

津波氾濫による地下鉄浸水に与える 堤防耐震化の効果について

庄田 侑平¹・石垣 泰輔²

¹正会員 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) (〒526-8640 大阪市淀川区西中島 5-4-20)
E-mail:shouda_y@jrnc.co.jp

²正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

南海トラフ地震は今後 30 年以内に発生する可能性が高いと地震調査研究推進本部は予想している。また、都市部では地下鉄と地下空間が広がっており津波による浸水リスクは高いといえる。大阪府は 2024 年までに被災者を減らす事業を行っており、浸水面積が約 50%まで減少することを示している。本検討では、大阪市の地下鉄や地下街を対象に下水管を含む都市域の水理シミュレーションソフト InfoworksICM を用いて津波氾濫時の地下鉄浸水を検討した。また、止水板を設置した場合の浸水についても評価を行った。堤防の沈下対策を行ってかつ止水板を設置した場合、浸水駅は 112 駅から 11 駅まで減少することが明らかとなった。しかし、止水板を取り付けても浸水することから地震収束後は地下鉄から地上に避難しなければならない。

Key Words: subway, Nankai-Trough earthquake, inundation, tsunami

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生した。巨大津波が沿岸部に甚大な被害をもたらした。その翌年に内閣府は中央防災会議を行い南海トラフ巨大地震が発生した場合の津波について複数のパターンを想定している。地震対策推進本部は将来 30 年以内に 70%以上の確率で南海トラフ巨大地震が発生すると予想している(2018 年 1 月 1 日地点)。その巨大地震は太平洋側に最大規模の津波をもたらすと考えられている。大阪府は 2024 年までに南海トラフ巨大地震による津波に備えて、堤防の対策を行っている。大阪府の予想では、構造物の耐震化を行った場合は浸水面積が約 50%に減少し、被災者数も約 7400 人にまで減少すると想定している。被災者数を限りなくゼロに近づけるための対策を行っている。

1993 年の台風 11 号では東京メトロの赤坂見附駅が冠水した。福岡豪雨(1999,2003 年)では地下鉄博多駅が浸水した。また 1999 年の福岡豪雨では 1 名が地下ビルから逃げ遅れて亡くなっている。大阪市には地下街や地下鉄が広がっている。水害発生時の地下施設および地下鉄は浸水時に脆弱であり、逃げ遅れると人々の生命を失うくらい危険である。

浅野ら¹⁾、濱口ら²⁾は梅田駅周辺の地下街を対象に津波氾濫時の解析を行っている。津波到達時間から 30 分

以内に地下街の浸水面積が 80%を超える結果であることを示している。このことから津波氾濫時は短時間で地下空間に流入するを示している。寺田ら³⁾、佐藤ら⁴⁾、村瀬ら⁵⁾、武田ら⁶⁾は止水板を設置した場合の地下街や地下鉄駅について検討をおこなっている。井上ら⁷⁾は木製や樹脂製や金属製の止水板を用いて実験を行っている。金属製の止水板(高さ 1.0m)は漏水が最も少ないことを示している。

以上のことから、本検討では大阪市の地下鉄路線を対象に、地上の堤防の対策を行う前後での津波氾濫時の地下鉄の浸水深や止水板の有効性について検討を行うこととした。

2. 検討地域

(1) 検討地域の概要

検討地域は大阪市全域である。図-1 は検討地域である大阪市の標高図を示している。赤枠で囲んだ上町台地より西側は海拔ゼロメートル地帯が広範囲に広がっていることを示している。海拔ゼロメートル地帯は津波が引いた後も浸水し続けていることが予想される。このことから、水害発生時は極めて脆弱な地形であると言える。

(2) 地下鉄ネットワーク

図-2は大阪市の地下鉄路線図を示している。駅番号は鉄道会社が指定しているものを用いた。大阪市には、Osaka Metroの8路線、JR西日本、阪神電気鉄道、京阪電気鉄道、近畿日本鉄道の計12の路線がある。対象の地下鉄駅は139駅である。大阪市の地下鉄路線は2.1)で示した様に、海拔ゼロメートル地帯を通過しているの、地上出入口に津波氾濫水が流入しやすい傾向にあることが想定される。また、地上出入口から流入した氾濫水が地下鉄の乗換駅を経由して地下鉄路線の広範囲に伝播すると想定される。

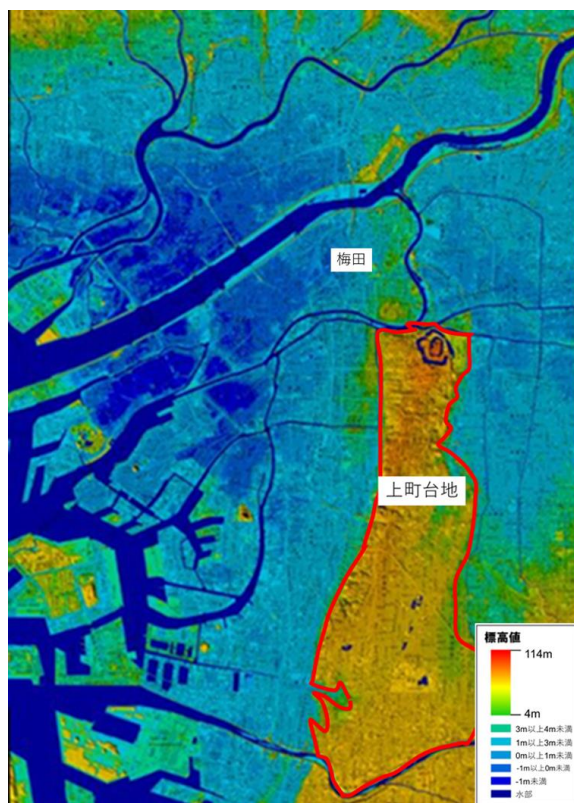


図-1 大阪市標高図(国土地理院地図加筆)

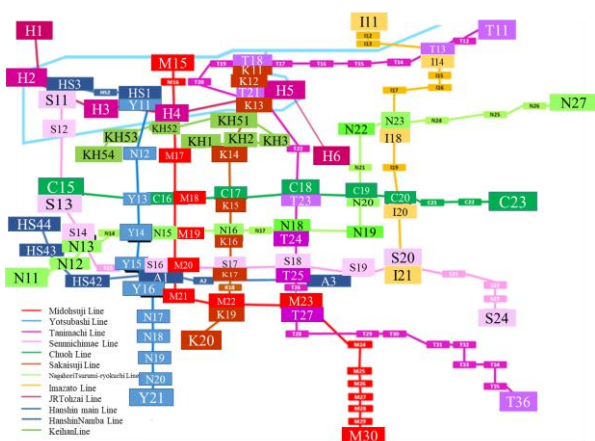


図-2 地下鉄ネットワーク (OsakaMetro 等加筆)

安治川津波水位

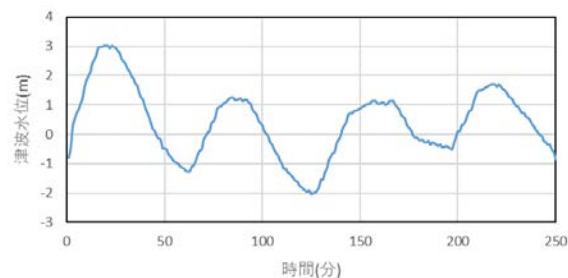


図-3 安治川河口部の津波水位(津波最短到達時間基準)

表-1 検討モデルの構造物条件

条件	堤防の沈下	水門の開閉
1	あり	開放
2	なし	閉鎖

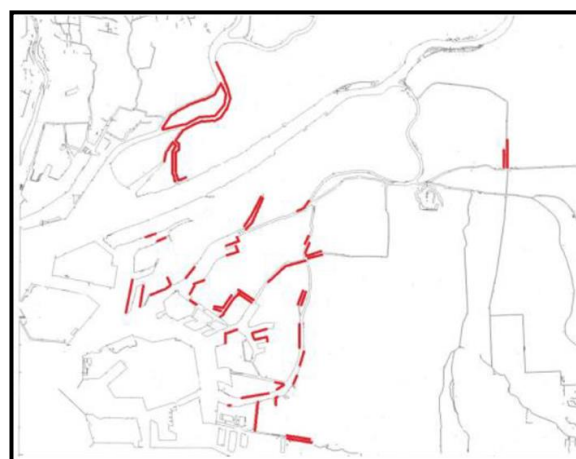


図-4 堤防沈下箇所(赤線)

3. 解析の条件とモデルと条件

(1) 数値解析モデル

下水道河川の統合シミュレーションソフトであるInfoworksICMを用いて、大阪市の地上と地下鉄網の津波氾濫解析を同時に行った。地下鉄軌道を下水管に置き換えることで津波氾濫時の浸水計算を行った。

地表面は非構造格子モデルで浅水2次方程式によって解析される⁸⁾。地下鉄はじめ地下構造物をモデル化した管渠はSaint Venant式によって解析される⁹⁾。堤防の沈下の高さは大阪府が想定しているデータを参考に地形モデルの設定を行った。本検討では、出入りロマウンドアップを解析モデルでは堰に置き換えた。堰高を超えた氾濫水の流量は越流公式が適用される¹⁰⁾。粗度係数は地表面0.065、水域0.025¹⁾、²⁾、¹¹⁾を用いた。

(2) 津波外力

大阪府が示している淀川水系の複数個所の津波水位¹²⁾を用いて解析を行った。最短津波到達時間と想定されている地震発生から110分後を基準に250分間の津波水位データを用いた。図-3は安治川河口部の水位データである。氾濫解析は津波最短到達時刻から12時間分を行った。外力は沿岸部や河口部から津波水位を加える方法で研究を行った。

(3) 地盤高と構造物

地形モデルの標高データは国土地理院¹³⁾の基盤地図情報を用いた。河床部の標高データを地形モデルに追加した^{14) 15)}。解析条件は表-1に示した2条件である。条件1は対策を行う前であり、条件2は対策を行った後である。河川の遡上を考慮した解析モデルとなっている。大阪府は堤防の沈下の対策を行う前と後での最大浸水規模を想定している¹⁶⁾。また、水門の開閉も考慮している。初期水位については朔望平均水位 TP+0.90m とした。対策を行う前での大阪府が予想している堤防が沈下する箇所¹⁷⁾を図-4の赤線で示す。赤線で示した箇所の地盤高を大阪府が予想している高さを参考に地形モデルの標高の調整を行った。なお本検討で用いたモデルは大阪府の想定条件と異なり越流しても破堤しないものとした。

(4) 地下鉄の駅と軌道モデル

地下鉄駅および軌道のモデルは寺田ら³⁾、岡部ら¹⁸⁾のモデルを改良する方法で解析を行った。駅の大きさは梅田駅の大きさを参考に139駅すべてに底面積6900m²、高さ4.6mの円筒としてモデル化した。地下鉄軌道のモデルはJR東西線の大きさを参考に管径6.5mの一元化され

た管に置き換える方法で12路線すべてに適用させた。駅の出入りロマウンドアップ高を実測し、駅の出入口の地盤高にマウンドアップ高を加えた値を堰高とした。止水板設置時は堰の天端高をマウンドアップ高より1.0m高く設定した。駅ホームの標高は階段一段当たりの高さを計測し、階段の高さに段数を掛けた数値を入り口の標高から引いた値とした。

(5) 駅の種類

本検討では、地上の出入口から浸水する直接浸水駅と他の駅からの伝播によって浸水する間接浸水駅に分類した。いずれにも該当しない駅を非浸水駅とする。以後、直接浸水駅と間接浸水駅の浸水深の変化について述べていくものとする。

4 止水板なしでの浸水深の比較

(1) 対策を行う前後の最大浸水深

本検討ではハード対策を行う前後での地上及び地下鉄の浸水解析を行った。図-5に対策を行う前後での最大浸水深の比較を示す。図-5の青線で示した箇所は越流が見られた箇所である。図-4に示した堤防が破堤すると予想されていた箇所以外からの越流が見られた。地上の構造物面での対策を行うことで越流箇所が減少したことが明らかとなった。構造物の対策を行った場合は、対策を行う前に比べて地上の浸水面積が約52%であることが示された。図-5より浸水路線は構造物の対策を行う前では御堂筋線のM22～M30と谷町線のT22～T36区間を除いて全路線が浸水する結果が得られた。構造物の対策を行

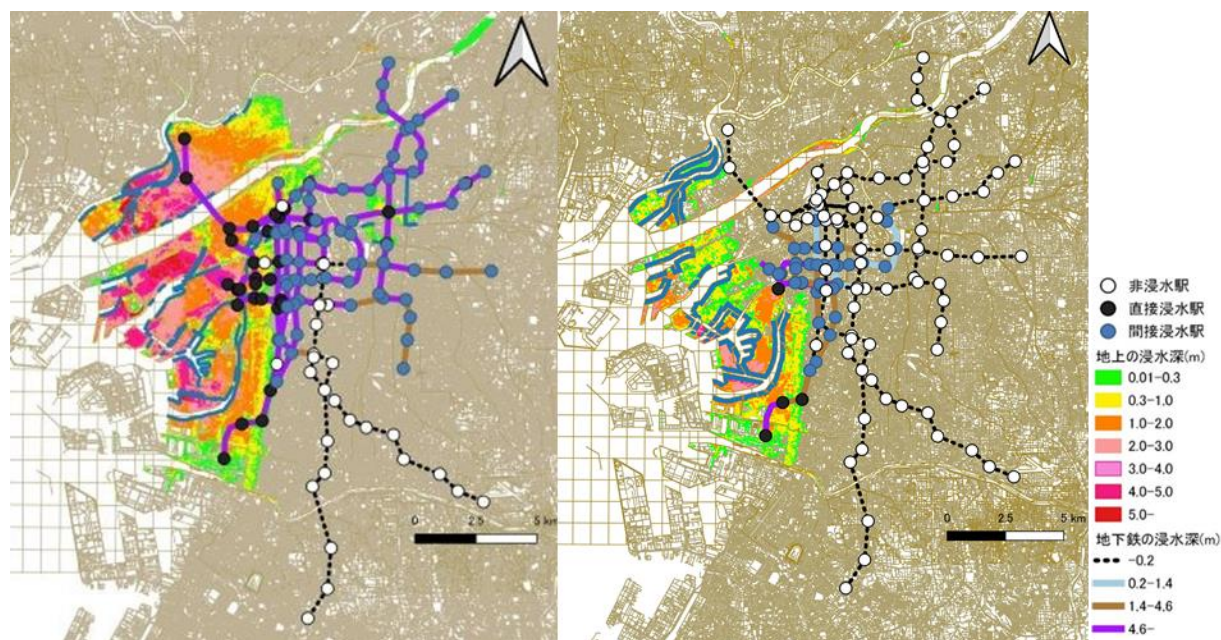


図-5 対策を行う前(左)と後(右)の地上及び地下鉄の最大浸水深

表-2 対策を行う前の出入口の最大浸水深

路線	駅番号	最大浸水深	路線	駅番号	最大浸水深
四ツ橋線	Y11	1.28	御堂筋線	M20	0.11
	Y12	0.14		M18	0.39
	Y13	0.45		M16	1.28
	Y15	0.11	今里筋線	I18	0.68
	Y17	0.02		HS42	1.31
	Y18	0.43	阪神なんば線	HS43	1.38
	Y19	0.39		HS44	2.73
	Y20	1.74		HS1	1.28
	Y21	0.51		HS2	1.72
谷町線	T20	1.28		A1	1.28
千日前線	S11	1.67	JR線	H5	1.28
	S12	0.95		H4	3.94
	S13	1.51		H3	1.53
	S14	1.24		H2	2.56
	S15	1.22		H1	1.05
	S16	0.11		Q1	0.11
中央線	C16	0.39	京阪線	KH53	0.4
	C15	1.51			
長堀鶴見緑地線	N11	2.32			
	N12	1.81			
	N13	1.27			
	N14	0.37			
	N23	0.68			

表-3 対策を行った後の出入口の最大浸水深

路線	駅番号	最大浸水深
長堀鶴見緑地	N11	2.01
四ツ橋線	Y19	0.01
	Y20	1.47
	Y21	0.63

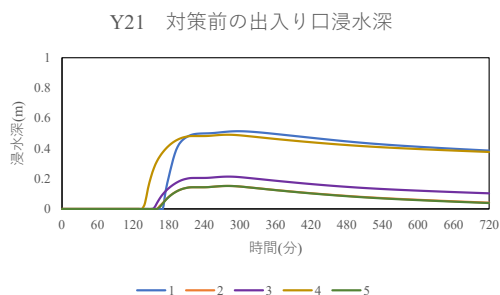


図-6 対策前のY21駅の地上出入口の浸水深の変化

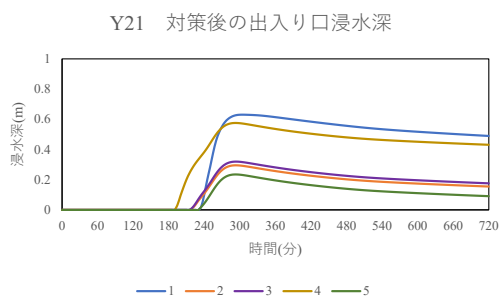


図-7 対策後のY21駅の地上出入口の浸水深の変化

った場合は、浸水区間が大幅に減少した。また地上構造物の対策を行った後は、谷町線、今里筋線、JR 東西線、京阪線は地上及び地下鉄駅の浸水が見られなかった。

(2) 直接浸水駅の浸水深

本検討では地上出入口が浸水する駅を直接浸水駅と定義した。直接浸水駅は対策を行う前は 40 駅であるが、対策後の直接浸水駅は Y19～Y21 駅と N11 駅の 4 駅である。地下鉄駅の出入口は多数存在し、それらの駅的全出入口の浸水深を示すのは紙面の都合上困難である。そのため、各駅の出入口の中で浸水深が最も大きい数値を表-2(対策を行う前)、表-3(対策を行った後)に示す。対策を行う前では浸水深が止水板の高さである 1.00m を超える駅が 23 駅も存在する結果となった。表-2、3 を比較すると対策を行うことで浸水深が減少する駅が多いことを示している。表-3 より対策後は Y19 と Y21 駅の出入口に止水板が有効であるということが明らかとなった。しかし、表-3 より N11 駅と Y20 駅は止水板を取り付けても越流する結果となった。Y21 駅のみ対策を行った後の方が地上の浸水深が 0.12m 大きいという結果が得られた。次に、Y21 駅の地上の構造物の対策を行う前後での地上出入口(図-6、7 の 1～5)浸水深の時間ごとの変化を示す。図-6、7 を比較すると対策を行う後は前に比べて浸水開始時刻が遅くなっているもののピーク浸水深が高いことを示している。対策を行うことで駅周辺の堤防高が高いことからそのまま地上部が浸水し続けていると考え



図-8 四つ橋線の浸水断面図(以下凡例は同じ)



図-9 長堀鶴見緑地線の浸水断面図

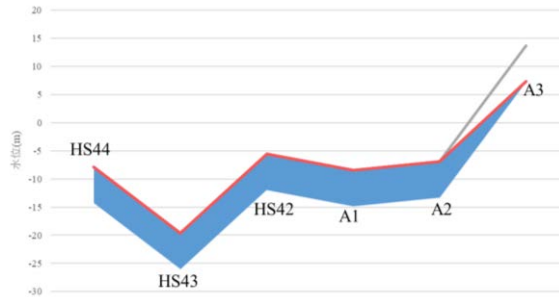


図-10 阪神なんば線・近鉄線の浸水断面図

られる。

(3) 間接浸水駅の浸水深

本検討では、間接浸水駅は地上で入り口は浸水しないが、他駅からの伝播によって浸水する駅と定義した。間接浸水駅は構造物面での対策を行う前は 72 駅であるが、対策を行うことで 37 駅まで減少することが示された。ほとんどの路線で地下鉄駅ホームの浸水深に変化が見られた。また、対策を行うことで、今里筋線、京阪線、谷町線、JR 東西線は浸水が見られない結果となった。4.(2) で示した様に地上の構造物の対策を行っても地上で入り口が浸水した四つ橋線(図-8)と長堀鶴見緑地線(図-9)について地下鉄駅の浸水深を示す。四つ橋線は沈下なしでも全駅浸水する結果となったが浸水深が減少していることが明らかとなった。長堀鶴見緑地線は沈下ありでは全駅浸水する結果となったが、沈下なしでは N22 駅までに減少した。N16 から N20 駅と N22 駅は特に浸水深が大幅に減少した。浸水深に変化が見られなかった阪神なんば線(図-10)の最大浸水断面図を示す。阪神なんば線は対策を行っても他の路線や乗換口からの伝播によって浸水する。

(4) 伝播の方向

対策を行う前と後での氾濫水の伝播の方向を図-11、12 に示す。図-12 より四つ橋線と阪神なんば線の伝播の

方向に変化が見られた。伝播の方向に変化が見られた Y14 駅と Y15 駅の間と HS43 駅と HS44 駅間の伝播の方向を縞模様で示した。構造物面の対策を行う前では Y14 駅の出入口から入ってきた氾濫水が隣駅へ伝播する結果となったが、対策後は地上出入口が浸水しないことから Y15 駅からの伝播によって浸水する結果となった。同様に HS43 駅と HS44 駅間は、堤防の対策を行った場合 HS44 駅の地上出入口からの流入せず HS43 駅から HS44 駅への伝播によって浸水した。

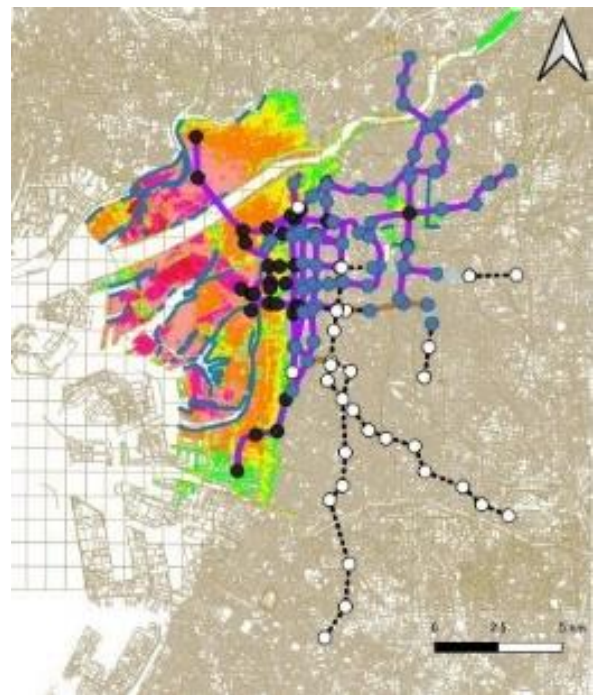


図-13 対策を行う前の止水板ありでの最大浸水深

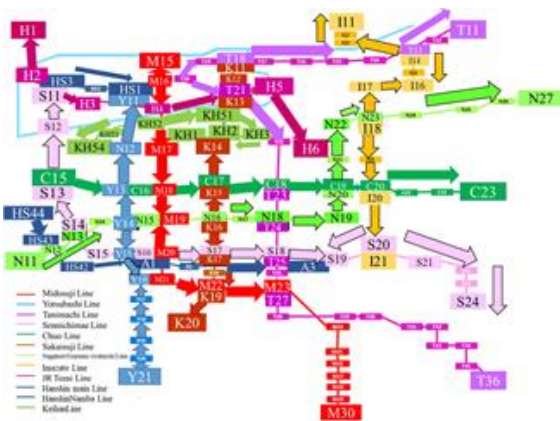


図-11 対策前の止水板なしでの氾濫水の伝播方向

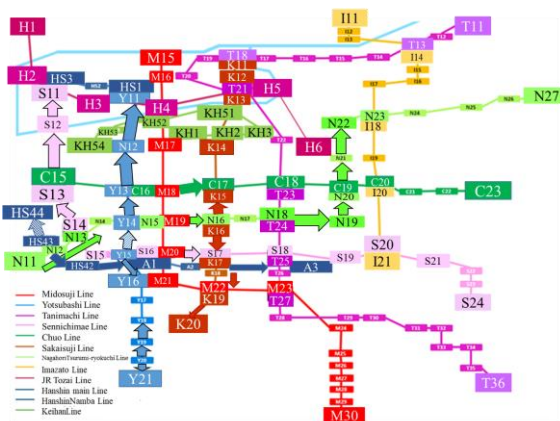


図-12 対策後の止水板なしでの氾濫水の伝播の方向

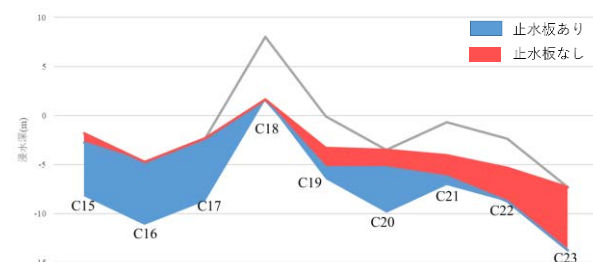


図-14 対策を行う前の止水板ありでの中央線の断面図

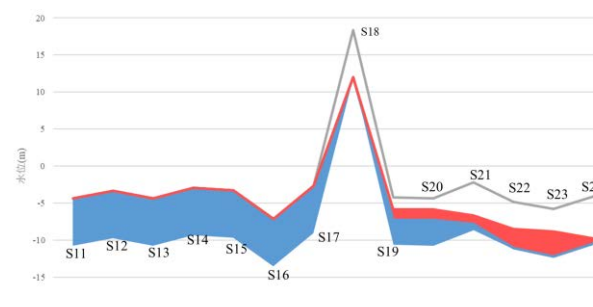


図-15 対策を行う前の止水板ありでの千日前線の断面図

5. 止水板設置後の比較

(1) 構造物面での対策を行う前での比較

地上の対策を行う前での地下鉄軌道内の最大浸水深を図-13に示す。図-13と4.(1)で示した図-5を比較すると中央線と千日前線で浸水深に変化が見られた。図-13よりC23,24駅及びS23,24駅は非浸水駅へと変化が見られた。図-14, 15は中央線、千日前線の断面における浸水深を示したものである。C22, C23駅は浸水深が0mとなりC21駅は止水板を取り付ける前は満水であったが、

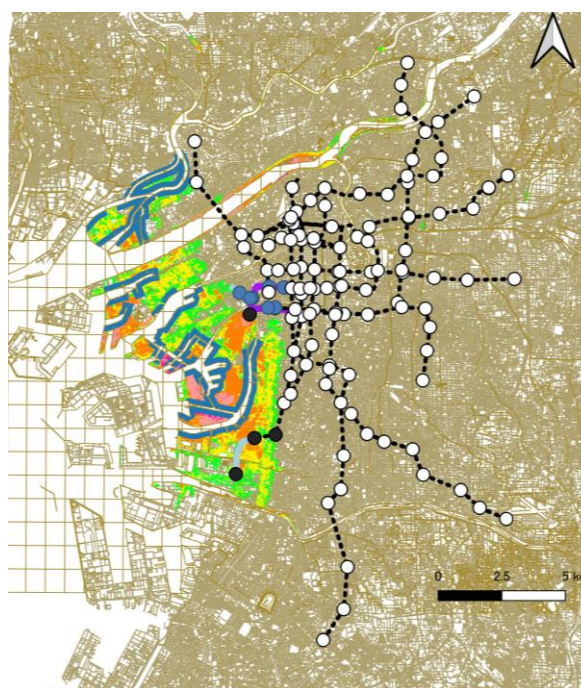


図-16 対策を行った後の止水板ありでの最大浸水深

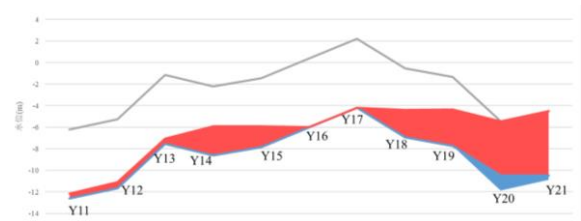


図-17 対策後の止水板ありでの四つ橋線の断面図

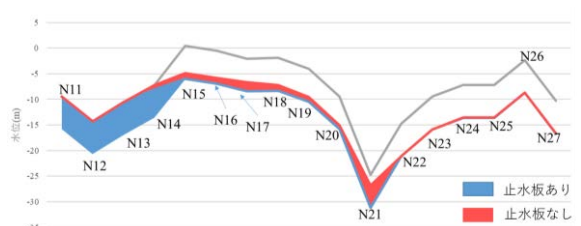


図-18 対策後の止水板ありでの長堀鶴見緑地線の断面図

0.86mにまで減少した。千日前線は止水板を取り付ける前はS21~S24駅はホームが浸水する状態であったが止水板を取り付けることで0.0mと変化した。止水板を取り付けることで堤防が地震で沈下しても、わずかではあるが浸水しない駅が4駅増えることを示している。

(2) 構造物面での対策を行った場合の比較

構造物の対策を行ってかつすべての出入り口に止水板を取り付けた場合の地下鉄の最大浸水深を図-16に示す。止水板なしでは4.(2), (3)より浸水駅数が42駅だが、止水板を取り付けることで11駅にまで減少した。図-17より四つ橋駅はY20, Y21駅が浸水する結果となった。Y20の浸水深は1.38mで、Y21駅は0.41mと4.(3)の図-8に比べて大幅に浸水深が減少する結果である。図-18より長堀鶴見緑地線は4.(3)の図-9と比べると間接浸水駅数は減少したものの止水板を取り付けてもN11~N14駅までホームは満水という結果であった。止水板を取り付けても浸水深に変化が見られなかった阪神なんば線は、N12駅の乗り換え口からHS43駅へと伝播することで浸水したと考えられる。止水板を取り付けることで、表-3に示した四つ橋線や長堀鶴見緑地線の地下鉄ホームの浸水深までも減少させる効果があることを示している。

(3) 氾濫水の伝播の方向

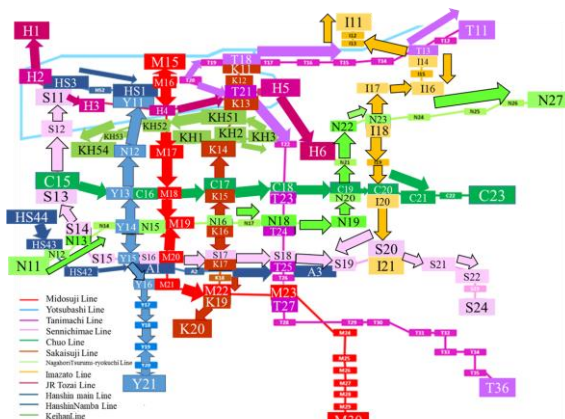


図-19 対策前の止水板ありでの伝播の方向

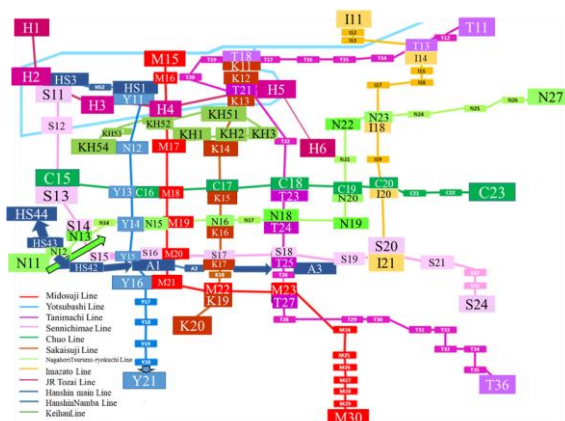


図-20 対策後の止水板ありでの伝播の方向

止水板を取り付けた条件で対策を行う前後の氾濫水の伝播の方向を図-19, 20 に示す。図-19 では図-11 と比較して伝播の方向には変化が見られなかった。図-20 に示した構造物面の対策を行った後で止水板を取り付けた場合阪神なんば線で変化が見られた。4.(4)の図-12 同様に図-20 では阪神なんば線は、図-19 とは逆に HS43 駅から HS44 駅へと伝播するというを示している。

(4) 止水板の有効性

本検討では駅の出入り口に 1.0m の止水板が使えるかについて検討を行った。図-5(左図)、13 より地上の構造物の対策を行う前は止水板を取り付けても地下鉄路線の浸水深に変化はあまり見られなかったが、図-16 より構造物の対策を行った場合は止水板を取り付けると大幅に浸水駅が減少した。しかし、地上の対策を行ってかつ止水板を取り付けても 11 駅が浸水する結果となった。このため、止水板を取り付けても越流する N11 駅や Y20 駅は止水扉で閉鎖する必要がある。

6. まとめ

本検討で得られた成果と課題を示す。

- 1) 地上の堤防や水門のような構造物面での対策を行う前と後で地上及び地下鉄の浸水範囲が大幅に変化した。
- 2) 1.0m の止水板を取り付けると地下鉄の浸水深まで変化した。地上の構造物の対策を行ってかつ止水板を設置すると浸水駅数が 11 駅にまで減少した。
- 3) 阪神なんば線は構造物対策を行ってかつ止水板を設置しても浸水深に変化が見られなかった。このため止水扉で完全に浸水を防ぐ必要がある。
- 4) Y21 駅のみ、地上構造物の対策を行った場合氾濫水到達時間が遅くなった分ピーク浸水深が高いことが示された。詳細を解明するのは今後の課題としたい。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会の科研費（19K04966、研究代表者：戸田圭一、20K050340、研究代表者：尾崎平）および関西大学先端科学技術推進機構研究グループ予算（2021年度）によって実施されたものである。

参考文献

- 1) 浅野統弘，石垣泰輔，尾崎平，戸田圭一：南海トラフ巨大地震による津波襲来時の大規模地下空間の浸水予測，土木学会水工論文集 B1(水工学)，Vol.70，No.4，I_1435-I_1440，2014。

- 2) 濱口舜，石垣泰輔，尾崎平，戸田圭一：記録的水災害に対する大規模地下空間の浸水に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.72，No.4，I_1363-I_1368，2016。
- 3) 寺田光宏，石垣泰輔，島田宏昭：密集市街地における地下駅浸水について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 20 巻，117-122，2015
- 4) 佐藤大介，武田 誠，村瀬将隆，薮下大貴：京都市の地下空間を考慮した浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 25 巻，155-164，2020。
- 5) 武田誠，島田嘉樹，川池健司，松尾直規：庄内川の想定破堤氾濫による地下空間への流入水量の検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 20 巻，46-53，2015。
- 6) 村瀬将隆，野澤智己，佐藤大介，武田 誠：洪水浸水想定区域図を用いた地下空間の浸水被害に関する基礎的検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 25 巻，1，2020。
- 7) 井上貴央，有村友孝，浮島徹，石垣泰輔，戸田圭一：地下空間の浸水対策としての樹脂製止水板の有効性に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 59 号 B，426-430，2016
- 8) Innovyzé : Hydraulic Theory, InfoWorks ICM Help version 8.5, 2017.
- 9) Innovyzé : Basic 2D Hydraulic Theory, InfoWorks ICM Help version 8.5, 2017.
- 10) Innovyzé : Weir, InfoWorks ICM Help version 8.5, 2017
- 11) 小谷美佐，今村文彦，首藤信夫：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第 45 巻，p356_p360，1998 年 11 月
- 12) 大阪府：津波浸水設定について，2013。
- 13) 国土地理院：基盤地図情報データ，<https://www.gsi.go.jp/kiban/>，2021 年 1 月 10 日閲覧
- 14) 財団法人大阪市土木技術研究会：大阪の川，1995。
- 15) 大阪市港湾局：大阪築港 100 年上・中・下巻，1999。
- 16) 大阪府：大阪府が早急に対応する取り組み，2018。
- 17) 大阪府：南海トラフ巨大地震土木構造物対策検討部会 部会報告，2014。
- 18) 岡部 良治，石垣泰輔，尾崎平，戸田圭一：外水氾濫時における地下鉄浸水及び減災対策に関する研究，平成 29 年度土木学会全国大会，学術講演会講演概要集，Vol.72，pp.CS4-010(2 頁)，2017。

STUDY ON THE INUNDATION OF OSAKA CITY SUBWAY STATIONS DURING TSUNAMI INUNDATION CAUSED BY THE NANKAI TROUGH EARTHQUAKE

Yuhei SHODA and Taisuke ISHIGAKI

The Nankai Trough earthquake is expected to occur within the next 30 years, according to the Headquarters for Earthquake Research Promotion. The risk of inundation by tsunamis is high in urban areas due to the extensive use of underground spaces like subway. Osaka Prefecture is working on a project to reduce the number of victims by 2024. In addition to that, it shows that the inundation area will be reduced to about 50%. In this study, we examined the inundation of subways and underground malls in Osaka City during a tsunami inundation using InfoworksICM, a hydraulic simulation software for urban areas including sewage pipes. We also evaluated the inundation of the subway when flood boards were installed. It was found that the number of flooded stations was reduced 112 to 11 when seismic retrofitting of embankment were taken and watertight panels were installed.