



Title	阪神・淡路大震災における水道構造物の被害と解析
Author(s)	眞柄, 泰基; 伊藤, 雅喜; 榎, 信昭
Description	第4回衛生工学シンポジウム (平成8年11月7日 (木) -8日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 6 調査 . 6-10
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 4, 268-273
Issue Date	1996-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7863
Type	departmental bulletin paper
File Information	4-6-10_p268-273.pdf



6-10

阪神・淡路大震災における水道構造物の被害と解析

眞柄泰基、伊藤雅喜（国立公衆衛生院 水道工学部）、榊信昭（国際水道コンサルタント）

1. 概要

ここでは、阪神・淡路大震災時に水道施設のうち浄水施設の被害をまとめるとともに、一部の解析を行ってその原因を考察し、水道施設の耐震性の向上に留意すべき点を検討した。

(1) 調査対象

調査対象とした浄水場は、震源域やそこに近い地域にある 18 カ所の浄水場（表 1）である。これらの浄水施設のうち、着水井からろ過池までの池構造物とその流入出渠の鉄筋コンクリート（RC）等の構造物、RC 構造物と管の取り合い部、水中機械および機器の水没について検討した。

(2) 地震動

浄水場の位置と地表面（神戸大学を除く）の観測最大水平加速度を図 1 に示す。

浄水場の位置での地震動の大きさは、他の位置での観測記録から内挿するなどしておおよその最大水平加速度を指定した（表 2）。

(3) 構造

調査対象とした RC 池構造物の地下・半地下式／地上式の別および基礎型式（直接基礎／杭基礎）、池構造物内に構造伸縮目地（以下目地）がある場合の最少目地間隔などを表 2 に示す。

(4) 被害

浄水施設に係わる地盤および浄水施設の RC 構造物、流入出管取り合い部、水中機械、水没機器の被害の概要を表 2 に示す。RC 構造物の被害は、漏水を生じた躯体のクラック・破損、目地の損傷である。これらの被害において特徴的な点はつぎのとおりである。

- ① 人工地盤（埋土、盛土）の変状が大きいところで規模の大きな被害が生じている。（猪名川、尼崎、上ヶ原、越水、奥山浄水場）
- ② RC 躯体に漏水が生じるクラック、破損が生じたのは猪名川浄水場（S38, 44）を除いて、昭和 17 年（尼崎浄水場）以前に建設されたものである。

表 1. 浄水場の施設能力および地形・地質

浄水場名	施設能力 m ³ /d	地形 ^{*)}	地質 ^{*)} 【表層地盤】	標高 m	浄水場内の断面	
阪神水道企業団	猪名川	675,000	沖積地	沖積層(礫・砂・粘土) 【一部埋土 10m】	10	
	尼崎	213,000	沖積地	沖積層(礫・砂・粘土) 【盛土 3.85m】	3.5	
神戸市	上ヶ原	125,700	段丘	大阪層群(非海成粘土・礫・火山灰) 【一部盛土 3~10m】	100	リニアメント(活断層の疑いのある地形的線形構造物)
	千河	108,000	谷底平野	沖積層(礫・砂・粘土) 【一部盛土 0~2.6m】	140	
	本山	8,000	扇状地	沖積層(礫・砂・粘土)	84	北側敷地境界に断層変位地形 ^{*)}
	住吉	5,500	扇状地	六甲花崗岩 【玉石混じり砂礫】	180	
	奥平野	60,000	段丘	大阪層群(非海成粘土・砂・礫・火山灰)	55	北側敷地境界に断層跡 ^{*)}
西宮市	鳴尾	21,800	沖積地	沖積層(礫・砂・粘土) 【一部埋土 1~2m】	3	
	武庫川	11,000	沖積地	砂州・砂堆・自然堤防 【一部埋土 1m】	11	
	中新田	6,400	沖積地	砂州・砂堆・自然堤防 【一部埋土 1m】	10	
	鯉池	39,900	沖積地	沖積層(礫・砂・粘土) 【一部埋土 1m】	12	
	越水	28,300	段丘	大阪層群上部垂層群の堆積層 【一部盛土・沖積層】	33~48	西宮断層(仮称) ^{*)}
	北山	4,200	丘陵	六甲花崗岩	195~205	
芦屋市	丸山	17,600	丘陵	吉川累層下部(砂岩・礫岩・泥岩および凝灰岩)	275	
	奥山	8,250	扇状地	六甲花崗岩 【一部盛土 0~6m】	150~160	芦屋断層 ^{*)}
	六観荘	800	扇状地(観音面)	六甲花崗岩	205	
北淡町	奥池	1,500	扇状地(観音面)	六甲花崗岩	473	
	室津	7,800	谷底平野	沖積層		

^{*)} 田中眞吾神戸大学名誉教授による

表. 2 浄水施設の構造および被害の概要

浄水場名	阪神水道企業団		神戸市					西宮市						芦屋市			北淡町	備考				
	猪名川	尼崎	上ヶ原	千苅	本山	住吉	奥平野	鳴尾	武庫川	中新田	鯨池	越水	北山	丸山	奥山	六龍荘	奥池		室津			
最大水平加速度 #1 (ガル)	550	650	500強	300強	500~600	500~600	500~600	650~700	650~700	650~700	650~700	600~750	500	350	500強	500強	500強	400~500				
構造	主なRC池構造物の平面サイズ m×m	F 144×52 (7) (S38, 44) F 144×94 (7) (S44)	K 72×12 (7) K 72×84 (4)	R2600 m ² ×8池 (扇形) F 30×40 (2) T 31×97 (2)	F 17×29 (2)	T 27×13 (4)	F 43×42 (2)	T 14×16 (1)	K 7×12 (1)	f 12×8 (1)	T 26×18 (2) (S38)	T 外径19m (S41)	F 9×16 (2) (S55)	F 25×61 (2)	R 69×28 (4)	R 10×20 (2)	F 6×17 (2)	F 10×23 (2)	単位m (含まれる池数) K:混和池 F:70ヶ形成池・沈澱池 f:70ヶ形成池 T:沈澱池 R:緩速ろ過池			
	建設時期 #2	J8 44 H5	17	T6 6 H4	42 51	28	10 36 57	56	50 57	52	51	37-46-39 49 52	T12 41	43 55	50	13	7	48		47	地下・半地下式 直接基礎 □ 杭基礎 ○ 地上式 直接基礎 ■ 杭基礎 ● R:RC杭 P:PC, PHC杭 S:鋼管杭 M:松杭 (最小目地間隔 m)	
	構造の形式	着水井	●R-●P	□	□ □	○R ○R	□	□	○s	□			□ □	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □		□ □		□ □
		混和池	●R●R○P (1.9)	□	□ □	□ □	□ □	□ □	○s	□	■	□	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □		□ □		□ □
		70ヶ形成池	●R●R○P 3.5 16.7	-	□ □	□ □ (不明)	□ □	□ □	○s	-	□		-	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □		□ □		□ □
沈澱池		●R●R○P ■(16.7) (3.9)	□ (不明)	□ □ (23.6)	□ □ (不明)	□ □	□ □	○s (20.5)	□ (15.1)		□ □	□ □	□ □	□ □ (31.6)	□ □ (10)	□ □	□ □	□ □	□ □			
ろ過池	□○R ○P	□○M	□ □ (2.7)	○R □ ○P	□ □	□ □	○s	□ □	■	□ □	□ □	□ □	□ □	□ □ (14)	□ □	□ □	□ □	□ □				
地盤沈下/盛土の滑り等 液状化	■ ■ #3 ■ ■	■	■ #3				□	□	□	□	□ □ □	■		■ #3								
被害	RC構造物	着水井		-																●基礎、躯体、目地に被害 ○基礎、目地に被害 ○躯体に被害 ▲躯体、目地に被害 △目地に被害		
		混和池		○	-										○	-						
		70ヶ形成池	◎ ◎	-	-																	
		沈澱池	◎ ◎	○	▲					△	-	-				▲	-					
		ろ過池	○	○	▲										○#4	▲	○					
流入出管	着水井	☆	☆																	☆被害があったもの		
	混和池																					
	70ヶ形成池	☆☆																				
	沈澱池	☆☆	☆										☆									
	ろ過池	☆☆	☆	☆☆									☆									
水中機械	☆☆☆	☆	- ☆	☆ ☆				☆				☆ ☆										
水没機器	☆	☆										☆☆										

#1 推定値 #2 無印:昭和, T:大正, H:平成 #3 基礎地盤が埋土(猪名川 S38, 44), 盛土(奥山), 盛土が沈澱池底版に接している(上ヶ原) #4 積ブロック構造

凡例: 地盤地下/盛土の滑り等; ■ 顕著なもの □ 液状化現象が認められるもの
 □ 地盤の変状が認められるもの □ 液状化現象が認められるもの
 ◇ 不完全な液状化の疑いのあるもの

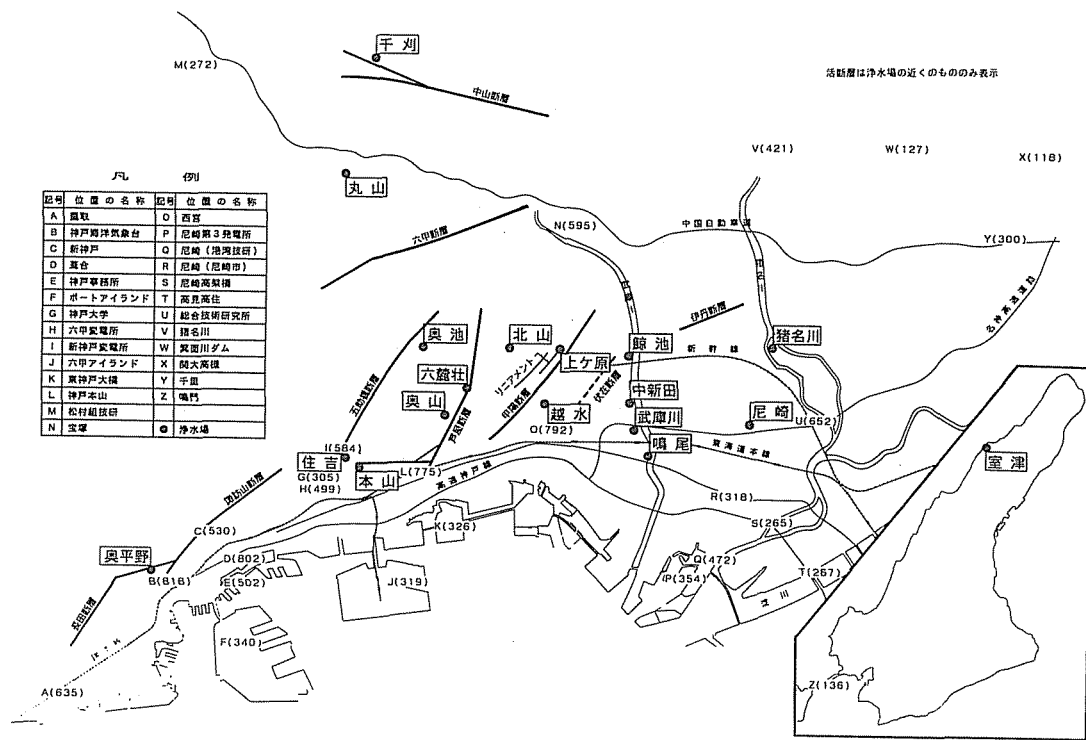


図1. 浄水場の位置および観測最大水平加速度 (ガル)

2. 解析

ここでは、対象浄水施設の池構造の規模が大きく、被害も比較的大きかった猪名川浄水場の埋立地盤の液状化とブロック形成池の杭基礎 (RC φ 300) の検討を行った。猪名川浄水場の着水井～沈澱池 (S38, 44) の埋立範囲、目地、目地の開き、底板下空隙高さなどを図2に示す。

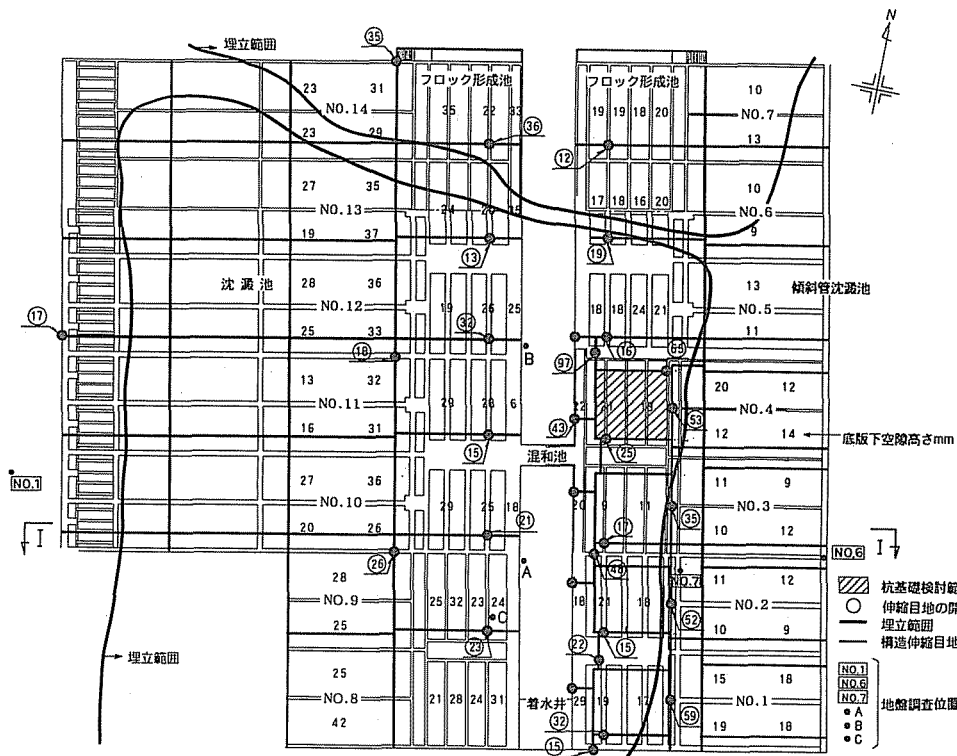


図2. 埋立範囲と伸縮目地の開き (猪名川浄水場)

(1) 液状化の判定

猪名川浄水場の埋立地盤（図2のA, Bの地点）の液状化の可能性を検討した。土質定数は現地の地盤調査による（表3）ものを用い、液状化の判定は道路橋示方書の方法¹⁾によった。地盤の動的せん断強度比はN値などにより、地震時せん断応力比は地盤の地震応答解析によりそれぞれ算定した。地震応答解析は重複反射理論による解析プログラムSHAKEを用いて行った。入力地震動は、総合技術研究所（図1）の深さ24.9mの東西方向成分の加速度波形²⁾（最大加速度239ガル）³⁾を、深さ9mの位置を基盤として、その位置に最大値を400ガルに引きのぼした波形（図3）を入力した。これは、猪名川浄水場から約3km離れたその波形の観測位置の地盤の地震応答解析では、深さ10mで約400ガルの応答となっているためである⁴⁾。

液状化の判定結果を表3に示す。同表には参考として、地表面での設計水平震度 $k_s=0.2$ （標準設計水平震度 $k_{s0}=0.15$ ）として求めた地震時せん断応力比を用いた場合も示している。埋立地盤では液状化に対する抵抗率 F_L が1.0以下となり、液状化したとの判定となった。

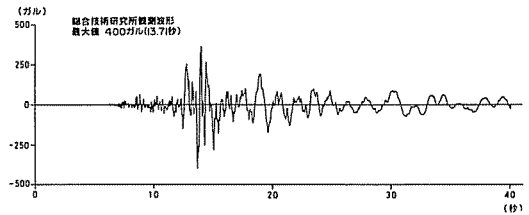


図3. 入力加速度波形
(猪名川浄水場液状化判定)

(2) 基礎杭の検討

地震時に損傷を受けた猪名川浄水場のRC杭の検討を行う。

1) 検討条件

対象とした杭基礎は、ブロック形成池（4号、S38）の一部の目地で区切られた範囲（14.5m×約16m、10×11=110本）（図2）のものである。断面図と作用荷重（水平震度0.4）を図4に示す。

杭の検討においては、底版は下方に突出した排泥溝があるが平坦とし、阻流壁の空隙は無視した。杭は外径300mmの遠心力鉄筋コンクリート杭（JIS A5310-1981）（1種：主として軸方向に対して設計され、水平荷重は考慮されていない）で壁厚は60mm、軸方向鉄筋の断面積は3.82cm²（φ9×6本）である。杭長は7m、地盤面からの突出長は20cmとした。

表3. 液状化の判定（猪名川浄水場）

地盤	深さ #1 m	土質	N値	湿潤単位体積重量 $\gamma_{1, t}$ t/m ³	平均粒径 D_{10} mm	細粒分含有率 FC %	最大加速度*2 α_{max} g/g	最大せん断応力度 τ_{max} t/m ²	液状化抵抗率	
									FL	FL
位 置 A	1	沙粒混じり礫	11	1.8	5.6	8	510	0.5	—	—
	2	沙粒混じり礫	4	1.8	8.1	5	510	1.4	—	—
	3	沙粒混じり礫	4	1.8	5.9	5	420	2.1	0.22	—
	4	沙粒混じり礫	6	1.8	3.3	7	350	2.4	0.29	—
	5	沙粒混じり礫	8	1.8	4.5	9	420	2.8	0.35	—
	6	沙粒混じり礫	10	1.8	4.5	9	450	3.1	0.40	—
	7	粘性土	3	1.8	0.071	51	460	3.4	0.69	—
	8	粘性土	12	1.8	0.011	86	430	3.9	—	—
	9	沙粒混じり礫	31	1.9	3.6	10	420	4.4	0.69	—
位 置 B	1	粘土質礫	12	1.8	1.6	32	380	0.4	—	—
	2	粘土質礫	5	1.8	3.9	18	380	1.1	—	—
	3	粘土質礫	3	1.8	3.4	26	370	1.7	0.23	—
	4	粘土質礫	4	1.8	0.59	35	280	2.1	0.25	—
	5	粘土質礫	30	1.8	0.59	35	280	2.5	0.85	—
	6	粘土質礫	9	1.8	0.28	38	280	2.8	0.56	—
	7	粘土質礫	9	1.8	3.8	9	290	3.2	0.39	—
	8	粘土質礫	3	1.8	4.3	38	300	3.5	0.17	—
	9	沙粒混じり礫	16	1.8	3.8	9	400	3.8	0.54	—

#1 各地層の下端

#2 各層の上端

全地層を埋土とみなす

液状化の範囲:

これは、検討範囲の底版下の空隙高さが13~22cm（平均20cm）となっていたためである。杭頭は捨コンなどと結合していたため底版に剛結されているものとした。水平地盤反力係数は、現地のボーリング調査データ（図2のC地点）から平均N値を5.7として求めた⁵⁾。

3. 耐震上留意すべき点

躯体のクラック・破損、目地の損傷の被害と建設年、地盤との関係をまとめて図5に示す。同図より、建設年および人工地盤の変状、断層が留意する点としてあげられる。今回の対象外の浄水場で昭和31年に建設された沈澱池の目地の損傷による漏水、ろ過池の圧力室のクラックによる漏水の被害⁸⁾が報告されており、昭和29年～54年に建設された構造物においても最新の設計法による構造強度の確認をすることが望ましいと思われる。構造、地盤の他、管と構造物の取り合い部、水中機械、機器の水没について留意すべき点と対策をするか否かの判断基準をまとめて表5に示す。

表5. 耐震上の留意点

項目	留意点・箇所	判断基準項目	対策
構造	建設時期 (構造強度)	[昭和28年以前] 最新の設計法による構造強度の確認	基礎、基礎地盤の補強 躯体強度の増加(底版, 側壁のRC増打ち)
		[昭和29～54年または構造が地上式で横抵抗が考慮されていない杭基礎をもつもの] 最新の設計法による構造強度杭の水平耐力の確認	目地の補強
地盤	液状化	最新の設計法による液状化の判定と躯体の安定	液状化対策 基礎の補強
	盛土(底版下/底版に接してあるもの)	盛土の安定 盛土の沈下	盛土地盤の補強(地盤改良など) 地滑り対策(抑止杭等)
	活断層	構造物の直下または極近傍に活断層があるか否か 最新の設計法により構造強度の確認	基礎補強 躯体強度の増加(底版, 側壁のRC増打ち)
管と構造物の取り合い部	盛土・埋土中	盛土の滑り, 沈下 埋土の液状化, 沈下	管体強度の増加 伸縮可撓管の採用
	架空部	管体の振動	管体強度の増加 伸縮可撓管の採用 管体の支持
	目地部		目地の変位に追随可能な構造
水中機械	フロキュレータ	構造の相対変位, 目地の位置	構造物対策
	汚泥掻き機	構造の相対変位, 目地の位置	構造物対策
	傾斜板/傾斜管	固定の有無, 状態	躯体への固定
水没機器	機械室	目地, 躯体からの漏水	構造物対策
	排泥弁室	目地, 躯体からの漏水	構造物対策
	管廊	目地, 躯体からの漏水	構造物対策 人孔蓋の固定

4. まとめ

兵庫県南部地震1地震と今回対象とした浄水場の限られた範囲であるが、浄水施設の被害と原因の考察により、浄水施設の耐震性向上のためのいくつかの必要条件を明らかにすることができた。それらは建設年(設計法)に代表される構造強度、基礎地盤、断層の有無など一般的に考えられるものであるが、今回の調査でも実証されたと思われる。

参考文献

- 1) 道路標示方書・同解説V耐震設計編、日本道路協会、平成2年2月
- 2) 関西地震観測研究協議会
- 3) M.Sugito, Characteristic of the Strong Ground Motion, Comprehensive Study of the Great Hanshin Earthquake, United Nations Centre for Regional Development (UNCRD) NAGOYA JAPAN, pp. 22~40, 1995.
- 4) 関口宏二、杉戸真太他、兵庫県南部地震における鉛直アレー強震記録に基づく地震動非線形増幅特性と地盤振動解析法の検討、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集(土木学会)、pp. 109~116, 1996. 1
- 5) 道路標示方書・同解説IV耐震設計編、日本道路協会、平成6年2月
- 6) 水道施設耐震工法指針、日本水道協会、1979.
- 7) 上前他、鉄筋コンクリートの新しい計算図表、昭和56年
- 8) 厚生省国立公衆衛生院委託研究、平成7年阪神・淡路大震災被害に関する技術評価報告書、(社)日本水道協会、pp. 8、平成7年3月