

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01266

研究課題名(和文)大都市における複合災害リスクに対するレジリエンス戦略の構築

研究課題名(英文)Resilience strategy for complex disaster risk in mega cities

研究代表者

尾崎 平(OZAKI, TAIRA)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：40351499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、わが国では局地的な集中豪雨が頻発し、全国各地で浸水被害が生じ、住民生活・社会生活に影響をきたしている。本研究課題では、地下空間を含む大都市を対象に、地震と水害の複合災害のリスクに対する複数のシナリオ条件と複数の適応策を提案し、シミュレーションモデルを用いて、地上の内水氾濫ならびに、地下空間の浸水被害の軽減効果を定量化した。また、評価した結果をもとに、地震と水害の複合災害に対するフェイズ別(短期、長期)の戦略的レジリエンス政策の有用性を考察した。

研究成果の概要(英文)：Recently, torrential rainfall has increased and there is a growing risk of the occurrence of floods in Japan. In this research, we propose multiple scenarios and multiple adaptation measures for the risk of combined disaster of earthquake and flood damage for large cities including underground space, and the effect of reducing flooding damage on the ground and the underground space was calculated using a simulation model. In addition, based on the results, we considered the usefulness of the strategic resilience policy for each phase against the combined disaster of earthquake and flood damage.

研究分野：環境防災学

キーワード：レジリエンス 都市水害 複合災害 地下空間

1. 研究開始当初の背景

わが国は過去に多くの自然災害による被害を受け、現在も自然災害の脅威にさらされている。これに対し、平成26年6月には国土強靱化基本計画が閣議決定され、①人命の保護を第一に、②社会の重要な機能が致命的な障害を受けず維持され、③国民の財産及び公共施設に係る被害を最小化し、かつ④迅速な復旧復興が行える社会の構築が望まれている。しかし、これまでの多くの研究は、単独の自然現象（例えば、地震、高潮、外水氾濫、内水氾濫等）に対する影響評価、対策の検討がほとんどである。

複合災害は、複数の自然災害が同時あるいは、近い間隔で起こることである。そのため、単独の自然災害に対する備えだけでは、想定されていない事象が発生する。具体的に、今回主題とする水害を例にすれば、内水氾濫対策として、下水道管渠の雨水能力排除の向上等があげられるが、地震による液状化等により管渠ネットワークが甚大なダメージを受けた場合には、その前提が大きく崩れる。そのため、複合災害リスクは不確実性を含むものと認識した上で、被害の幅を持った推定・評価および対策の立案が必要である。さらに、社会システムの早期の機能回復を図るレジリエントなハード・ソフト対策についても単独の対策効果を推定する研究は見られるが、複合災害を想定した分野横断的な整理・検討はなされていない。

2. 研究の目的

本研究の着想に至った経緯は、東日本大震災を経験し、震災直後に豪雨が発生したならば、どうなるのか、どのように対応する必要があるのかということ考えたことである。地震により地盤沈下や液状化が発生し、下水道システムの機能不全が浸水被害を拡大する、高潮対策の防波堤が地震により破堤し、高潮対策効果の機能が発揮されないなど、複数の自然災害がもたらす被害の大きさは甚大となり、単独の自然災害に対する備えの前提条件・想定が機能しないこともあり得る。そのため、根本的に想定を見直し、複合災害リスクを考慮した対応が必要であると考えた。特に大規模地下街（地下鉄を含む）を有する大都市においては、多くの人々が活動しており、ハザードに加え、人的な被害ポテンシャルが極めて大きいことから大都市の複合災害リスクを適切に評価し、その対応を考える必要がある。

本研究の特色は大阪市梅田地区のケーススタディを通じて、大都市における複合災害リスクを想定し、シナリオメイキングとレジリエンスの高い都市（人、空間）を構築するための適応策と戦略を明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1) 豪雨と地震の複合災害のリスク・影響評価

①概要

複合災害として、豪雨災害とポンプ場の機能停止を取り上げた。ポンプ場の機能停止は、人為的、機械的なトラブルや豪雨あるいは豪雨以外の災害（地震や津波等）により生じる恐れがある。本研究課題では、雨水排水をポンプに依存し、かつ大規模な地下空間を有する大阪梅田地区を含む大阪市の海老江処理区を対象に複合災害がもたらす被害の程度について考察する。

②評価ケースと評価指標

複合災害として、豪雨災害とポンプ場の機能停止を想定し、表-1に示すケースを設定した。ケース1~3はポンプ場が機能している場合、ケース4~6はポンプ場が機能停止している場合とし、内水氾濫による地下街の浸水を防除する方法として止水板の設置レベルを3段階で設定した。ケース2、5の地下出入り口の止水板の設置位置の選定は、事前のシミュレーションにより流入量が多い5箇所を抽出した。

対象豪雨は、平成20年8月に愛知県岡崎市美合町で観測された「平成20年8月末豪雨」（岡崎豪雨）とした（時間雨量：146.5mm/hr）。岡崎豪雨による内水氾濫による地上部および地下街への影響を評価するため、1)地上での湛水量、2)地上部の浸水面積、3)地上部の平均浸水深、4)地下への流入箇所数、5)地下への流入水量の5指標とした。ここで、1)~3)の地上部の評価は最大時の値を評価指標とした。

表-1 評価ケース

	ポンプ	止水板	説明
1	稼働	なし	平常時の位置づけ。急な豪雨により止水板の設置ができなかった場合
2		5カ所	降雨情報を基に事前対応し、流入量の多い上位5箇所に止水板を設置
3		すべて	ケース6に対するリファレンスケース
4	停止	なし	ポンプの不具合と豪雨災害がほぼ同時に起こった場合
5		5カ所	ポンプの不具合を受け、事前に流入量の多い上位5箇所に止水板を設置
6		すべて	ポンプの不具合を受け、事前に出入り口に止水板を設置

(2) 内水氾濫に対する適応策の評価

①概要

ここでは、内水氾濫による地下空間の浸水被害を軽減するために、内水氾濫のモニタリングに基づく止水板設置の有効性を検討する。気候変動の影響として、計画降雨量をベースに、段階的に降雨強度を引き延ばしている、複数の降雨強度を外力として設定する（図-1）。その上で、シミュレーションモデ

ルを用いて、現状の水位モニタリングなどの技術とそれを基にした止水板の設置による地下空間の浸水被害の軽減効果を降雨規模別に明らかにし、その有用性と限界を示す。

②評価ケース

外力条件7ケースと止水板の設置ルールとして、モニタリング方法3ケース、設置順序、設置チーム数を各1ケースの組み合わせで21ケース、さらにリファレンスケースとして、止水板設置を行わない場合（対策のなしケース）における各外力でのケースをあわせて、合計28ケースとする。

(3)対象地域

海老江処理区の面積は約1,215haである。同処理区内には海老江下水処理場に60m³/s、北野、天満堀川、出入橋の各抽水所に28m³/s、15m³/s、7m³/sの雨水排水ポンプが設置されている。梅田地区の地下街は公的な地下街出入口だけでも137箇所存在し、複数のビルが隣接しており、管理者の異なる複数の地下街で形成されている。そこにはJR・私鉄・市営地下鉄駅が地上・地下を合わせて7駅あり、また、梅田以外にも地下駅が11駅存在している(図-2)。

本研究課題では、海老江処理区全体の下水道ネットワークならびに地表氾濫の地上面を後述のとおりモデル化し、全域を対象としてシミュレーションを行うが、地下空間の流入量の評価に関しては、図-2(b)の四角で囲んだ地下街(ホワイトいうめだ、大阪地下街株式会社)を対象として考察を行う。同地下街を選定した理由は、事前解析において、同処理区内で最も浸水開始が早く、浸水量も多いことが予見されており、脆弱な地下街のためである。なお、ホワイトいうめだには35箇所の出入口が存在する。

(4)解析モデル

本研究では、内水氾濫解析にInfoWorks CSを用いた。同ソフトウェアは、内水ハザードマップ作成などにおいて利用されている。内水氾濫解析は下水道ネットワークを1次元モデル、地表面の氾濫を2次元モデルとした1D-2Dモデルである。本モデルにより、下水道管渠からマンホールを介して、溢水、再流入する現象を表現している。なお、本研究では、内水氾濫水は建築物(住区)内には流入せず、道路面のみを流れるとした。本モデルは、2011年8月末の豪雨(時間雨量77.5mm)を用いて検証を行っており、現地調査を実施した5地点における浸水深はおおむね妥当な結果を得ている。

主なモデルパラメータは、①流出モデル(固定係数法)の流出係数0.85(中心市街地)、0.65(周辺住宅地)、初期損失係数0.28mm、②氾濫解析の粗度係数0.043とした。また、対象地域における地下空間への浸水の影響を評価するために、地下街と地下駐車場の出入口の幅とマウンドアップ高を現地にて調

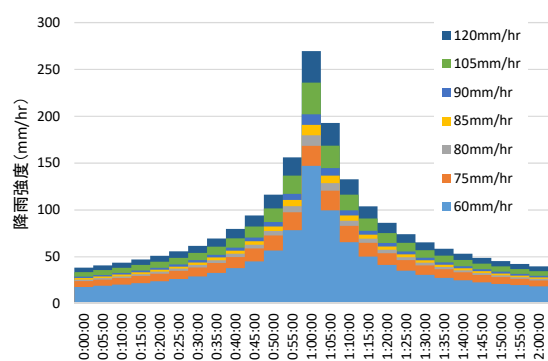
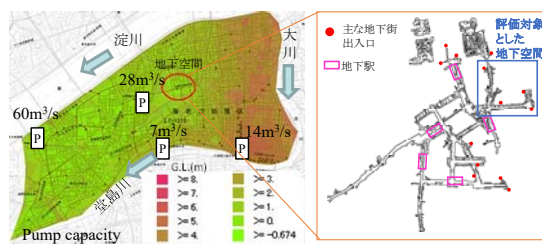


図-1 外力ケースのハイトグラフ



(a) 地盤高とポンプ場の排水能力 (b) 地下街と主な出入口・地下駅

図-2 対象エリア

査し、出入口を堰によりモデル化した。また、地下空間に加え、地下鉄駅、軌道部分ならびに、地下鉄軌道の地下空間部分から地上に出るトンネル坑口もモデル化している。

4. 研究成果

(1) 豪雨と地震の複合災害のリスク・影響評価

解析した結果を表-2に、地上部の浸水状況(広がりと浸水深)の一例としてケース1,4の結果を図-3に示す。

① 地上部の内水氾濫

ポンプ排水が阻害された場合、稼働時に比べて地上部の湛水量は、概ね倍増しており、その影響が大きいことを定量的に示した。ケース間(ケース1~3あるいは4~6)で地上の湛水量が異なる理由は、止水板の設置の有無により地下への流入が多いケース1やケース4では、ケース2,3あるいは5,6と比較して湛水量が少なくなっている。次に地上の浸水面積は、ポンプが停止された場合、稼働時よりも約20ha(1割ほど)浸水範囲が広がる結果となっている。今回の解析条件は道路部のみを流れるという条件で評価していることを勘案すると20haもの広がり差は大きいと解釈できる。最後に、平均浸水深で評価してもポンプ稼働時は約30cm以下であるのに対し、停止時は40cm以上となる。また、このことは図-1の浸水深の分布状況からもわかる通り、ポンプ停止により、広がり、浸水深ともに影響が大きいことがわかる。

② 地下部への内水氾濫の被害

本検討では止水板の高さを一律50cmと設定したためケース3、ケース6の場合でも出

入り口部の浸水深が 50cm 以上になった場合には、止水板を越流して地下に水が流れ込む。ポンプの稼働の有無により、流入箇所数で約 10 箇所、流入量で 1.8 倍程多くなり、地下にもたらす影響が極めて大きいことがわかる。また、止水板による効果について地下空間のみに限定すると止水板を設置することにより地下への流入量を軽減できていることがケース間の比較より読み取れる。しかし、特定箇所のみ止水板の設置（ケース 2 や 5）は、他の箇所からの流入を助長することがある。つまり、止水板を設置したことで、下流側に水が流れ、下流側の出入り口から浸水が発生する、あるいは浸水量が増加する、いわゆる上下流問題が発生する。本検討においても、このトレード・オフの関係が現れる結果となった。そのため、事前の対応策を十分検討した上で、対処行動の立案が必要である。

以上のことから複合災害はその発生確率は低いものの、生じたときのダメージは大きい。すなわち、複合災害のリスクは大きいことを定量的に示した。今回の検討では、湛水量、浸水深、地下への流入量のみによる評価に留まっているため、今後の課題として、地下空間の被害の程度の定量化ならびにリスク評価があげられる。

(2) 内水氾濫に対する適応策の評価

① モニタリング手法の違いによるリードタイムの比較

本研究ではモニタリング手法として、「地上監視カメラ」と「水位計」の 2 種類を評価対象としている。ここでは、初動開始のタイミングをそれぞれ、カメラ観測において地上の浸水が確認された時点、下水管渠内の水位が 7 割水深に到達したことが確認された時点としている。ここでは、対照系とした地下流入後ケースの初動開始時刻（地下への流入が確認された時点）と、各モニタリングにより初動を開始した時刻の差をリードタイムと定義し、比較を行った（図-4）。

監視カメラ、水位計のモニタリングにより、それぞれリードタイムを 5~10 分、18~20 分程度、確保することができる。同じモニタリング手法であれば、計画規模を上回る 75mm/hr 以上の降雨の場合、降雨量が異なっても、リードタイムの差は 1 分程度である。

すなわち、今回対象とした計画規模を上回る 75~120mm/hr 程度までの降雨の場合、監視カメラによるリードタイムは約 6 分程度であり、水位計によるリードタイムは 18 分程度である。このことより、水位計によるモニタリングは、初動行動の開始に大きなリードタイムを得ることができることが明らかとなった。

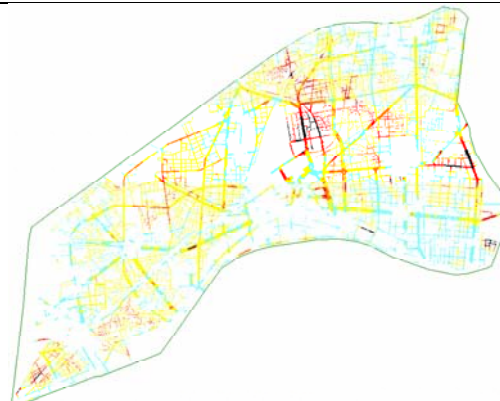
② 地上の氾濫状況

各降雨規模別のシミュレーションを行った。ここでは一例として、今回のシミュレーションで最大の降雨規模である 120mm/hr のケースにおける地下街（ホワイトイウめだ）

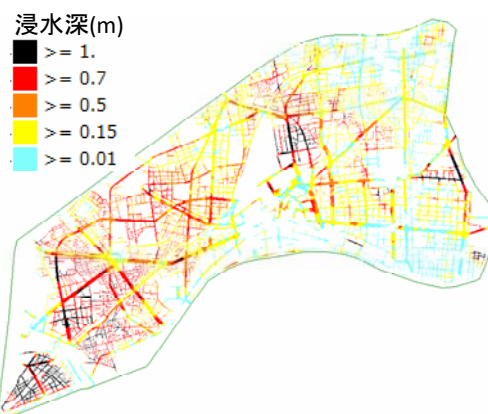
表-2 各ケースにおける計算結果

ケース	1	2	3	4	5	6
a)	673	683	771	1,200	1,213	1,411
b)	247	247	252	273	273	278
c)	0.27	0.28	0.31	0.44	0.44	0.51
d)	59	62	21	69	69	30
e)	262	234	202	474	426	375

a)~e)は次のとおり。a)：湛水量(千 m^3)、b)：浸水面積(地上)(ha)、c)：平均浸水深(地上)(m)、d)：地下への流入箇所数、f)：地下への流入量(千 m^3)



ケース1_ポンプ:稼働_止水板:なし



ケース4_ポンプ:停止_止水板なし

図-3 最大浸水深の分布（ケース 1, 4）

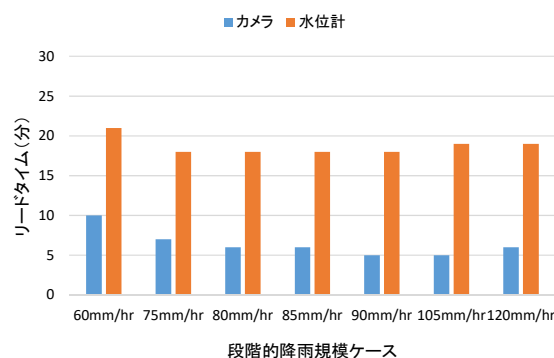


図-4 モニタリング手法別のリードタイムの比較

付近の地上部の最大浸水深の分布を図-5 に示す（流入の多い上位 5 カ所の出入り口地点も併記する）。

地下街への流入量は、出入口番号 W-1、W-2 の順で多い。両地点は浸水深が約 85cm と、

対象地下街の出入口地点で最も浸水深が大きい地点である。W-3～W-5の出入口の最大浸水深は、50cm以上であり、現行の止水板の高さ（50cm）よりも高い状態となる。

そのため、降雨規模が大きい場合、現状の止水板による対策のみでは、内水氾濫水が止水板を越流して、地下が浸水する可能性があることを示した。

③地下街への流入量の比較

止水板による浸水軽減効果を定量するために、止水板を設置しないケースと水位計に基づき止水行動を開始し、止水板を設置したケースの比較結果を図-6に示す。

降雨規模が75、80mm/hrの場合、止水板の設置により浸水被害を防ぐことができる。降雨規模が90、105、120mm/hrの場合、それぞれ約90、80、75%程度、地下街への流入量を軽減できる。

水位計に基づき初動を開始した場合でも、浸水被害が生じる理由を考察した結果、止水板を設置することで、初期の流入は防げているものの、先に示したように止水板の高さ（50cm）を超えて、内水氾濫水が地下街へ流入している。すなわち、水位計によりモニタリングを行い、初動を早く行った場合でも、止水板高が十分でないため、浸水が生じている。対象地域の止水板は、完全密閉型ではなく、人が乗り越えて出入りできる構造となっている。そのため、水位モニタリングによる情報提供だけでは、十分な対策とは言えず、あわせて、止水板の設置高さについても検討の必要性が示唆された。

次に、降雨規模別のモニタリング手法（「流入後」「監視カメラ」「水位計」）別の地下街への流入量の比較結果を図-7に示す。大局的には、降雨規模が同じ場合、モニタリング手法別の地下街への流入量に大差はみられない。また、降雨規模が90mm/hrを超えると流入量が大きくなる傾向が見られる。

大阪市における確率年と降雨規模の関係は20年、50年、100年確率雨量が、それぞれ約60、70、75mm/hrである。図-7の降雨規模別の地下街への流入量と照らし合わせると、75mm/hr以下の場合、すなわち100年確率雨量程度までの場合には、モニタリング結果に基づき止水板を設置する対策は有効である。降雨規模80、85mm/hrの場合の「流入後」と「水位計」のケースを比較すると、リードタイムが確保できていることにより、浸水被害を軽減できている。しかし、90、105、120mm/hrと降雨規模が大きい場合は、現状の止水板高50cmでは、止水板を越流して氾濫水が流入するため、単に初期行動だけを早める対策では不十分である。

以上のことから、現在の止水板高50cmを前提としたときの限界降雨強度は75mm/hrであり、その降雨規模は、概ね100年確率降雨量と同等である。すなわち、対象エリアにおいては75mm/hr程度までの降雨規模であれば、水位モニタリングに基づく止水板設置によ

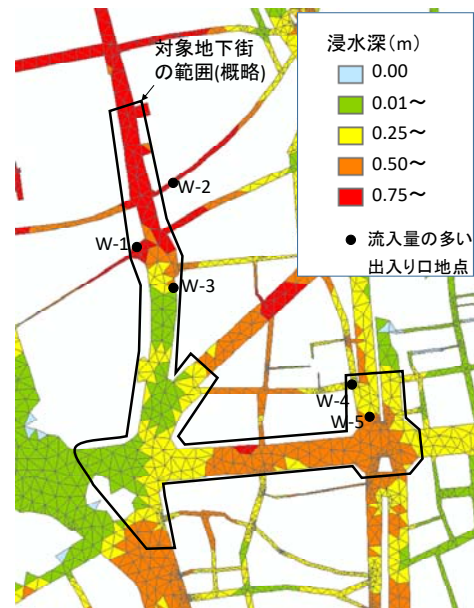


図-5 降雨規模120mm/hrの場合の地上の最大浸水深（対象地下街周辺部のみを表示）

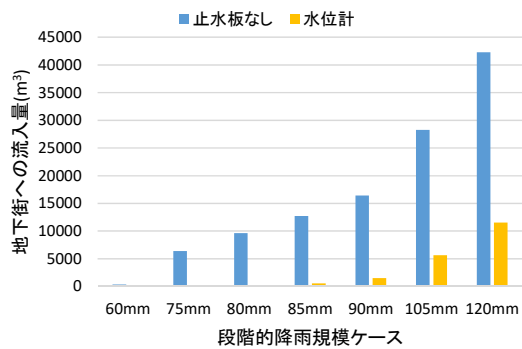


図-6 止水板設置の有無による地下街への流入量の比較

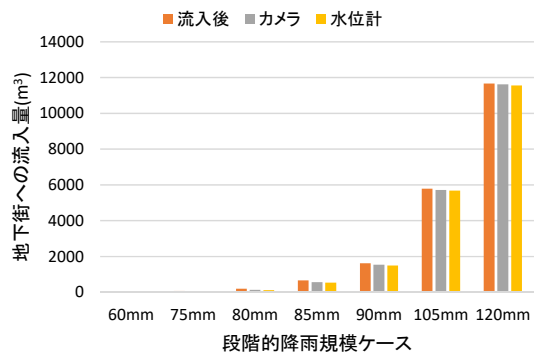


図-7 モニタリング手法別の地下街への流入量の比較

る内水氾濫対策は有効であるが、それを上回る降雨に対しては、その他の対策と併せて検討が必要である。

④ 止水板の改良による適応策の効果

③の検討結果より、現状の止水板による対策では、将来予見される豪雨に対して、地下空間の脆弱性は改善されないことが明らかとなった。そのため、ここでは、越流量の多

い出入り口 3 カ所を現状の 50cm 高の止水板から完全止水型の止水板に変更した場合の検討を行った。

その結果、降雨規模が 120mm/hr の場合、地下への流入量は 90%以上軽減できた。また、降雨規模を 180mm/hr とした場合でも、地下への流入量を約 80%軽減できることを明らかにした。

この結果より、今後の気候変動による豪雨に対する適応策として、現状の止水板を数カ所改良することにより、地下への流入量、すなわち被害を大幅に軽減できることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

①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), 査読有, Vol. 74, No. 4, 2018, pp. I_1465 -I_1470.

②尾崎平, 稲森優吾, 盛岡通: 巨大地震に対する地域のレジリエンス評価指標の提案 - 四国南岸三市町を対象に-, 環境共生, 査読有, Vol. 30, 2017, pp. 32-42

③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脆弱性に関する検討, 査読有, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 72, No. 4, 2016, pp. I_1363 -I_1368

④Taisuke Ishigaki, Ryuji Kawanaka, Taira Ozaki, and Keiichi Toda: Vulnerability to Underground Inundation and Evacuation in Densely Urbanized Area, Journal of Disaster Research, 査読有, Vol. 11, No. 2, 2016, pp. 298-305

[学会発表] (計 11 件)

①尾崎平, 川口徹矢, 盛岡通: 大規模地下空間の浸水対策としての管内水位情報の有用性に関する一考察, 第 54 回下水道研究発表会講演集, 2017

②尾崎平, 石垣泰輔, 濱口舜, 戸田圭一: 複合災害を想定した内水氾濫解析と考察, 第 53 回下水道研究発表会講演集, 2016

③尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 市民の都市水害に対するリスク認知と対応策への態度, 第 52 回下水道研究発表会講演集, 2015

[図書] (計 2 件)

①尾崎平 (分担執筆), エヌ・ティー・エス, 豪雨のメカニズムと水害対策 降水の観

測・予測から浸水対策, 2017, pp. 199-210 (都市部における雨水制御システム)

②石垣泰輔 (分担執筆), エヌ・ティー・エス, 豪雨のメカニズムと水害対策 降水の観測・予測から浸水対策, 2017, pp. 107-115 (大規模地下空間の浸水メカニズム)

[その他]

ホームページ等

<https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/emgt/project/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 平 (OZAKI, Taira)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号: 40351499

(2) 研究分担者

石垣 泰輔 (ISHIGAKI, Taisuke)

関西大学・環境都市工学部・教授

研究者番号: 70144392