

下水道管路施設における耐震化技術の有効性評価と今後の技術的課題

深 谷 渉

東日本大震災は、重要なライフラインである下水道施設に大きな爪痕を残した。被害総数としては、管きょ 600 km 以上、マンホール 15,000 千基以上という膨大な数に上った。被害の多くは、耐震化されていない管路施設で発生したと考えられ、今後想定される大規模地震に備え、加速度的に耐震対策を促進することが喫緊の課題である。しかしながら、管路施設の耐震化技術の多くは 2000 年代に入り開発、普及してきたもので、実績や効果についての情報に乏しいのが現状である。国土技術政策総合研究所では、東日本大震災における被害状況整理の一環とし、耐震化済み下水道管路施設の被害状況を整理した。この結果、管きょ埋め戻し工法の効果を確認し、あわせて施工管理上の問題点についても整理した。

キーワード：下水道管路施設、耐震効果、液状化対策、埋め戻し 3 工法、マンホール浮上

1. はじめに

災害列島と称される我が国では、過去に多くの巨大地震に見舞われてきた。2000 年以降（東日本大震災前まで）を見ても、震度 6 弱以上を観測した地震は実に 27 回、震度 6 強以上は 8 回を数え¹⁾、その都度、下水道施設は被害を受けてきた。

近年では、新潟県中越地震及び中越沖地震、能登半島地震、岩手宮城内陸地震が記憶に新しいが、各々の地震においては、被災した自治体の管きょ総延長の 2% 前後²⁾ で、下水の流下能力低下や路面異常による交通障害等が引き起こされている。

下水道施設によるこれらの社会的影響を極力排除するために、国土交通省では大きな地震の発生の都度、地震対策技術に関する検討委員会を立ち上げ、効果的な耐震化技術の検討や積極的な地震対策の推進に取り組んできた。新潟県中越沖地震時には、その約 3 年前に発生した新潟県中越地震時の「管きょ埋め戻しに関する緊急提言」が功を奏し、多くの管きょが再被災を免れた³⁾。

しかしながら、このような下水道管路施設における地震対策への取り組みは、まだ途についたばかりであり、全国的な下水道管路施設の耐震化は進んでいないのが現状である。

今後、施設の耐震化を促進させる上では、耐震化技術の認知度及び理解度の向上を図るとともに、既存耐震化技術の有効性を評価することで、既存技術の改良、

高性能技術の開発、経済性や施工性に優れた新技術の開発などを促し、技術のさらなる向上と耐震化の加速度的促進を図っていく必要がある。

本稿では、東日本大震災における耐震化済み下水道管路施設の耐震化の有効性に関して、国土技術政策総合研究所が調査した結果を報告する。

2. 東日本大震災における下水道管路施設被害の概況

(1) 下水道管路施設の被害概要

液状化現象という言葉が一般的に知られるようになった新潟地震（昭和 39 年）以降、阪神淡路大震災や釧路沖地震、最近では新潟県中越地震・中越沖地震や能登半島地震において、車両等の通行を妨げるほどマンホールが路上に大きく浮き上がるなどの液状化による下水道管路施設の被害が多く確認されている。

東日本大震災では、600 km 以上の管きょ、15,000 基以上のマンホールが損傷等しており、過去の地震（能登半島地震、新潟中越沖地震）を超える大きな被害を受けた（表—1）。

管きょの被害を都道府県別に見ると（表—2）、宮城県、福島県及び茨城県で被害率が高く、激しい液状化が発生した千葉県においても比較的高い被害率となっている。

表一 東日本大震災と過去の地震の被害率

震災名	被災市町村等団体数	総延長 (km)	被害管路延長 (km)	被害率 (%)
東日本大震災	132	65,001	642	0.99
東日本大震災 (関東地方除く)	77	19,063	445	2.33
兵庫県南部地震	11	13,919	162	1.16
新潟県中越地震	20	3,293	152	4.62
能登半島地震	6	652	15	2.30
新潟県中越沖地震	5	3,072	50	1.63

※「総延長」とは、当該市町村等団体における管路の総布設延長を示している。

※能登半島地震、新潟県中越沖地震の各数値は災害査定ベース。

※新潟県中越地震の各数値は、「下水道災害復旧の記録 概要版 平成18年3月 新潟県土木部都市局下水道課」より引用。

※兵庫県南部地震は、「阪神・淡路大震災 下水道はどう対応したか (社)日本下水道協会」より引用。

※関東地方とは、茨城県、栃木県、千葉県、埼玉県、東京都、神奈川県である。

表二 東日本大震災における都道府県別下水道管路被害状況

都道府県名	被災市町村等団体数	総延長 (km)	被害管路延長 (km)	被害率 (%)
青森県計	1	113	0.1	0.09
岩手県計	13	3,712	13	0.34
宮城県計	39	9,702	312	3.21
福島県計	22	5,110	120	2.34
茨城県計	36	9,509	129	1.36
栃木県計	3	287	2	0.67
埼玉県計	1	214	0.006	0.003
千葉県計	13	8,510	54	0.63
東京都計	1	15,793	12	0.08
神奈川県計	1	11,625	0.5	0.004
新潟県計	2	426	1	0.29
合計	132	65,001	642	0.99

(国土交通省調べ、平成24年2月6日現在)

(2) 管きょ・マンホールの被害と特徴

下水道管路施設の被害は、地盤条件に応じ、図一1に示す3つに区分できる。以下に、東日本大震災における各区分の被害の特徴を整理する。

①埋め戻し部の液状化による被害と特徴

埋め戻し部の液状化の多くは、震源(本震)からの距離が近い東北地方において、過去に発生した新潟県中越地震や能登半島地震の際と同様の被害であるマンホールの突出や管きょ埋め戻し部の路面異常などが発生した。

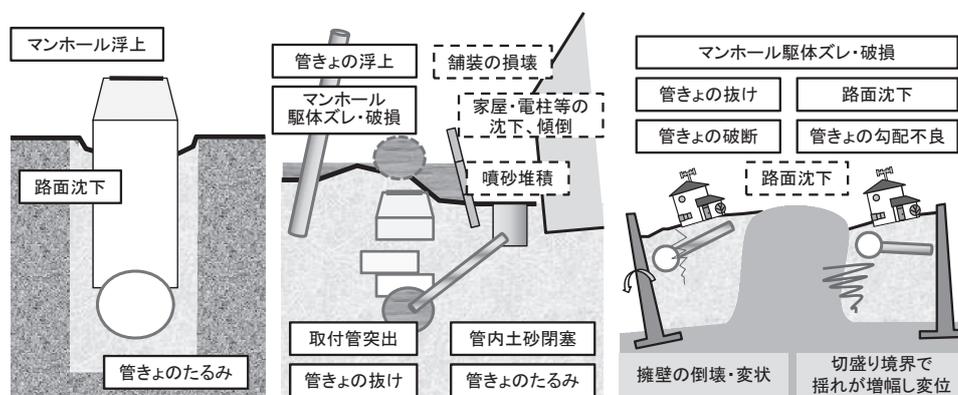
②周辺地盤の全面液状化による被害と特徴

周辺地盤の全面液状化は、東京湾沿岸部及び、利根川下流域において集中的に発生しており、下水道施設の以外の道路、住宅等についても大きな被害が発生した。下水道施設の被害としては、主に土砂による管きょ閉塞、マンホール躯体のずれ、管きょの蛇行、たるみなどであり、管きょの一部が地表部まで露出するという事例も確認された。

これら大規模な液状化に発展した原因は、東北地方に比べ地震動は小さかったものの地震動の揺れの継続時間が長かったことや、規模の大きな余震や誘発地震が立て続けに発生したことが挙げられ、これらの現象が発生した代表的な箇所は、千葉県や茨城県に集中しており、海浜や旧河道、沼地等を埋め立てて宅地や道路に造成した共通の経緯を有する。

③側方流動を伴う周辺地盤の変状による被害と特徴

宮城県仙台市青葉区や太白区、福島市等の丘陵部にある造成地では、周辺地盤の液状化等による側方流動に伴い地盤が大きく変状し、管きょの蛇行や抜け、破損、マンホール浮上・沈下などの被害が発生した。被害の多くは、造成時の盛土部分及び切盛境界で集中的に発生した。



a) 埋め戻し部の液状化 b) 周辺地盤の全面液状化 c) 側方流動を伴う周辺地盤の液状化

下水道に起因する被害 下水道以外の被害

図一1 下水道管路施設の被害形態

3. 下水道管路施設における耐震化の現状と経緯

法的に耐震化が義務づけられる前の平成9年度以前に工事発注された管路（重要な幹線）の耐震化率は約14%（平成22年度末現在）である。地方自治体の厳しい財政事情や技術者不足といった事業執行上の課題に加え、下水道管路施設の耐震化技術の浸透度の低さや信頼性に関わる情報の不足も要因の一つと考えられる。

下水道管路施設の耐震化の歴史は非常に浅い。契機は阪神淡路大震災であり、液状化により甚大な下水道管路被害が生じ、耐震化の重要性、必要性が指摘された。その後、耐震対策が法的に義務づけられ、同時期より耐震化技術の開発研究も本格化した。

新潟県中越地震（平成16年）時には、国土交通省が当時設置した下水道地震対策技術検討委員会による「管路施設の本復旧にあたっての技術的緊急提言」により、埋め戻し部の液状化対策として、埋戻し部の締固め、碎石による埋戻し、埋戻し部の固化の3工法が示された。中越地震の約3年後に発生した新潟県中越沖地震（平成19年）では、この提言が功を奏し、下水道管路施設（管きよ及びマンホール）の再度被害が大きく軽減された。

しかしながら、これら耐震化技術の全国的な実績や効果については、まだ十分な情報がなく、その採用に当たっては主に経済性の観点で検討され、耐震効果、適用条件といった技術的な評価はされていない。今後は、実績や効果の情報を蓄積し、経済性とあわせて最大限の効果が発揮できる工法の選択フロー等を作成する必要がある。

4. 下水道管路施設の耐震化技術とその効果

(1) 管きよ

下水道管路施設は近年の地震において多くの被害が報告されており、その主要因は埋戻し土が液状化することにあることが、既往の研究により明らかにされている。先に触れたように、平成16年に発生した新潟県中越地震時緊急提言では、復旧工事には再度災害防止のため埋め戻し土の締固め、セメント固化、碎石の3工法（図—2）のいずれかを採用することとしており、下水道施設耐震指針⁴⁾にも記載されている。以下に、東日本大震災被災地で施工実績のあった、セメント固化及び碎石の耐震化工法に関して、被害状況及び効果検証の調査結果を示す。

a) セメント固化

本工法は、原位置の掘削土にセメントを混合して埋め戻す、いわゆるセメント安定処理工法である。平成16年に発生した新潟県中越地震における下水道管きよ被害の復旧工法としてはじめて本格的に適用され、3年後の平成19年に発生した新潟県中越沖地震での被害発生率は0.4%と極めて低く、同工法の有効性が実証されている³⁾。

今回の東日本大震災の被災地でも、セメント系改良土等の固化工法による下水道管きよ埋め戻しは、宮城県内の2市で施工実績があった。2市の施工延長及び今回震災における被害延長を表—3に示す。

A市全域の被害率（被害率①）と固化工法を採用した路線の被害率（被害率②）を比較すると両市とも固化した箇所の方が低い。また、被害程度を見ても固化した箇所は、若干の路面異常が見られる程度であり（写真—1～3）、セメント固化による液状化対策の効果があったものと考えられる。以下に、効果検証のために実施した、A市、B市での調査結果を

埋戻し方法	埋戻し土の締固め	碎石による埋戻し	埋戻し土の固化
概要	良質土で締固め（締固め度90%程度以上）ながら、埋戻す。	地下水位以深を透水性の高い材料（碎石）で埋戻す。	地下水位以深をセメント固化改良土等で埋戻す。
概念図			
液状化対策の効果	十分な締固めを行うことにより、埋戻し部の過剰間隙水圧を小さくすることが出来るため、液状化に対する効果は大きい。	マンホール・管路近傍部の過剰間隙水圧が消散するため、液状化に対する効果は大きい。	埋戻し部が非液状化層となるため、液状化に対する効果は大きい。

図—2 「管路施設の本復旧にあたっての技術的緊急提言」における3工法

表一3 A市とB市の被災状況

自治体名	整備延長 (m)	被災延長 (m)	固化対策延長 (m)		被害率① (%)	被害率② (%)
	①	②	③	うち被災延長		
				④	②/①	④/③
A市	315,000	12,200	2,500	54	3.87	2.16
B市	142,000	13,410	19,662	336	9.44	1.71



写真一1 標準施工（未対策）



写真一2 液状化対策施工箇所



写真一3 液状化対策施工箇所（被害軽微）

述べる。

① A市における効果検証

A市におけるセメント固化被災箇所については、耐震設計上は許容範囲とされる程度の軽微なもの（写真一3）であったが、今後のより一層の耐震性向上を図るために、現地の土質調査及び被災状況の分析を実施した。

この結果、現地の埋め戻し土の一軸圧縮強度は、表一4に示す通り、1断面当たりの平均一軸圧縮強度が2カ所とも基準値(50～100 kPa)を下回る結果であったほか、調査深度が深い位置の土は特に強度が発現していなかった。また、セメント添加量は、酸化カルシウム分析結果より、事前配合(50 kg/m³)に近い混入率が確認された。

また、施工当時の状況について施工担当者にヒアリングしたところ、セメント混合は現地攪拌(バックホウによる3回攪拌)であったこと、攪拌後の仮置きが1日程度あったことが分かった。

以上の結果を整理すると、セメントの必要添加量は満たしているものの、埋戻し時の施工上の問題により適正な強度が得られなかったことが推察された。

新潟県中越沖地震の際に設置された下水道地震対策技術検討委員会では、セメント系改良土による埋戻し時の施工上の留意点が提言されており、この提言と現地土質試験結果及び現地の施工状況を照らし合わせると、主な原因として下記が考えられた。

- ・セメント混合は現地攪拌(バックホウによる3回攪拌)であったが、攪拌不足のために1断面中の強度にばらつきが生じた。
- ・セメント攪拌後に仮置き(1日程度)したために、十分な強度が発現しなかった。
- ・深い位置の強度が低いことから、管周りの転圧が十分でなかった可能性がある。

② B市における効果検証

B市では、市内2地区を対象に、平成17年度からセメント系固化による耐震化を進めている。今回の震

表一4 A市における一軸圧縮強度試験結果

調査深度	被害有り		調査深度	被害なし		深度別平均値
	孔-No1	孔-No2		孔-No3	孔-No4	
1.80～2.75 m	76.0 kPa	68.0 kPa	1.50～2.3 m	42.5 kPa	18.4 kPa	51.2 kPa
2.75～3.35 m	12.6 kPa	12.2 kPa	2.60～3.54 m	12.6 kPa	11.4 kPa	12.2 kPa
1断面当たり平均値	44.3 kPa	40.1 kPa	1断面当たり平均値	27.6 kPa	14.9 kPa	31.7 kPa

表一五 施工年度別の整備延長と被災延長

処理区	A 処理分区			B 処理分区			計		
	整備延長 (m)	被災延長 (m)	被害率 (%)	整備延長 (m)	被災延長 (m)	被害率 (%)	整備延長 (m)	被災延長 (m)	被害率 (%)
H17	3,238	243	7.5	2,453	52	2.1	5,690	294	5.2
H18	3,104	0	0	2,096	0	0	5,201	0	0
H19	3,769	41	1.1	2,114	0	0	5,883	41	0.7
H20	2,256	0	0	0	0	0	2,256	0	0
H21	632	0	0	0	0	0	632	0	0
計	12,999	284	2.2	6,663	52	0.8	19,662	336	1.7

災における2地区の被災状況を整理すると、表一五の通りである。

被災した箇所について詳細に分析すると、被災した管きよは平成17年度に施工されたものに集中していることが分かった。また、施工担当者へのヒアリングによれば、平成17年度は、耐震化事業に着手した初年度であり、施工管理において十分な指導ができていなかったとして、翌年度から事前配合の立ち会いや指示等の適正化を図ったとのことである。この結果、平成18年度以降の施工箇所については、ほとんど被害がない。

施工管理の適正化において留意した事項は下記の通り。

- ・現地でのセメント混合時の立会い（全数量に対して実施）
- ・現場発生土毎（3カ所／1工事）に一軸圧縮強度試験を行い、セメント配合量を決定。

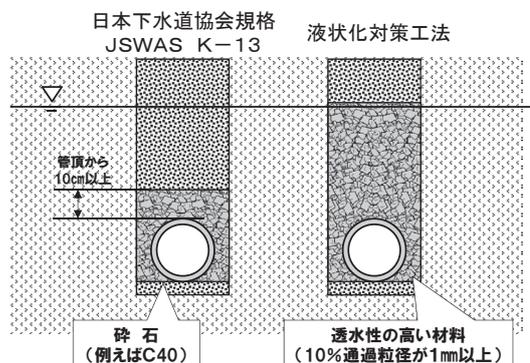
b) 砕石等による埋戻し

本工法は、埋戻し部が液状化しないよう、埋戻し材料に砕石を用いる方法であり、小口径管きよでは、多くの場合、砕石に対応可能なリブ付き塩ビ管やリブ付きポリエチレン管などが用いられる。

リブ付き管きよの施工方法は、管周りのみを砕石に置換する方法が標準（JSWAS K-13）であるが、液状化対策を目的とする工法では、地下水位以深（もしくは埋戻し部全部）を砕石で埋戻すことが最も重要である（図一三）。

本工法の採用箇所は、東日本大震災の被災地内では極僅かで、宮城県内C市の一部で採用されている程度である。

本地区では、同一路線上に、前出の標準施工箇所と液状化対策施工箇所が存在する。今回の震災では、標準施工箇所でも車両通行が不可能となる大きな路面異常



図一三 砕石による埋め戻し方法



写真一四 標準施工（未対策）



写真一五 液状化対策施工（被害なし）



写真一六 液状化対策施工（被害有り）

が発生したが（写真—4）、液状化対策施工箇所では、路面が若干沈下した程度の被害であり（写真—5, 6）、その効果が確認された。

ただし液状化対策を施工した一部の管きょ（約20 m）で、被害程度は小さいものの、管きょのたわみ及び路面異常が発生しており、その原因究明のための調査を行った。

調査にあたっては、対策済みながら若干の被害が確認された管きょについて、施工時の工事書類の確認と当時の工事担当者へのヒアリングを実施した。この結果、使用した碎石の種類と、施工時の矢板引き抜きに関して問題があると推察された。

使用する碎石については、耐震指針において透水性の高い材料として10%通過粒径 $D_{10} \geq 1 \text{ mm}$ の材料を推奨しているが、現場で使用されていたのは $D_{10} \geq 600 \mu\text{m}$ であり、細粒分が多く含まれていた。このため、液状化時の過剰間隙水圧の消散効果が低下し、被害につながったものと推察された。

矢板の引き抜きについては、引き抜きに伴い地山と埋戻し部に空隙が生じ、埋め戻し部の締め固めが緩んだ可能性が、当時の施工担当者により示唆されている。

c) まとめと今後の課題

今回震災の被災地における管きょ耐震化工法の実施箇所は、極限られた箇所でのみであった。被害状況を確認したところ、交通障害や流下阻害等の大きな被害がなかったことから、一定の効果があったものと考えられる。しかし、一部の管きょでは、施工上及び施工管理上の問題から液状化を防止するために必要な一定の基準を満たしていない箇所が確認された。また、工法に対する理解が不足しており、誤った施工をしている例も散見された。

今後の埋め戻し3工法の採用においては、平成20年に設置された下水道地震対策技術検討委員会で、埋め戻し3工法に関しての施工上の留意点（下水道地震対策技術検討委員会報告書、平成20年10月）をとりまとめており、引き続きこの提言の徹底を図るほか、前出の実態を踏まえ、下記について再検討する必要がある。

- ①施工管理上の問題と解決策を検討する。
- ②現場の施工条件等により、求める品質（基準）の確

保が困難な場合の、工法の選択方法を検討する。

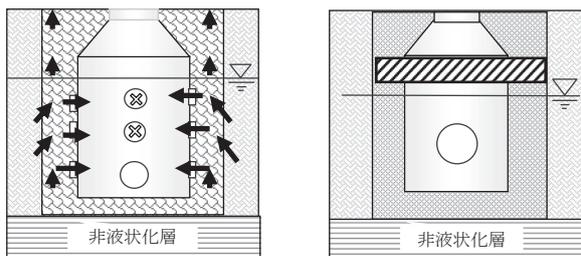
- ③工法の技術的な理解度を向上させるため、マニュアル等の充実化を行う。

(2) マンホール

a) マンホール耐震化工法の実績と効果

マンホールの液状化対策工法については、液状化発生防止対策と被害軽減対策の2つに大別できる。液状化発生防止対策としては、埋め戻し土の固化・締め固めや過剰間隙水圧抑制工法があり、被害軽減対策としては、重量化工法及びアンカー工法、遮断壁によるものなどがある。

これら工法の施工実績について、工法協会へのヒアリング及びインターネットで調べた結果、近年の施工実績としては、既存施設の耐震化として採用される過剰間隙水圧消散工法と重量化工法（図—4）が大半を占めており、その他の工法については実績が極めて少なかった。



【過剰間隙水圧抑制工法】 【重量化工法】
図—4 過剰間隙水圧消散工法と重量化工法の概念図

施工実績の多い過剰間隙水圧消散工法と重量化工法の2工法については、東日本大震災の被災地域内にも施工されており、各工法の関係団体（工法協会、メーカー等）が、被害の有無について独自に調査を実施している。ここでは、関係団体が実施した調査結果や国土技術政策総合研究所が実施した調査結果を整理する。

①過剰間隙水圧消散工法

過剰間隙水圧消散工法は、主に東京都での採用が多い。東日本大震災では、江東区や江戸川区などの東京湾沿岸部の埋め立て地で大規模な液状化が発生してお

表—6 東日本大震災における耐震化済みマンホールの被害調査結果一覧

工法区分	調査者	調査対象	被害有無	備考
過剰間隙水圧消散	関係団体①	詳細調査：72基	なし	東京湾沿岸、石巻市、東松島市
	関係団体②	一次調査：24基	なし	栗原市、登米市、石巻市、女川町
重量化	関係団体③・国総研	一次調査：309基	なし	宮城県、浦安市
		詳細調査：21基	なし	浦安市、栗原市、東松島市

※関係団体の公表資料に基づく。

り、これら液状化が確認された地区に設置済みの耐震化済みマンホール48基について、路面の異常やマンホール内の下水流下状況、過剰間隙水圧の消散効果を確認するための調査が関係団体①により行われている(表一6)。

この調査結果によると、調査した48基の全マンホールで被害が発生していなかったことを確認したと報告されている。また調査した48基の内、過剰間隙水圧の消散が確認されたマンホールが10基あり、消散機能が適正に発揮され、マンホールの浮上抑制効果があったと推察された。この他、石巻市や東松島市においても同様の調査が実施されており、24基のマンホールを調査し被害はなし、内16基で過剰間隙水圧の消散跡が確認できている。

また、類似の工法を開発している別の関係団体②も、自社工法施工箇所について路面異常有無の調査(計24基)を実施しており、被害がないことを確認している。

②重量化工法

重量化工法は、東北3県の他、関東3県においても施工実績を有する。東日本大震災で特に被害の大きかった宮城県(栗原市、石巻市、東松島市など)や浦安市にも多くの施工実績があり、関係団体③と国土技術政策総合研究所の共同で調査を実施した。

耐震化済みマンホールの内、①本震の震度が6強以上、②調査対象マンホール周辺で液状化被害が確認されている、③調査対象マンホールに近接または同一路線上に未対策マンホールがある、の条件を満たす場所として、栗原市内3地区、東松島市1地区の4地区における21基のマンホールを抽出し、①マンホールの周辺地盤変位を含めた隆起測定、②同一路線におけるマンホール高さの測定、③マンホール内および管口の破損状況、④流下観察、⑤マンホール周辺の家屋・道路構造物等の損傷状況の詳細調査を実施した。

この結果、周辺地盤の液状化により、正確な突出及び沈下の判断が困難な箇所が一部であったが、流下阻害や交通障害を招くような被害は認められなかった。

b) まとめと今後の課題

マンホールの液状化対策としては、既設マンホール

対策として重量化工法及び過剰間隙水圧消散工法の施工実績が多く、今回震災においてその効果が確認された。採用工法として2極化が進みつつあるが、液状化対策の効果を確実に発揮するには、施工場所毎の施工条件に応じた工法の選択が必要であり、今後は他工法も含めた適用条件の整理及び条件による効果の違いの検証が必要と考える。またあわせて、加速度的な耐震化に向けた、より経済的で効果の高い新工法の開発も進めるべきと考える。

5. おわりに

東日本大震災では、東北から関東にかけての広い範囲で発生した液状化により、多くの管きょ及びマンホールが被害を受けた。管路施設の耐震化率は14%と低く、今回の地震において被害を受けた管きょやマンホールのほとんどは未耐震であったと考えられる。

今後想定される東海・東南海・南海等の巨大地震に備え、既設下水道管路施設の耐震化は急務である。今回震災で得られた新たな教訓や知見が今後の対策に役立ち、来る地震時の被害防止に少しでも貢献できることを切に願う。

JICMA

《参考文献》

- 1) 気象庁 HP : http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html
- 2) 第5回下水道地震・津波対策技術検討委員会(資料3)、平成23年12月15日
- 3) 下水道地震対策技術検討委員会報告書、平成20年10月
- 4) 下水道施設の耐震対策指針と解説—2006年版—、日本下水道協会、2006
- 5) 東日本大震災における下水道マンホール調査報告書、ハットリング工法研究会、平成24年2月

【筆者紹介】

深谷 渉(ふかたに わたる)
国土交通省
国土技術政策総合研究所 下水道研究室
主任研究官

