

深部裂缝带——一种新的地震构造样式

李愿军

(武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

[摘要] 黄河黑山峡大柳树坝址、雅砻江锦屏普斯罗坝址及其他一些水电工程区, 在勘探过程相继发现了一种新的地质构造现象——深部裂缝带, 并且多出现在我国强震活跃地区和强震发生断裂带上, 沿断裂带历史上强震活动频繁; 深部裂缝带向地下延伸超过 300 m, 远远超出地表卸荷带的影响深度, 故与强地震作用时岩体构造动力效应密切相关; 讨论了根据弹性波作用下岩体的动力学响应, 阐述了深部裂缝带发生的地震学原因。

[关键词] 深部裂缝带; 强震断层; 卸荷; 岩石动力学

[中图分类号] V475; V476 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)04-0012-07

随着大规模水电工程建设的展开, 坝址区内的各种工程开挖揭示出一种新的近地表深部构造现象, 笔者统一称为深部裂缝带。在不少大型工程的调查、勘探和施工过程中, 不断有深部裂缝现象发现。最典型的两个例子: 一是黄河黑山峡大柳树坝址, 二是雅砻江锦屏的普斯罗坝址。深部裂缝现象引起了广泛的注意, 土木工程界和工程设计部门投入了大量资金, 以求合理地解释这种新的地质现象。这是一种新发现的地震构造现象, 深入研究深部裂缝是地震地质面临的一个新课题, 对重大工程的地震安全评价具有重要的理论意义。

1 深部裂缝带的宏观描述

1.1 黄河黑山峡大柳树坝址区大规模岩体松动带

位于宁夏中卫境内的大柳树水利枢纽工程, 拟建高土石坝或高面板堆石坝, 设计最大坝高 164 m, 坝长 674 m, 总库容 $110 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。该工程对优化配置黄河水利资源、调节南水北调西线工程的调水要求、改善区域生态环境、防洪防凌和灌溉发电十分重要。地震、地质部门的调查测绘和勘测设计系统的勘探和测试表明, 大柳树坝址位于一组由北西南转折延伸的区域大断裂带之间, 属于典型的强震

发生断层(图1)。特别是大柳树坝址以西 10 km 米粮营至以东 5 km 的烟筒梁地区, 大范围内分布有严重破碎并拉张松动的岩体, 其范围自黄河水面沿两岸直达山顶 1 500 m 高程, 平硐探测水平松动深度达 85 ~ 90 m, 甚至 160 ~ 268 m。岩体松动的特点可概括为岩体架空、断裂张开、节理错动、滑塌和地表倾倒等。经追踪调查显示, 大规模岩体松动带主要沿中卫一同心活动断裂带分布。

1.2 雅砻江锦屏普斯罗大坝左岸深部裂缝带

锦屏一级水电工程普斯罗坝位于四川冕宁雅砻江上, 设计采用混凝土双曲拱坝结构, 坝高 305 m, 总库容 $77.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。勘探设计从 1989 年开始, 1991 年底在左岸 IV 线 PD14 勘探平硐的开挖过程中遇到塌顶现象, 随后在 VI 线 PD16 平硐勘探中在距岸坡深 130 ~ 160 m 的地方发现了明显的拉张裂缝。为进一步弄清这种特殊的地质现象, 国家电力公司成都勘测设计研究院又相继邀请一些科研和高校专家, 开展了进一步的工程勘探、专题研究和咨询审评; 查明坝址深部裂缝 89 条, 平面排布方向与坝址地区的断裂和节理的优势方向一致, 即走向 $N40^\circ \sim 70^\circ$, 倾向 E/SE, 倾角 $50^\circ \sim 75^\circ$ 或走向 $N0^\circ \sim 30^\circ$ 倾向 E/SE, 倾角 $50^\circ \sim 65^\circ$ 。深部裂缝的排列方式多为锯齿状、



图 1 黄河黑山峡大柳树坝区活动构造背景^[1]

Fig.1 Active tectonic setting of Daliushu Dam-site area at Heishanxia of Huanghe River

雁列式和平行式，裂缝的串联方式表现为菱形拉分结环、追踪张裂和节理连接，与之伴随的许多规模不等的断裂与深部裂缝带产状、分布完全一致。这些断裂的运动历史和力学性质对判断深部裂缝带的成因机制非常重要，断裂前期主要以水平剪切运动为主，后期有正断位错也有挤压逆冲。

1.3 深部裂缝带的几个特点

无论大规模岩体松动带还是深部裂缝带，都具有几个显著的共同特点。

首先，发现这种现象的地点都位于我国强震活动带范围内。黄河黑山峡大柳树位于我国青藏高原东北部边缘弧形转折带的拐点附近，受一条巨型岩石圈活动断裂系—北祁连山断裂系控制，断裂带早更新世晚期至中更新世初期以来表现为左旋逆走滑性质，晚更新世以来成为一条重要的强震断裂系。其中穿过坝址区的中卫—同心断裂带长达 200 km，而坝址 F₂₀₁ 断裂带在早更新世晚期至中更新世初期形成的左旋逆走滑剪切带长达 110 km，沿 F₂₀₁ 断裂带 1709 年曾发生中卫南 7.5 级地震，地震破裂带 110 km，最大水平位移 5.6 m，最大垂直断距 1.15 m。大规模岩体松动带均沿断裂带分布于 IX ~ X 度极震区内。雅砻江锦屏普斯罗坝址位于锦屏山—小金河断裂以西 2 km 处，该断裂带向南西与丽江大断裂连为一体，向北东融入我国著名的南北向强震

构造带之中（图 2）。锦屏山—小金河断裂带在区内延伸约 150 km，走向 N 20° ~ 40° E，倾向北西，倾角 40° ~ 70°。1996 年云南丽江曾发生 7.0 级地震，死亡 286 人，重伤 3 866 人，受灾人口超过 10⁶ 人，仅丽江市直接经济损失达 27 × 10⁸ 元。断裂带北段在木里以南曾多次发生 6 级以上强震^[2,3]。

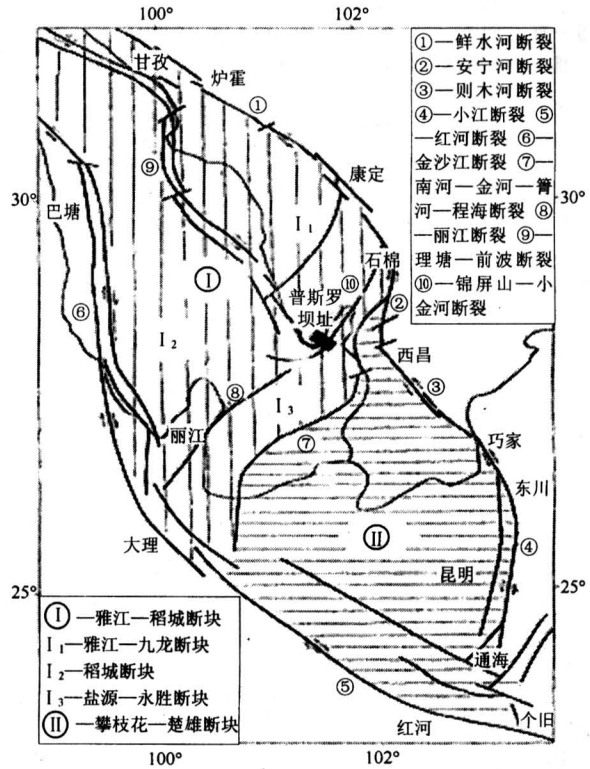


图 2 雅砻江锦屏一级水电站活动构造背景

Fig.2 Active tectonic setting of Pusluo Dam-site area at Jinpingshan of Yalongjiang River

其次，深部裂缝带和大规模岩体松动带都以深部拉伸为特点（表 1、表 2），这种拉伸向地下延伸远远超过地表河流下切和地壳抬升造成的边坡卸荷影响范围。在黑山峡大柳树坝轴线及趾板附近松动岩体发育的水平深度最深达 268 m。根据 18 个平硐的探测资料，雅砻江普斯罗的裂缝多集中于硐深 50 ~ 190 m 处，PD48 在 300 多 m 深处仍见有裂缝。

第三，共生的小断裂在近 20 ~ 40 ka 是活动的。大柳树坝址小断层的 ESR 测年大多数在该时间范畴，普斯罗坝址张裂隙中错碎的石英粉及压碎的粉末状钙华 ESR 年龄也在此范畴（表 3 至表 5）。

2 深部裂缝带的两种认识

大柳树坝址大规模岩体松动带和普斯罗坝址的

表 1 普斯罗坝址区深部裂缝发育总表*

Table 1 Characteristics of deep-seated rupture zone in Pusiluo Dam-site area

位置	坝号	高程/m	坝深/m	深裂缝发育范围/m	深卸荷底界/m	条(带)数		规模			
						大理岩	砂板岩	I	II	III	IV
II	PD12	1 775.59	249.2	89.5 ~ 185.1	185.1	3	2			1	4
	PD30	1 736.6	198.7		139						
	PD06	1 692.62	199		185						
	PD56	1 652.12	220.5		190	1		1			
II-III	PD58	1 695.53	101.6	80 ~ 85		2				2	
III	PD48	1 880.62	361	65 ~ 338	301		7			2	5
	PD54	1 824.7	246	50 ~ 100	212.5		3			3	
	PD40	1 777.89	203.5		196						
	PD52	1 716.98	200.6		159						
V	PD50	1 668.76	213.5		196						
	PD38	1 869.51	150	130 ~ 140	> 150		1			1	
	PD18	1 781.98	200	136.4 ~ 172.8	172.8	2	1				3
	PD36	1 734.86	204.6	165 ~ 175	175	1		1			
I	PD24	1 698.19	199.8	163	163	1				1	
	PD04	1 783.68	250.6	101.4 ~ 187	187	3					3
	PD34	1 721.59	204.5		201						
III	PD02	1 645.97	243								
	PD44	1 930.79	203.8	56.5 ~ 203.8	> 203.8		9	9			
V	PD42	1 929.32	359	70 ~ 132.7	330		10	3	1	6	
	PD10	1 915.67	145	71 ~ 145	> 145		6		2	4	
VI	PD46	1 816.59	250.3	132 ~ 215	215	5			1	3	1
	PD16	1 768.52	299.5	134 ~ 185	185	6		1	1		4
	PD32	1 725.08	203.3	95	195	1				1	
	PD26	1 659.77	202.8								
IV	PD20	1 918.93	199.3								
	PD14	1 783.14	201	83.5 ~ 173	173	9		1	2	1	5
	PD28	1 719.59	202.8	68 ~ 103	164	3		2		1	
A	PD22	1 779.79	254.5	51.5 ~ 133.5	223	13		1	5	3	4
III	PD08	1 649.08	230.6								

表 2 大柳树坝址大规模岩体松动带深度**

Table 2 Depth of large-scale rock loosened zone in Daliushu Dam-site area

位置	代表性平硐	左岸			右岸				
		高程/m	松动岩体深/m	主要特征	位置	代表性平硐	高程/m	松动岩体深/m	主要特征
III线	313 #	1 247.82	13	强风化卸荷	III线	338 #	1 252.93	40.0	强风化卸荷
	307 #	1 256.97	37	松动岩体	304 #	1 265.23	> 69.9		松动岩体
	319 #	1 273.21	84.8	松动岩体	324 #	1 265.89	102.0		松动岩体
	303 #	1 289.24	> 61.3	松动岩体	342 #	1 288.74	> 49.0		松动岩体
	309 #	1 321.49	> 63.8	松动岩体	306 #	1 296.37	> 148.4		松动岩体
	311 #	1 363.91	> 63.0	松动岩体	308 #	1 307.54	268		松动岩体
	305 #	1 369.52	105.00 ~ 121.90	松动岩体	趾板	354 #	1 245.85	25.0	卸荷松动
趾板	343 #	1 261.96	60	松动岩体	334 #	1 329.50	63.5		松动岩体
	341 #	1 287.26	> 54.70	松动岩体	344 #	1 347.25	> 49.10		松动岩体
	323 #	1 293.11	> 85	松动岩体	洞群出口	360 #	1 245.61	41.0	强风化卸荷
	345 #	1 297.01	76	松动岩体	330 #	1 284.55	> 113.7		松动岩体
	325 #	1 320.24	91.50	松动岩体	328 #	1 301.68	> 102.40		松动岩体
	327 #	1 348.49	> 42.50	松动岩体	346 #	1 324.65	103.75		松动岩体

* 国家电力公司成都勘测设计研究院. 雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告(工程地质), 2003

** 国家电力公司西北勘测设计研究院. 黄河黑山峡河段开发方案补充论证(大柳树高坝方案)工程地质报告, 2002

表 3 大柳树坝址区主干断层测年资料**

Table 3 Ages of the latest activities of the major faults in Daliushu Dam-site area

序号	断层及试样编号	测试位置	样品特征	测试方法	年龄/ka	备注
1	F ₃ -01	烟筒梁南侧	黑色断层泥	热释光法	13.82 ± 0.54	
2	F ₃ -02	烟筒梁南侧	断层破碎带	热释光法	17.83 ± 1.7	
3	F ₃	346 平硐 70 m	黑色断层泥	ESR 法	20	
4	F ₃	336 平硐 10 m	断裂面	ESR 法	50	
5	F ₃	331 平硐 13 m	灰夹红色断层泥	ESR 法	144	
6	F ₇ ⑧-C	烟筒梁西侧	黄色断层泥	热释光法	19.29 ± 0.44	合并后 F ₂₀₁
7	F ₇ ⑧-D	烟筒梁西侧	黑色断层泥	热释光法	21.78 ± 2.15	合并后 F ₂₀₁
8	F ₇ ⑧-A	冰沟口左侧	灰色断层泥	热释光法	14.53 ± 1.5	
9	F ₇ ⑧-B	冰沟口左侧	灰色断层泥	热释光法	17.38 ± 1.86	
10	F ₂₀₁ -60	窑沟枣树林西南侧	黑色断层泥	热释光法	15.79 ± 1.62	
11	F ₂₀₁ -61	窑沟枣树林西南侧	黄色断层泥	热释光法	37.80 ± 1.59	
12	F ₂₀₁ -62	窑沟枣树林西南侧	黑色断层泥	热释光法	47.59 ± 4.06	
13	F ₂₀₁ -63	下河沿东大沟	杂色断层泥	热释光法	25.06 ± 0.37	
14	F ₂₀₁ -64	下河沿东大沟	黑色断层泥	热释光法	26.31 ± 1.14	
15	F ₂₀₁ -16		砂砾石	光释光法	10.53 ± 0.66	
16	F ₂₀₁ -30		坡、洪积砂砾石	光释光法	15.85 ± 1.1	
17	F ₂₀₁ -37		黄色粉砂石	光释光法	7.10 ± 0.67	
18	F ₂₀₁ -41		粉砂土	光释光法	7.99 ± 0.48	
19	F ₂₀₁ -44		坡、洪积砂砾石	光释光法	82.9 ± 9	
20	F ₂₀₁ -48		坡、坡积砂砾石	光释光法	15.59 ± 0.44	
21	F ₂₀₁ -49		粉砂土	光释光法	24.52 ± 1.18	
22	F ₂₀₁ -50		粉砂土	光释光法	19.64 ± 0.62	
23	F ₂₀₁ -51		红色粘土	光释光法	8.76 ± 0.45	
24	F ₂₀₁ -56		坡、洪积砂砾石	光释光法	12.23 ± 1.13	
25	F ₂₀₁ -11	长流水沟口	黄色断层泥	热释光法	20.38 ± 2.1	

表 4 普斯罗坝址深部裂缝带中断裂的活动性质 (据文献[*]整理)

Table 4 Active features of the faults in deep-seated rupture zone of Pusiluo Dam-site area

断裂编号	产状 (走向/倾向/倾角)	长度/m	力学性质	运动历史	最新活动年代/ka	采样地点
f ₅ (左岸)	N40° ~ 50°E/SE/70° ~ 80°	1 800	右行错距 70 ~ 90 m 地表断距 30 m 左右 右行兼逆冲	平移→逆冲→拉张	TL149 ± 16 ESR205 TL90 ± 11 ESR166 TL258 ± 26 ESR279	RD18 # 90 m RD18 # 90 m RD12 # 85 m PD16 上游 支硐 110 m
SL15 (左岸)	N45° ~ 80°E/SE/40° ~ 63°	> 1 000	水平右旋	水平右旋	TL > Q	
f ₁₃ (右岸)				平移→逆冲→拉张	TL158 ± 25 ESR168	
f ₆ (左岸)	N30° ~ 40°E/SE/60° ~ 75°	1 400		挤压→挤压→挤压		
F ₁ (左岸)	N36° ~ 51°E/SE/79° ~ 88°	左岸 600 右岸 100		右旋走滑→正断位错		
f ₁₄ (右岸)	N52°E/SE/65° ~ 70°	500 ~ 700	逆冲	逆冲→正断		
f ₉ (左岸)	N60° ~ 70°E/NW/70° ~ 80°	300		右旋走滑→右旋逆冲→逆冲		

表 5 大柳树坝址中小断层 ESR 测年资料**

Table 5 ESR dating of the mid-little faults in Daliushu Dam-site area

序号	采样硐号	采样位置/m	断层产状(走向/倾向/倾角)	样品特征	年龄/ka	备注
1	310	下游壁 10	NW282°/SW/69°	灰色断层泥	37.1	F ₂
2	324	上游壁 55	NE55°/SE/50°	黑色断层泥	26.1	J ₃
3	324	上游壁 11		灰色断层泥	29.2	J ₆
4	324	上游壁 52	NE55°/SE/50°	黑色断层泥	35.5	J ₃
5	308	上游壁 189	NE50°/SE/78°	灰色断层泥	24.5	f ₅₉
6	308	硐顶 103	NW300°/SW/50°	红色断层泥	21.7	f ₂₂
7	308	硐顶 103	NW300°/SE/50°	灰色断层泥	28.2	f ₂₂
8	308	上游壁 225		红色断层泥	88.6	f ₇₂
9	308	上游壁 112	NE83°/SE/62°	红色断层泥	38.8	f ₂₈
10	321	上游壁 64	NW350°/SW/70°	方解石	32.7	f ₁₃
11	311	掌子面 63	NE60°/SE/29°	灰绿色断层泥	25.0	f ₁₁
12	303	掌子面 60	NE45°/SE/37°	灰色断层泥	9.8 ~ 17.4	L ₃₇
13	346	660	NE65°/SE/15°	灰色断层泥	175	F ₂₄₀
14	346	486	NE15°/SE/60°	黄褐色断层泥	44	F ₁₆₇
15	346	上游壁 253	NE10°/SE/80°	灰白色断层泥	85	F ₂₀₇
16	346	上游壁 311	NW326°/SW/40°	灰色断层泥	42	F ₂₃₂
17	346	上游壁 70	NE80°/NW/62°	黑色断层泥	20	F ₃
18	336	上游壁 10	NE70°/NW/68	灰黑色断层泥	50	F ₃
19	331	上游壁 13	NE70°/NW/68°	灰加红色断层泥	144	F ₃
20	360	上游壁 485	NE60°/NW/66°	灰色泥	74	顺层
21	360	下游壁 797	EW/S/85°	灰色断层泥	46	F ₂₀
22	360	上游壁 915	NE70°/NW/56°	黄色断层泥	351	J ₂₄₇
23	360	上游壁 665	EW/S/53°	黑色泥	42	
24	352	右壁 132	NE80°/SE/87°	土黄色断层泥	78	J ₁₁₀
25	304	右壁 38	NE73°/SE/48°	黑色泥	6.0	F ₂
26	332	下支硐 46	NE70°/SE/85°	灰色断层泥	27	F ₇
27	325	下支硐 42	NE80°/NW/39°	灰色断层泥	30	L ₇₃
28	325	下支硐 45	NE65°/NW/58°	黄色断层泥	56	F ₁₄
29	343	下支硐 104	NE57°/SE/40°	灰绿色断层泥	18	F ₇
30	341	下支硐 23	NE85°/NW/31°	黑色泥	76	F ₁₁
31	305	下支硐 119	NE73°/SE/77°	灰色泥	156	F ₆
32	305	下支硐 71	NE74°/NW/67°	灰色泥	75	J ₂
33	319	下支硐 75	NE76°/NW/88°	黄黑色断层泥	73	f ₁₃

深部裂缝带,曾引起人们广泛重视和讨论。比较有代表性的观点大致可分为两种,一种是地表卸荷作用,另一种认为可能是古地震的遗迹。

2.1 地表卸荷导致深部裂缝带的产生

普斯罗坝址深部裂缝带研究的学者中持地表卸

荷观点者认为:

1) 近场区及外围 30 km 半径范围虽曾多次发生中强地震,但近场区内地震活动平静,历史记载与仪器记录都没有发生过 $M \geq 4.7$ 级以上的地震。

锦屏山—小金河断裂带从坝址东侧 2 km 处通

过, 但沿断裂带无地震发生也无热水(温泉)活动, 经黑色断层泥采样 TL 测年, 最近一次活动距今 177.6 ± 14.4 ka, 属中更新世晚期;

2) 坝区右岸发育的 f_{13} , f_{14} 断裂, 左岸发育的 f_5 , f_8 及 F_1 断层, 延长多在 200 ~ 2 000 m, 大理岩中破碎带宽度不足 1 m, 断层泥的测年结果大多在 150 ka 以上, 表明这些小断裂在晚更新世以来无新活动;

3) 深部裂缝主要发育在一定深度的山体内部, 而没有直接出露于地表, 这与地震效应产生的裂缝不同, 地震裂缝主要是在地表, 向下减弱, 进入基岩应归结到一个断层上, 在地表往往形成线状带。

因此, 锦屏普斯罗坝址左岸深部裂缝是在坝区特定高地应力环境条件下, 伴随河谷快速下切过程, 坡体应力强烈释放, 而沿坡体内原有构造结构面(小断层、裂隙密集带)卸荷拉裂形成的。

2.2 古地震可能是深部裂缝带产生的主因

大柳树坝址岩体中的岩体松动和拉张发育深度大于 268 m, 最大已达 300 m 以上, 普斯罗坝址的深部裂缝带最大深度超过 360 m。这种深度已远远超过地表卸荷影响深度, 即地表卸荷而产生的重力作用影响不会超过地下 100 m。

普斯罗坝区左岸所有不同高程平硐, 由硐口向里做的横剖面表明可分出 3 个带: a. 卸荷裂隙带, 有的厚 10 ~ 20 m, 有的 30 ~ 40 m, 有的 70 ~ 80 m, 平均厚约 50 m 左右; b. 新鲜完整的无裂隙分布带, 厚约数十米到百余米; c. 宽约数十米到二三百米的深部裂缝带。

在地表卸荷带与深部裂缝带之间出现很厚的完整岩体是很难理解的。坝址平硐中深部裂缝的内部结构记录图显示, 裂缝呈菱形、锯齿状、雁列式排列, 单条裂隙可由次级甚至更次级雁列节理组成, 这反映了水平剪切力的强大作用, 并非单纯拉张造成的。因此, 深部裂缝带应是古地震产生的遗迹。

3 强地震作用的动力学过程

人们对地震的过程了解仍极其有限。地震仪器记录到的地震曲线, 在震源物理上目前只用到初动符号, 而且只是向上还是向下, 初动的波幅和周期及其他物理意义现在仍不甚明了。至于整个地震曲线, 即包含了震源全部的运动过程, 也包含了穿越复杂地质体和构造单位、接近地表后错纵复杂地貌和土层条件之后的各种信息, 这就使人们对记录

到的地震时程曲线的认识非常粗浅; 至于对地震波穿过非连续性介质(岩体)时的动力学响应, 了解仍然十分有限。尽管如此, 对这种深部裂缝带用强地震作用效应是可以给出较为合理解释的。

3.1 竖井核试验的断层响应与破坏

美国自 1957 年进行第一次封闭地下核试验以来, 全球已进行过 1 000 多次地下核试验, 每次试验都是一次人为地震现象。封闭式竖井地下核试验产生的破坏现象与天然地震有许多相似之处, 这为揭开深部裂缝带地震成因提供了一个窗口。

地下核爆炸导致的一个重要现象, 就是地质构造状态的改变和断层的活动, 主要表现为断层两盘的相对运动并产生张裂隙, 这种张裂隙沿断层走向一般延长达几十米至几百米, 宽在几十厘米至上百厘米, 可见深度浅者几十厘米, 深者几百厘米。断层上盘上升, 下盘下降, 上下盘陡坎高差一般为几十厘米, 甚至上百厘米。通常而言, 断层上盘比下盘岩体破坏要严重一些。在一次当量 10×10^4 t 级竖井试验时, 井口 $0^\circ/164$ m 处有一条走向 $85^\circ/SE/70^\circ$ 的断层, 爆炸后发现断层活动强烈, 上下盘断层面发生垂直错动, 在井口的 $30^\circ/200$ m 处上下盘高差达 2 m, 断层错动产生的张裂隙几十厘米不等, 还造成了严重的放射性泄露^[4-6]。

地下核爆炸揭示, 岩石中传播的强烈压缩波在自由面或不连续介面处产生反射拉伸波, 压缩波和拉伸波在地下一定深度处产生拉应力, 当这种拉应力达到或超过岩体的抗拉强度时, 使之产生拉张裂隙。核爆炸在距爆心一定距离处产生的环状、放射状张裂隙和近地表处的拉张裂隙, 说明地震是深部裂缝带形成的可能原因。

3.2 岩体的地震动力学行为

地震波传播过程中在断层面(带)附近的破坏情况资料有限, 但已有的震例应引起注意。1968 年美国 Borrego 山发生过一次 6.4 级地震, 在震中区 Coyote Creek 断裂带上产生长达 31 km 的地表破裂带。6.4 级地震竟能产生如此长距离的地表错动如果尚难理解的话, 那么在 70 km 以外的 Imperial 断层和 50 km 外的 San Andreas 断层上, 同步产生右旋位错 1 ~ 2.5 cm 的现象就更是科学上的一个难题。1976 年我国唐山地震也曾引起 120 km 以外的北京夏垫断裂产生错动。这些现象引起了普遍的疑惑。但有一点是客观存在的: 断裂带的存在兼有聚能和释能的双重作用, 即增震或减震的不同效果。

自然地震的地表行为表现为线状地裂缝带和喷砂涌水带,还有一些与构造无直接关系的面状地裂、塌陷或地表的隆起、沉降、山头开裂等现象。

当地震发生弹性应力波遇到断层后,一部分作为入射波在岩体中形成压应力,另一部分为反射波在反方向上形成拉应力。当这两种波以相反方向相互扫过时,且在距自由面一定距离处瞬间形成最大的拉应力,如果拉张的力量超过岩体的抗拉强度,岩体就会被拉开或被分离出来,如果波动的应力值远远大于岩体的抗拉强度,就会不断有裂片相继分裂开来,直至截断波所产生的应力变得很小为止。对于疏松胶结的岩体或颗粒状介质,在自由介面处不是剥离或层裂,而是物质的粉碎化(pulverization)。实验时在水泥杆的一端爆破,而另一端会产生剥落;在厚钢板面上爆炸,在钢板的背面会产生层裂。后者,在军事工程中已有应用,如装甲车的外壁若中弹,其内壁会产生大量飞出的裂片(称为痴片)而造成巨大的破坏和伤亡^[7-9]。

有关数学表述,可以采用应力波理论、弹性动力学或岩石动力学方面有关物理方程描述。这些方程中,基本的一维齐次波动方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2},$$

式中 c 为常数,其物理意义是波传播的相速度。上式的通解

$$u(x, t) = F(x - ct) + G(x + ct)。$$

设一维波动为一维压力波的方式 $p = -\sigma_x$, 在弹性半无限空间内沿 x 轴方向传播。如果 $x = a$ 处存在一垂直弹性半空间 $x < a$ 的自由面,且 $t = 0$ 时压力波到达 $x = 0$, $p = f(t)$, $f(t)$ 为已知函数。当 $t > 0$ 时, $f(t) \geq 0$, $t < 0$ 时, $f(t) \equiv 0$ 。现假定压力波的传播速度为 c , 则右行入射压力波

$$\sigma_x^{[L]}(x, t) = f(t - x/c)。$$

当 $t = a/c$ 时,入射压力波到达半空间的自由表面 $x = a$, 由于交界面的存在将产生反射波,并沿 x 轴负方向左行传播

$$\sigma_x^{[R]}(x, t) = g(t + x/c)。$$

由于自由面处应力为零,故 $x = a$ 处的边界条件为

$$\sigma_x(x, t) |_{x=a} = (\sigma_x^{[L]} + \sigma_x^{[R]}) |_{x=a} = 0。$$

对于 $t < a/c$ 即压力波尚未到达自由面,故方程 $g(t + x/c) \equiv 0$ 。当 $t > a/c$ 代入上式,得

$$-f(t - a/c) + g(t + a/c) = 0。$$

设 $s = t + a/c$, 则 $g(s) = f(s - 2a/c)$ 。所以,反射波可表示为

$$\begin{aligned} \sigma_x^{[R]} &= g(t + x/c) = f(t + x/c - 2a/c) \\ &= f(t - a/c + (x - a)/c)。 \end{aligned}$$

该方程表明,反射波与入射波具有相同的形状,但应力的符号在反射后相反,所以自由面上的压力脉冲经反射后变为拉力脉冲。这种现象如出现在抗拉强度较低的地方,特别是地质体中的断裂带所在部位,当波长足够短的压力脉冲在破裂面发生反射时,所产生的拉应力足以形成地下一定深度部位的裂缝带。

当已知岩体的抗拉强度、抗压强度、压缩脉冲波的幅值、弹性波速和岩体的密度,就可以求出拉张裂缝的数目、裂缝间的厚度和不同裂缝拉张时的初速度。对于花岗岩、大理岩、石灰岩,它的最初断裂速度等于 2.4~2.8 m/s。根据理论推导,质点运动的速度等于最小断裂速度的 0.5,由质点速度计算得到的岩体动态拉伸极限强度为

$$\sigma = \rho_0 cv,$$

式中 ρ_0 为岩样的密度, c 为岩样的波速, v 为质点运动速度。

4 结论

通过对黄河黑山峡大柳树坝址大规模岩体松动带和雅砻江锦屏普斯罗坝址深部裂缝带的分析,可以得出以下几点主要认识:

1) 两处的深部拉张裂缝,均已超出地表物理地质卸荷带的范畴,是一种与构造运动密切相关的地质现象。

2) 深部裂缝现象均位于已知的强震发生断层带上或附近,沿断裂带历史或近代均有强震发生的记录,所以与强震的地震动力作用有直接关系。

3) 地下核试验的调查结果和岩体动力学的理论解释,可以根据自由介面处地震波入射波和反射波产生的拉张应力超过岩体抗拉强度,说明先存断裂带附近深部裂缝带产生的主要地震根由。

参考文献

- [1] 彭建兵,毛彦龙,范文,等.区域稳定动力学研究—黄河黑山峡大型水电工程例析[M].北京:科学出版社,2001

(下转第 45 页)

Numerical Modeling of Water Waves Interaction With Soft Mud Beds: Based on an Empirical Rheology Model Featured by Hysteresis Loop

Qi Peng, Hou Yijun

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China*)

[Abstract] On the basis of the semi-empirical rheology model of soft mud under such oscillatory external forces as water waves, a vertical 2-D numerical model is developed for simulating the interaction between surface water waves and underlying soft mud beds. The rheology model used is featured by remarkable hysteresis loops in the relationships of shear strain versus shear stress and the rate of shear strain versus shear stress and strong nonlinearity. A logarithmic grid from the water-mud interface in the vertical direction is employed for numerical treatment, which increases the resolution of the flow in the neighborhood of both sides of the interface, thus contributes to reproducing the characteristics of wave boundary. Model verifications are given through comparisons between the calculated and the measured bed mud mass transport velocities as well as the rate of decay of surface wave heights.

[Key words] mud mass transport; wave attenuation; soft mud bed; rheological model

(上接第 18 页)

- | | |
|---|--|
| <p>[2] 向宏发, 徐锡伟, 魏顺民, 等. 丽江—小金河断裂第四纪以来的左旋逆推运动及其构造地质意义——陆内活动地块横向构造的屏蔽作用[J]. 地震地质, 2002, 24(2): 188 ~ 198</p> <p>[3] 张洪由, 李怀英. 1996 年 2 月 3 日云南丽江 7 级地震概况[J]. 国际地震动态, 1996, (4): 22 ~ 26</p> <p>[4] 郑学峰, 孟广魁. 竖井试验地表地震破坏效应[A]. 核爆破地震效应观测研究文集[C]. 1992</p> <p>[5] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 地下核爆炸现象学概论(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002</p> | <p>[6] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 地下核爆炸及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002</p> <p>[7] 吴 斌, 韩 强, 李 枕. 结构中的应力波[M]. 北京: 科学出版社, 2001</p> <p>[8] 于亚伦. 岩石动力学[M]. 北京: 北京科技大学, 1990</p> <p>[9] 马宏伟, 吴 斌. 弹性动力学及其数值方法[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000</p> |
|---|--|

Deep-seated Rupture Zone—a New Seismotectonic Style

Li Yuanjun

(*School of civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

[Abstract] In hydraulic engineering, deep-seated rupture zones have been discovered in some dam areas, such as Heishanxia of Huanghe River, Jinpingshan of Yalongjiang River and others. It is a new geological structure phenomenon. deep-seated rupture zones are usually situated in the pleistoseismic generating faults. Historic earthquakes frequently occur along the active structure zone. Deep seated rupture zones are 300 m or more beneath the surface, far exceeding the depth of surface unloading range. They are bound up with the dynamics effect of rock mass during earthquake happening. This paper discussed the seismologic reasons for the occurrence of deep seated rupture zones according to elastic wave kinetics.

[Key words] deep-seated rupture zone; pleistoseismic generating fault; unloading; rock dynamics