

下水道の地震対策技術検討 に関する調査研究

1. はじめに

下水道は重要なライフラインの1つであり、都市の下水を常に適切に排除、処理する役目を負っている。大地震等により下水道がその機能を果たすことができなくなった場合には、各家庭のトイレが使用できないなど住民の生活に与える影響は非常に大きく、このような事態を回避するために、下水道施設機能の信頼性を高めることが強く求められている。

下水道における地震対策は、阪神・淡路大震災の教訓を踏まえ、2段階の設計対象地震動を設定するなど技術的考え方を整理するとともに、対策の強化に努めてきた。

このような中、新潟県中越地震は、阪神・淡路大震災以来ともいえる大規模な被害を下水道施設にもたらした。特に、地盤液状化によると思われるマンホールの隆起・沈下が1,400カ所以上発生するなど、管きよ施設が大きな被害を受けていることが明らかとなった。

本調査研究では、今回の地震による下水道施設の被害状況をとりまとめ、適切な本復旧を行うため必要な検討を行うとともに、下水道施設の耐震対策のあり方について検討したものである。

2. 地震の概況

新潟県中越地震は、平成16年10月23日17時56分頃に発生した。この時の震源の深さは約13km、マグニチュー

ードは6.8、震度は最大を記録した中越地方の川口町等でⅦ（激震）である。今回の地震は、震源深さの浅いことが兵庫県南部地震と類似しているが、その地震動は「下水道施設の耐震対策指針と解説（日本下水道協会1997年版）」（以下「1997年指針」という）が対象としている大規模地震（レベル2地震動）と比べ、最大加速度が1,700galを超える遥かに大きなものであった。また、震度5弱以上の余震がかなりの期間にわたり繰り返し発生していることや、余震においても震源の深さが10km内外とかなり浅いことも特徴となっている。

3. 被害の特徴と要因

3.1 管路施設

3.3.1 被害の特徴

新潟県下水道災害支援対策本部の一次調査結果（以下「一次調査結果」という）によると、管路の被害は表-1に示すような特徴を有している。1997年指針が言う「主要な幹線等」にあたる流域下水道管路では、管とマンホールの破損、マンホールの突出および道路崩壊による管きよの破断等の被害が発生した。管きよでは路面異常（130カ所）、マンホールでは躯体破損（250カ所）がほとんどであった。

一方、「その他の管路」では、路面異常（5,778カ所）とマンホールの突出が被害総数の5割近くを占めている。特に震源に近い長岡市、小千谷市で多数発生し、本管破損、閉塞により流下機能に大きな支障が発生し

た。

また、表-2は災害査定を受けた自治体と震度の関係を示したものであり、震度5弱より下水道被害が発

生しており、特に震度5強以上では被害のあった地区が増加している。

表-1 自治体別下水道被害一次調査結果

管理者	①流域下水道		②公共下水道																									①②合計							
	新潟県	計	新潟県	計	長岡市	柏崎市	小千谷市	栃尾市	見附市	越路町	三島町	与板町	和島村	出雲崎町	小国町	十日町市	川口町	川西町	堀之内町	守門村	小出町	弥彦村	津南町	中之島町	西山町	加茂市	分水町	下田村	六日町	浦川原村	松代町	計	新潟県計		
管路延長 (km)	61.3	125.8	421.5	182.8	135.1	195.0	83.7	58.7	56.0	37.7	39.6	61.3	198.1	43.0	29.3	75.1	48.6	88.5	100.2	59.0	33.3	25.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,230.1	3,291.4	
調査状況	支援状況 支援有:○ 支援無:—		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	支援有 16 支援無 11	
調査延長 累計 (km)	80.6	1,183.6	410.0	150.9	135.0	195.0	75.4	58.1	54.1	38.0	40.2	53.6	182.0	38.0	30.7	69.0	48.0	0.9	0.0	59.0	33.0	26.0	0.4	4.0	0.5	10.0	0.4	18.0	2,913.9	2,994.5					
二次調査 必要延長 (km)	32.6	162.4	1.7	34.9	2.6	7.4	8.3	4.6	7.7	1.0	2.5	11.1	2.2	9.0	1.6	7.0	0.6	0.0	0.0	1.5	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	266.6	299.2		
路面異常 (個数)	130	3,685	230	349	20	315	157	16	187	114	22	107	110	93	1	93	178	19	3	20	19	2	2	4	0	22	0	10	5,778	5,908					
人孔滞水 (個数)	7	1,643	22	662	12	34	147	47	116	32	4	115	54	49	70	91	2	3	0	29	1	8	0	0	0	0	0	0	1	3,142	3,149				
途中水没 (個数)	1	142	20	8	0	13	86	0	7	0	0	54	0	13	2	10	1	3	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	399	400			
管閉塞 (個数)	3	38	9	9	0	20	43	32	62	8	1	82	0	10	0	24	2	0	0	3	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	345	348			
本管破損 (個数)	77	25	0	6	0	3	14	0	104	0	8	0	0	15	0	10	2	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	191	268			
本管浸入水 (個数)	43	3	9	6	0	1	3	0	2	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	76			
合計 (個数)	261	5,536	290	1,040	32	386	450	95	478	161	35	358	164	180	73	228	185	25	4	95	20	12	2	4	0	22	0	13	9,888	10,149					
鉄蓋 (個数)	6	90	35	84	0	14	19	3	3	0	66	25	12	31	1	3	21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	409	415			
躯体 (個数)	250	105	3	56	0	25	50	19	11	0	26	19	18	3	2	8	5	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	354	604			
土砂汚水 (個数)	4	67	20	4	9	3	6	5	10	0	2	10	2	2	0	1	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	170	174			
管接合部 (個数)	24	35	20	11	0	1	26	2	5	0	0	8	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	112	136				
突出 (個数)	51	436	12	400	9	64	93	5	88	36	5	158	10	24	0	37	9	5	0	0	0	0	8	2	0	0	0	1	0	1,402	1,453				
その他 (個数)	98	152	0	166	18	10	38	0	78	102	0	22	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	593	691				
合計 (個数)	433	885	90	721	36	117	232	34	195	138	99	242	44	66	3	50	35	7	0	31	0	8	3	0	1	0	3	0	3,040	3,473					

※新潟県の管路延長は、信濃川流域下水道長岡処理区・魚野川流域下水道堀之内処理区の合計である。

表-2 被害発生自治体と震度

計測震度	計測地点
震度7	6.5～ [川口町]川口
震度6強	6～6.4 [小千谷市]城内、新潟県[小国町]法坂
震度6弱	5.5～5.9 [長岡市]幸町、[十日町市]千歳町、[栃尾市]大町、[越路町]浦、新潟[三島町]上岩井、 [堀之内町]堀之内、[広神村]今泉、[守門村]須原、入[広瀬村]穴沢、新潟[川西町]水口沢、 新潟中[里村]田沢、刈羽村[割町]新田
震度5強	5～5.4 安塚町[安塚]、松代町[松代]、松之山町[松之山]、[見附市]昭和町、[中之島町]中之島、 [与板町]与板、[和島村]小島谷、[出雲崎町]米田、[小出町]小出島、[塩沢町]塩沢、[六日町]伊勢町、 新潟大[和町]浦佐、[津南町]下船渡
震度5弱	4.5～4.9 只見町[只見]、西会津町[野沢]、福島柳津町[柳津]、片品村[東小川]、高崎市[高崎町]、北橋村[真壁]、 久喜市[下早見]、上越市[大手町]、上越市[木田]、浦川原村[釜淵]、牧村[柳島]、柿崎町[柿崎]、 頸城村[百間町]新田、新潟吉川村[原之町]、三和村[井ノ口]、三条市[西裏館]、[柏崎市]中央町、 加茂市[幸町]、新潟栄町[新堀]、[出雲崎町]川西、湯之谷村[大沢]、[広神村]米沢、高柳町[岡野町]、 [西山町]池浦、燕市[秋葉町]、[弥彦村]矢作、[分水町]地藏堂、新潟県吉田町[日乃出町]、巻町[巻]、 月潟村[月潟]、中之口村[中之口]、[三水村]芋沢

備考 ① 出典：地震調査研究推進本部，地震加速度情報ホームページの資料に下記②と③を加筆。

② —は下水道整備自治体を示す。

③ □は下水道被害により災害査定を受けた自治体を示す。

3.1.2 被害発生箇所の特性

被害の多くが小口径の塩ビ管や組立式・塩ビマンホールで整備された場所で発生しているが、これを詳細に整理すると、地質・地下水等の地盤条件や管材・布設箇所等の施工条件において、次のような特性が見られた。

- ・小口径の塩ビ管
- ・歩道部に布設された管路
- ・布設年度の新しい管路
- ・周辺地盤が沖積低地地盤で地下水位が高い地区に布設された管路

3.1.3 埋戻し部の路面陥没とマンホール突出の発生要因

被害が多く発生した長岡市と小千谷市での土質調査結果では次の特性を有しており、被害の特徴である埋戻し部の路面陥没とマンホール突出は、埋戻し材の液状化が原因と考えられた。

- ・埋戻し土内の地下水位が高い
- ・埋戻し土が液状化しやすい粒度分布である
- ・埋戻し部の締固め度が低い

3.2 処理場・ポンプ場

流域下水道の処理場は、4 処理場で被害が発生した。このうち被害が最も大きかった堀之内浄化センターでは、水処理施設の躯体に段差やズレが発生するとともに、目地、止水板、連絡管きよが破断し、消化タンク汚泥輸送管の破断や設備破損があり、処理機能が停止した。また、比較的被害の少なかった長岡、六日町、西川浄化センターでは、水処理施設の汚泥掻寄機破損、伸縮継ぎ手（エキスパンション・ジョイント）のズレ、躯体の亀裂や場内道路の沈下が発生したが、特に処理機能に影響はなかった。

公共下水道の処理場は、8 ヶ所で被害が発生したが、小国浄化センターで脱水機が作動不能になった以外は、設備や配管の破損、躯体のひび割れなど、いずれも被害が小さく処理機能に支障はなかった。

ポンプ場は12ヶ所で被害が発生した。このうち竜光ポンプ場と宇賀地ポンプ場で、一時的に送水機能に支障が生じた。送水機能が停止した竜光ポンプ場では、外階段破損、変圧器破、場内道路不等沈下が発生し、宇賀地ポンプ場では、躯体ズレ、傾き、圧送管破損、場内道路不等沈下が発生した。一方、他のポンプ場では場内道路の陥没・不等沈下、上屋傾き、外壁破損が発生したが、いずれも被害が小さく、送水機能に支障はなかった。

4. 応急復旧

4.1 管路施設

下水道の流下機能が損なわれた地区では、マンホール内の滞水、溢水が生じたことから、応急措置として地震発生後の数日間はバキューム車による汲み上げを実施した。その後、応急復旧工事として、仮配管、仮排水ポンプの設置を行った。また、マンホールの突出は突出部の切断、路面陥没部では碎石による埋戻しにより、それぞれ応急復旧工事を実施した。

しかし、これらの応急復旧工事が水道復旧に追いつかず、下水道の使用制限が続いた地区が残ったり、応急復旧後にも道路陥没が発生した。こうしたことから、応急復旧工事の迅速化や寒冷地特有の応急復旧方法、ならびに路盤下の空洞部の調査方法に工夫を要する等の課題が明らかとなった。

4.2 処理場・ポンプ場

4.2.1 堀之内浄化センター

堀之内浄化センターでは、分水槽取り付け部の破断により流入下水が流出し、水処理施設の伸縮継ぎ手から活性汚泥等の全量が管廊へ流出した。このため応急復旧として素掘り簡易水路を設置し、通常の処理水放流口より河川へ排水した。その後、10月30日までに仮設沈殿池、仮設塩素混和池、仮設管きよを設けた。これらの仮設施設は、掘削後、ブルーシートを被せる簡易なもので、凝集剤、消毒剤等を用いて処理した。このように処理機能が一時的に停止したものの、場外ポンプ場から圧送していた特殊性や、兵庫県南部地震における神戸市東灘処理場の経験を生かした仮設沈殿池の建設により早期に処理機能を回復させることができた。

なお、仮設処理施設からの放流水質は、pH 7.1、BOD 32mg/ℓ、SS 73mg/ℓ、大腸菌群数78個/cm³で、通常の沈殿法により達成可能な処理水質（pH 5.8以上8.6以下、BOD 120mg/ℓ以下、SS 150mg/ℓ以下、大腸菌群数3,000個/cm³以下）であった。また、放流先河川の水質については、魚野川平常水量（堀之内測候所計測値）が約950万 m³/日に対して放流量が約9,000 m³/日（平成15年度実績）と極めて小さく、新潟県の調査および推計によると河川環境水質（魚野川下流の環境基準値 BOD 2 mg/ℓ）を満足しており、簡易処理放流による特段の汚染は観測されなかった。

4.2.2 その他の処理場

長岡中央浄化センターでは、水処理施設で亀裂漏水が発生したが、他池を使用することで処理に支障はな

かった。

小国浄化センターでは、脱水機が作動不能となったが、移動脱水車により応急復旧を行うことで処理に支障はなかった。

十日町下水処理センターではブロワの吸気弁破損、最初沈殿池の柱にクラックおよび座屈、配管破損、消雪パイプ破損、道路陥没などの被害があり、応急復旧において消雪パイプ、道路乗り入れ部を修復した。また本復旧工事では消化タンク損傷部品の交換およびブロワ風量調節機吸気弁の交換を行った。

なお、他の処理場においては、処理機能停止まで至らない範囲のひび割れや設備の一部破損にとどまっている。

4.2.3 ポンプ場

竜光ポンプ場では応急復旧として変圧器の修繕を行い、10月26日に送水機能を回復させた。宇賀地ポンプ場では応急復旧として圧送管の仮配管を設置することで、10月29日に送水機能を回復させた。

5. 下水道施設の耐震対策のあり方

5.1 管路施設

1997年指針では、新設管路においては、重要な幹線等はレベル1地震動に対しては設計流下能力の確保、加えてレベル2地震動に対しては流下機能の確保、また、その他の管路はレベル1地震動に対して設計流下能力を確保することとしている。その他の管路における周辺地盤が液状化の恐れのない地盤の埋戻しについては、対策を規定していない。しかし、今回の新潟県中越地震での被害を踏まえると、液状化の恐れのない地盤であっても、埋戻し土が液状化することにより、埋戻し部の道路陥没やマンホールの浮上り被害が発生している。このため、周辺地盤が液状化の恐れのない地盤であっても、埋戻し土の液状化が想定される場合には、液状化しないような対策を講じる必要がある。

5.1.1 重要な幹線等の定義の見直し

管路施設に被害を受けた場合には、表-3に示すような影響が発生する恐れがある。特に、埋戻し部の道路陥没やマンホールの突出は、交通障害を引き起こすとともに、救援活動や復旧作業に支障をきたし、ライフラインとしての信頼性の低下に繋がる恐れがある。このため、その他の管路のうち、布設位置によって重大な影響を及ぼす恐れのあるものについては、重要な幹線の扱いに準じて、耐震性能を確保することが望ましい。

表-3 下水道被害に起因する影響

主たる影響等	主原因	影響の概要
使用制限	管きよの破断	下水道使用制限 下水道使用制限に起因する水道使用制限
交通障害	埋戻し部の道路陥没・マンホールの突出	交通遮断、避難ルート の遮断
道路の損傷	路盤下の埋戻し部の液状化による沈下、管路の破損部への土砂の吸い込み	道路の路盤下の空洞化による陥没
水質汚染	管きよの破断、マンホールポンプの故障による汚水の流出	地下水の汚染、公共用水域の汚染

5.1.2 液状化対策の重要性

管路の耐震化にあたっては、液状化対策が最も重要なことから、表-4をもとに液状化の発生しやすい地区を特定し、被害想定を行うことにより管路の弱点を把握する必要がある。

特に、液状化被害の発生しやすい地域においては、土質調査が不可欠であるとの認識を徹底させる必要がある。また、地下水位は設計上重要な要素となることから、近傍の観測井等のデータを収集し、地下水位の変動が大きい場合には、その変動を考慮することが望ましい。

表-4 埋戻し部の液状化被害の発生しやすい条件

条件項目	条件細目	液状化被害の発生しやすい条件
周辺地盤	土質	沖積砂層、埋立土、 軟弱粘性土層
	地下水位	高い
	基盤面	深い
埋戻し部	埋戻し土	粒度分布が液状化しやすい (山砂等)
	地下水位	高い
	締固め	緩い
地震動	震度	震度5以上

5.1.3 具体的な液状化対策

液状化被害が発生しやすい地区で管路を布設する際には、マンホール周辺を含め、地盤の特性、施工条件等現地特性、管材、工期等を勘案して、道路管理者と調整の上、原則として以下のいずれかの対策を行うこ

とが望ましい。

- ・埋戻し土の締固め^{※1}
- ・碎石による埋戻し^{※1}
- ・改良土による埋戻し
- ・埋戻し土の固化^{※1}

なお、これらの対策を行う範囲（高さ）については、地下水位を考慮するとともに、施工時の矢板引き抜きに注意するなど、適切に対処することが望ましい。また、液状化対策としては、周辺地盤の液状化の有無、経済性、建設発生土の積極的利用等を考慮し、工法選定する必要がある。

〔埋戻し土の締固め〕

埋戻し土の締固め度^{※2}が90%程度以上であれば、一般的に浮上り等の被害が生じにくいことから、埋戻し土の締固めに関しては、最適含水比に近い状態にした上で、タンパ等による念入りな転圧を行い、現場測定での締固め度が90%程度以上に保たれるように施工管理する。なお、周辺地盤が軟弱な粘性土のところでは、90%以上で液状化した実験結果もあることから、施工にあたっては地盤の特性、施工条件等、現地の特性に留意する必要がある。

〔碎石による埋戻し〕

碎石の材料としては、道路橋示方書の液状化判定の項目で、液状化する可能性がある土の粒度分布の上限値を参考として、平均粒径（D50）が10mm以上かつ10%粒径（D10）が1mm以上の碎石を用いるのがよいと考えられる。碎石による締固めに際しては、締固め度90%程度以上を確保し、周辺地盤が砂質土の場合には、吸い出しによる路面沈下の可能性があるので注意する。

〔改良土による埋戻し〕

埋戻し土に生石灰を添加し、埋戻し土内の含水比を低下させることにより、液状化の発生を防止することができる。改良土の設計強度は、「石灰安定処理工法設計・施工の手引き」（日本石灰協会）を参考に次のとおりとする。

- ・第2種改良土：コーン指数 $q_c=800\text{kPa}$
- ・第3種改良土：コーン指数 $q_c=400\text{kPa}$
- ・第4種改良土：コーン指数 $q_c=200\text{kPa}$

〔埋戻し土の固化〕

埋戻し土にセメントあるいはセメント系固化剤を添加することにより、液状化の発生を防止することができる。セメント添加量は、一軸圧縮強度（28日強度）が100kPa～200kPaとなる量を目安とし、現場強度として50kPa～100kPaを確保する。なお、採用にあたっては再掘削の必要性も合わせて検討する。

※1 「管路施設の本復旧にあたっての技術的緊急提言（下水道地震

対策技術検討委員会とりまとめ）」として平成16年11月22日に報道発表した内容。

※2 締固め度 $D_c(\%) = (Pd/Pd_{max}) \times 100$

Pd : 乾燥密度

Pd_{max} : 最大乾燥密度（室内突固め試験）

5.1.4 布設時の施工

埋戻しにあたっては、まず地下水の排水を十分に行う必要がある。撒き出し厚さは、規定値を超えないように留意する。特に規定値を設けていない場合は、20cm以下を目安とする。撒き出し後は、十分な締固めを行い、密度測定等により締固め度を確認する必要がある。

また、矢板引き抜きによる埋戻し部の緩みに対しても十分に注意し、布設にあたっては施工方法、工期などを、施工業者とよく調整して、丁寧な施工に努める必要がある。

なお、上記の事項を踏まえ、現場において迅速かつ確実に実施できる施工管理方法等の開発、確立が望まれる。

5.2 処理場・ポンプ場

1997年指針では、処理場・ポンプ場はレベル1地震動に対しては機能面で本来の機能の確保、構造面で損傷を生じさせないことを目標とし、レベル2地震動に対しては機能面で早期復旧の確保、構造面で構造物全体の破壊がないことを目標としている。

今回の新潟県中越地震を踏まえると、処理場・ポンプ場の場合、兵庫県南部地震以前に設置された施設が大半であり、一概に現在の耐震設計の評価をすることはできないが、構造的に大きな被害は生じていないことから、現在の1997年指針を大幅改訂する要因にはならないと考えられる。ただし、機能維持の観点から、水処理施設と管きよの継ぎ手ならびに場内配管の継ぎ手には、より一層の配慮が必要と考えられる。

5.2.1 水槽内の継ぎ手

1997年指針では、「水槽内あるいは水路と一体となった管廊には、極力継ぎ手を設けない工夫を施す」とあるが、堀之内浄化センターの被害状況を踏まえれば、「水槽内には継ぎ手を設けない」とすることが望ましい。

5.2.2 可とう性継ぎ手

施設周辺の地盤沈下が大きく、建物の内外を継ぐ配管および伸縮継ぎ手部上の配管については、より可とう性の大きな継ぎ手を設ける必要がある。また、施設

内の配管においても、破損により水や汚泥を呼び込む恐れのある配管については、応力集中する可能性のある箇所について可とう性を持たせる必要がある。

さらに、下水道施設は施設の特徴から基礎面が大きく単一の支持地盤に設置できない場合が多いので、直接基礎を採用する場合においては、適切な処置を行うとともに杭基礎に比べて不確定要素が多いと判断される場合は、可とう管や伸縮継ぎ手部の許容変位量を多めに取ることも一つの方策として検討する必要がある。

換気ダクトや脱臭ダクトの相当部分については、防振タイプの吊りボルトおよび振れ止めの施工、コーナー部および機器との取り付け部にフレキシブルな材質なものを施工するなど応力が集中して破損しないような措置を検討する必要がある。

6. おわりに

新潟県中越地震は、兵庫県南部地震以来ともいえる大規模な被害を下水道施設にもたらした。被害を受けた自治体は、新潟県および6市12町3村の22地方公共

団体であり、災害査定結果によれば、被害総額は処理場11億円、ポンプ場1億円、管きょ193億円、総計206億円であった。

中央防災会議では東海地震や東南海・南海地震をはじめとしていつ発生してもおかしくない大規模地震を想定した地震対策について検討が進められているところである。中でも東海地震は、ここ30年以内に発生する確率が86%（参考値）（「全国を概観した地震動予測地図」報告書、地震調査委員会）と予測されており、たった今起きていても不思議ではない状況にある。

下水道は重要なライフラインの一つであり、下水道施設の被災は、トイレが使用できないなど市民生活に直接大きな影響を与えるばかりでなく、生活空間での汚水の滞留や未処理下水の流出に伴う公共用水域の汚染による伝染病の発生等、また、雨水排水機能等の喪失による甚大な浸水被害の発生など、多くの住民の生命・財産を危険にさらす重大な二次災害を発生させる恐れがある。

このため、今後、下水道地震対策が促進されることが望まれる。

●この研究を行ったのは

研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員
研究第一部研究員

堀江 信之
加畑 雅宏
吉澤 正宏
飯田 和輝

●この研究に関するお問い合わせは

研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部研究員

堀江 信之
加畑 雅宏
飯田 和輝