

文化遺産防災技術研究プロジェクト

プロジェクト代表者：衣笠総合研究機構・教授 鈴木 祥之

共同研究者：大窪 健之、深川 良一、里深 好文、小林 泰三、藤本 将光、吉富 信太、持田 泰秀、
福山 智子

1. 防火環境整備技術の開発【大窪 健之、金 度源】

研究目的

(1) 地域防災情報ネットワークの開発

個別に設置されている住宅用火災警報器が感知した火災発生情報を地域全体で共有し、地域住民による初期消火や避難活動に迅速に対応できるよう、情報共有システムの開発と実践配備を目指す。社会実験などを通して地域固有の適応性能について検証しながら、火災と健康障害以外の発災情報も共有できるよう高機能化の可能性についてニーズの把握を行う。

(2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ホルダーの開発

消防隊が即座に対応できないような大規模災害時には、消火活動の遅れは日本の歴史文化都市にとって致命的な被害となる。しかし現状の公設消火栓はプロの消防士が3人がかりで操作する必要があるなど、市民一人の力では取り扱いが不可能である。このため、地域に残された市民の力だけで最低限の消火活動が可能にするために、特別な訓練を要することなく日常的に散水などにも利用することのできる、市民一人で操作が可能な高機能型市民消火栓を開発する必要がある。さらに、景観に調和し使いやすく平常時にも役立つ機能を備えた、街頭設置できる多機能型消火器ホルダーの開発が求められている。

研究成果の詳細

(1) 地域防災情報ネットワークの開発

これまで実装完了している「火災と急病」以外の新たな災害情報の配信可能性について、火元の正確な場所把握、自宅の場所を明示したハザードマップ配信、避難完了信号の発信などに対して期待が寄せられている。今年度は、青森県黒岩重伝建地区で実証運用中のシステムをモニタリングしながらデータ収集を継続している。

研究成果の一部は以下のように今年度の特許申請につながっており、研究面でも今後学会への論文投稿を経て、広く社会に貢献していく予定である。

- ・大窪健之（共同発明者）：地域防災情報システム・警報システム、特許番号：6340197、2018年5月18日（登録）、特願2014-005324、2014年1月15日（出願）
- ・大窪健之（共同発明者）：地域防災情報システム、特許番号：6325412（2018年4月20日）、案件番号：2014-042、出願番号：2014-206759

(2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ホルダーの開発

市民消火栓では、ホースの重さの問題から1本当たりの長さが30 m程度に制限されるため、これまで消火範囲が限定されてしまう問題があった。このため付近の市民消火栓からホースを持参すれば、ノズルを取り外すことなくそのままワンタッチで延長が可能な機構を開発し、さらにノズルヘッドのコンパクト化を図ってきた。その成果は以下のように今年度の特許取得に

結実している。

- ・大窪健之、横井亮（共同発明者）：消火用ノズル、特許証 6384917 号、出願番号：2014-206815、登録日 2018 年 8 月 17 日

加えて元々市民利用の困難な公設消火栓に対して、取り付けだけで市民用消火栓ホースの接続が可能になる減圧バルブ付スタンドパイプを試作し、訓練等を経て改良を重ねてきた。2018 年度は津和野重伝建地区で実施した訓練の結果を踏まえて、以下のように学会誌への寄稿により成果報告を行った。

- ・大窪健之、中林秀光、金度源：伝建地区における防災訓練の実施とその改善提案 一島根県・津和野重要伝統的建造物群保存地区を対象として一、建築防災、2018 年 11 月号、一般財団法人日本建築防災協会、pp.41-46、2018.11
- ・中林秀光、大窪健之、金度源：重伝建地区における防災訓練の実施とその改善方針の提案～島根県津和野重伝建地区を対象として～、歴史都市防災論文集（報告）、vol.12、pp.241-246、2018 年 7 月



写真1 スタンドパイプと減圧バルブの設置訓練



写真2 市民用消火栓ホースでの放水訓練

今後の研究計画・展開

(1) 地域防災情報ネットワークの開発

今後は、火災発生情報や急病発生情報だけでなく、洪水や土砂災害、津波などの危険情報についても即時的な配信を可能とする多様な防災情報の受配信機能の実装と、スマートフォンによる地図情報の配信や電話による音声通知以外にも、既存の防災放送やサイレンなどと連動した多角的な情報配信により、市民への確実な情報伝達機能の実装を目指す。

(2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ホルダーの開発

今後は、これまで実施してきた、即時的に隣接する収納箱から取り出したホースを使って延

長可能なノズルシステム開発と、直観的に操作できる回転ドラム型収納箱の試作をふまえ、停電時照明機構やサイン表示などのデザイン面での改善を加えて現場での社会実験を継続し、改良を加えていく予定である。消火器ホルダーについても、現場での仮設による住民評価を踏まえながら、地域特性に応じたデザインと機能の向上を目指して開発を継続していく予定である。

2. 伝統木造建築物の耐震設計・耐震補強設計法の開発

【鈴木 祥之、大窪 健之、吉富 信太、金 度源、棚橋 秀光、佐藤 英佑】

研究目的

高山市、与謝野町、金沢市などの伝建地区などの伝統構法木造建築物を引き続き調査するとともに、以下のように、耐震設計法、耐震改修法に関する研究を行う。

(1) 与謝野町旧加悦町役場庁舎の耐震改修のための調査研究

与謝野町旧加悦町役場庁舎の改修のための調査研究を行って、構造補強法、耐震補強法を開発して、改修計画案を提案する。また、耐震性能評価に必要な主要構造要素の設計用復元力特性の評価を行う。

(2) 本格的な伝統構法の技法による三重塔の設計法の開発

2012 年から設計に着手してきた三重塔は、細部に至るまで全て本格的な伝統的構法によるもので、設計法、特に耐震設計法の開発を行う。

(3) 伝統的構法木造建築物の耐震設計法マニュアルの作成

伝統的構法が、現在、確認申請が難しく危機的な状況にある。この状況を打開するために、実務者、行政などが使える耐震設計マニュアルを作成する。

研究成果の詳細

(1) 与謝野町旧加悦町役場庁舎の耐震改修のための調査研究

1929 年 7 月に竣工した加悦伝建地区の与謝野町旧加悦町役場庁舎（写真 3）の耐震改修のために、2018 年に地盤調査、木部の劣化調査、構造詳細、耐震調査、防火・避難など本格的な調査研究を行った。主要な構造要素である外壁鉄網モルタル壁（スタッコ仕上げ）と、1 階東側、西側の柱列に設けられた方杖（写真 4）は、耐震性、防火性を高めるために、当時の最新の技術、工法を採用したとされ、構造的・意匠的に重要であるので、これらを生かした補強、改修とする。

外壁鉄網モルタル壁、方杖など主要構造要素の設計用復元力特性は、耐震性能評価に必要で



写真 3 旧加悦町役場庁舎の外観



写真 4 1 階の方杖

あり、これらの設計用復元力特性について、実験あるいは文献から評価を行った。

現況の耐震診断の結果、耐震補強が必要となり、また、構造詳細調査による構造安全性の検討から構造補強が必要となったため、構造補強設計、耐震補強設計を行い、京都府指定有形文化財であることを考慮して歴史的、文化財価値を損なうことのないように耐震改修計画案を提案した。それに基づいて、2019 年度に改修工事を実施予定である。

(2) 本格的な伝統構法の技法による三重塔の設計法の開発

細部に至るまで全て本格的な伝統的構法による三重塔は、2012 年から設計に着手してきた。多雪区域に建てるために、積算荷重を考慮して構造解析、地震応答解析を実施して、各部の構造安全性、耐震安全性、耐風安全性を検討した。2018 年 12 月に竣工した。三重塔などは、構造部材が多く、また、複雑に組まれているために、3 次元立体モデル化の手法とともに 3 次元立体モデルによる構造解析、地震応答解析などの解析法については、今後とも研究開発が必要である。



写真 5 伝統構法の技法による
三重塔

(3) 伝統的構法木造建築物の耐震設計法マニュアルの作成

伝統的構法木造建築物は、現在、限界耐力計算による確認申請がなされている。一般的な木造（在来工法）の仕様規定を満たせば伝統的構法ではなくなる。これらの仕様規定を適用除外するために性能規定型の設計法である限界耐力計算によって設計されている。しかし、限界耐力計算が高度な設計法であるため、実務者、行政などが使える、石場建てを含む伝統的構法木造建築物のための耐震設計マニュアルを作成し、刊行する。

今後の研究計画・展開

京都市、高山市、与謝野町、金沢市などの伝建地区などの伝統構法木造建築物を引き続き調査するとともに、与謝野町旧加悦町役場庁舎については、2019 年度に改修工事がなされるので、調査が難しかった基礎、壁面内部などの箇所について引き続き調査を行う。

三重塔については、構造解析、地震応答解析など解析法の開発とともに、細部に至る木部の設計法の開発を行う。

伝統的構法木造建築物の耐震設計法マニュアルについては、実務者向けの講習会等を開催して普及を図るとともに、マニュアルを実務者が使えるように設計手法を改訂する。

3. タイ・アユタヤおよび熊野古道、安国寺における地盤災害調査・観測・変状予測【深川 良一、里深 好文、小林 泰三、藤本 将光、石田 優子】

研究目的

王朝時代の仏塔の傾斜が問題となっているタイ・アユタヤについては、現地の地盤特性を把握し、それを反映させた地盤変形解析を実施する。さらに現地調査および変形解析結果を踏まえた防災対策を提案する。土砂災害リスクの高い熊野古道については、横垣峠を対象に現地の降雨特性、地下水変動特性を把握し、危険度評価モデルを提案する。また、観光客の避難支援について、災害リスクと防災対策を周知するためのサイトの構築、斜面の変状を可視化する装置の開発と普及を推進する。

研究成果の詳細

タイ・アユタヤでは、現地調査データに基づいた解析モデルを作成し、2011 年と同等の洪水が今後発生すると仮定して沈下解析を実施した。地下水位の上下動に伴い沈下量は変動するが、洪水終了後における洪水発生前からの変化量は小さく（仏塔中心構造部において約 0.029° の傾斜増加）、洪水が仏塔に及ぼす影響は小さいと考察された。ただし、解析結果は、仮定条件における理論上の数値であり、不確定な要素を含む。そこで、実際の仏塔の挙動を把握するために、アユタヤ歴史公園事務所に協力を依頼して、傾斜計測を開始した（写真 6）。

熊野古道では、雨量、風向風速、地下水のデータを蓄積するとともに、地すべり地の地下水位変動特性について詳細分析を実施し、目詰まりを起こしやすい排水工（現地で最も効果がある対策工）の管理への利用と、降雨応答特性から雨量を用いた危険度評価の可能性を見出した。

斜面の変状可視化装置（写真 7）については、立命館大学工作センターの協力で試作品の改良を重ね、室内土槽実験での動作確認および崩壊の 1 時間前から安定的に斜面の変状を可視化できることを確認した。また、近傍斜面で崩壊や地すべりが多発している安国寺の後背斜面に変状可視化装置を設置し、現地実験を開始した。

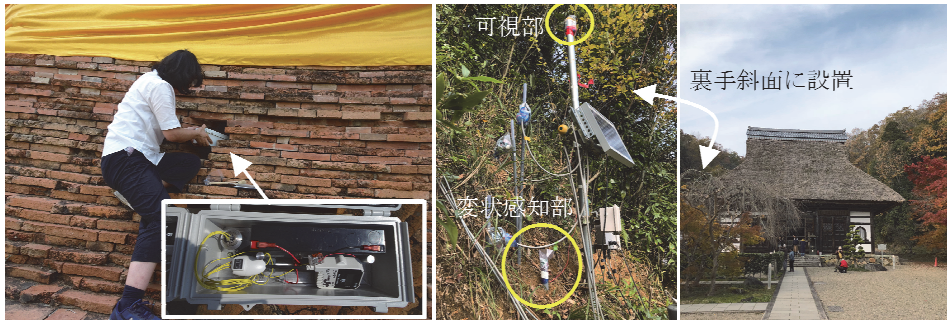


写真 6 傾斜計設置（アユタヤ仏塔）

写真 7 変状可視化装置設置（安国寺）

今後の研究計画・展開

タイ・アユタヤは、傾斜計測データにより仏塔の変位状況を把握した上で、防災対策の検討を進める。また、計測期間の地下水位データを用いて変形解析を実施し解析の妥当性を検証する。

熊野古道では引き続き各種データを蓄積し、観測サイトにおける気象、水文特性分析を進め、結果を反映させた安全管理手法（案）の策定を目指す。また、防災・観光情報サイトのコンテンツ充実を図り、情報発信を推進する。

変状可視化装置は、性能において個体差があるため機構の改良を図る。室内試験では、製品の性能検証、適切な設置位置と埋設深さの検討、感知（変状）と崩壊の開始時刻と推移状況に着目した分析を行う。安国寺では、変状可視化装置の頭部に取り付けた傾斜計のデータをもとに機器の動作確認を、また、ウェブカメラとタイムラプスカメラの映像をもとに視認性の確認を行い、現地設置における改良を行う。

4. 地盤災害、河川災害減災に向けた土砂・河川災害現象の解明、現地発生材を利用した経済的かつ効果的な防災対策工の提案および効果的な流域管理手法の提案【深川 良一、里深 好文、小林 泰三、藤本 将光、石田 優子】

研究目的

清水寺に関しては、引き続き重要建造物後背斜面内地下水流動特性の把握、斜面安定性評価のためのモニタリングシステムの開発を目指す。今年度は、超音波水分動態観測手法を用いた原位置の透水試験や水分状態の変動を計測した。それらの結果を踏まえた浸透解析、動的安定性評価を実施する。

研究成果の詳細

重要建造物後背斜面において雨量、間隙水圧、変位量を長期モニタリングし、水分量変動に伴う変状および斜面崩壊発生機構を検討した。超音波水分動態観測手法を用いたシステムを新たに設置し（図 1）、システムの検証を行った。また、2次元の飽和－不飽和浸透解析を実施し、観測斜面の間隙水圧値と比較した。地下水位の変動を数値解析で再現することが難しく、側方流や深部浸透などの影響を大きく受けていることが確認された。

昨年度提案した、地形判読結果と湧水状況等を含む現地踏査結果を組み合わせ、潜在的な斜面崩壊の発生の危険性の高い箇所を抽出する方法の有効性の検討を行った。田上山地（地質：花崗岩）で同様の解析、現地調査を行い、京都府清水寺周辺の山地（地質：堆積岩）の結果と比較した。花崗岩山地は比較的地下水流動のスケールが小さいのに対し、清水寺周辺の地下水の変動は広域に及ぶ特徴をもつことが示された。

2018 年台風 21 号では、境内および周辺の山地において大規模な倒木被害が発生した（写真 8）。倒木では杉は根系全体ごと倒れる、ヒノキは幹で折れる傾向がみられた。また、風が巻いた場所ではねじれるように倒木した被害も認められた。これらの倒木の実態および倒木に伴う斜面の変状、今後の土砂流出発生の可能性についても現地調査を行った。

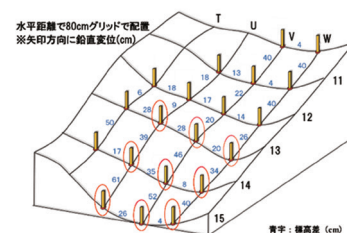


図 1 超音波水分動態観測手法の設置現場の様子と設置位置



写真 8 成就院周辺における倒木被害の様子

5. 伝統木造建築物の構造特性の解明【吉富 信太】

研究目的

伝統的木造建築物の構造特性をシステム同定手法および 3 次元立体解析モデルによる応答解析法により明らかにする。建物の振動計測に基づいて構造特性を推定するヘルスモニタリング手法を伝統的木造建築物へ適用可能なかたちに拡張することである。

研究成果の詳細

従来の構造特性を推定するヘルスマonitoring手法が、ビル等の剛床建物を対象とした多層せん断モデルを用いて、層全体の特性推定を想定しているのに対し、古い木造建物の耐震補強などへの応用を考えると、建物の層方向だけでなく平面内の部位別の構造特性の推定が可能な手法が重要である。

本研究では、京都市与謝野町にある旧加悦町役場庁舎（写真 9）を対象として、24 台の微動計を用いた立体的な振動計測を行った。微動計測や起振機を用いた加振実験の結果、柔床的な立体挙動が確認できた。またこの建物については、実際の構造調査の結果を参考にして詳細な立体解析モデルを構築し、耐震補強計画の効果について検討した。さらに、伝建地区でよくみられるような壁を接して建つ連棟の町屋建築について、単独で建つ建物との挙動の違いについて検討するために、24 台の微動計を用いた振動計測により立体的な挙動把握を試みた。こうした伝統木造の耐震性能の評価においては、質量や非線形特性の推定が重要となる。そのため、柔床多層多構面の伝統木造建物を想定した立体せん断モデルの構面単位の剛性、減衰係数、および質量を直接推定可能な手法を提案した。



写真 9 旧加悦町役場庁舎

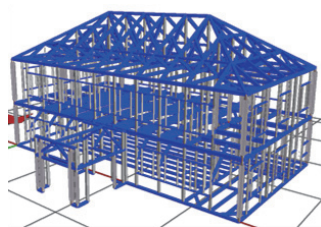


図 2 立体解析モデル

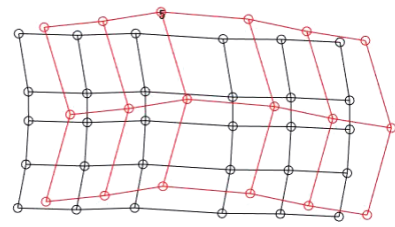


図 3 立体的振動性状把握



写真 10 長江家住宅

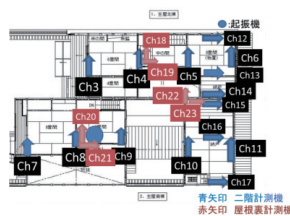


図 4 振動計測計画と振動計測機器

6. 免震レトロフィットの耐震計画・施工計画の分析と評価【持田 泰秀】

研究目的

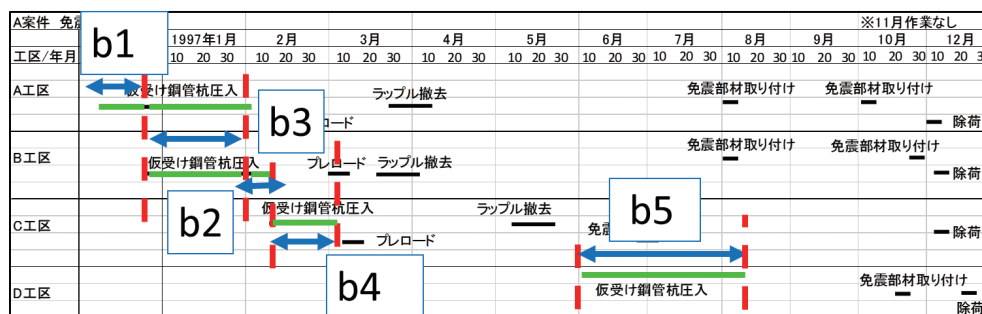
国内の代表的な基礎免震レトロフィットの幾つかの施工事例について、施工計画の中の、主に施工工程や施工時の沈下性状の調査分析を行った。まず、施工工程については、基礎免震レトロフィットの仮受けの工法を分類し、それらの各々の工事項目の特徴を明らかにするとともに、工事項目毎の適正な組数、標準的な歩掛の評価を行った。次に、沈下性状については、仮受け鋼管杭と仮受けサンドルといった、仮受け時の支持位置（深さ）の違いによる影響を調査分析した。

以上から、今後の基礎免震レトロフィット工事における施工工程作成や施工時の沈下管理手法の確立のための貴重な基礎データとなることを目的とする。

研究成果の詳細

2018 年度の研究の遂行については、2 つの取組みに大きく分類される。

- 6-1. 施工工程については、国内の免震レトロフィット工事 9 案件の工事实績より、仮受け鋼管杭工法、仮受け支保工工法及び凍結土工法の 3 種類に分類した。昨年度は、分類毎に仮受け工程の近似評価を行い、これまで、明らかにされていなかった工程歩掛を提案したが、日作業組数の定義が十分に考慮出来ていなかったため、本年は、この点を改善して、 $D_i = Q / (S_i \cdot B)$ 、 D_i = 工事別の作業日数（評価値）、 S_i = 各工事歩掛の評価値を作成した。具体的には、S1:掘削土量に対する歩掛 15.59 (m³ / 日・組)、S2:鋼管杭圧入本数に対する歩掛 0.94 (本 / 日・組)、S3:鋼管杭除荷本数に対する歩掛 2.98 (本 / 日・組)、S4:H 形鋼設置本数に対する歩掛 7.59 (本 / 日・組)、S5:凍結管設置本数に対する歩掛 0.38 (本 / 日・組)、S6:解体凍結土量に対する歩掛 9.49 (m³ / 日・組) これより、免震レトロフィットの施工計画での早急な工程計画検討を可能とした。尚、この内容については修士 1 回生、伊原大貴、免震レトロフィットにおける仮受工法の工程歩掛に関する研究、日本建築学会第 34 回建築生産シンポジウム若手研究者優秀発表賞（2018 年 7 月 27 日）を受賞している。



各工区ごとに 1 日当たりの作業量を $B(i) = (b1 + b2 + b3 + b4 + b5) /$ 延べ作業日数 (D) にて算出。
日作業組数の定義の一例

- 6-2. 施工時の沈下管理については、国内の基礎免震レトロフィット工事 4 案件の工事实績より、仮受け鋼管杭工法、仮受けサンドル工法の 2 種類に分類し、各々の施工時の沈下性状の調査分析を行った。既存の直接基礎からの仮受けでの免震装置の挿入を行う過程で、元々の支持地盤は相当に剛固な性状である。狭小な空間での鋼管杭の使用は、支持機能を効率的に発揮させる一方で、杭体の変形や地盤のリバウンドの影響を大きく受け、仮受け時の沈下管理がサンドル工法より困難であることを明らかにした。今後、この両者を比較評価し、仮受け工事における沈下管理の基礎データとしての活用を図る。

7. 歴史的実構造物の耐久性評価調査【福山 智子】

研究目的

本研究の目的は、軍艦島鉄筋コンクリート構造物群に代表される歴史的な構造物の耐久性向上と建物延命である。

本研究では、軍艦島構造物群を検討対象として取り上げた。構造物の耐久性には鉄筋の健全性が主要なファクターである。鉄筋の防錆には部材表面に補修材の皮膜を設け劣化因子の浸入を防ぐ必要があるが、軍艦島構造物群は世界遺産であるため外観を変えずに補修を行わなければならない。適切な補修材の選定のため、鉄筋を埋設したコンクリート試験体に各種補

修材を施工し、実環境に長期間（10 年）暴露し毎年 4 月と 6 月に定点測定を実施することで補修材の耐久性と防錆性能について検証する。

※このプロジェクトの主催は日本コンクリート工学会と東京大学であるが、東京理科大学、芝浦工業大学、名城大学、琉球大学その他の建築材料の耐久性に関する研究室・研究機関が参画する共同プロジェクトであり、各機関は独自の調査を実施することができる。

研究成果の詳細

写真 11 に示すように、各種表面補修材を施工したコンクリート試験体を 2016 年から暴露している。紫外線などによる補修材の劣化と海水浸透による鉄筋の腐食状況などを把握するため、試験体表面から非破壊で各種項目（色差、光沢度、含水率、コンクリートの比抵抗、分極抵抗、自然電位など）の測定を行った。この測定結果は経時変化として取りまとめられ、補修材の耐久性評価指標となる。福山のグループは次年度以降も引き続きこの調査に参画し、歴史的な鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究を行う。また、軍艦島は理想的な天然暴露試験場ともいえるため、福山の主な研究テーマである鉄筋コンクリート構造物の電気化学的非破壊検査に関する研究成果の実証実験を実施するフィールドとする予定である。



写真 11 試験体暴露と測定の様子

前述の通り、軍艦島は海水に対する構造物の耐久性検証暴露試験場として適しているが、2018 年秋に複数の台風の直撃を受けたことから、写真 12 に示すように波浪による構造的な被害を受けている。これまでの検討では、海水による塩害と鉄筋腐食の促進のみが注目を集めていたが、軍艦島構造物群の補修・維持のためには、このような榴弾による被害についても考慮する必要があることが明らかになった。

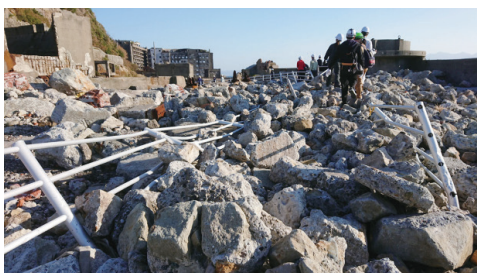


写真 12 台風による被害の様子