

下水道施設における地震・津波対策の 効果的な対策規模の基礎的検討

原田 賢治¹・嶋原 良典²・瀬尾 直樹³・小西 康彦⁴・山崎 宣良⁵・松本 貴久⁶・
砂坂 善雄⁷・小黒 明⁸・石野 好彦⁹・長谷川 浩市¹⁰・鈴木 一仁¹¹

¹正会員 静岡大学准教授 防災総合センター (〒422-8529 静岡市駿河区大谷836)
E-mail:okharad@ipc.shizuoka.ac.jp

²正会員 防衛大学校助教 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)
E-mail:shigi@nda.ac.jp

³正会員 株式会社フジヤマ 技術部防災室 (〒435-0013 浜松市東区天龍川町303-6)
E-mail:seo@con-fujiyam.com

⁴正会員 株式会社日水コン 下水道事業部東部計画・管路部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)
E-mail:konishi_y@nissuicon.co.jp

⁵非会員 静岡県交通基盤部都市局生活排水課 (〒420-8601 静岡市葵区追手町9番6号)
E-mail:nobuyoshi1_yamazaki@pref.shizuoka.lg.jp

⁶正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土保全事業本部 上下水道部 (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)
E-mail:takahisa.matsumoto@tk.pacific.co.jp

⁷正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都赤坂6-5-30)
E-mail:sunasaka@kajima.com

⁸正会員 株式会社日水コン 海外技術統括部 技術第二部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)
E-mail:oguro_a@nissuicon.co.jp

⁹非会員 伊豆の国市 都市整備部 (〒410-2292 伊豆の国市長岡340-1)
E-mail:yi501174@city.izunokuni.shizuoka.jp

¹⁰非会員 横須賀市 上下水道局経営部 経営計画課 (〒238-8550 横須賀市小川町11)
E-mail:koichi-hasegawa@city.yokosuka.kanagawa.jp

¹¹非会員 静岡市 上下水道局下水道部 下水道計画課 (〒424-8701 静岡市清水区旭町6番8号)
E-mail:suzuki_bdc@city.shizuoka.lg.jp

東日本大震災において沿岸都市域での下水道施設は、津波により壊滅的な被害を受け、復旧に長期の時間を必要とした。これまで、地震動や津波の最大値のみを対象として防災対策が議論・計画されてきたが、下水道施設において最大クラスの災害外力に対応するには時間と費用が多くなることが予想される。本論では、簡便な手法を用いて対策費用と残余リスクの観点から、下水道施設における効果的な対策規模の検討手法を提案する。検討対象として、静岡市清水区の下水処理施設を対象として具体的に算出を試みた。本論の手法によれば、効果的な対策規模を具体的に把握することができ、当面の対策目標を設定できる可能性を検討した。

Key Words: Sewerage facilities, residual risk, cost, countermeasure, earthquake, tsunami

1. はじめに

2011年3月に発生した巨大地震により東北地方を中心として、従来考えられていた地震動による被害、液状化による被害の他、未曾有の大津波による被害を構造物が受けると共に多くの人命が失われることになった。

沿岸域では都市化された市町村が多く点在すると共に、

それら市町村には具備すべき都市施設としての下水道施設が整備され、特に下水を処理する終末処理場は流域の末端の海に近い河口等に存在するため、地震動や液状化よりも津波による影響を直接的に受け、壊滅的な被害となった¹⁾。

また、同種の事業とも言える上水道の復旧が早期に行われたにも関わらず、津波被害を受けた下水処理場の復

旧には1年以上の時間を要したものと現在も本復旧工事を進めている処理場もある状態である^{2),3)}。このように復旧に時間がかかると予想される下水道施設に対して地震動や津波に対する対策を事前に措置することは重要と考えられる。

本論文では、近い将来にその発生が懸念されている東海地震や過去にも発生したことがある東南海地震によりその影響を受ける駿河湾・遠州灘地域の下水道施設を対象として、地震発生に対応する望ましい姿を明らかにしようとするものである。

駿河湾・遠州灘地域の下水道施設と地震を対象とした研究には、『静岡市中島浄化センターの東海地震・津波来襲時の被害予測について』（藤間ら、2007）⁴⁾がある。藤間らは、波源として内閣府・中央防災会議の想定による東海地震モデルを採用し、レーザープロファイラーによる詳細な地形データ(建物を含む)を用いて、津波浸水シミュレーションを行い、安倍川河口に位置する静岡市中島浄化センターに及ぼす影響を検討し、さらに想定を超える規模として初期水位を変化させた場合の施設の安全性の評価を行っている。藤間らは、従来、下水処理場が対象としてきた高潮水位ではなく、当時としては余り考慮されていなかった地震津波を対象とした先駆的な研究であると共に想定外の事象を取り上げ、評価を行っていることが特徴としてあげられる。藤間らでは当時の津波予測値に対しては処理場が安全であるが、初期水位を2倍とした場合には被害が生じることが報告されている。

次に東北地方太平洋沖地震以降の駿河湾・遠州灘地域に関する研究としては、『津波防災施設の最適規模と残余リスクを明示する手法の提案』（藤間・樋渡、2013）⁵⁾がある。この藤間・樋渡⁵⁾では、波源に近く観光が主たる産業である静岡県伊豆市土肥地区を対象として、地震の規模と津波による被害を地震の発生頻度から津波対策に対する残余リスクとして評価し、ある高さの防潮堤を整備した場合の後背地の被害軽減について、従来の対策の目安とされた費用対便益に対し、費用と残余リスクの和による評価手法の提案を行っている。さらに、津波防災施設の規模をめぐる合意促進のためのスキームとして、残余リスクの分析を活用可能としている。

従来の震災対策は、目標とする地震動の大きさや津波高さの最大値のみを対象として議論・計画されてきた。下水道施設は、この最大クラスの外力に対応する防災施設を構築していく必要があるが、それには時間と費用が多大となることが予想される⁶⁾。ここでは、震度、液状化分布、浸水深が得られれば、中小の下水道組織でも適用可能で簡便な手法を用い、対策費用と残余リスク(残余被害額)の観点から効果的な対策規模の検討方法を提案することを目的とする。

2. 検討手法

(1) 検討の方針(検討フロー)

本研究の検討フローを図-1に示す。本研究では、藤間・樋渡⁵⁾にならない地震規模の異なる条件における下水道施設に対する被害額、対策費および残余リスクを用いて分析を行う。すなわち、4段階の地震動規模に対して下水道施設(管渠、ポンプ場、処理場)が被るであろう地震動・液状化・津波による施設被害を想定し、各々の被害額(Ds)を算定し、対策工法を選定した上で対策費(C)を算定する。これらの結果より、無対策の場合の被害額(D_N)より被害軽減額(B)を算出し、また対策を施しても残余する被害額(D)を算出して(D+C)の最小化を指標とする分析により効果的な対策規模の検討を行う。

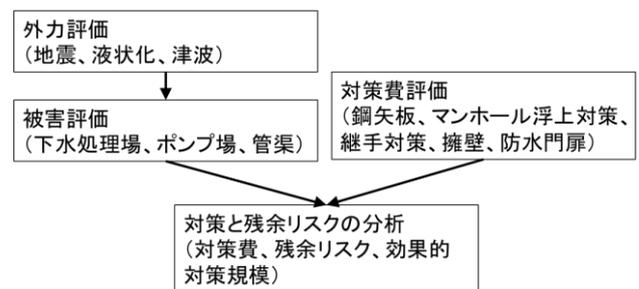


図-1 本研究の検討フロー

(2) 地震の発生頻度

本研究の対象地域は駿河湾・遠州灘である。この地域に最も大きな影響を及ぼすと思われる地震は東海地震であると考えられる。一方で、東海地震の発生頻度に関しては、藤間・樋渡⁵⁾が津波防施設の供用期間(約50年)に対する地震頻度の密度関数を提案していることから、本研究では藤間・樋渡の密度関数(標準設定、詳細は後述)を採用することにした。具体的には以下の式で表される。

$$p(M) = p_0 / 10^{b(M-M_0)} \quad (1)$$

ここで b はグーテンベルク・リヒター則の b 値であり、標準設定は $b = 1$, $p_0 = 1$, $M_0 = 8.0$ である。これは、マグニチュードが1増える場合に地震の頻度が1/10になることを意味している。また、 M_1 以上の地震の発生回数 N は以下の積分から求めることができる。

$$N = \int_{M_1}^{\infty} p(M) dM = \frac{P_0}{b \ln 10} 10^{-b(M_1-M_0)} \quad (2)$$

標準設定では、M8.0以上の地震の発生回数は、 $N = 0.43$ 回となり、地震調査研究推進本部の平均的な東海地震の再現期間と整合することが示されている。

表-1 処理場・ポンプ場の概要

区分	名称	分類	処理区	供用年	種別	日最大処理水量 (m ³ /日)
処理場	静清浄化センター	分流	静清	H9	汚水	83,750
	清水北部浄化センター	合流	北部	S56	汚水	15,100
					雨水	102,500
清水南部浄化センター	合流	南部	S47	汚水	45,600	
				雨水	171,200	

(3) 対象とする下水道施設

本研究の対象とする下水道施設は、静岡県中央に位置し、駿河湾沿岸部において地震・津波被害が想定される、静岡市清水区の処理場、ならびにそれに付随する各処理区のポンプ場及び管渠とする。各施設の位置を図-2に示す。

a) 下水処理場、ポンプ場

清水区においては、市の中心部(JR清水駅付近)から三保半島全域を処理区とする清水南部浄化センター、市街地の北部地区を処理区とする清水北部浄化センター、そして、清水区の東部・西部地区と旧静岡市の東部地区を処理区とし、流域下水道として整備された静清浄化センター(H25 静岡市へ移管)の三つの処理場が清水港に面し設置されている。また、海に面して広がる平坦な地形のため、いくつもの中継ポンプ場が設けられている。各施設の概要を表-1に示す。

b) 管渠

清水区に設置されている三つの浄化センターは、それぞれ静清処理区、北部処理区、南部処理区の各処理区の汚水を処理しており、各処理区に敷設された管渠延長は、表-2に示すとおりである。なお静岡市では、平成10年度以降に敷設した管渠については、可とう性継手の設置等の耐震対策を実施済みである。

区分	名称	分類	処理区	供用年	種別	計画流量 (m ³ /分)
ポンプ場	築地ポンプ場	合流	南部	S33	汚水	68
					雨水	700
	浜田ポンプ場	合流	南部	S52	汚水	43.8
					雨水	390
	清開ポンプ場	合流	南部	S48	汚水	140
					雨水	700
	愛染ポンプ場	合流	北部	S56	汚水	70
					S41	雨水
	宮加三ポンプ場	分流	南部	S62	汚水	64
	折戸ポンプ場	分流	南部	H10	汚水	14
折戸雨水ポンプ場	雨水	南部	S62	雨水	576	
三保ポンプ場	分流	南部	H22	汚水	7.02	
三保雨水ポンプ場	雨水	南部	S55	雨水	720.9	

表-2 下水道管渠延長

処理区	施工時期	管渠延長(m)	
		塩ビ管・陶管	その他の管
静清	H9年以前	132,793	61,512
	H10年以降	267,786	32,787
	小計	400,579	94,299
北部	H9年以前	51,956	31,751
	H10年以降	3,127	339
	小計	55,083	32,090
南部	H9年以前	182,580	86,386
	H10年以降	57,604	5,658
	小計	240,184	92,044
計	H9年以前	367,329	179,649
	H10年以降	328,517	38,784
	小計	695,846	218,433



図-2 清水区下水処理場・ポンプ場位置図

(4) 地震・液状化

a) 地震の評価手法

静岡県第3次地震被害想定(以下、「3次想定」と静岡県第4次地震被害想定(以下、「4次想定」)による地震の評価を踏襲することを基本とした。3次想定では、M8.0の東海地震を想定し、静岡県域を500mメッシュ単位で地震動(実効的な最大加速度、震度等)の算定を行っている。4次想定では、M9.0の地震を用いているが、駿河湾においてはM8.3の東海地震相当とし、静岡県域を250mメッシュ単位で地震動(地表面最大加速度、震度、SI値等)の算定を行っている。M7.4、M7.7の地震について

ては、3次想定 (M8.0) と4次想定 (M8.3) による地震の評価結果に基づいて推定した。

b) 地震動 (震度)

静岡市の震度分布は、M8.0, M8.3については3次想定と4次想定による地震の評価結果をそのまま用いる。

M7.4, M7.7の震度については、分布は3次想定の結果をそのまま使い、震度の値は3次想定 (M8.0) と4次想定 (M8.3) による地震の評価結果に基づき推定する。3次想定によれば、M8.0の東海地震における静岡市街地の震度は、500mメッシュ毎に6弱, 6強, 7と推定されている。これらの震度を有する代表的なメッシュ (例えば処理場のあるメッシュ) について、4次想定 (M8.3) で算定されている震度を参照して、M7.4, M7.7の地震について震度を推定した。推定結果を表-3に示す。

表-3 震度の推定結果

3次想定 の震度の 評価値	M7.4の時の 震度の推 定値	M7.7の時の 震度の推 定値
7	7	7
6強	5強	6弱
6弱	5弱	5強

c) 液状化

静岡市の液状化分布は、M8.0, M8.3については3次想定と4次想定による液状化の評価結果をそのまま用いる。

M7.4, M7.7の地表面加速度は、代表的なメッシュ (例えば処理場のあるメッシュ) について3次想定 (M8.0) と4次想定 (M8.3) による評価結果に基づき試算してみたところ、200Gal以上の大きな値となった。これは、想定されている東海地震の震源域が静岡市の直下であり、マグニチュードも7.4, 7.7と大きな値であることを考慮すると妥当であると考えられる。従って、M7.4, M7.7の液状化の可能性は、3次想定の場合と同様と仮定した。

(5) 津波

a) 津波の検討条件 (波源モデル)

津波計算を行うために設定した波源モデルは藤間・樋渡⁹⁾のものと同様とした。すなわち、静岡県内の3次被害想定で使用されたM8.0のモデルを基準として、スケーリング則を使用して断層の幅・長さ・すべり量を変化させる。断層モデルの位置関係を図-3に示す。ここでM8.3のケースは、M8.0のすべり量のみを大きくしていることに注意する。

b) 浸水分布, 各施設の浸水深

断層モデルから計算された地殻変動量を津波初期波源として、非線形長波理論に基づく津波浸水計算を行った。ここで最小の空間格子間隔は50mであり、陸上遡上も考慮している。計算結果として、図-4にM7.4とM8.3の場合での清水港周辺の浸水深分布を示す。この図から、地震

の規模が大きくなると浸水域が広がりかつ浸水深が大きくなる傾向であることが分かる。

上記の結果を基にして、地震の各ケースに対する施設毎の最大浸水深をまとめた。結果を表-4に示す。海岸線に近く、かつ地盤の低い位置にある浄化センターや雨水・汚水ポンプ場ではM7.4から浸水が始まり、M8.3では平均4.6m, 最大5.6m (清水北部浄化センター) であった。一方、合流式ポンプ場では全体的に小さく最大でも2.4m (築地ポンプ場) 程度であり、特に、清開ポンプ場ではM8.3であっても浸水しない。

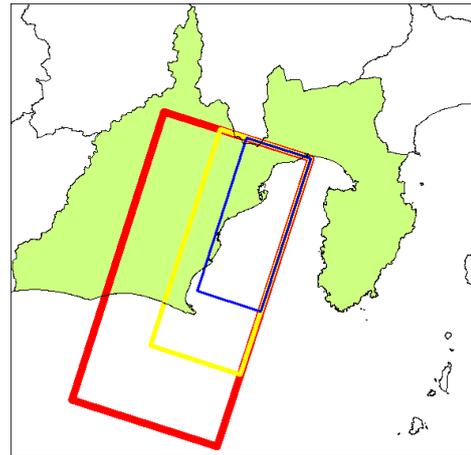


図-3 断層モデルの位置関係
(青: M7.4, 黄: M7.7, 赤: M8.0およびM8.3)

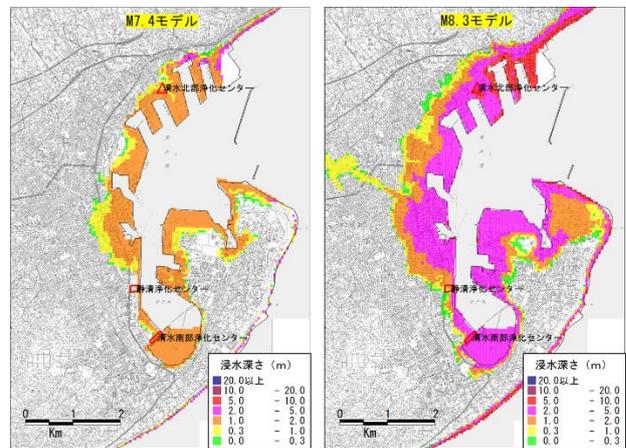


図-4 清水港周辺の浸水深分布 (M=7.4, M=8.3)

(6) 被害額の評価方法

a) 地震動・液状化による下水処理場・ポンプ場の被害額

① 地震規模別の側方流動・震度・液状化危険度の設定
対象施設の耐震性、側方流動の危険性及び地震規模 (マグニチュード) 別の震度、液状化危険度を静岡県想定等を参考に表-5のとおり設定した。

表-4 施設での最大浸水深

区分	施設名	想定浸水深 (m)			
		M7.4	M7.7	M8.0	M8.3
処理場	静清浄化	1.60	1.87	2.61	4.08
	清水北部	1.97	2.34	3.36	5.58
	清水南部	1.53	1.89	2.66	4.14
ポンプ場	築地(合流)	0.65	0.90	1.36	2.41
	浜田(合流)	0	0	0.18	1.16
	清開(合流)	0	0	0	0
	愛染(合流)	0	0	0	0.61
	宮加三(汚水)	0	0	0	0.64
	折戸(汚水)	1.58	1.92	2.63	4.18
	折戸(雨水)	1.58	1.92	2.63	4.18
	三保(汚水)	1.51	1.85	2.56	4.13
三保(雨水)	1.51	1.85	2.56	4.13	

表-5 処理場・ポンプ場の危険度の設定

区分	施設名	供用年次	耐震性	側方流動	地震動 (震度)				液状化危険度 (PL値)			
					M7.4	M7.7	M8.0	M8.3	M7.4	M7.7	M8.0	M8.3
					処理場	静清浄化	1997	○	○	7	7	7
	清水北部	1981	△	-	5強	6弱	6強	6強	>15	>15	>15	>15
	清水南部	1972	△	○	7	7	7	7	>15	>15	>15	>15
ポンプ場	築地(合流)	1958	△	-	7	7	7	7	>15	>15	>15	>15
	浜田(合流)	1977	△	-	7	7	7	7	>15	>15	>15	>15
	清開(合流)	1973	△	-	5強	6弱	6強	7	>15	>15	>15	>15
	愛染(合流)	1966	△	-	5強	6弱	6強	7	>15	>15	>15	>15
	宮加三(汚水)	1987	○	-	7	7	7	7	>15	>15	>15	>15
	折戸(汚水)	1987	○	-	5強	6弱	6強	7	5-15	5-15	5-15	5-15
	折戸(雨水)	1998	○	-	5強	6弱	6強	7	5-15	5-15	5-15	5-15
	三保(汚水)	1980	△	-	7	7	7	7	5-15	5-15	5-15	5-15
三保(雨水)	2010	◎	-	7	7	7	7	5-15	5-15	5-15	5-15	

耐震性の◎は、1997(H9)年度改訂の耐震設計基準に対応の施設
 ○は、1981(S56)年度改訂の耐震設計基準に対応の施設
 △は、1981(S56)年度以前の耐震設計基準の施設
 側方流動の○は、下水処理場において海岸から100m以内の施設

表-6 処理場被害率⁷⁾

項目	被害タイプ			
	1	2	3	4
被害率	0.378	0.019	0.006	0.001

表-7 ポンプ場被害率⁷⁾

項目	被害タイプ			
	1	2	3	4
被害率	-	0.044	0.016	0.001

② 側方流動・地震動・液状化による施設被害率の設定

それぞれの対象施設の施設被害率は、「大規模地震による下水道被害想定及び想定結果の活用方法に関するマニュアル⁷⁾」に示された図-5の被害タイプ分類フローに従い被害タイプを確認することにより設定される。

その被害タイプ別の処理場被害率を表-6、ポンプ場被害率を表-7に示す。また、対象施設の施設被害タイプ及び被害率の設定結果を表-8に示す。

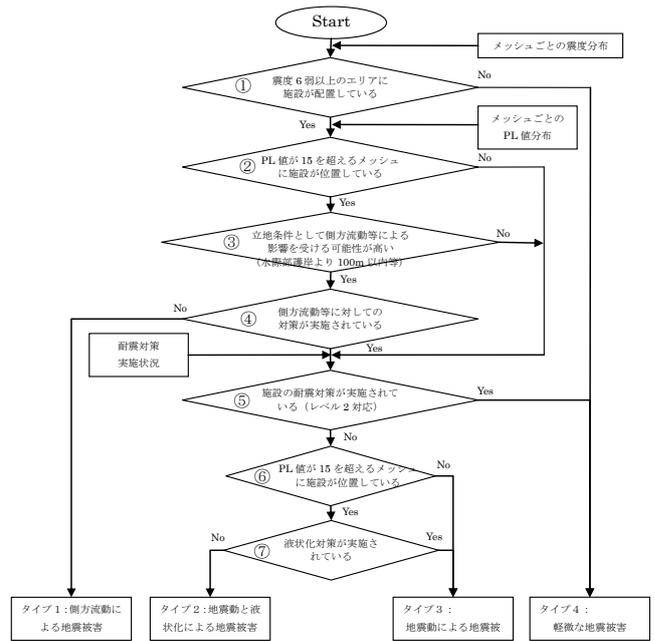


図-5 被害タイプ分類フロー⁷⁾

表-8 施設被害タイプ及び被害率の設定

区分	施設名	被害タイプ				被害率の設定値			
		M7.4	M7.7	M8.0	M8.3	M7.4	M7.7	M8.0	M8.3
処理場	静清浄化	1	1	1	1	0.378	0.378	0.378	0.378
	清水北部	4	2	2	2	0.001	0.019	0.019	0.019
	清水南部	1	1	1	1	0.378	0.378	0.378	0.378
ポンプ場	築地(合流)	2	2	2	2	0.044	0.044	0.044	0.044
	浜田(合流)	2	2	2	2	0.044	0.044	0.044	0.044
	清開(合流)	4	2	2	2	0.001	0.044	0.044	0.044
	愛染(合流)	4	2	2	2	0.001	0.044	0.044	0.044
	宮加三(汚水)	2	2	2	2	0.044	0.044	0.044	0.044
	折戸(汚水)	4	3	3	3	0.001	0.016	0.016	0.016
	折戸(雨水)	4	3	3	3	0.001	0.016	0.016	0.016
	三保(汚水)	4	4	4	4	0.001	0.001	0.001	0.001
三保(雨水)	3	3	3	3	0.016	0.016	0.016	0.016	

③ 対象施設の建設費

各対象施設の被害額は、施設復旧工事に要する費用とした。施設能力に応じた各施設の費用関数（流域別下水道整備総合計画調査指針と解説⁸⁾に基づき設定した施設建設費を表-9に示す。なお、雨水排水設備の建設費用については、費用関数が示されていないことから、表-9に示す様に建設費を設定した。

④ 対象施設の地震規模別の施設被害額

施設建設費に各施設の被害率を乗じて被害額（復旧費用）を算定する。この被害額が対策を行わない現状での被害額となる。各施設の建設費用、被害率からの被害額の算定結果を表-10に示す。

表-9 施設建設費の設定

施設名	方式	処理能力 (千m ³ /日)	建設費 (百万円)	算定根拠	
処理場	静清 浄化	標準活性 汚泥法	83.70	20,573	
	清水 北部	標準活性 汚泥法	15.10	7,617	
	清水 南部	標準活性 汚泥法	45.60	14,460	
				C=1150Q ^{0.85} ×(1033780) C:建設費(百万円) Q:日最大処理量 (千m ³ /日)	
施設名		処理能力 (m ³ /分)	建設費 (百万円)	算定根拠	
ポンプ場	築地 (合流)	汚水中継	68	1,424	
		雨水排水	700	3,500	
	浜田 (合流)	汚水中継	43.8	1,094	
		雨水排水	390	1,950	
	清開 (合流)	汚水中継	140	2,196	
		雨水排水	700	3,500	
	愛染 (合流)	汚水中継	70	1,449	
		雨水排水	956	4,780	
	宮加三 (汚水)	汚水中継	64	1,373	
	折戸 (汚水)	汚水中継	14	552	
	折戸 (雨水)	雨水排水	576	2,880	
	三保 (汚水)	汚水中継	7	365	
	三保 (雨水)	雨水排水	721	1,802	
					汚水中継設備は、 C=855Q ^{0.85} ×(1033780) C:建設費(百万円) Q:全体計画水量 時間最大(m ³ /分) 雨水排水設備は、 三保は15(億円/m ³ /秒) その他30(億円/m ³ /秒) で算定

表-10 施設被害額の設定

区分	施設名	建設費 (百万円)	被害率の設定値				被害額 (百万円)			
			M 7.4	M 7.7	M 8.0	M 8.3	M 7.4	M 7.7	M 8.0	M 8.3
処理場	静清 浄化	20573	0.378	0.378	0.378	0.378	7,777	7,777	7,777	7,777
	清水 北部	7617	0.001	0.019	0.019	0.019	8	145	145	145
	清水 南部	14460	0.378	0.378	0.378	0.378	5,466	5,466	5,466	5,466
ポンプ場	築地 (合流)	4924	0.044	0.044	0.044	0.044	217	217	217	217
	浜田 (合流)	3044	0.044	0.044	0.044	0.044	134	134	134	134
	清開 (合流)	5696	0.001	0.044	0.044	0.044	6	251	251	251
	愛染 (合流)	6229	0.001	0.044	0.044	0.044	6	274	274	274
	宮加三 (汚水)	1,373	0.044	0.044	0.044	0.044	60	60	60	60
	折戸 (汚水)	552	0.001	0.016	0.016	0.016	1	9	9	9
	折戸 (雨水)	2,880	0.001	0.016	0.016	0.016	3	46	46	46
	三保 (汚水)	365	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0
	三保 (雨水)	1,802	0.016	0.016	0.016	0.016	28	28	28	28
被害額の合計										

b) 地震動・液状化による管渠（マンホール浮上・継手被害）の被害額

静岡市では、平成10年以降に建設した管渠は耐震対策を実施している。したがって、平成9年以前に建設した管渠について地震動・液状化による被害を検討した。このうち、管渠を【塩ビ管・陶管】および【その他の管渠】に分類し、新潟県中越地震、兵庫県南部地震および日本海中部地震の実績から被害率を設定した⁷⁾。

【塩ビ管・陶管】

(非液状化地盤)・・・新潟県中越地震の実績

$$y = 0.00057 \times e^{(1.5828X)}$$

(液状化地盤)・・・兵庫県南部地震の実績

$$y = 0.00057 \times e^{(1.5828X)}$$

【その他の管渠】

(非液状化地盤)・・・兵庫県南部地震の実績

$$y = 0.00021 \times e^{(1.5828X)}$$

(液状化地盤)・・・日本海中部地震の実績

危険度A $y = 0.00033 \times e^{(1.5828X)}$

危険度B $y = 0.000244 \times e^{(1.5828X)}$

危険度C $y = 0.000223 \times e^{(1.5828X)}$

危険度D $y = 0.00021 \times e^{(1.5828X)}$

ここに、y ; 被害率 (%)

x ; 震度 (基準計測震度)

マンホールの浮上および継手被害の被害額の算定は、地震動M7.4, M7.7, M8.0およびM8.3について実施した。

① マンホール浮上の被害額

管渠の被害率から算定した被害延長をもとに、マンホールの浮上基数を算定した。通常マンホールの設置間隔が30~40mであることから設置間隔を35mと設定し、被害延長を35mで除して浮上基数を算定した。マンホール浮上の被害額は、管径Dにおいて、D ≤ 300を人孔組立1号、300 < D ≤ 600を人孔組立2号、600 < D ≤ 1000を人孔組立3号、1000 < D ≤ 2000を人孔組立4号、D < 2000を人孔組立5号とし、被害額を静岡市の実績による復旧額とした。なお、人孔深は、組立1号および組立2号については3m、組立3号、組立4号および組立5号については5mとした。被害額算定結果を表-11に示す。

なお、被害額の算定において、M8.0とM8.3とを比較した場合、M8.3の方が被害額が安価になっている。これは、M8.0では3次想定500m格子のデータを用いた結果、液状化危険度が異なっている箇所があったため、被害額がM8.3の方が小さいこととなった。以降の検討においては、M8.3の被害額はM8.0の被害額と同等とした。

表-11 マンホール浮上の被害額

	単位	塩ビ管・陶管	その他の管	合計
管路全延長	m	695,846	218,433	914,279
平成9年以前建設分の延長	m	367,329	179,649	546,978
被害延長	M7.4	m	20,406	9,439
	M7.7	m	29,118	11,140
	M8.0	m	48,339	14,884
	M8.3	m	59,033	13,096
マンホール浮上基数	M7.4	基	588	324
	M7.7	基	826	372
	M8.0	基	1,350	471
マンホール浮上被害額	M7.4	千円	300,360	206,680
	M7.7	千円	420,800	234,960
	M8.0	千円	684,880	292,540
	M8.3	千円	583,820	239,540

② 継手の被害額

継手の被害額の算定は、マンホール浮上の被害額の算定と同様に、マンホールの基数を算定し、マンホールに

接続する継手の本数をマンホール1基当たり2本として継手の本数を算定した。継手の被害額は、静岡市の実績による施工単価を被害額とした。被害額算定結果を表-12に示す。

なお、継手の被害額においても、マンホール浮上の被害額と同様の理由により、M8.3の方がM8.0よりも被害額が安価となったため、以降の検討においては、M8.3の被害額はM8.0の被害額と同等とした。

表-12 継手の被害額

		単位	塩ビ管・陶管	その他の管	合計
管路全延長		m	695,846	218,433	914,279
平成9年以前建設分の延長		m	367,329	179,649	546,978
被害延長	M7.4	m	20,406	9,439	29,845
	M7.7	m	29,118	11,140	40,258
	M8.0	m	48,339	14,884	63,223
	M8.3	m	59,033	13,096	72,129
マンホール浮上基数	M7.4	基	1,176	648	1,824
	M7.7	基	1,652	744	2,396
	M8.0	基	2,700	942	3,642
マンホール浮上被害額	M8.3	基	2,300	752	3,052
	M7.4	千円	549,456	509,704	1,059,160
	M7.7	千円	765,860	569,016	1,334,876
	M8.0	千円	1,238,908	690,292	1,929,200
	M8.3	千円	1,061,948	578,192	1,640,140

c) 津波による下水処理場・ポンプ場の被害額

津波被害は、津波波力、漂流物の衝突、浸水によるものが考えられる。ここでは、津波波力、漂流物の衝突については対象外とし、浸水被害について検討を行った。

① 地震規模別の津波浸水深の設定

地震規模(マグニチュード)別の津波シミュレーションにより、対象施設の浸水深が表-4のとおり想定された。

② 各施設の浸水範囲の設定

対象とする処理場、ポンプ場の施設断面図に地震規模(マグニチュード)別の浸水深を表記し、浸水する階高の把握を行った。図-6に折戸汚水ポンプ場の例を示す。全対象施設の浸水する階高の結果を表-13に示す。

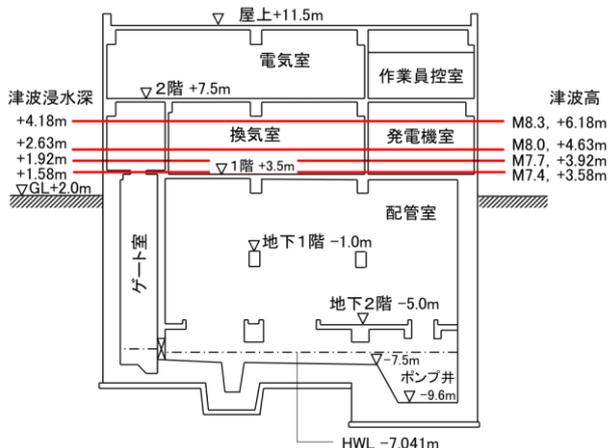


図-6 折戸汚水ポンプ場浸水範囲

表-13 地震規模別の津波浸水階高の設定

区分	施設名	想定浸水深 (m)			
		M7.4	M7.7	M8.0	M8.3
処理場	静清浄化	1F	1F	1F	1F
	清水北部	1F	1F	1F	2F
	清水南部	1F	1F	1F	2F
ポンプ場	築地(合流)	1F床	1F床	1F	1F
	浜田(合流)	—	—	1F床	1F
	清開(合流)	—	—	—	—
	愛染(合流)	—	—	—	1F床
	宮加三(汚水)	—	—	—	1F床
	折戸(汚水)	1F床	1F	1F	1F
	折戸(雨水)	1F	1F	1F	1F
	三保(汚水)	1F	1F	1F	1F
三保(雨水)	1F	1F	1F	1F	

- ① 津波浸水深がない場合「—」は、被害なし。
- ② 津波浸水深が1階床までの場合「1F床」。地下部の浸水被害あり。
- ③ 津波浸水深が1階までの場合「1F」。1階、地下部の浸水被害あり。

③ 地震規模別の津波浸水被害額の算定

浸水による施設被害額は、浸水する電気、機械設備の浸水に伴う被害を把握し、浸水機器の特性から点検調整、全交換に係る費用を計上することにより算定した。各設備の再建設費用は、静岡市が作成している設備台帳のデータを基に算定した。全施設の津波浸水被害の結果を表-14に示す。

下水道施設における浸水被害は、地下部分に主要機能が配置されているため、津波の高さによる被害額の変動は大きくない。

表-14 地震規模別津波浸水被害額の算定結果

区分	施設名	津波浸水被害額 (百万円)			
		M7.4	M7.7	M8.0	M8.3
処理場	静清浄化	10,240	10,240	10,240	10,240
	清水北部	1,899	1,899	1,899	2,518
	清水南部	2,166	2,166	2,166	3,009
ポンプ場	築地(合流)	1,480	1,480	1,765	1,765
	浜田(合流)	0	0	463	1,219
	清開(合流)	0	0	0	0
	愛染(合流)	0	0	0	89
	宮加三(汚水)	0	0	0	191
	折戸(汚水)	112	150	150	150
	折戸(雨水)	1,270	1,270	1,270	1,270
	三保(汚水)	37	37	37	37
三保(雨水)	818	818	818	818	
合計		18,022	18,060	18,808	21,306

(7) 対策費の評価方法

a) 地震動・液状化による下水処理場・ポンプ場対策費

地震動に対しては耐震補強を行うこととなる。人命確保の観点から地上建築部分の耐震補強が一般的に行われるが、下水処理機能の大部分が配置されている地下階部

分は、処理機能を停止して耐震化を実施することは難しい。また、地震動において下水道構造物の致命的な被害は少ない状況であり^{1), 8)}、液状化（側方流動）対策を対象に検討することとする。

そこで、地震動、液状化対策としては、地下水を遮断して被害を軽減する対策として鋼矢板打込み対策を行うものとした。鋼矢板は、剛性を必要としないためⅢ型を20mの深さまで打込むものとして、土木工事積算標準単価から概算費用を19千円/m²（表-15）と設定した。

表-15 対策費の算出単価設定

外力	対象	対策	対策単価
地震 液状化	下水処理場 ポンプ場	鋼矢板打込み対策	19千円/m ²
	管渠	マンホール浮上対策	700千円/基
継手対策		665千円/箇所	
津波	下水処理場	擁壁建設対策	150千円/m ²
	ポンプ場	防水門扉建設対策	50,000千円/基

b) 地震動・液状化による管渠（マンホール浮上，継手被害）の対策費

マンホール浮上および継手被害の対策費については、静岡市における実績を用いるものとした。しかしながら、地下水位の状況、土質条件等により対策費は大きく変動することが考えられることから、マンホール浮上および継手被害それぞれの対策工種における全実績の施工費を件数で除した平均的施工費にもとづいて対策費とした。

マンホール浮上と継手被害の対策費は、静岡市の実績を用い、それぞれ700千円/基、665千円/箇所（表-15）と設定した。

c) 津波による下水処理場・ポンプ場の対策費

津波浸水に対しては、各施設の構造を詳細に調査し、防水対策等を選定することとなる。本研究では、簡便な手法で検討するため施設敷地外周に擁壁を設置する浸水防衛対策を対策費とした。擁壁建設による対策費は、単位面積当たり150千円/m²（表-15）と設定し、各施設の外周距離と擁壁高さを用いて算出する。また、施設進入用の防水門扉（陸閘）を各施設で1カ所設置する事とし、1基あたり50,000千円/基（表-15）と設定した。

(8) リスク分析の手法

下水道施設の地震・津波による被害に対し有効な対策を選択する手法として、防災対策事業費を（C）、地震規模毎の被害に対する防災事業による減災額を効果

（B）とした、費用効果分析（B/C）がある。しかし、藤間・樋渡⁹⁾が指摘するように（B/C）の最大化を指標とした場合、小さな減災額（B）に対し対策費（C）がそれ以上に小さければ良いことになるなど社会的に負担すべきコストを議論する場合、かならずしも相応しい指標

ではないことから、防災対策事業費を（C）、対策を施しても残余する被害額を（D）として（D+C）の最小化を指標として効果的な対策事業を評価する。

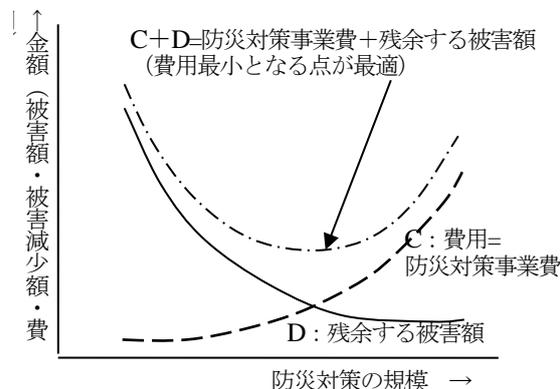


図-7 リスク分析概念図

各マグニチュード毎の地震・津波により現状で生じる被害（D_N（M））、マグニチュードMの地震の発生確率p（M）、対策（n）を行った時の対策費（C）、更に必要な対策費（D_S（M，n））とすると、残余リスクD（n）は、(3)式で表される。

$$\begin{aligned}
 D(n) &= \int [D_s(M, n) p(M)] dM \\
 &= \sum [D_s(M) \times p(M) \times DM] \quad (3) \\
 &= 0.3 \times \sum [D_s(M) \times p(M)]
 \end{aligned}$$

この残余リスクD（n）と対策費（C）の和が最小となる対策規模が対象対策にとって最も効率的な対策規模と見なす事ができる。

a) 被害と便益、残余する被害額

対策費の評価方法を用いて被害額を算出し（D_S）とする。また、各対策を実施しなかった場合の被害額を（D_N）とする。（D_N - D_S）が津波防災施設による被害軽減額となる。この被害軽減額を便益（B）として考える。また、施設が全て破壊された場合の被害額（≒施設新設費）を（D₀）とすると対策を施しても残余する被害額（D）は（D₀ - B）で表される。

なお、地震や津波による下水道施設の被害においては、物的被害による直接的な損失のほか、下水道施設を利用できないことによる水質環境の悪化やストレスによる健康被害などの間接的な被害も考慮すべきであるが、今回は、物的損害による被害額について着目する。

b) 費用

地震及び津波防災施設にかかる対策費（C）とする。対策費の評価方法により、地震規模毎に対策費（C）を算出し、便益（B）、残余する被害額（D）と併せ提示することにより、最適な対策を評価することができる。

なお、地震津波防災施設にかかる対策費としては、建設費の他に維持管理費や失われるものがある場合にはその保障費があるが、本論文では建設費について着目する。

3. 検討結果

(1) 被害額と対策費

a) 地震動・液状化の対策費と被害額の算定結果

地震動・液状化対策では、液状化と側方流動の対策について検討した。また、施設毎に地震規模（マグニチュード）別では、液状化の危険度に変化がないため、対策前の被害額と対策後の被害額の算定を行った。その効果を算定して費用対効果率と残余リスク、対策額の合計額を算定して評価を行う。

なお、処理場、ポンプ場の対象施設は機能的に独立していることから、施設毎に地震規模（マグニチュード）別の評価を行う。

① 鋼矢板打込みによる液状化（側方流動）対策費

対象施設の液状化について、図-7に示すように敷地外周に鋼矢板（根入長20m）を設置するものとした。



図-7 鋼矢板設置範囲イメージ

表-16 対策費（矢板設置費）の設定

施設名	外周延長 矢板延長 (m)	矢板設置 面積(m ²)	対策費 (千円)	備 考
処理場	静清浄化	840	319,200	
	清水北部	680	258,400	
	清水南部	790	300,200	
ポンプ場	築地(合流)	200	76,000	
	浜田(合流)	210	79,800	
	清洲(合流)	200	76,000	
	愛染(合流)	320	121,600	
	宮加三(汚水)	230	87,400	
	折戸(汚水)	280	106,400	
	三保(汚水)	260	98,800	

② 対策（鋼矢板打込み）前後の液状化被害額

鋼矢板打込みによる対策により、液状化と側方流動を抑制するとした場合に前記の図-5の被害タイプ分類フローに従って被害率の設定と再度被害額の算定を行った。

地震規模別に対策前と対策後の被害額の結果を表-17の
上段に対策前、下段に対策後の被害額の算定を示す。

③ 対象施設の残余リスク・対策費・費用対効果

対象施設の残余リスク、効果額、対策費及び費用対効果の結果は、表-18のとおりとなった。

液状化対策により静清浄化センター、清水南部浄化センターでは高い費用対効果が期待できた。その一方で、清水北部浄化センター、折戸ポンプ場、三保ポンプ場では対策の効果は認められない。

表-17 対策前後の被害額の算定

区分	施設名	建設費 (百万円)	被害率の設定値 (上段：対策前、下段：対策後)				被害額 (百万円)			
			M 7.4	M 7.7	M 8.0	M 8.3	M 7.4	M 7.7	M 8.0	M 8.3
処理場	静清 浄化	20,573	0.378 0.006	0.378 0.006	0.378 0.006	0.378 0.006	7,777 123	7,777 123	7,777 123	7,777 123
	清水 北部	7,617	0.001 0.001	0.019 0.001	0.019 0.001	0.019 0.001	8 8	145 8	145 8	145 8
	清水 南部	14,460	0.378 0.006	0.378 0.006	0.378 0.006	0.378 0.006	5,466 87	5,466 87	5,466 87	5,466 87
ポンプ場	築地 (合流)	4,924	0.044 0.016	0.044 0.016	0.044 0.016	0.044 0.016	217 79	217 79	217 79	217 79
	浜田 (合流)	3,044	0.044 0.016	0.044 0.016	0.044 0.016	0.044 0.016	134 49	134 49	134 49	134 49
	清洲 (合流)	5,696	0.001 0.001	0.044 0.016	0.044 0.016	0.044 0.016	6 6	251 91	251 91	251 91
	愛染 (合流)	6,229	0.001 0.001	0.044 0.016	0.044 0.016	0.044 0.016	6 6	274 100	274 100	274 100
	宮加三 (汚水)	1,373	0.044 0.016	0.044 0.016	0.044 0.016	0.044 0.016	60 22	60 22	60 22	60 22
	折戸 (汚水)	552	0.001 0.001	0.016 0.016	0.016 0.016	0.016 0.016	1 1	9 9	9 9	9 9
	折戸 (雨水)	2,880	0.001 0.001	0.016 0.016	0.016 0.016	0.016 0.016	3 3	46 46	46 46	46 46
	三保 (汚水)	365	0.001 0.001	0.001 0.001	0.001 0.001	0.001 0.001	0 0	0 0	0 0	0 0
	三保 (雨水)	1,802	0.016 0.016	0.016 0.016	0.016 0.016	0.016 0.016	29 29	29 29	29 29	29 29
	被害額の合計(上段：対策前、下段：対策後)						13,707 413	14,408 643	14,408 643	14,408 643

表-18 対象施設の残余リスク等の算定

施設名	対策前 残余リスク (百万円)	対策後 残余リスク (百万円)	効果額 (百万円)	対策費 (百万円)	費用対 効果	
処理場	静清浄化	18,030	290	17,740	319	55.6
	清水北部	170	10	160	258	0.6
	清水南部	12,670	200	12,470	300	41.5
ポンプ場	築地(合流)	500	180	320	76	4.2
	浜田(合流)	310	110	200	80	2.5
	清洲(合流)	300	110	190	76	2.5
	愛染(合流)	310	120	190	122	1.6
	宮加三(汚水)	140	50	90	87	1.0
	折戸(汚水)	60	60	0	106	0
	三保(汚水)	60	60	0	99	0

b) 津波浸水の対策費と被害額の算定結果

津波浸水対策では、処理場、ポンプ場の対象施設が機能的に独立していることから、施設毎に地震規模（マグニチュード）別の津波浸水深に対応した対策費を算定し、その場合の被害額を算定する。

① 擁壁・防水門扉建設による対策費

対象施設の浸水について、図-7と同様に、敷地外周に

擁壁を，出入用の防水門扉（陸閘）を設置するものとした（図-8，9）．各施設の想定浸水に0.5mの余裕を持たせた擁壁を設置するものとした費用を表-19に示す．

表-19 対策費（擁壁＋門扉設置）の設定

施設名	擁壁延長 (m)	地震規模	浸水深 m	擁壁高 m	擁壁規模 m ²	浸水対策費 (防水門扉含) 百万円	
処理場	静 清 浄 化	840	M7.4	160	210	1,764	314.6
			M7.7	187	240	2,016	352.4
			M8.0	261	310	2,604	440.6
			M8.3	408	460	3,864	629.6
	清 水 北 部	680	M7.4	197	250	1,700	305.0
			M7.7	234	280	1,904	335.6
			M8.0	336	390	2,652	447.8
			M8.3	558	610	4,148	672.2
	清 水 南 部	790	M7.4	153	200	1,580	237.0
			M7.7	189	240	1,896	284.4
			M8.0	266	320	2,528	379.2
			M8.3	414	460	3,634	545.1
ポンプ場	築地(合流)	200	M7.4	0.65	1.20	240	86.0
			M7.7	0.90	1.40	280	92.0
			M8.0	1.36	1.90	380	107.0
			M8.3	2.41	2.90	580	137.0
	浜田(合流)	210	M7.4	0.00	0.00	0	0.0
			M7.7	0.00	0.00	0	0.0
			M8.0	0.18	0.70	147	72.1
			M8.3	1.16	1.70	357	108.6
	清開(合流)	200	M7.4	0.00	0.00	0	0.0
			M7.7	0.00	0.00	0	0.0
			M8.0	0.00	0.00	0	0.0
			M8.3	0.00	0.00	0	0.0
愛染(合流)	320	M7.4	0.00	0.00	0	0.0	
		M7.7	0.00	0.00	0	0.0	
		M8.0	0.00	0.00	0	0.0	
		M8.3	0.61	1.10	352	102.8	
宮加三(汚)	230	M7.4	0.00	0.00	0	0.0	
		M7.7	0.00	0.00	0	0.0	
		M8.0	0.00	0.00	0	0.0	
		M8.3	0.64	1.10	253	88.0	
折戸(汚雨)	280	M7.4	158	210	588	138.2	
		M7.7	192	240	672	150.8	
		M8.0	263	310	868	180.2	
		M8.3	418	470	1,316	247.4	
三保(汚雨)	260	M7.4	151	200	520	128.0	
		M7.7	185	240	624	143.6	
		M8.0	256	310	806	170.9	
		M8.3	413	460	1,196	229.4	



図-8 施設出入用の防水門扉（陸閘）

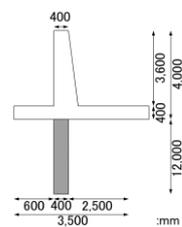


図-9 擁壁構造例

表-20 対象施設の残余リスク等の算定

施設名	対策	残余対 Ds (百万円)	対策費 C(百万円)	効果額 E(百万円)	費用 対効果 B/C	残余対 +対策費 (百万円)	
処理場	静 清 浄 化	対策無	23,740	0	—	—	—
		M7.4	11,510	315	12,230	38.9	11,825
		M7.7	5,380	352	18,360	52.1	5,732
		M8.0	2,310	441	21,430	48.6	2,751
	清 水 北 部	対策無	4,550	0	—	—	—
		M7.4	2,280	305	2,270	7.4	2,585
		M7.7	1,140	336	3,410	10.2	1,476
		M8.0	570	448	3,980	8.9	1,018
	清 水 南 部	対策無	5,220	0	—	—	—
		M7.4	2,630	287	2,590	9.0	2,917
		M7.7	1,330	334	3,890	11.6	1,664
		M8.0	680	429	4,540	10.6	1,109
ポンプ場	築地(合流)	対策無	3,590	0	—	—	—
		M7.4	1,820	86.0	1,770	20.6	1,906
		M7.7	930	92.0	2,660	28.9	1,022
		M8.0	400	107.0	3,190	29.8	507
	浜田(合流)	対策無	410	0	—	—	—
		M7.4	410	0.0	—	—	—
		M7.7	410	0.0	—	—	—
		M8.0	270	72.1	140	1.9	342
	愛染(合流)	対策無	20	0	—	—	—
		M7.4	20	0.0	—	—	—
		M7.7	20	0.0	—	—	—
		M8.0	20	0.0	—	—	—
宮加三(汚)	対策無	40	0	—	—	—	
	M7.4	40	0.0	—	—	—	
	M7.7	40	0.0	—	—	—	
	M8.0	40	0.0	—	—	—	
折戸(汚雨)	対策無	3,150	0	—	—	—	
	M7.4	1,600	138.2	1,550	11.2	1,738	
	M7.7	750	150.8	2,400	15.9	901	
	M8.0	320	180.2	2,830	15.7	500	
三保(汚雨)	対策無	3,150	0	—	—	—	
	M7.4	1,600	128.0	1,550	12.1	1,728	
	M7.7	750	143.6	2,400	16.7	894	
	M8.0	320	170.9	2,830	16.6	491	

② 施設の残余リスク・対策費・費用対効果

対象施設の残余リスク，効果額，対策費及び費用対効果の結果は，表-20のとおりとなった。浸水対策については，すべての施設で最大規模の津波に対応するものが最も効果的となると判定された。これは，下水処理施設では地下部分に主要な設備が配置されていることによる。

(2) リスク分析

a) 下水処理場・ポンプ場における被害額期待値と対策費

地震・液状化被害について，下水処理場（3カ所）とポンプ場（6カ所）に対する鋼矢板の打込み深さと対策費，残余リスクおよびその和の関係を図-10，11に示す。各施設の敷地における深度別FL値をもとに，液状化（FL値<1）への効果が発揮される矢板深さを考慮して，残余リスクを算出した。

下水処理場では，被害額が対策費よりもかなり大きく，対策により軽減される残余リスクが大きく，20m以上の矢板深さの対策規模で大幅な残余リスクの低減がみられ，矢板深さが20mでD(H)+Cが最小となった。ポンプ場でも同様に，矢板深さが20mでD(H)+Cが最小となった。

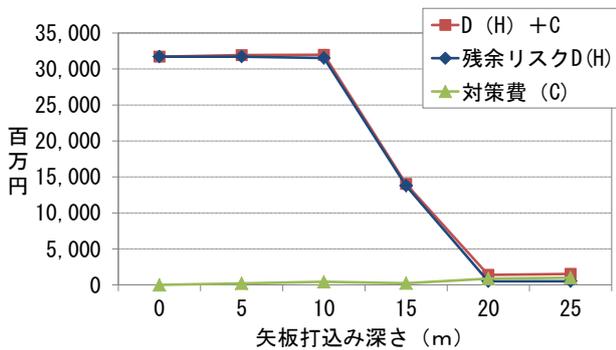


図-10 下水処理場における鋼矢板の検討結果

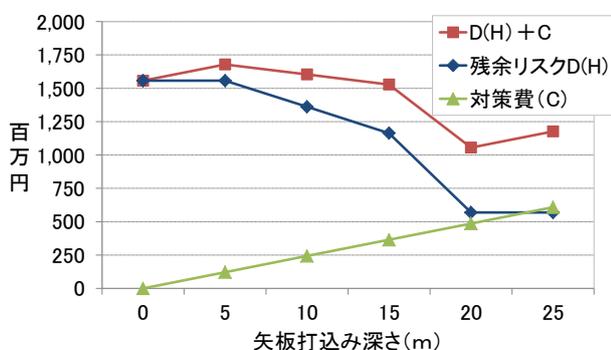


図-11 ポンプ場における鋼矢板の検討結果

津波被害について，3カ所の下水処理場の周囲を一律に擁壁で囲う対策を行う場合の擁壁高（H）と残余リス

クと対策費の和（D(H)+C）との関係を図-12に示す。H=6mの時，D(H)+Cが最小となるが，H=3m以上では残余リスクの低減効果は小さい。

実際には，最大クラスの津波高は静清浄化センターの4.08mから清水北部浄化センターの5.58mと各処理場において異なるが，当面の整備目標としては，D+Cが最小ではないが残余リスクの低減効果が大きい最小の擁壁高としてH=3mをすることが考えられる。この場合，各処理場の処理水量や供用後の経過年数等を勘案して優先順位を設定する必要がある。なお，現実的には施設耐用年数等を勘案して，改築更新時に対応を図る⁶⁾ことが考えられる。

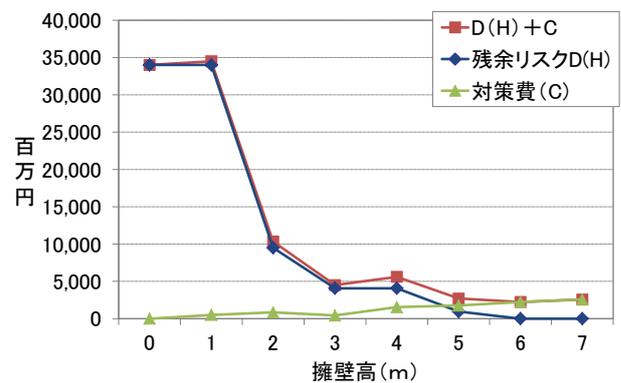


図-12 下水処理場（3箇所）における擁壁の検討結果

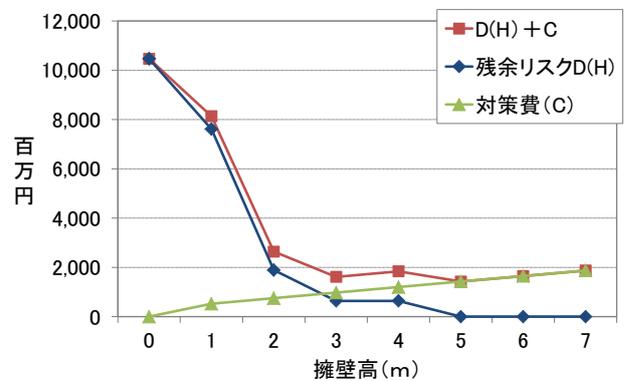


図-13 ポンプ場（6箇所）における擁壁の検討結果

次に，下水処理場と同様に各ポンプ場（6カ所）の周囲を一律に擁壁で囲う対策を行うものとした場合の擁壁高（H）と残余リスクと対策費の和（D(H)+C）との関係を図-13に示す。H=5mの時，D(H)+Cが最小となるが，H=2m以上では残余リスクの低減効果は小さい。

実際には，最大クラスの津波高は愛染ポンプ場の0.61mから折戸ポンプ場の4.18mと各ポンプ場によって異なるが，当面の整備目標としては，D+Cが最小ではないが残余リスクの低減効果が大きい最小の擁壁高としてH=2mをすることが考えられる。この場合，各ポンプ場の個別の津波高や送水量，供用後の経過年数等を勘案して

優先順位を設定する必要がある。なお、現実的には施設耐用年数等を勘案して、改築更新時に対応を図る⁶⁾ことが考えられる。

b) 管渠（マンホール浮上、継手被害）における被害額期待値と対策費

表-11において検討した地震・液状化によるマンホール浮上に対し、浮上防止対策を行うものとした場合の対策基数（ n ）と残余リスクと対策費の和（ $D(n)+C$ ）との関係を図-14に示す。対策箇所数 $n=1,000$ 基の時、 $D(n)+C$ が最小となる。

最大クラスの地震による被害箇所は、1,898箇所と想定されていることから、当面の整備目標はその半分程度とし、管渠の改築更新計画に合わせ速やかに進めていく必要がある。

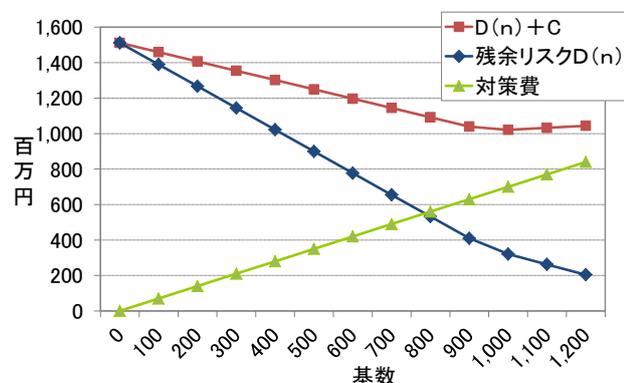


図-14 マンホール浮上対策の検討結果

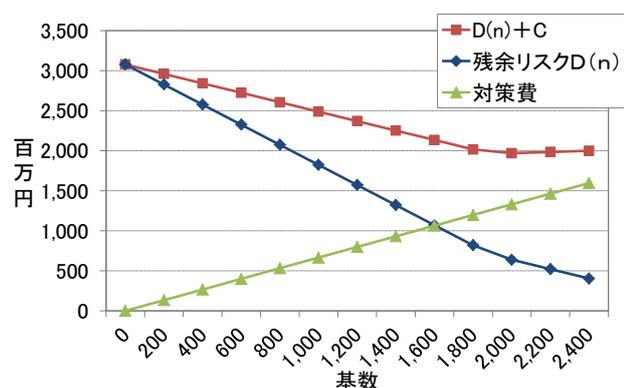


図-15 可とう性継手の検討結果

表-12において検討した地震・液状化によるマンホール継手被害に対し、可とう化対策を行うものとした場合の対策箇所数（ n ）と残余リスクと対策費の和（ $D(n)+C$ ）との関係を図-15に示す。対策箇所数 $n=2,000$ 箇所の時、 $D(n)+C$ が最小となる。

最大クラスの地震による被害箇所は、3,796箇所と想定されていることから、当面の整備目標はその半分程度とし、管渠の改築更新計画に合わせ速やかに進めていく

必要がある。

4. おわりに

本研究では、異なる地震規模における地震・液状化・津波による下水処理施設（処理場、ポンプ場、管渠）の被害および対策費を概算し、さらに地震の規模と発生確率を考慮して算出した残余リスクと対策費の和から効果的な対策規模の検討を行った。下水処理場、ポンプ場の鋼矢板による液状化対策に対しては、20m程度の打込み深さによる検討結果で残余リスクが低減される結果となった。また、擁壁建設による津波浸水対策に対しては、2m以上の擁壁を建設しても残余リスクの低減効果は小さくなり、対策費と残余リスクの和の最小値は5~6mで最小となった。マンホール浮上、継手対策に対しては、最大クラスの地震による被害箇所の半数程度の対策基数が対策費と残余リスクの最小値となった。今回の検討の様に、対策費と残余リスクの和から効果的な対策規模を概算することで、効果的な対策規模の目標値を設定する事ができると考えられる。

なお、今回の検討では、地震・液状化・津波による直接的な施設被害、施設建設費にもとづいた対策費について簡便な評価手法を用いて検討しているが、実情に合わせた具体的な評価値を用いて検討することが望ましい。ただし、前提条件として用いた地震や津波の外力評価の精度に対する注意も必要である。

また、今回の検討では、各対策における効果的な規模のみについて検討している。下水処理施設の面的な配置や処理システムとしての各施設の重要度などを考慮した優先順位をつけた対策の検討が合わせて必要と考えられる。実際の対策実施においては、施設更新時に地震・津波対策を考慮した施設整備が検討されているものがあり、現実的な対策として考えられている。

今回の検討には含まなかったが、施設の維持管理や損失への保証費用、下水道の機能が停止する事による水質環境の悪化などによる健康被害などの項目については下水処理施設の対策の検討における重要事項であり今後の検討課題である。さらには、今後の人口動態や下水処理施設に対する社会的要請の変化などにより、必要な対策規模は変動すると考えられるため、適宜対策規模を見直す必要があると考えられる。

謝辞

本論文における検討にあたり、静岡県、静岡市から貴重なデータを提供いただいた。ここに記して謝意を表す。本論文は、土木学会地震工学委員会水循環ネットワーク施設災害軽減対策研究小委員会WG5（駿河湾・遠州

灘地域における望ましい対応について) によって作成されたものである。WGの主査を務めていただいていた藤間功司教授(防衛大学校)が平成26年(2014年)5月2日に永眠された。本論文の残余リスクに関する考え方は藤間教授によるものであり、本論文の作成にあたり多くのご指導を頂いた。ここに記して感謝するとともに、ご冥福を心よりお祈りする。

参考文献

- 1) 下水道地震・津波対策技術検討委員会：下水道地震・津波対策技術検討会報告書，東日本大震災における下水道施設被害の総括と耐震・耐津波対策の現状を踏まえた今後のあり方，2012.
- 2) 宮城県土木部下水道課：甕れ みやぎの下水道1・2，東日本大震災からの復旧の記録 平成 24 年度改訂版，2013.
- 3) 仙台市建設局：仙台市下水道震災復興推進計画（平成 24 年度～平成 27 年度），2012.
- 4) 藤間功司，佐藤紘志，嶋原良典，竹内幹雄，千葉智晴，飯田勉，砂坂善雄，高梨和光：静岡市中島浄化センターの東海地震・津波来襲時の被害予測について，土木学会地震工学論文集，第 29 巻，pp.881-889，2007.
- 5) 藤間功司，樋渡康子：津波防災施設の最適規模と残余リスクを明示する手法の提案，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.69，No.4(地震工学論文集 32 巻)，L_345-L_357，2013.
- 6) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，2014.
- 7) 日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，2008.
- 8) 大規模地震による下水道被害想定検討委員会：大規模地震による被害想定及び想定結果の活用方法に関するマニュアル，59 p，2006.
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部下水道事業課（監修）：下水道事業の手引，日本水道新聞社，2013.

A PRERIMINARY INVESTIGATION ON THE EFFECTIVE SCALE OF COUNTERMEASURES FOR SEWERAGE FACILITIES AGAINST EARTHQUAKE AND TSUNAMI DISASTERS

Kenji HARADA, Yoshinori SHIGIHARA, Naoki SEO, Yasuhiko KONISHI, Nobuyoshi YAMAZAKI, Takahisa MATSUMOTO, Yoshio SUNASAKA, Akira OGURO, Yoshihiko ISHINO, Koichi HASEGAWA and Kazuhito SUZUKI

By tsunami of great east japan earthquake, the sewerage facilities were destroyed severely at the coastal areas of Tohoku region. And long time was required for recovery. Until the great east japan earthquake, the disaster prevention measures have been discussed and planned only for the maximum value of the earthquake and tsunami. In sewerage facilities, it takes a huge cost and long time to disaster prevention measures to prepare for the largest disasters. In this study, we examined the scale of the measures based on the residual risk and cost. Using the method of this paper, it is possible to understand quantitatively the effective scale of countermeasure.