管桩抛石顺坝在侵蚀性海岸保滩工程中的应用

嵇欧洋

(响水县水利勘测设计室,江苏 响水　224600)

摘要:借鉴上海奉贤南门港和滨海六合庄采用透空式管桩顺坝的成功经验,结合本地管桩生产条件,采用外径 $D = 50$ cm 的管桩抛石顺坝方案,桩的透空间距为 35 cm,透空率 41%,经模型试验和实际工程验证,具有明显的消浪保滩效果,减小了作用在陡墙式主海堤的波高,并明显减弱了堤后波浪刷滩的动力,有效地保护顺坝坝后与主海堤之间的滩地.

关键词:管桩;顺坝;保滩;海堤

中图分类号:U656.2+4　　文献标识码:B　　文章编号:1006-7647(2005)S1-0132-04

1　工程概况

响水县海堤位于江苏省北部沿海灌河口至套子口之间,是江苏省侵蚀性海岸段之一.

1.1　海岸变迁

自 1194 年黄河夺淮到 1855 年北徙的 661 年间,由于黄河挟带大量泥沙流入海中,使江苏北部废黄河口南北附近海岸迅速向东推移.江苏省响水县全境原来大都是沧海,后来由于淤沙沉积,海岸东移,逐步演变成陆地.

黄河夺淮之后,由于没有得到有效的治理,于清咸丰五年(1855 年)又在河南省兰考县西北铜瓦厢决口,黄河水从山东省北部流入渤海湾.原夺淮入海水道遂称废黄河,从此泥沙来源中断,失去泥沙补给,海岸开始蚀退,如淤黄河口在搞治海保滩工程前的 60 多年间,陆地蚀退 17 km,平均每年蚀退 280 m.响水县海岸蚀退速度较淤黄河口慢,根据调查,现状海岸已趋于稳定,每年侵蚀量大约在 15 ~ 20 m,台风等灾害多发年份可达 40 m 以上.

1.2　工程地质

钻探揭示,钻探范围内的土层均为第四纪滨海相沉积,自上而下可分 6 层.

第 1 层:素填土,褐黄色轻(重)粉质壤土杂粉质黏土,层底标高 1.6 ~ 2.3 m(废黄河零点,下同),层厚 2.5 ~ 5.3 m.

第 2 层:淤泥质粉质黏土,灰黄色,杂轻粉质砂壤土,层底标高 0.5 ~ 1.3 m,层厚 0.7 ~ 1.7 m. ω = 31.0%, C = 10 kPa, $\varphi = 7°$, N = 0.9 击, f_k = 90 kPa.

第 3-1 层:淤泥质粉质黏土,深灰色,夹薄层轻粉质砂壤土.层底标高(-3.4) ~ (-2.4) m,层厚 3.3 ~ 4.7 m. ω = 42.7%, C = 8 kPa, $\varphi = 5°$, N = 0.9 击, f_k = 65 kPa.

第 3-2 层:重粉质砂壤土,灰 ~ 灰黄色,局部为轻粉质砂壤土.层底标高(-4.8) ~ (-3.3) m,层厚 0.2 ~ 1.7 m. ω = 25.4%, C = 5 kPa, $\varphi = 25°$, N = 6 击, f_k = 80 kPa.

第 3-3 层:淤泥质粉质黏土,深灰色,偶夹薄层轻粉质砂壤土.层底标高 -19.3 m,层厚 14.5 m. ω = 43.1%, C = 10 kPa, $\varphi = 4°$, N = 0.8 击, f_k = 65 kPa.

第 4 层:极细砂,棕黄色,未见底.

1.3　潮位与波浪

a. 潮位.响水县沿海潮流受海州湾潮波系统控制,潮汐属非正规半日潮型,每日涨潮落潮各两次,其历时各不相同,多年平均涨潮历时 308 min,落潮历时 437 min.燕尾港站历史最高潮位 4.05 m(1981 年 9 月 1 日),多年平均高潮位 2.15 m,低潮位 -0.95 m;最大潮差 4.86 m,平均潮差 3.08 m.

b. 波浪.江苏沿海北部海区北向浪频率为 68%,主浪向为 ENE,其频率为 14%,强浪亦为 EN.最大波高出现在每年 9 月,6 月出现最小值.波浪要素见表 1.

c. 台风.台风是对海堤安全构成威胁的主要自然灾害之一.响水县受台风影响较多,台风影响大多发生在每年的 7 月至 9 月,平均每年 1.1 次,最多的

作者简介:嵇欧洋(1965—),男,江苏阜宁人,工程师,从事水利工程规划设计与施工管理工作.

表 1　连响闸段管桩抛石顺坝波浪要素

潮位 Z/m	水深 d/m	波高 H_b/m	波周期 T/s	L/H_b
4.02	3.22	2.25	8.2	20
4.02	3.22	2.25	7.5	18
3.50	2.70	1.90	8.2	21.5
3.50	2.70	1.90	6.91	18
3.00	2.20	1.56	8.2	24
3.00	2.20	1.56	6.55	18
2.50	1.70	1.20	8.2	27.5
2.50	1.70	1.20	6.07	20

注 滩面高程 $Z_d = 0.80$ m.

为 1962 年，出现过 3 次. 响水县虽受台风正面袭击的机遇不多，但一旦遭受台风袭击，连续暴雨，又遇天文大潮，对沿海堤防将造成严重威胁. 1997 年 8 月 18 日，11 号台风侵袭响水县，风力 10 级，阵风 11 级，大风暴雨持续 3 d. 2000 年 8 月 30 日，受 12 号台风“派北安”与北方弱冷空气共同影响，响水县城 24 h 降雨量 824.7 mm，为江苏之最，连响闸段海堤部分堤身被冲刷近半，损失惨重.

2　工程设计

响水县一线海堤全长 46.7 km，大陆标准海岸线长 43.14 km，全部处于侵蚀性海岸. 连响闸段海堤位于新滩港至蒲港之间一线海堤上，是最具代表性的侵蚀性海岸. 1996 年前该段滩面平均高程为 2.5 m，淘刷至 2000 年，在该段近 3 km 的海堤中，滩面低于高程 2.0 m 的有 1.8 km，其中滩面最低高程已下降至高程 1.2 ~ 1.4 m，其滩面蚀降速度明显快于别处海岸. 鉴于长 1 774 m 的陡墙式主海堤前沿滩地在波浪和潮流作用下还在继续被淘刷下切，选择有效的保滩工程措施，以保证海堤堤前滩地不再下降，并削减作用在主海堤上的波浪是十分必要的. 本着“保堤必先保滩”的原则，在实施主海堤防护的同时，有必要对部分堤段实施保滩工程，以确保连响闸段主海堤的安全.

本期工程在一期工程基础上进行加固，防护工程全长 2 600 m，其中直立墙段 1 774 m，斜坡段 826 m（新增 140 m），并同步实施保滩工程长 2 155 m，见图 1.

连响闸段海堤防护工程设计中保滩工程是关键，考虑到中段 686 m 段海堤为凹岸，滩面高程 1.8 ~ 2.3 m 之间，且滩面淘刷没有其他堤段严重，暂不考虑保滩工程，待滩面高程淘刷至 1.80 m 以下时，再考虑实施保滩工程.

2.1　方案比选

a. 管桩抛石顺坝方案（方案 1）. 在直立墙（或块石护坡）前 50 m 处设管桩顺坝，管桩顶高程为 3.0 m，桩径为 50 cm，壁厚 10 cm，桩长 7 m，管桩前抛石 8 m，管桩后抛石 3 m，抛石厚度管桩前 70 cm，管桩后 60 cm，块石规格均为 60 ~ 80 kg/块，下垫一层 270 g/m^2 有纺土工布.

b. 抛石顺坝方案（方案 2）. 在直立墙（或块石护坡）前 50 m 处设抛石顺坝，坝顶高程 2.5 m，沿海侧 1∶4，内侧 1∶2.5，块石规格为 60 ~ 80 kg/块，下垫一层 270 g/m^2 有纺土工布. 在顺坝堤面及沿海侧坡表面密抛 37 cm × 37 cm × 37 cm C25 预制块（120 kg/块），以防坝体被波浪打击滚落.

方案 1 与方案 2 相比，方案 1 工程造价稍低，约节省 5% 左右，且具有抗滩面降低稳定性好、任意方向消浪效果明显、促淤效果好、建成后维护量小、施工快捷、一次施工可定型等优点. 见图 1 ~ 2.

2.2　丁坝设置

为了能与管桩抛石顺坝构成完整的防浪促淤系统，在顺坝两端各设一条丁坝，从主海堤坡脚至管桩中心线 50 m；丁坝坝顶宽 4.0 m，坝头高程 2.5 m，从坝根向坝头设 1% 纵坡，坝外侧坡为 1∶4，内侧坡为 1∶2.5，块石规格均为 60 ~ 80 kg/块，下垫一层 270 g/m^2 有纺土工布；管桩抛石顺坝伸入并穿过两端的丁坝坝身，这样能构成较封闭的坝田，对坝内的流速减小

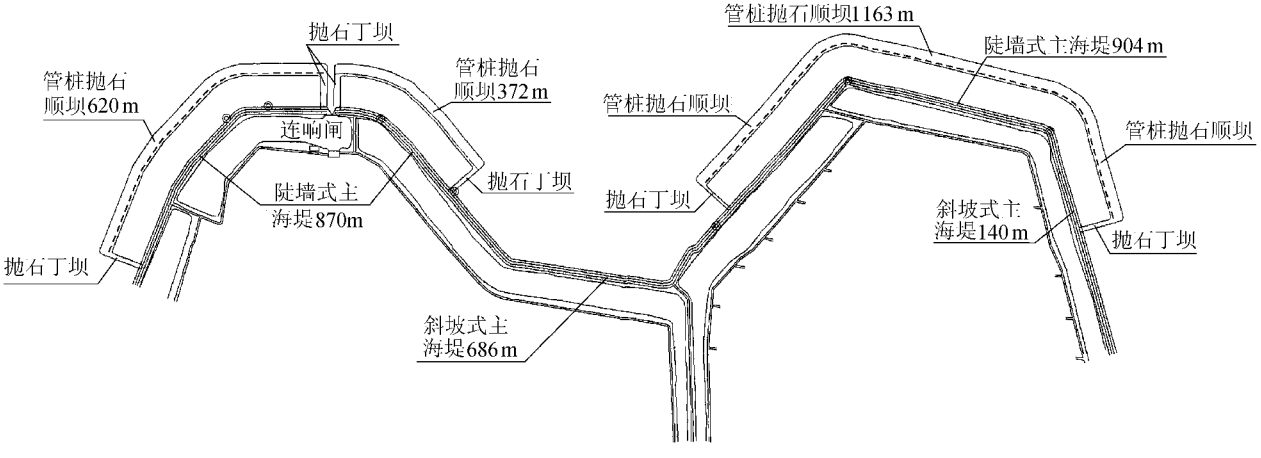

图 1　海堤保滩工程平面示意图

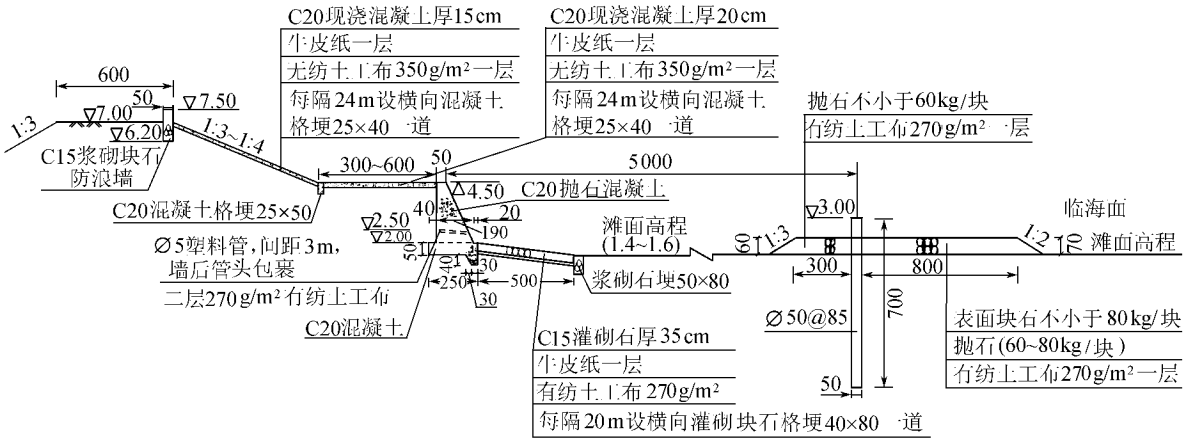

图2 海堤/管桩抛石顺坝断面图

有较大的好处,同时对丁坝坝身的防护也有较好的效果.

2.3 管桩计算

管桩计算方法采用港口工程中常用的无锚板桩的计算方法.根据模型试验,取设计单桩总水平压力 $P=13\ \mathrm{kN}$,作用点在高程 1.9 m 处.根据以上设计方案拟定的桩径为 50 cm,壁厚 10 cm,桩顶高程 3.0 m,计算成果如下:

a. 桩长计算.桩入土深度 $t=Kt_0$,等值内摩擦角 $\varphi_D=10°$,K 取 1.2,$t_0=3.95\ \mathrm{m}$,由此得桩的入土深度 $t=4.74\ \mathrm{m}$,则桩长 $L=2.2+4.74=6.94\ \mathrm{m}$.取桩长为 7.0 m(桩端持力层在 3-2 层上).

b. 桩身最大弯矩 $M_{\max}$ 计算.经计算,$M_{\max}=31.71\ \mathrm{kN\cdot m}$.根据《先张法预应力混凝土管桩结构设计图集》①,选用 C60PC-AB 型,桩径为 50 cm,壁厚为 10 cm,桩长 7 m,其极限弯矩为 207 kN·m,抗裂弯矩为 125 kN·m.均能满足设计要求.

3 模型试验

为了验证保滩工程结构的合理性,在工程设计过程中,委托河海大学进行模型试验,其模型试验结果及测试数据,作为修改设计方案的参考依据.

3.1 模型设计

管桩桩径 $D=50\ \mathrm{cm}$,桩的透空间距 $a=35\ \mathrm{cm}$,管桩顶高程为 3.0 m.现有滩面高程 1.40 ~ 1.80 m,部分堤段达 1.80 ~ 2.30 m.考虑到目前滩面还在继续淘刷下切,模型试验顺坝前滩面高程取 0.80 m,留有一定余地,顺坝与海堤之间滩面高程取 1.40 m.

3.2 潮位与波浪

响水县海堤设计标准为 50 年一遇潮位加 10 级风浪,设计高潮位为 4.02 m,考虑不同的潮位与相应波浪的组合,对海堤和顺坝各部位结构的作用各不相同,所以模型试验用多种潮位与波浪的组合,各级潮位间隔 0.5 m 左右.根据滩面高程和坝前水深,顺坝和陡墙式主海堤取四级潮位,分别为 4.02 m,3.50 m,3.00 m,2.50 m.

因连响闸段主海堤迎海面的滩面水深较浅,滩面高程 0.8 m,最高潮位 4.02 m 时,坝前水深最大 3.22 m,其他潮位组合时水深更小,所以各潮、波组合的波高均取极限波高($H_b\approx 0.7d$).各级潮位的波浪要素见表 1.

周期参照赣榆(NE 向 $T=8.11\ \mathrm{s}$,ENE 向 $T=8.16\ \mathrm{s}$)和滨海六合庄(NNE 向 $T=8.31\ \mathrm{s}$,NE 向 $T=8.15\ \mathrm{s}$,ENE 向 $T=7.98\ \mathrm{s}$)的 30 ~ 34 年重现期推算的波周期,取 $\bar{T}=8.2\ \mathrm{s}$.

由于波浪对桩的最大作用力一般发生在波坦 $L/H_b=18\sim 25$ 时,所以在模型试验中各级潮位都增加了一组波周期与波高的组合.

3.3 消浪效果试验结果

模型试验按表 1 所列的波周期 $\bar{T}=8.2\ \mathrm{s}$ 的各潮位与波高的组合测定顺坝坝后波高 H'(即作用于陡墙式主海堤的波高).试验结果见表 2.由表 2 可见,当潮位 $Z=4.02\ \mathrm{m}$ 时,波浪在坝顶前沿发生变形,越过顺坝坝顶(高程 $Z_0=3.0\ \mathrm{m}$)后在坝后 10 ~ 12 m 处发生破碎,波高由坝前 $H_b=2.25\ \mathrm{m}$ 衰减为坝后波高 $H'=1.35\ \mathrm{m}$,透消系数 $K=H'/H_b=0.60$.当潮位降

表2 管桩顺坝消浪系数 K 及波能衰减系数 K_E

Z/m	管桩顺坝				陡墙式主海堤			透消系数
	Z_d/m	d/m	H_b/m	T/m	Z'_d/m	d'/m	H'/m	$K(H'/H_b)$
4.02	0.80	3.22	2.25	8.2	1.40	2.62	1.35	0.60
3.50	0.80	2.70	1.90	8.2	1.40	2.10	1.10	0.58
3.00	0.80	2.20	1.56	8.2	1.40	1.60	0.85	0.55
2.50	0.80	1.70	1.20	8.2	1.40	1.10	0.55	0.46

① 中国水泥制品工业协会强制混凝土桩专业委员会,国家建材局苏州混凝土水泥制品研究院.先张法预应力混凝土管桩结构设计图集,1996.

至 $Z=3.5$ m 时，波浪在坝顶处发生变形，并在坝后 9～10 m 处破碎，波高 $H_b=1.90$ m 衰减为 $H'=1.10$ m，透消系数 $K=0.58$. 当潮位 $Z=3.0$ m 时，波浪在坝后 6～7 m 处破碎，波高 $H_b=1.56$ m 衰减为 $H'=0.85$ m，透消系数 $K=0.55$. 潮位 $Z=2.5$ m 时，波浪在坝前沿处破碎，波高 $H_b=1.20$ m 衰减为 $H'=0.55$ m，透消系数 $K=0.46$.

3.4 波压力试验结果

透空管桩属于无锚桩式结构，设计时需确定作用在单桩上的最大水平波压力及相应的波压力作用点.

测定透空圆桩上波压力时，按表 1 所列潮、波组合进行试验. 8 组潮波组合的模型实测波压力及经换算为原体后的波压力成果见表 3.

表 3 管桩顺坝波压力

Z/m	d/m	H_b/m	T/s	L_0/H_b	$d'(Z-Z_0)$/m	d'/H_b	P/kN·根$^{-1}$
4.02	3.22	2.25	8.2	20	1.02	0.453	5.53
			7.5	18			5.53
3.50	2.70	1.90	8.2	21.5	0.50	0.263	5.78
			6.91	18			5.55
3.00	2.20	1.55	8.2	24	0.00	0.000	7.00
			6.55	18			6.69
2.50	1.70	1.20	8.2	27.5	−0.50	−0.417	6.86
			6.07	20			7.22

注：滩面高程 $Z_d=0.8$ m，桩顶高程 $Z_0=3.0$ m，桩自由长度 $L=2.2$ m.

从表 3 可看出，当潮位高于桩顶时，由于波浪破碎在坝后，作用在桩上的波压力较小，而当潮位与桩顶齐平或略低于桩顶时，波浪直接打击在桩上，作用在桩上的波浪压力比高潮位时更大. 虽然潮位 $Z=2.5$ m 时波高 $H_b=1.20$ m，仅为潮位 $Z=4.02$ m 时波高 $H_b=2.25$ m 的 53%，而前者波压力却为后者的 1.3 倍. 设计时取实测最大单桩压力 $P_{实测}=7.22$ kN/根，考虑到波压力的随机性，设计时取安全系数 1.2，考虑波浪斜向作用时，桩的透空间距将有所减小，取系数 1.5，则设计波压力 $P=1.2\times1.5\times P_{实测}=13$ kN/根.

3.5 护底试验结果

模型试验坝后滩面高程取 1.4 m，坝前滩面高程取 0.8 m. 根据波浪越顶后对坝后滩面冲刷的位置和当坝前滩面被淘刷下切后仍能保证堤线附近滩面的高程不发生明显变化的需要，坝后需抛石宽 3 m，坝前需抛石宽 8 m. 试验结果表明，坝后抛石块石重 40～60 kg 能保持稳定，坝前抛石块石重需在 80 kg 以上才能保持稳定，否则重量偏小的块石在波浪作用下将不断撞击管桩，使管桩混凝土破损，钢筋裸露，直接影响管桩的强度和安全.

4 工程施工

本工程位于黄海之滨的浅滩上，施工环境特别，既不同于陆地施工，又不同于江河湖泊施工，也不同于海上施工. 而且施工区域潮位有涨有落，只能赶潮施工. 由于本工程所处滩面表层淤泥普遍达到 50～80 cm，施工期间正值雨季和台风多发季节，施工期间与堤岸防护工程平行交叉施工，施工干扰大，施工相当困难.

a. 管桩运输. 工程用 PC-AB 管桩采用陆上运输，卸至大堤后采用 25T 汽车吊吊至滩地上，滩地上铺设轨道，用人工将管桩滚至施工区域.

b. 施工测量. 就近引测水准至施工工地，并在施工区域内布设高程控制点；根据地形测图，确定轴线、圆弧、转点等，在施工现场布置控制网.

c. 管桩施工. 本工程保滩工段长 2 155 m，共计需沉桩 2 536 根. 管桩施工采用两台改进后的水陆型 1.8 T 柴油打桩机赶潮施工，分别从两端向内侧施工. 技术人员根据桩位布置图测放桩位. 桩身定位，桩垂直度调节好后，徐徐将锤放上桩顶，直至桩自沉到某一深度不动为止，再用锤将桩徐徐打入. 在管桩沉桩过程中，对于桩距、高程、轴线的控制采取了以下措施：①桩距控制，采用 10 cm×10 cm×35 cm 木方作靠模，在施工过程中控制好垂直度，确保桩距控制在 ±10 cm 内；②标高控制，在远离桩 20～30 m 间架设 DS3 型水准仪，调节水准仪仪高至 2.92～2.94 m，桩顶高程在桩锤上作好记号，在记号到水准仪中心视线即停止施打；③轴线偏差控制，PC 管桩沉桩时，桩机操作工人根据已沉桩完毕轴线用目测控制管桩轴线方向偏差.

d. 抛石施工. 沉桩完成后，整平滩面铺设土工布，然后进行抛石施工. 抛石采用独轮车运输，人工码抛，一是严格控制块石单体重量符合设计要求；二是控制抛石坝体面层的平整度.

5 工程效果

响水县连响闸段海堤防护工程已于 2002 年 11 月通过江苏省水利厅组织的竣工验收，经过 4 个汛期和数次台风、高潮的考验，使用效果很好.

a. 管桩抛石顺坝与常规抛石顺坝相比，具有抗浪稳定性好、促淤效果好、建成后维护量小、施工快捷等优点. 波浪通过管桩后破碎明显，消浪作用十分明显.

b. 通过对管桩工程进行沉陷观测分析，3 个月内沉陷比较明显，3 个月后基本稳定，（下转第 145 页）

渠工程，由于渠首至(2+500)段渠底基本与黑河底相平.据渠线探坑揭示，地下水在地面以下0.5~1.0m之间，而渠深在1.0m以下.该段干渠经常有潜流渗入.对此采用了透水衬砌的设计方案：底部干砌块石，边坡为干砌块石辅以异型预制砖衬砌，既避免了渠道淤积，缩小了设计断面，防止了刚性护砌的冻胀危害发生，同时将地下水引入干渠，使有限的水资源充分发挥作用.在2004年的乐善干渠一标、小坝干渠一标工程采取了干砌块石护砌弧形弧底、预制块护砌边坡的透水衬砌形式，有效地防止了冻胀发生.

2.8 运行管理措施

运行管理措施主要有：

a. 合理掌握冬灌时间，冬灌结束不能太迟.

b. 适时、集中灌溉，缩短渠道通水周期，减少渗漏，及时清理渠内垃圾污物，回填渠堤鼠洞陷坑，排除渠道两旁积水，清除渠内的积冰积雪.

c. 每次运行结束，要及时排走渠底积水，修复局部残缺破损，防止破坏蔓延扩大.

3 结 语

渠道发生冻胀破坏的原因是多方面的，在黑河流域节水改造中，针对不同地域、不同地质、不同地下水位等工程环境和条件，采取一种或同时采用几种方法并举的综合防治措施来进行冻胀防治，较好地解决了甘、临、高黑河流域节水改造中的渠道冻胀问题.实践表明，渠道运行良好，节水效果显著，延长了渠道寿命，取得了较好的经济效益.

(收稿日期：2005-04-25 编辑：马敏峰)

(上接第135页)特别是抛石后，管桩没有沉陷变化.从管桩总沉陷记录发现，沉降量超过10cm的仅有2根，沉陷量均为11cm，沉陷量超过5cm的有19根；沉陷量在2~5cm之间的有82根；上浮的有7根，最大上浮量仅为1cm；其余桩的下沉量均在2cm以下.管桩稳定性达到设计标准.为了防止管桩顶部钢箍及钢筋锈蚀而损坏管桩，增设了管桩帽.

c. 一年后，通过对已完工程段滩面测量结果分析，海堤陡墙与管桩抛石顺坝之间滩面淤积明显.至2004年底，滩面平均淤高0.3~0.5m.由于海浪减小，且滩面淤高，有利于大米草定植，大米草从两侧向中央不断繁殖延伸，逐渐形成一条绿带，不仅起固沙保土作用，而且消浪效果更加显著.

d. 由于在施工过程中对块石进行严格筛选，砌筑方法得当，管桩两侧抛石体没有发现破损变形现象，完整如初.

响水县连响闸段海堤管桩抛石顺坝的应用，不仅使连响闸段海堤临海一侧滩面下蚀趋势得以控制，而且滩面向淤涨方向转变，彻底消除了该段海堤因滩面持续下降所带来堤身安全隐患，同时也为今后海堤达标建设和海岸防护积累了经验.

(收稿日期：2005-03-14 编辑：马敏峰)

(上接第140页)

4.3 加快水质站网建设

黄河水污染事件的主要特点是突发性，目前的水质监测及信息传输模式周期长、代表性差，无法满足预防污染、保障用水安全的需要.应尽快结合水量观测、预报工作，建设在线水质监测网，对山东黄河干流水质状况进行在线观测；同时建设信息传输设施，以便对水质污染进行及时预警预报，确保下游沿黄地区的用水安全.

4.4 加强水质监测能力建设

近年来，由于黄河污径比的增加，黄河水污染事件时有发生.目前每月1次的水质监测已经不能满足要求.加强巡测能力的建设，提高处理水污染事件的快速反应能力，已经成为水质监测工作的迫切需要.低水位小流量期间，由于水环境容量低，每月的水质都随着来水量和排污口的变化而发生较大变化，同时，由于水体承载能力低，极易发生突发性水污染事件.因此，应尽快实施水量水质同时监测，以满足水资源管理的需要.

4.5 做好山东沿黄主要排污口的污染治理工作

目前，山东沿黄主要排污口为旧县粉条加工废水排污口和翟庄闸排污口，其排放量大而集中，污染物浓度高，已经对下游河段水质造成了较大影响，特别是对地处下游不远处济南河段黄河水质的影响更是不可小视.目前，旧县粉条加工废水依然在没有经过任何污水处理的情况下，向东平湖出湖口陈山口闸下排放，建议有关部门尽快对上述污染源采取措施，做到达标排放.

(收稿日期：2005-10-20 编辑：马敏峰)