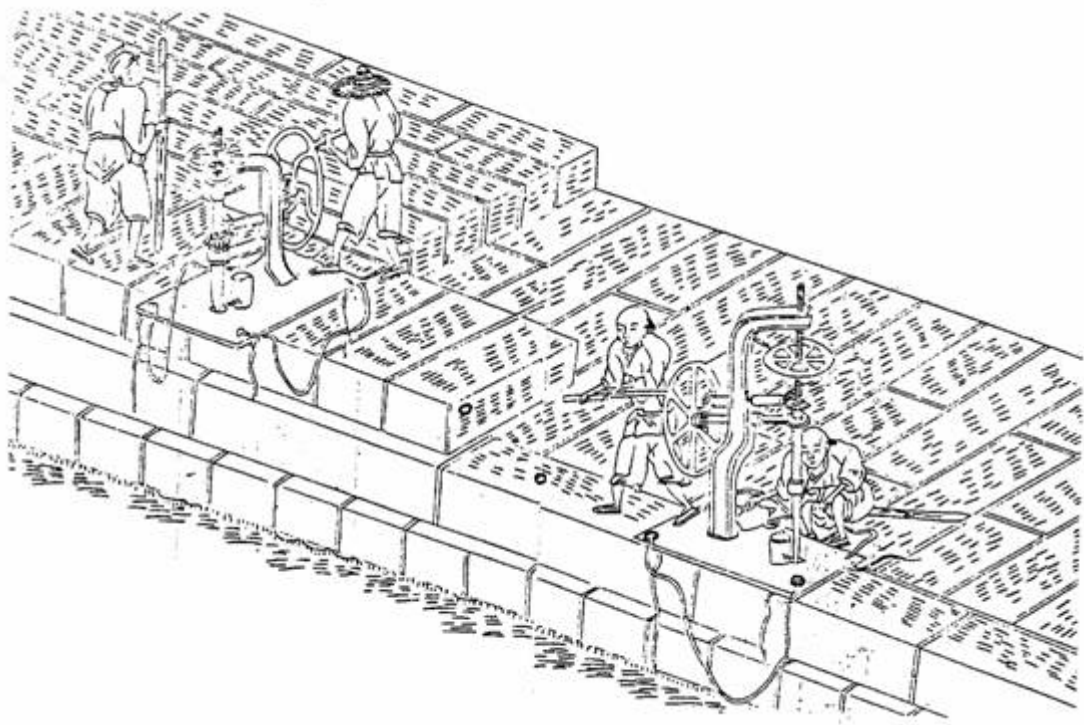
①，② 清·翟清廉：《海塘录》卷6，四库全书本，第13页。

③，④ 清·乾隆，命老盐仓上下相地仍建石塘诗以言志，乾隆四十五年，引自《海塘录》卷首，第37页。

⑤ 《大清会典事例》卷920，中华书局影印本，第579页。



a. 石塘的塘基下桩、抛石及底层砌石



b. 条石钻孔、锚固与砌筑

图 4-71 清光绪海宁鱼鳞大石塘施工流程

(引自(清)《海宁念汛六口门二限三限石塘图说》，光绪八年刻本)

此规定还来自康熙末年朱轼依据主持的老盐仓那段塘工经验。这种形制的石料价格非常昂贵，到光绪时海塘造价已达到每丈 790 两白银，这时不得不采用厚一尺，宽一尺，长三四尺不等的石料。石料变小，砌石块数大为增加，直接受影响的是塘身整体性和稳定性。因此在块石连接方式上改进，以弥补其整体性。光绪前砌石块之间的联结，多采用砌石表面凿榫槽以铁锭搭钉的方式[见图 4-71(b)]。光绪以来改榫槽为凿孔，孔中现浇铁水，形成联结上下砌石的铁桩，还因此减少了施工工程量和石料损耗。办法是用钢钻在砌石上凿孔，上下层用铁榫贯穿合缝，即同层砌体左右联结改为铁销锁住，砌石四面凿孔，

孔不贯通深四寸，直径一寸。这一工艺在乾隆时长江口松江海塘普遍使用，光绪三年移植到海宁石塘施工中，其联结的牢固程度当然超过了铁锭搭结工艺①。

塘基条款也照搬明黄氏海塘的做法：“向基根脚密排梅花桩三路，用三和土坚筑使之稳固。”②实际上清代石塘基础工程和明代有所不同，据清光绪刊刻的《海宁念汛六口门二限三限石塘图说》，塘基下桩后，其上并不满铺三合土，而是采用大块碎石，使之紧密嵌在桩与桩的空隙里，大致找平基础后再开始铺第一层条石[图 4-71(a)]经过桩基和抛石处理后的基础对软沙地基承载力的改善比三合土效果更好③。

三 海塘护岸工程

海塘工程由土塘、柴塘、竹笼塘、石囤塘发展到鱼鳞大石塘，在工程技术领域则向两个层面的发展：塘体建筑材料的改良和工程结构的演进，旨在提高塘体抗冲刷能力；护岸工程的进步，则是体现在基础保护和海岸稳定上。护岸工程的实施直接作用于海岸，形成了新岸坡和潮流运动的新形态。因此，海塘护岸工程技术发展反映了当时对发生岸蚀的潮流动力力学和海岸地质力学的认识和工程实践的水准。

在海塘迎水面种植植物如芦苇、灌木等，依靠植物的根系和枝条消浪护滩护塘，应是起源最早最为经济实用的措施。五代大约在梁开

平四年(910)时，吴越王钱谬修钱塘江海塘，以木桩防浪护塘④。南宋，浙江海塘有木桩护塘的记载⑤。南宋乾道七年(1171)，秀州华亭(今上海)海塘完工，“令所筑华亭捍海塘堰，趁时栽种芦苇，不许樵采”⑥。这种现代称为“生态型”护塘工程，在宋代已经作为海塘的主要工程设施加以管理。宋元多用竹笼、石囤海塘则以土塘作为塘背护塘。

明清砌石海塘发展，对于砌石结构的海塘，海塘的安全系于基础，可以说重力型海塘技术的发展过程就是护岸工程渐次完善的过程。

砌石海塘的护基护塘护滩工程几乎包容了临时性海塘的各种工程形式，临时性工程结构在消浪护基方面的优点被充分利用。鱼鳞石塘起支撑稳固作用的附塘，建在石塘塘背，或称子塘，一般采用土塘；鱼鳞石塘迎水面的消能工则主要是竹笼工、石囤工和木桩工。

清乾隆以后，石塘的护塘护滩工程逐渐融为一体，称之“坦水”，以排桩与砌石结合，自塘基开始由高趋低，向滩涂前缘延伸长达数百米。近海塘部分坦水与塘体浑然一体，成功地解决了附属工程与海塘主体工程的结合，并使人工控制海岸稳定的性能提高。

①《大清会典事例》卷 920，中华书局影印本，第 579 页。

②《大清会典事例》卷 920，中华书局影印本，第 578 页。

③ 光绪三年八月二十二日浙江巡抚部院梅奏折，引自(清)《海宁念汛六口门二三限石塘图说》，光绪八年刻本，第1页。

④宋·沈括：《元刊梦溪笔谈》卷11，文物出版社，1975年，第23~24页。

⑤宋·佚名：《石海塘记》，转引自(明)徐光启《农政全书·水利》卷16。

⑥《宋史·河渠志》，二十四史河渠志注释本，第188~189页。

(一)清代潮流动力学现象的认识及实践意义

清康熙时钱塘江口兴建砌石海塘，在海宁坍塘频繁发生，往往新修的海塘一遭遇潮浪冲击就垮塌，人们发现这是地基失稳引起的，海岸工程问题引起了人们对潮浪运动形态的注意，正是有关潮流动力学现象的观测和认识对护基工程实践有重要指导意义，使此后鱼鳞大石塘工程结构更注重护塘护基工程，并推动了海塘工程技术的最后完善。陈訢是当时的代表人物之一。

陈訢(1650~1722)字言扬，号焕吾，浙江海宁人，曾从师明末清初学者黄宗羲，精通几何，著有《勾股术》《勾股引蒙》。陈訢生活的年代，正当康熙间砌石海塘从海盐向海宁延伸，工程屡屡失事之际。陈对海宁和海盐两地的潮浪水动力形态和海岸地理条件作了精细的考察，在《修塘议》中阐述了相互的关系：“潮有横冲、直冲之异；

地有软沙、硬沙之别。其横冲而沙软者，患在脚根搜空，虽有极坚极固之塘，不能存立。”^①海宁段钱塘江涌潮激流由岸下“横冲而过”，对海岸产生横向冲刷。潮头过后，“长水停蓄，日渐淤积”，滩涂可达三四十里。潮涌再至势如山崩，顷刻之间“荡为浊流，杳无踪影”。而在海盐则因为南有秦驻山，北有乍浦山，海岸“近山多硬，不坍不涨”，独东面受大海潮流的对冲，“潮流之来，一冲一吸”，“其冲也，固有排山之势；而其吸也，亦有拔山之力”。

基于对潮浪运动规律的认识，陈汧提出海塘塘体与基础要考虑海流动力和地质特点。因此海盐海塘则应以塘身为重，以庞大坚固的塘体来抵挡巨浪的冲击，这里的海塘特别讲究砌石取材、砌法，“海盐之塘讲之甚精，既须极大之厚石。而其取材也，不可头大头小；其叠砌也，不用石块垫衬；其程式也，必方方相合，面面相同”^②。而海宁海塘应特别重视塘基，保护塘基的主要工程坦水应尽可能长，使海塘基础向滩涂延伸，他建议坦水最好能达到约40米的长度。其形制：“近塘稍高，渐远渐深，既御潮来之冲刷，并护塘根可坚久矣。”^③

陈汧之后，许多人论及海宁筑塘均从潮浪的特征入手，来阐述护岸工程的重要性。光绪时人翟均廉（《海塘录》的作者）说：“海盐潮水暗长，沿塘一带又间有铁板沙，但令塘身坚固，足资抵御。惟海宁自尖山一束江水，又从上顺下，潮与江斗，激而使高，遂起潮头，斜搜横啮，势莫可当。有潮退之时，江水顺势汕刷。苟非根脚坚固，塘

身难保无虞。是以海宁塘工历来修筑，既重塘身，更重塘脚坦水。”^④翟氏指出了康熙之后海塘工程对护岸工程的重视，既护塘又护滩的坦水已经在工程中占了相当比重。

(二) 木柜、竹笼及桩石草混合材料的护塘工

① 《海塘录》卷 1，四库全书本，第 12 页。

②，③ 清·陈讷，宁盐二邑修塘议，引自《海塘录》卷 20，第 20~27 页。

④ 《海塘录》卷 1，四库全书本，第 41 页。

《大清会典事例》载：“康熙五十七年(1758)覆准，浙江省海宁石塘，下用木柜，外筑坦水，再开浚备塘河以防泛滥。木柜之法：以松杉宜水木为之，长丈余，高宽四尺，横贴塘底，实以碎石，以固塘根。乃用大石高筑塘身。附塘另筑坦水，高及塘身之半。斜竖四丈，亦用木柜储碎石为干，外砌巨石二三层，纵缝合缝以护塘脚。”^①道光六年制定《整顿海塘章程》，规定“所有坦水石工，著保固四年；柴埽工，著保固二年；以验收之日为始”^②。主要也是着眼易冲刷损坏的附属工程。

木柜和竹笼都是古代常用的水工建筑构件，被称为“聚小石为大石之法”^③，在海塘的护塘工中，这种柔性的构件所具有的消能效果、

对软基良好的保护性能得到充分发挥。

1. 木柜和竹笼

木柜即为元代建筑海塘的石囤，明清被用作鱼鳞大石塘的护塘工。木柜制作和施工与石囤海塘相同，木柜护塘工的结构形式类似堤防呈梯形断面，“自下叠上，自近及远，俱用品字排置，兼如陂陀之坦，近塘稍高，渐远渐深。既御潮来之所冲刷，并护塘根可坚久矣”^④。木柜护塘工最高处可达4层(约8米)，成排放置，层数渐少而断面由高至低，自海塘塘基向外延伸至30多米。用作护塘工的木柜更强调柜与滩结合的整体效果，木柜之间，柜与地基之间用长木桩来固定“至于柜外，则用长木桩密钉入地，钳束其柜，柜外有桩，桩外复有柜层层密钉，即使潮冲无一柜随流，他柜因以欹倒之患”^⑤。

竹笼(或称竹络)护塘因为造价低廉，无论是石塘，还是土塘，多首选竹笼护塘。竹笼有长方两种形式，“如垒高者用方竹络，平铺者用长竹络。前代修筑相沿用之”^⑥。乾隆八年(1743)，海宁多处草塘出险，采用长竹络护塘，挑溜挂淤效果甚佳，后来护塘挑水坝竟也采用竹笼工。与木柜相同，竹笼工也用长木桩来加强。

2. 桩石草混合材料的护塘工

宋代，沈括在《梦溪笔谈》中首先涉及到木桩在护塘工程中的运用，“钱塘江钱氏时为石堤，堤外又植大木十余行，谓之混柱”^⑦，以成排木桩置于海塘迎水面，可以抵消海浪对塘体的冲击。

框架结构的木柜用作护塘，不仅施工复杂且成本较高，木桩框架在水力的冲击下一旦散架，冲填的块石将立即被浪潮席卷一空。清乾隆以后护塘工变化较大，排桩重新得到重视并不断改良，以木桩为主和埽草混合结构的护塘工逐渐普遍(图 4-72)。当时有人指出这一变革的背景：“或曰筑堤之法，向用木柜，近用排桩，兼用草坝。乃排桩时筑时倾，而草坝经年不动。岂石之坚反不如草之柔欤？曰治水之法，河不同于湖，海又不同于河。湖之水停蓄，无风时不动，有风时软浪磅礴，势缓而弱，故坦水石可御；河之水湍急，罅沙而行，沙淤则流必迁，固时有溃决，然不过顶冲之处，而与皆平溜中行，故用柴即可无虞；若海则朝朝夕汐，呼吸排荡，非仅湖之波澜，河之湍流已也。”^⑧桩草结合的护塘工，以木桩抵挡大浪的冲击和消浪，以柴草埽坝延缓退潮水流速度使之挂淤以护滩，利用材料各自的特点，实现了多重工程目标。

3. 坦水

明代修建石塘以来，已经注意到护滩是石塘成功的保障，坦水作为护滩的重要设施而逐渐完善。随着石塘规模的扩大，坦水由临时性

的木桩、竹笼结构向永久性的砌石结构过渡，且越来越长，块石的砌筑形式也愈加多样。

①《大清会典事例》卷 920，中华书局本，第 579 页。

②《大清会典事例》卷 920，中国书局本，第 578 页。

③《宋史·河渠志》，二十四史河渠志注释本，第 207 页。

④《海塘录》卷 1，四库全书本，第 48 页。

⑤清·陈讷，宁盐二邑修塘议，《海塘录》卷 20，四库全书本，第 22 页。

⑥ 同④。

⑦宋·沈括：《元刊梦溪笔谈》卷 11，文物出版社，1975 年，第 23~24 页。

⑧ 清·陈诜：海宁县海潮议五，引自《海塘录》卷 20，四库全书本，第 15 页。

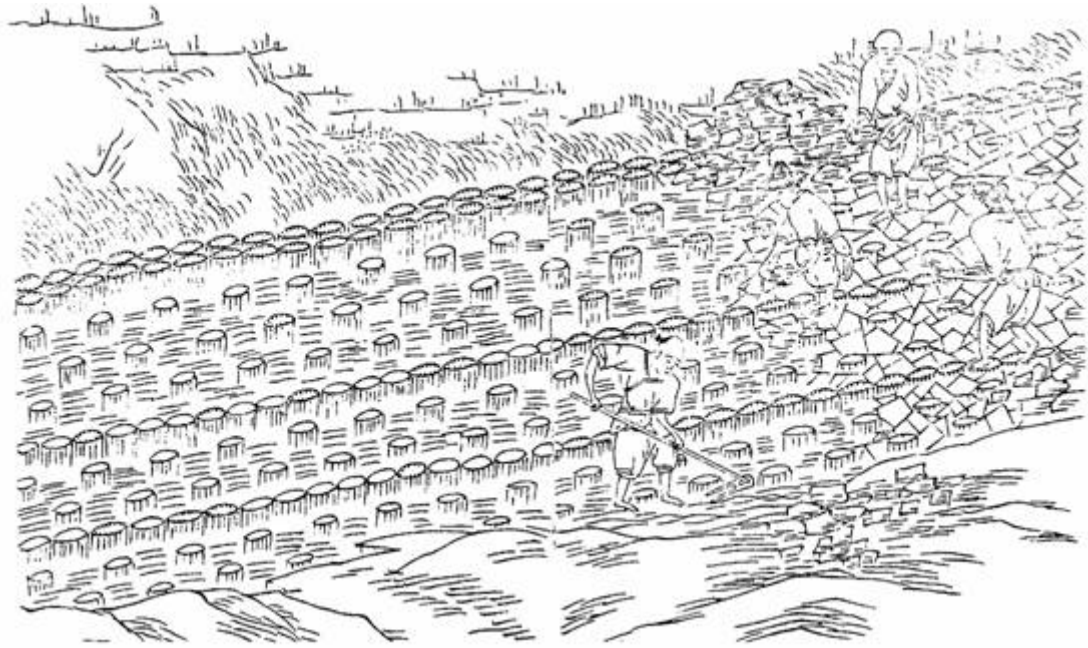


图 4-72 护塘消能工程施工(木桩与埽工构成的消能和护基工程)

(引自(清)《海宁念汛六口门二限三限石塘图说》第 20 页, 光绪八年刻本)

清康熙时, 朱轼的 20 层鱼鳞大石塘的坦水用木柜贮石为干, 外砌巨石二至三层。乾隆时嵇曾钧建鱼鳞大石塘, 对将以往的平铺改为斜砌, 但沿用此前的方式上部仍有条石盖面, “(海)宁塘历来修筑海塘既重塘身, 更重塘脚。坦水从前用块石铺砌, 虽多至三四五层不等, 易于泼卸, 以致修补频仍, 终非经久之策”, 嵇曾钧的海宁绕城石塘, “塘脚外铺条石坦水二层, 里高外低, 斜披而下……上盖条石”^①。嵇式坦水为木桩条石结构。先在海滩上打排桩, 再用块石充填, 顶层铺条石。块石厚 3 尺, 盖面条石厚 7 寸, 称“平砌条石坦水”^②。由于平砌条石容易被潮流掀动, 更后来面石改用竖砌或斜砌方式, 不过这种砌式条石耗费量大, 除海宁外其他地区用的较少[图

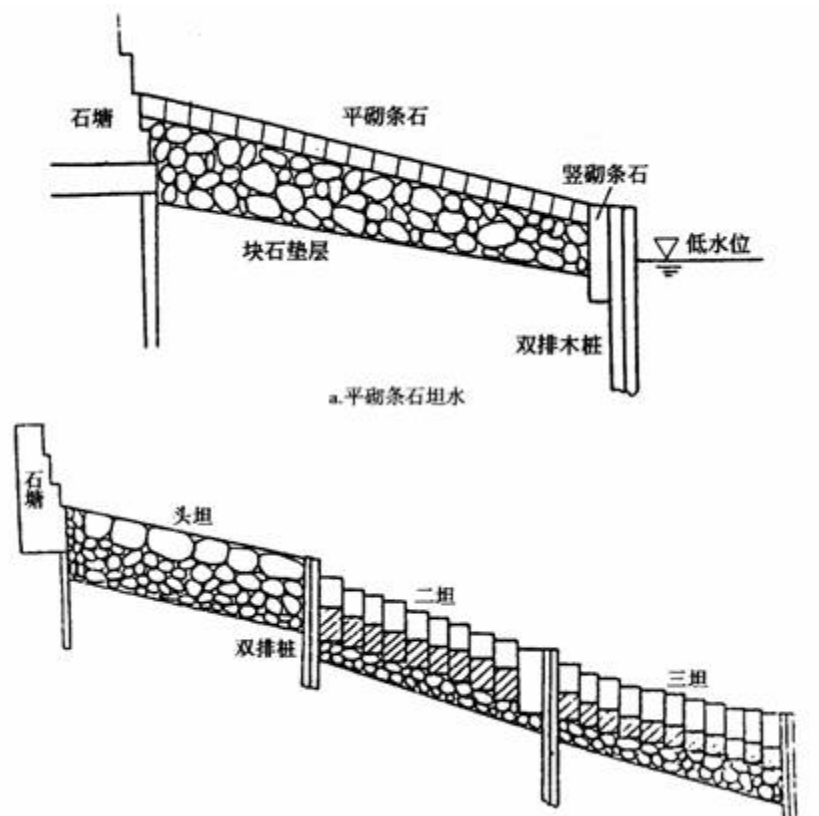
4-73(a)(b)]。

用于保护石塘的坦水一般为多级，从靠近塘身向外，分别称“头坦”、“二坦”、“三坦”等。通常也要设置两级坦水，在险工段可多达四坦。坦水多是木柜(元明多称石囤)、砌石与排桩混合运用。清乾隆以后逐渐放弃木柜，以入土更深的排桩加固砌石；而石材由散石填冲改为砌石，更后来又将平砌条石改为斜砌、立砌，一切改造旨在提高坦水的抗冲性能。

4. 挑水坝和盘头

清代，护塘护滩工程中挑水坝得到了普遍的应用。挑水坝主要有两种：导水堤式和盘头式。堤式挑水坝横截海中，短仅几十米，长可达数百米(图 4-74)；盘头式挑水坝如半月状，弦紧贴塘体，抵御其对海塘的直接冲击。

①，② 《海塘录》卷 1，四库全书本，第 41 页。



b. 立砌条石多层坦水

图 4-73 清代坦水二式

(引自《古代海塘工程》)

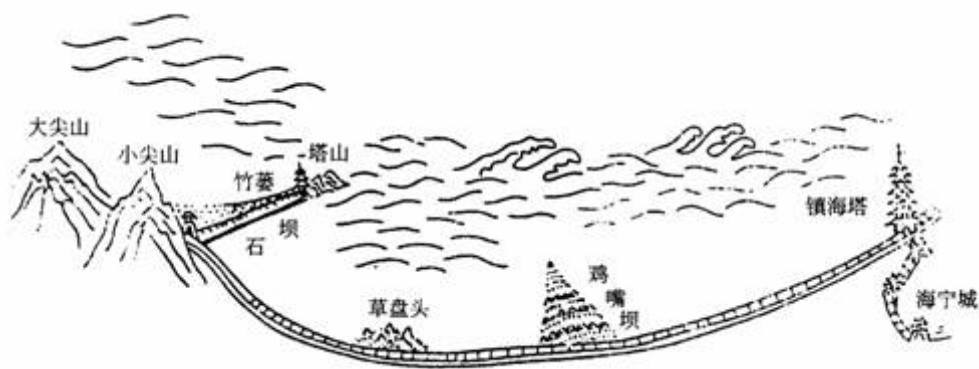


图 4-74 清代坵山挑水工程示意图

(选自《两浙海塘通志》)

堤式挑水坝中，著名的浙江海宁塔山坝以其规模巨大，工程艰巨最具代表性。海宁临海是一段呈弧状的海岸线，海潮迅急奔驰，直冲海岸，这段海塘屡建屡毁。但是，海宁城东南海岸有尖山耸立，尖山之西百余丈有塔山岛位于海中，二山之间为潮流所经，主槽深达三四十丈。为保障海宁海塘安全，相传明初有人在二山之间建坝，拦断潮流，保护了以西约 5 千米海塘不受潮流顶冲。后来塔山坝损坏，雍正时重提塔山工程。十二年(1734)塔山挑水工程开工，经过长达 6 年的施工，于乾隆五年(1740)建成，挑水坝长近 800 米，其间先后由直隶总督李卫和南河总督嵇曾筠主持^①。塔山坝分别以尖山和塔山作天然坝头，以标杆定位，然后抛石，最后砌竹笼。塔山坝伸入激流，如中流砥柱保护着海宁石塘，如今仍在发挥作用。

(三) 护滩工

海塘塘外滩涂其实是海塘塘基的屏障，滩涂延伸愈远愈有利于塘基安全，护滩工程作用是通过护滩促淤来保护滩涂、保护坦水，进而巩固塘基(图 4-75)。植物护滩是海塘中运用历史最长，最普遍和最经济的工程形式。清代，因为大石塘的兴建，工程护滩得以推广。

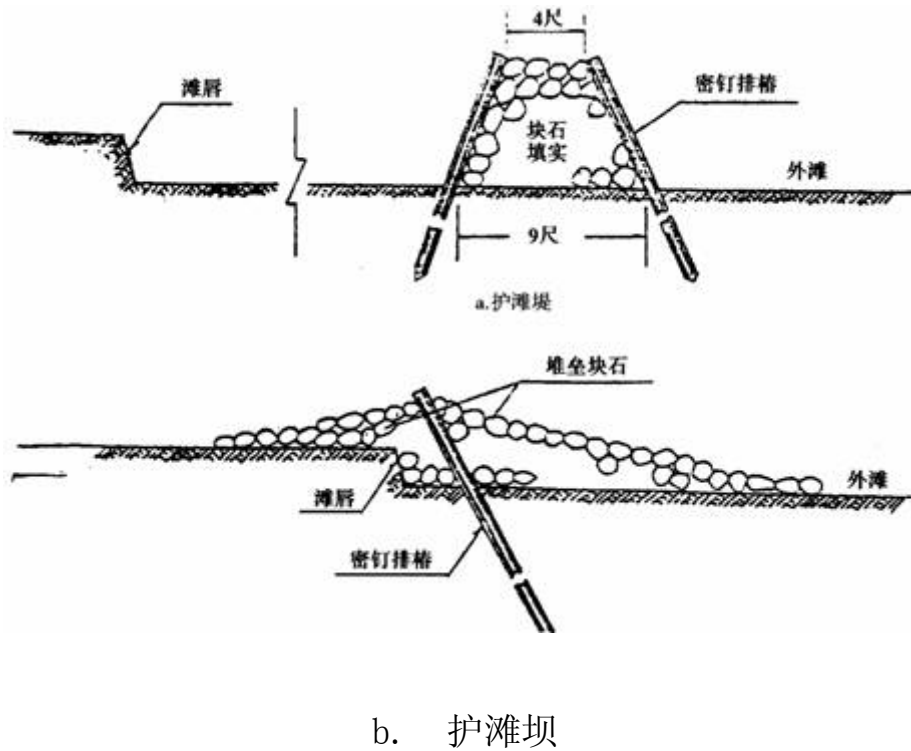


图 4-75 护滩堤与护滩坝

清代，在今上海的宝山、太仓等地兴建的海塘护滩工是比较具有代表性的工程。道光十五年(1835)七月海潮海塘遭到严重破坏。时任江苏巡抚林则徐视察海塘后，认为工程被毁的主要原因是塘外无老滩，在他的主持下修复海塘时增加了护滩坝^②。林氏护滩坝采用的是清代水利工程中常见的所谓玲珑坝的做法，但根据各地段不同的潮势或设单坝，或为二三重以上的多重坝。玲珑坝建筑材料和结构是与河工的透水坝相近的潜水坝，即在滩唇处打排桩，排桩间抛石，护滩坝受到潮水冲击时，潮浪的动力被削弱、吸纳，水中的悬沙不断落淤，时间渐长而利于水生植物生长，滩涂由此得到稳定、并不断延伸。

① 《大清会典事例》卷 923，中华书局本，第 613~614 页。

②清·林则徐：《林文忠公政书·江苏奏稿》卷6，中国书店，1991年，第49～50页。

(四) 备塘河

重力型石塘安全运用的工程保障是多方面的。明嘉靖黄光升海盐大石塘之后，人们希望在潮灾频繁的地区以石塘取代草塘和土塘。但是，明嘉靖以来海宁修筑的石塘难以抵挡台风大潮的袭击。明代在海盐有成功实例，移植到海宁之初却难以推广。明代人陈善曾阐述过重力型石塘在海宁推行的可行性和难度：“修(海)宁塘者诚一准海盐新塘之式则是一劳永逸之计尔。”^①但是海盐、海宁相邻两地自然特点不同：“余观海宁之塘与海盐异，盐塘有大患亦有大利，宁塘似无显患而实有隐忧。盖盐塘陂池相属，有内河可开，故潮势至此，既为分杀而引其流更能使草荡惜为膏腴，是大患弭而大利兴也；若宁塘逼近城郭，无内河可开，幸潮水缓于盐尔。设一旦海啸直荡邑治，为隐忧可胜道乎。”^②陈善指出了尽管海宁潮位高度低于海盐，但是没有内河与钱塘江通，潮浪袭来无河流可以蓄滞。堤背的高水位不利于塘体稳定，这也是海宁建石塘的困难之一。

清乾隆以来，海宁修筑鱼鳞大石塘，备塘河成为主要附属工程设施。备塘河即为以排水为主兼有通航效益的排水河，它与海塘相距100米左右，与塘背堤平行，每间隔一段有闸门与钱塘江相通，堤岸多为夯土。《海塘录》记：“海宁旧无土塘，雍正十一年(1733)内大

臣海望总督李卫以鱼鳞石塘难以速成，请于海宁龟山南至仁和李家村筑土备塘一道，离外塘或一里半……又恐外有石塘，内有备塘，雨水无从泻泄，因于最低之处筑涵洞十七座，以泄水石闸四座，兼通舟楫，又于备塘河建木桥二十六座，以通行人。”^③显然海宁备塘河主要是从鱼鳞石塘的安全运行的角度来设计的。元代在海盐海塘已有备塘河应用，主要是筑塘取土留下的沟壑，为了保护塘身安全，边坡有护坡工程^④。清代随着鱼鳞石塘规模日渐扩大，备塘河的工程设施更加配套。备塘河有涵洞、泄水闸与外河或海相通，具有完备的排水功能并兼有交通效益。

①，② 明·陈善：捍海塘考，《海塘录》卷 21，四库全书本，第 9~12 页。

③清·翟均廉：《海塘录》卷 1，四库全书本，第 12 页。

④《元史·河渠志》，二十五史河渠志校注本，第 294 页，记：泰定四年(1327)，盐官海塘被冲，潮水袭击县城，杭州路组织抢修，主持者“与都水庸田司议，欲于北地筑塘四十余里。而工费浩大，莫若先修咸塘，增其高阔，填塞沟港，且浚深近北备塘濠堑，用桩密钉，庶可护御”。这种设在海塘背水面的排水沟边坡有木桩护坡。