

内水氾濫時の地下鉄運行停止に伴う 浸水被害に関する検討

DAMAGE OF SHUTDOWN OPERATION FOR SUBWAY INUNDATION BY PLUVIAL FLOOD

寺田 光宏¹・石垣 泰輔²・尾崎 平³・戸田 圭一⁴

Mitsuhiro TERADA¹, Taisuke ISHIGAKI², Taira OZAKI³, Keiichi TODA⁴

In Japan, mega cities such as Tokyo and Osaka have subway networks. These subways are prone to pluvial, fluvial, storm surge or tsunami floods. In this paper, inundation of the subway network including newly planned line in Osaka is investigated by using numerical model. And the damage of subway shutdown operation during pluvial flood is discussed here. The results indicate that shutdown operation should be done as soon as possible and trains have to be moved to outside of inundation area.

Key Words : subway, pluvial flood, evacuation, planning line, flood damage

1. はじめに

近年, 地球規模の気候変動により集中豪雨の発生回数が増加しており, 浸水被害が発生する可能性も高まっている. また, 大阪を含む都市部では地下街や地下鉄等の地下空間の利用も進んでいる. 近年, 大阪市でも, 2011年8月, 2012年8月及び2013年8月に市の中心部において, 浸水被害が発生している. 池内ら¹⁾は, 東京を対象に荒川が決壊した場合の地下鉄の浸水想定と被害軽減方策の効果分析を行っている. 現況の止水板等のみの対策の場合の解析によると, 地上部よりも早く地下鉄等のトンネルを通じて氾濫水が到達したり, 地上部が氾濫していないにもかかわらず, 地下鉄が浸水する場合があることを示している. また, 止水板等の対策を行った場合, 地下鉄浸水が軽減されることを示している. 村瀬ら²⁾は, 外水氾濫による名古屋市と大阪市を対象に地下鉄の大規模浸水解析を行い, 名古屋と大阪の地下浸水の状況を比較している. 名古屋では, 地下浸水も生じにくく, 大阪では, 地下空間の入り口で浸水が流入して多大な被害になると共に, 鉄道線路を伝って浸水があふれだす可能性があることを

示している. 中島ら³⁾は, 名古屋市を対象にネスティングモデルを用いた津波による地下鉄の浸水解析を行い, 津波解析結果の妥当性について考察している.

さらに, 都市氾濫解析において, 堤防がある場合と無い場合における陸域及び地下鉄の浸水特性の違いを考察している. その結果, 堤防が無い場合, 地下鉄が浸水することを示している.

著者ら⁴⁾は, 大阪市の海老江処理区を対象に, 外水氾濫時における地下鉄軌道を伝搬する氾濫水の挙動予測に関する検討を行っている. 氾濫水は地下鉄を伝搬し, 上町台地の東側の駅まで流入することを示している. また, 地下連絡通路に防水扉を設置すると, 海老江処理区外へ伝搬しなくなるという結果を得ている.

著者ら⁵⁾は, 大阪市の海老江処理区及び大野処理区を対象として, 計画の中になにわ筋線を含む地下鉄を考慮した氾濫解析を行い, 地下鉄を伝搬し, 淀川を横断して海老江処理区から大野処理区へ浸水が広がることを確認した. また, 地下鉄トンネル内に凸部を設けることにより, 氾濫水の移動を防ぐことができるという結果を得ている. 本検討はこの検討を基に, 地下鉄運行停止に伴う浸水被害についての検討を進めていく.

キーワード: 地下鉄, 内水氾濫, 避難, 計画路線, 浸水被害

¹正会員 オリジナル設計株式会社 関西支店 Engineering, Original Engineering Consultants, Osaka, Japan (Email: terada-a1314@oec-solution.co.jp)

²正会員 関西大学 環境都市工学部 Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Suita, Japan

³正会員 関西大学 環境都市工学部 Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Suita, Japan

⁴正会員 京都大学大学院 工学研究科 Graduated School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan



図-1 対象区域及び路線

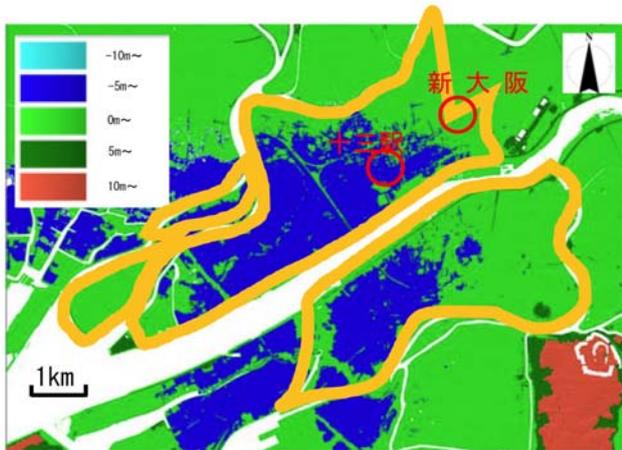


図-2 対象区域の地盤高

2. 対象地域の概要

図-1に、対象区域及び路線を示す。対象地域周辺には、地下路線である大阪メトロの御堂筋線、四つ橋線、谷町線、堺筋線、中央線、千日前線、長堀鶴見緑地線、今里筋線、阪神本線、阪神なんば線、京阪線、京阪中之島線、近鉄線及びJR東西線が走っている。図-2に、本研究の対象地域となる海老江処理区と大野処理区の位置を示す。検討対象区域は大阪市の福島区の全部、中之島の除く北区の大部分及び此花区の一部である海老江処理区及び西淀川区と淀川区の大部分である大野処理区を対象とする。海老江処理区と大野処理区は淀川を挟んで隣接している。海老江処理区は、縦横4km×6kmで、面積は12.15km²、

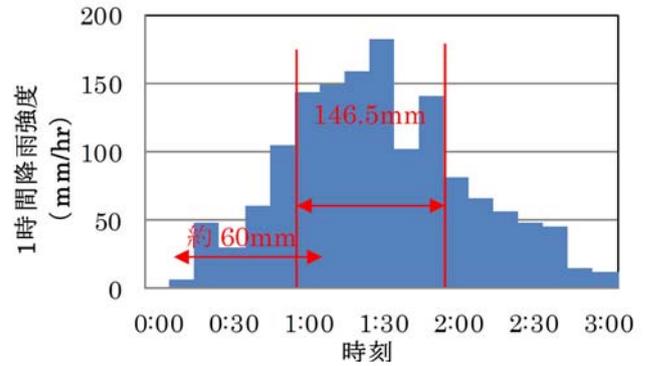


図-3 2008年8月末豪雨のハイエトグラフ

大野処理区は、縦横5km×8.5kmで、面積は18.59km²となっている。処理区内には、地盤高が0m以下の区域が広がっている。図-3に、2008年8月末豪雨のハイエトグラフを示す。対象とした降雨は、岡崎市美合町で観測された2008年8月29日午前0時～3時までの降雨とした。この降雨は8月の1時間降雨が観測史上1位を記録した降雨であった。時間雨量は146.5mmを記録した。想定最大外力⁶⁾の設定では、海老江処理区の12.15km²で、降雨継続時間を1時間とすると141mm/hrとなり、概ね岡崎市での実績降雨と一致する。このことから、対象区域での想定最大降雨ということが出来る。よって、本検討では想定最大降雨として、岡崎豪雨の降雨を用いる。

なにわ筋線とは、2017年(平成29年)5月23日に大阪市淀川区の新大阪駅、大阪市北区に建設予定の北梅田駅(仮称)と、JR難波駅および新今宮駅を結ぶ計画を進めることが大阪府、大阪市、西日本旅客鉄道(JR西日本)、南海電気鉄道(南海)、阪急電鉄(阪急)の5者より発表された。新たに北梅田駅、中之島駅、西本町駅及び南海新難波駅が新設される。なにわ筋線は、大阪市のなにわ筋の地下に建設が計画されている地下鉄で、大阪市を南北に縦貫する路線として計画されている。なにわ筋線は、検討区域内の駅である十三駅や北梅田駅を含む8駅が通る。なにわ筋線は2023年春開業予定である。

3. 解析方法

Infoworks ICMは米国のInnovyze社製の解析ソフトで、下水道ネットワークと地上の氾濫水を同時に計算が可能である。モデルは有効降雨モデル、地表面流出モデル、管内水理モデル、地表面氾濫計算モデルから構成されている。降雨データを入力データとし、地表面に応じて有効降雨を算定し、単一貯留池モデルにより地表面流出量を算定する。地表面流出量が管内水理モデルの入力データとなり、管きょ内水理は、サンブナン式により計算される。地上部の氾濫計算では、地表に溢れた水の挙動を非構造格子による2次元不定流解析(浅水方程式)で処

理している。

なにわ筋線は、計画中の路線のため、次のような仮定をし、モデル化した。路線の深さは、一律、JR東西線の淀川横断の高さとする。また、上下線を1つのトンネル(6,505mmの円形管)としてモデル化した。地下鉄の粗度係数は、粗石モルタル積みの0.017~0.030の範囲内の0.025を採用した。

(1) 地下空間の出入口のモデル化

地下空間の出入口は現地調査に基づく道路面からの高さ、出入口幅を堰でモデル内に表現し、地下空間出入口付近の道路における水深が堰高を超える場合、地下空間へ流入するように、本研究では地下への出入口をモデル化した。堰の公式は(1)式を用いた。

$$Q_0 = Cd \sqrt{g} \times B \times (Du)^{3/2} \quad (1)$$

(Kindsvater and Carter 式)

Q_0 : 自由吐き流

Cd : 流量係数 (0.85)

G : 重力加速度

B : 堰の幅

Du : 堰頂部からの上流水深

(2) 地下鉄駅ホームの形状

地下鉄駅ホームは、駅の形状や、駅の大きさ等が異なり、今後改良を考えているが、本研究では現地調査で計測した御堂筋線梅田駅の形状を基準とし、ホームの長さは概ね一致していると仮定し、全ての駅の形状を統一化し、大きな空間としてモデルの構築を行った。これは、大阪市営地下鉄では、軌間や車両サイズなどの基本寸法は同じとしていることからホームの大きさも同程度の大きさであると仮定している。

表-1 海老江処理区内ポンプ場能力

ポンプ場名	能力 (m ³ /min)
海老江処理場	3,290.00
北野抽水所	1,870.00
天満堀川抽水所	840.00
出入橋抽水所	420.00

表-2 大野処理区内ポンプ場能力

ポンプ場名	能力 (m ³ /min)
大野処理場	1,760.00
塚本抽水所	3,161.72
竹島抽水所	720.94
中島抽水所	288.76
中島第2抽水所	774.38
佃第2抽水所	571.59

また、本研究で用いるInfoWorks ICMは下水道等ネットワークの解析ソフトであるため、地下構造物として、下水道管渠、マンホールしかモデル化ができないため、地下鉄駅を大きな地下空間としてモデル上で再現する。その際、InfoWorks ICMでは地下空間の形状を円柱状でモデル化することから、ホームの高さを実際の高さに合わせ、延べ床面積を現状と同一とさせることで、ホームの大きさを再現した。ホームの高さを合わせることで、浸水深さの高さの判断を下すことが可能となる。西村ら⁷⁾によると、地下鉄駅構内で発生する列車風の予測を一次元解析で行っている。今回も地下鉄を一次元解析で解析することとする。

表-1に海老江処理区内のポンプ能力を、表-2に大野処理区内のポンプ能力を示す。海老江処理区では、海老江処理場、北野抽水所、天満堀川抽水所及び出入橋抽水所から雨水が排水されている。大野処理区内には大野処理場、塚本抽水所、竹島抽水所、中島抽水所、中島第2抽水所及び佃第2抽水所から雨水が排水されている。しかし、今回検討では、最悪のシナリオを想定して、河川の水位が高く、ポンプが停止している状態で解析している。

(3) 解析メッシュの地表面データ

解析メッシュの地表面データは解析領域を三角形に分割する。地表面のメッシュデータは国土地理院から公表されている5mメッシュデータの高さをTPからOPに変換し、三角形のメッシュデータの標高データを作成した。

4. 解析結果

(1) モデルの妥当性の確認

モデルの妥当性の確認には、さまざまな手法があるが、1つの手法として、Nash-Sutcliffe係数⁸⁾を用いる。図-4に竹島抽水所吐出量を示す。Nash-Sutcliffe係数は、1970年に(Nash and Sutcliffe)により提唱された指標であり値が1に近いほどモデルの精度はよいとされ、指標値0より小さい場合、ほぼ予測の効果がないとみなすことができる。一般的にNash-Sutcliffe係数が、0.7を超えると有効な精度であるとされている。

解析結果のうち、浸水実績箇所と計算結果が一致していることに加え、大野処理区の竹島抽水所の吐出量の計算結果と実績値から求めたNash-Sutcliffe係数を次に示す。Nash-Sutcliffe係数は0.74となり、有効な精度であるといえる。

$$NS = 0.74$$

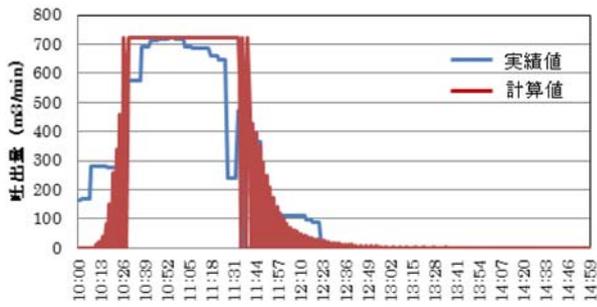


図-4 竹島抽水所吐出量

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{q_0(i) - q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{q_0(i) - q_{av}\}^2}$$

$$q_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_0(i) \quad (2)$$

N : 計算時間数

$q_0(i)$: i 時の実測流量

$q_c(i)$: i 時の計算流量

$q_{av}(i)$: 実測流量の平均値

なにわ筋線無し

なにわ筋線有り

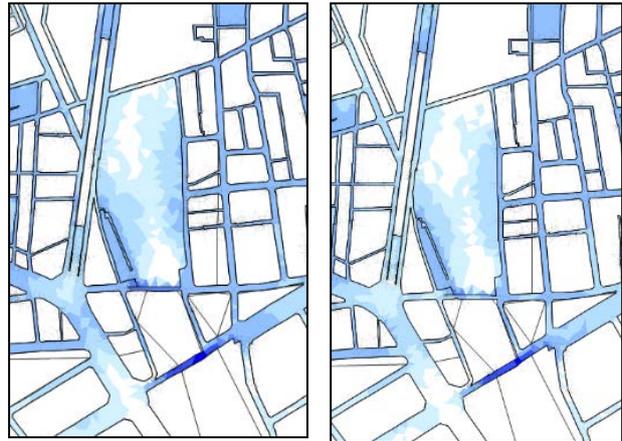


図-5 十三駅での浸水状況

(2) 車両の運行停止に伴う浸水被害の検討

大野処理区では、地盤高が低い箇所を中心に、処理区内のいたるところで浸水が発生し、十三駅周辺でも浸水が発生している。図-5に十三駅での浸水状況を、図-6に大野処理区での浸水状況を示す。十三駅周辺において、なにわ筋線ありとなしの場合を比較すると、なにわ筋線が建設され、氾濫水が地下に流入することにより、地上では浸水が軽減される。十三駅周辺では、なにわ筋線が貯留管の役割を果たしている。

豪雨災害発生時には、大雨が観測され次第、運行中の全車両が次の駅で停車し乗客の避難を行うことが考えられるが、連絡が遅くなった場合、浸水している駅に車両が停止することが想定される。そこで、内水氾濫解析結

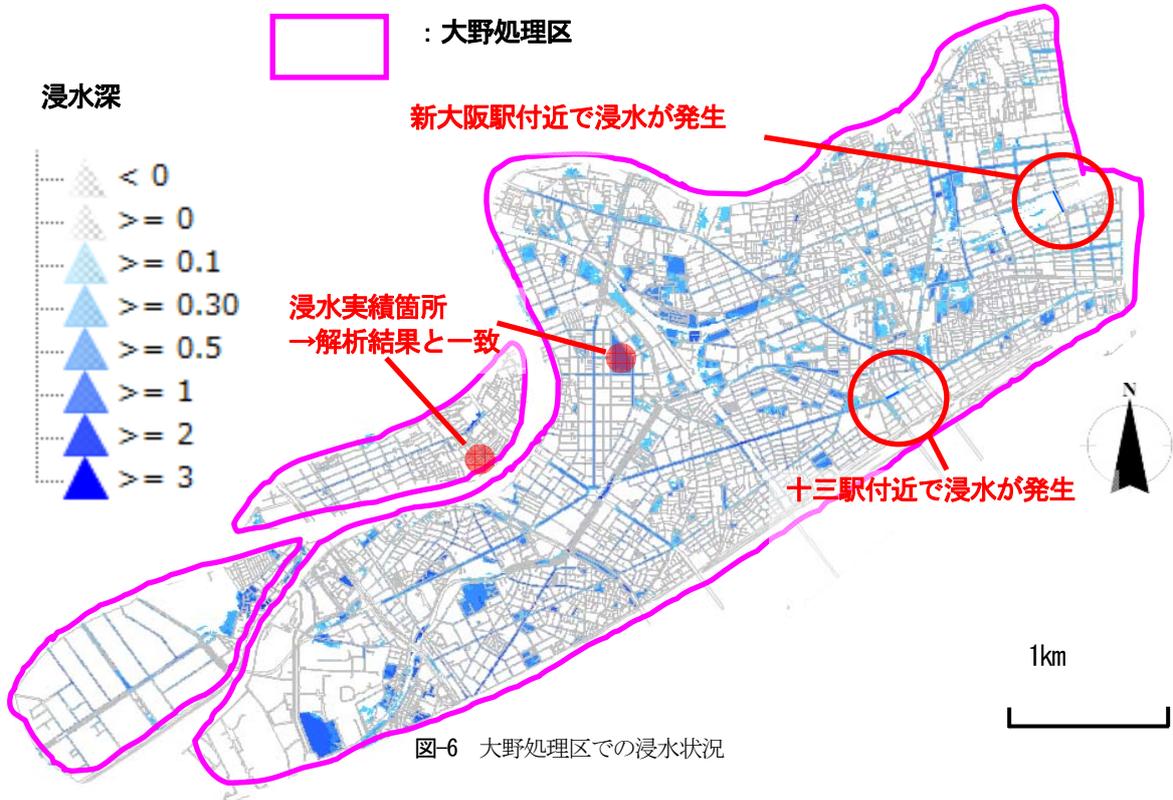


図-6 大野処理区での浸水状況



図-7 なにわ筋線の浸水状況

果とインターネットの鉄道運行表 (<http://www.ekikara.jp/top.htm>)⁹⁾を比較することによって、浸水発見から連絡までの時間に伴う浸水車両数について調べた。表-3に、各駅の浸水時間(なにわ筋線なし)を、表-4に、各駅の浸水時間(なにわ筋線あり)を、表-5に、朝ラッシュ時の電車の浸水状況を、表-6に、日中の電車の浸水状況を、表-7に、夕方ラッシュ時の電車の浸水状況を示す。鉄道運行表は時刻表より、車両ごとの駅到着時間を求め、運行時間を平日ダイヤの朝ラッシュ(7:00~9:00)、日中(13:00~15:00)、夕方ラッシュ(17:00~19:00)の3つに分け、検討する。表に各駅の内水氾濫時の浸水開始時間を示す。表-3よりなにわ筋線がない場合、一番早く浸水が確認されるのは、阪神本線の福島駅の20分後である。表-4よりなにわ筋線がある場合、一番早く浸水が確認されるのは、なにわ筋線の十三駅、北梅田駅及び阪神本線の福島駅の20分後となっている。建設が予定されているなにわ筋では、早い時刻から浸水が発生する。なにわ筋線を含め、5つの路線では、梅田地区に乗り入れており、全般的に梅田地区では浸水被害が著しい。なにわ筋線がある場合とない場合を比較して、なにわ筋線以外の路線ではあまり変わらないことを示している。これは、なにわ筋線の影響する範囲は小さく、浸水する直近の区域以外では浸水状況が変わらないことを示している。開始時間は降雨開始から、大阪市下水道計画降雨の60mm/hrに達する60分後の時間とする。この結果と鉄道運行表より、駅での浸水を確認してから鉄道車両の運行を停止するまでの時間に伴う車両の浸水被害を検討する。本検討では駅で浸水発生が確認されてから全車両の停止までの0分後、5分後、10分後の場合について検討を行う。検討結果から20%以上の電車が浸水する駅に停車することがわかり、避難完了後、車両を移動させなければ、車両が浸水することを示している。また、連絡が遅くなると、車両自体が浸水する割合が増える。よって、迅速な対応が必要である。また、なにわ筋線がある場合とない場合では、なにわ筋線を除くとあまり大きく変わらない結果をえている。なにわ筋線では、対策を講じなければ、浸水被害が甚大になることが示された。また、車両運行停止において、車両を停

止するための連絡が遅くなると、0分後、5分後、10分後と車両自体が浸水する割合が増える。

(3) 排水時間の検討

次に、浸水する路線ごとに流入した浸水量をポンプ排水によって、排水する時間を算出し、復旧までの時間の目安を算定する。ポンプ能力は0.6m³/s(近畿地方整備局が保有するポンプ車能力の平均)¹⁰⁾とする。表-8に、浸水ボリュームと排水時間を示す。実際は、排水後も復旧作業は発生すると考えられるが、今回検討では最低限必要な復旧時間を算出する。なにわ筋線なしの場合、浸水ボリュームは、御堂筋線、阪神本線、谷町線及び四つ橋線の順に多く、御堂筋線では、71,935(m³)にも及ぶ。

なにわ筋線ありの場合、浸水ボリュームは、なにわ筋線、阪神本線、御堂筋線、谷町線及び四つ橋線の順に多く、なにわ筋線では、317,047(m³)にも及ぶ。なにわ筋線が建設されることにより、阪神本線の浸水は変わらないが、なにわ筋線が浸水することにより、御堂筋線、谷町線及び四つ橋線の浸水は軽減される。図-7になにわ筋線の浸水状況を示す。なにわ筋線では、地下鉄トンネルがすべて浸水する。排水時間は、もっとも短い四つ橋線でも1時間以上、最も長いなにわ筋線では6日以上の日数がかかり、浸水が電車の運行に与える影響が大きくなるという結果を得ている。よって、地下鉄内に氾濫水が流れ込むことの無いよう、また氾濫水が広がらないように、対策を施す必要がある。対策としては、氾濫水が多く流入するトンネル坑口での対策を提案する。御堂筋線の中津坑口では、25,028m³の氾濫水が流入し、最大の水深で、3.9mにもなり、4m以上の防水扉をつける必要がある。堺筋線の天神橋筋6丁目トンネル坑口では、1,352m³の氾濫水が流入し、最大の水深で、0.5mにもなり、0.5m以上の防水扉をつける必要がある。また、阪神本線の福島坑口では、31,180m³の氾濫水が流入し、最大の水深で、6.9mにもなり、福島坑口では全閉しなければ、ならない。トンネル坑口からの氾濫水の流入を防ぐことができれば、御堂筋線で復旧までの時間を695分短縮でき、阪神本線では、866分短縮できる計算となる。防水

表-3 各駅の浸水時間（なにわ筋線なし）

御堂筋線	中津	梅田	淀屋橋	本町
浸水開始	0:50	1:00	1:40	—
ホームまで	1:50	1:30	2:10	—

谷町線	南森町	東梅田	中崎町	天神橋筋6丁目	都島
浸水開始	2:40	1:00	2:20	0:50	3:50
ホームまで	—	1:40	—	3:00	10:20

四つ橋線	西梅田	千日前線	野田阪神
浸水開始	1:30	浸水開始	2:10
ホームまで	—	ホームまで	—

JR東西線	新福島	北新地	大阪天満宮
浸水開始	8:50	2:50	7:00
ホームまで	—	3:20	—

阪神本線	梅田	福島
浸水開始	1:20	0:20
ホームまで	1:40	0:50

なにわ筋線	新大阪	十三	北梅田	中之島	西本町	南海新難波
浸水開始	1:00	0:20	0:20	0:50	1:20	1:50
ホームまで	1:40	1:20	1:10	1:20	1:40	2:10

表-4 各駅の浸水時間（なにわ筋線あり）

御堂筋線	中津	梅田	淀屋橋	本町
浸水開始	0:50	1:00	1:40	4:00
ホームまで	1:40	1:20	2:00	—

谷町線	南森町	東梅田	中崎町	天神橋筋6丁目	都島
浸水開始	2:20	1:00	2:10	0:50	3:20
ホームまで	—	1:30	—	2:40	5:20

四つ橋線	西梅田	千日前線	野田阪神
浸水開始	1:30	浸水開始	2:10
ホームまで	—	ホームまで	—

JR東西線	新福島	北新地	大阪天満宮
浸水開始	7:50	2:30	6:20
ホームまで	—	3:10	8:40

阪神本線	梅田	福島
浸水開始	1:20	0:20
ホームまで	1:40	0:50

扉を設けることにより、復旧までの時間を半減できる。

5. おわりに

本検討で確認できたことを次にまとめる。

表-5 朝ラッシュ時の電車の浸水状況

停止までの時間	朝ラッシュ					
	浸水しない駅に停車		浸水する駅に停車		車両が浸水	
なにわ筋線	無し	有り	無し	有り	無し	有り
0分後	92	92	15	19	1	3
5分後	95	95	17	21	16	18
10分後	93	93	17	21	24	26

表-6 日中の電車の浸水状況

停止までの時間	日中					
	浸水しない駅に停車		浸水する駅に停車		車両が浸水	
なにわ筋線	無し	有り	無し	有り	無し	有り
0分後	59	59	7	9	0	0
5分後	55	55	10	12	12	12
10分後	56	56	10	12	15	15

表-7 夕方ラッシュ時の電車の浸水状況

停止までの時間	夕方ラッシュ					
	浸水しない駅に停車		浸水する駅に停車		車両が浸水	
なにわ筋線	無し	有り	無し	有り	無し	有り
0分後	80	80	16	20	2	4
5分後	83	83	16	20	16	18
10分後	79	79	16	19	27	29

表-8 浸水ボリュームと排水時間

項目	浸水ボリューム(m ³)		ポンプ能力(m ³ /s)	時間(分)	
	無し	有り		無し	有り
なにわ筋線	無し	有り	0.6	1,998	1,376
御堂筋線	71,935	49,529	0.6	1,022	822
谷町線	36,794	29,597	0.6	124	61
四つ橋線	4,453	2,195	0.6	1,564	1,563
阪神本線	56,305	56,268	0.6	—	8,807
なにわ筋線	—	317,047	0.6	—	—

・モデルの妥当性の確認において、浸水実績箇所と計算結果が一致することに加え、Nash-Sutcliffe係数を用い、係数が0.74となったことから、モデルの妥当性を確認した。

・車両の運行停止に伴う浸水被害の検討結果からいずれのケースも20%以上の電車が浸水する駅に停車することがわかり、避難完了後、車両を移動させなければ、車両自体が浸水することを示している。

・車両の運行停止に伴う浸水被害の検討において、車両を停止するための連絡が遅くなると、0分後、5分後、10分後と車両自体が浸水する割合が増える。よって、迅速な対応が必要である。

・平成30年台風21号の関西国際空港の場合も復旧に時間がかかったように、排水時間の検討において、なにわ筋線では、流入した氾濫水をポンプで排水するのに6日以上かかることがわかり、影響が大きくなるという結果を得ている。そのため、地下鉄路線内に氾濫水を流入させないようにすることが重要であることを示している。

・地下鉄浸水への対策として、トンネル坑口に防水扉を設けることができれば、復旧までの時間を半減することができると思われる。

謝辞：本研究を行うにあたり、データを提供していただいた大阪市や関西大学の学生等、関係各位に心から謝意を表します。なお、本研究は日本学術振興会の科学研究費（15H02979、研究代表者、戸田圭一）の助成を持って実施した研究の成果の一部である。

参考文献

- 1) 池内幸司, 越智繁雄, 安田吾郎, 岡村次郎, 青野正志：大規模水害時における地下鉄等の浸水想定と被害軽減方策の効果分析, 土木学会論文集B1（水工学）, 第68巻, 3号, pp.136-147, 2012.
- 2) 村瀬将隆, 中島勇介, 武田誠, 川池健司, 松尾直規：地下鉄を考慮した名古屋と大阪の大規模浸水解析, 土木学会論文集B1（水工学）, 第73巻, 4号, pp.I_1441-I_1446, 2017.
- 3) 中島勇介, 武田誠, 久納匠, 松尾直規：地下鉄を有する名古屋における津波の浸水解析, 土木学会論文集B1（水工学）, 第73巻（2017）4号, pp. I_1465-I_1470, 2017.
- 4) 岡部良治, 寺田光宏, 土井峻平, 石垣泰輔：外水氾濫時における地下鉄軌道を伝播する氾濫水の挙動予測に関する検討, 土木学会第71回年次学術講演会, II-116, 2015.
- 5) 寺田光宏, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一：計画中の新路線を考慮した内水氾濫時の地下鉄浸水に関する検討, 土木学会論文集B1（水工学）, 第74巻（2018）4号, pp. I_1465-I_1470, 2018.
- 6) 浸水想定（洪水, 内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法：国土交通省水管理・国土保全局, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/shinsuiso_utei_honnbun_1507.pdf, 2015.
- 7) 西村高明, 森谷剛, 宇波邦宣, 森井宜治：列車走行に伴い地下鉄駅構内で発生する列車風の予測解析と緩和対策について, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第14巻, 土木学会, pp.101-108, 2009
- 8) 都市域における局所的集中豪雨に対する雨水管理技術導入ガイドライン（案）：国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水道研究室, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoku/tnn/tnn0998.htm>, 2018.
- 9) えきから時刻表：株式会社ぐるなび®, <http://www.ekikara.jp/top.htm>.
- 10) 大阪大規模都市水害対策ガイドライン：大阪大規模都市水害対策検討会, <http://www.kkr.mlit.go.jp/bousai/sonae/oosakadaikibo/index05.htm>, 2018.