

# 第 7 章

## 関連研究



## 7.1 ワイヤレスセンサネットワークによるモニタリングシステムの構築とその活用に関する研究

石塚洋一、藤本孝文、藤島友之、杉本知史

### 7.1.1 ワイヤレスセンサネットワーク用ゲートウェイ、データサーバーおよび GUI 等の構築【石塚】

2016年度来、ワイヤレスセンサネットワークの展開を続けて来た。2017年度までに佐世保の斜面地および熊本城内の石垣変状モニタリング用に設置を行った(図7.1.1)。しかし、設置後様々な要因のトラブルが発生し、その都度現地に出向き調整を行う必要が生じた。そのため、2018年度は、学内にて様々な調整や予備試験を実施可能にするため、学内に2か所の拠点(杉本研究室用および石塚研究室用)形成を行った。また、当該システム他分野応用として、2019年3月に長崎県諫早市の農地において、モニタリング用のワイヤレスセンサネットワーク設置(長崎県農林技術開発センターとの共同研究)を行った。

本システムは、図7.1.2に示すようなIoT(Internet of Things)技術と共に、WoT(Web of Things)技術により成り立っており、上記のような拠点(サイト)追加の際には、ソフトウェア的には、ゲートウェイ、データサーバーおよびGUIの追加・修正を行う必要がある。

ゲートウェイ(Data Relay Server)は、ワイヤレスセンサネットワークの無線規格と採用しているZigbeeと大学に設置済みのサーバーとを接続するためのLTE回線間に、Raspberry PIとLTEルーターにより構築している。Raspberry PIには、サイトごとに取得対象の物理量に合わせたデータ取得コマンドの設定が必要である。LTEルーターには、ホスト名やポートマッピングの設定を行う。

また、MISTインフラ病院サーバーおよび各サイトのゲートウェイには、オープンソースのドキュメントデータサーバーであるmongodbを設置している。本データベースへは、indexと呼ばれる配列要素へ番号を追加することで、サイトの追加が終了するために、mongodbのシステム的な修正は不要である。ただし、物理量を直接センシングする各センサーノードには、上記indexの固有番号を一つずつ割り振る必要がある。

これらを集約するMISTインフラ病院サーバーには、上記データサーバーと共に、図7.1.3に示すGUI(Graphical User Interface)をhtml/Javaベースで構

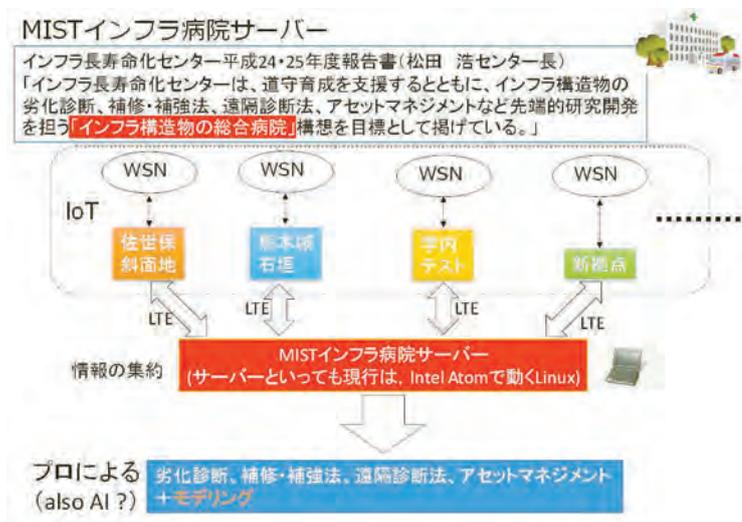


図 7.1.1 MIST インフラ病院サーバー

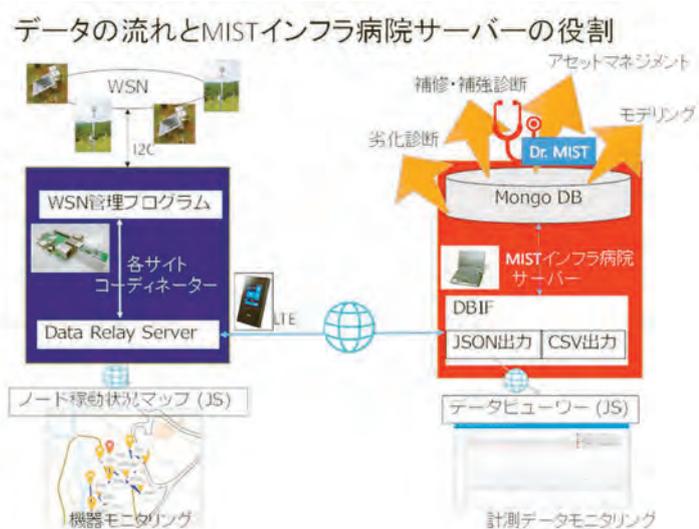


図 7.1.2 IoT / WoT によるシステム概要

築しており、データビューワーおよびデータを CSV 形式等のデータダウンロード用のコンフィグレーションの修正が必要となる。

以上、データを取得するセンサノードから、最終的なデータを集約するデータサーバーまで、レベル毎に異なる修正は、必要であるが、ソフトウェア部分での修正・追記に関して大変容易である。

今後は、無線センサネットワークに適した、各種物理量を高精度にデータ化するためのセンサおよびインターフェース回路を安価に構築する研究を遂行予定である。

### 7.1.2 斜面モニタリングに関する研究【杉本】

#### (a) 現地モニタリングの概要

図7.1.4の対象斜面は、地表面付近に土砂主体の産業廃棄物、その下に崖錐堆積物、基盤岩で構成される。現状の斜面形状は、斜面勾配1:1.5、高さは40mとなっている。本研究では、特に降雨後の斜面内の地下水位の上昇に着目し、後述するモニタリングシステムによってデータの計測を行った。

図7.1.5に各種観測機器とその設置場所を示す。本研究で採用したシステムにより、現場での観測機器（土壌水分計、水圧計、雨量計）を利用して観測したデータを、無線センサネットワークを通じて中継機で収集して、ネットワークを介して外部と通信することができる。これにより、遠隔地にてモニタリングを行うことができ、対象斜面の安全の確保やセンシングデータの解析によるリアルタイムの現状分析が可能となる。また、同現場に、対象斜面の変状を把握するため、中央開発㈱の協力により双方向遠隔自動監視システムの二軸傾斜計(X・Y)が場内13箇所設置されている。

#### (b) センサネットワークによる斜面表層のモニタリング

二軸傾斜計は深さ 50cm の位置に埋設されている。当システムは水平面内の直交方向の累積角度や変化量を 10 分間隔で記録し親機に送信され、ブラウザ上で確認することが出来る。総降雨量の比較的多い 2018 年 6 月～7 月のデータを取得し、降雨量と累積角度の関係を表したものを図 7.1.6 に示す。降雨量が多い場合は、累積角度の変化が顕著に現れ、現場斜面が動いているということがわかる。降雨により地下水位が上昇し、その影響で表層での変

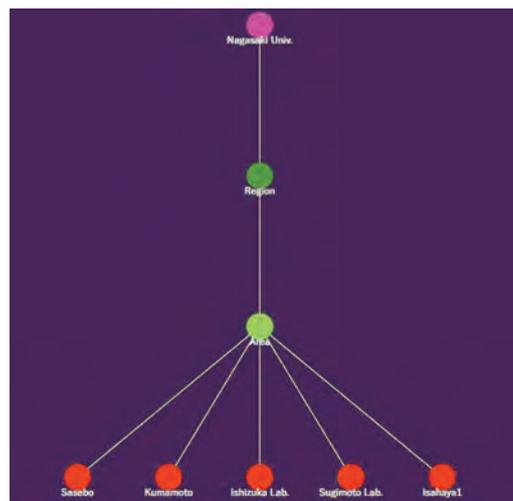


図 7.1.3 現行の GUI



図 7.1.4 対象斜面の断面図

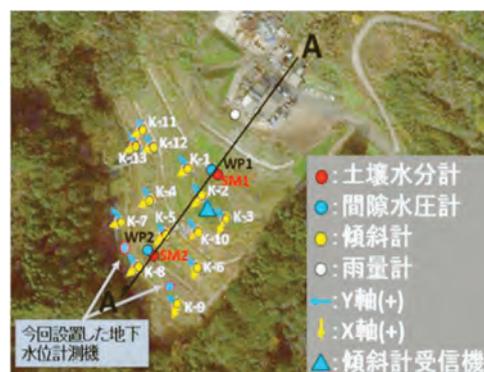


図 7.1.5 各種観測機器と設置場所

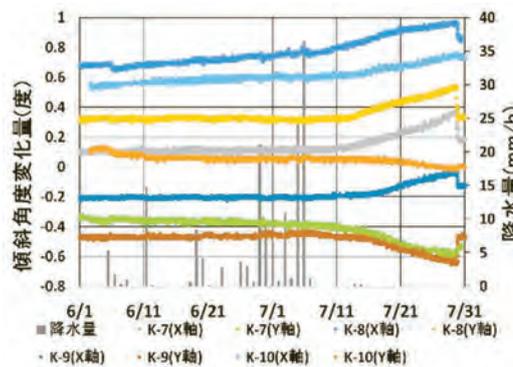


図 7.1.6 降雨量と累積角度の関係

表 7.1.1 降雨と地下水位・土壌水分率の関係

	期間	総降雨量(mm)	最大時間雨量	変化量	降雨開始時刻	上昇時刻	降雨開始から上昇にかかる時間(分)	(累積雨量/降雨開始からの時間)
		期間中の雨量						
下段間隙水圧計 (WP2)	6/11-6/18	35.20	14.72	+1.372m	2018/6/11 1:00	2018/6/11 4:11	191	3.18
	6/19-6/28	61.76	8.48	+1.620m	2018/6/19 5:00	2018/6/20 1:01	1201	0.124
中段土壌水分計 (SM1)	6/11-6/18	35.20	14.72	+2.998%	2018/6/11 1:00	2018/6/11 4:11	191	3.18
	6/19-6/28	61.76	8.48	+3.471%	2018/6/19 5:00	2018/6/19 18:28	808	0.124
下段土壌水分計 (SM2)	6/11-6/18	35.20	14.72	+4.377%	2018/6/11 1:00	2018/6/11 5:12	252	3.18
	6/19-6/28	61.76	8.48	+4.758%	2018/6/19 5:00	2018/6/19 17:58	778	0.124

状が生じたことが推測される。また、このシステムの活用法の1つとして、K1~K10について、6月1日~7月10日の期間において10日ごとに斜面表層の変状量を分析した。回転軸が中心でない場合や、センサを取り付けた棒が斜面上を平行移動していることも考えられるが、今回は回転軸を中心と仮定することにより、ベクトルで変化を表し斜面の動きを視覚化する。図 7.1.7 より、この期間において現場斜面が動いていることは明確であるが、斜面の下方と中腹では動き方が異なることがわかる。斜面下方(K5~K9)については、今回のように累積角度の変化量を連続的に追いかけていくことで、表層の大まかな変状量を把握することが可能と考えられる。K1 や K2 のように上下方向に繰り返し動いているような箇所は、斜面下方が谷側に動いたことで斜面上方の傾斜センサが山側に傾く形になったと考えられる。

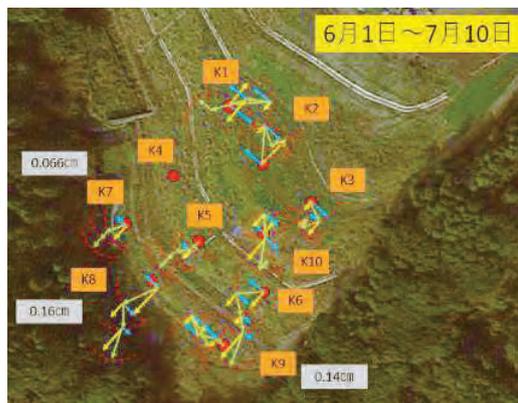


図 7.1.7 斜面表層の推定変状

(c) 降雨による地下水位と土壌水分率の変動

図 7.1.5 に示した下段の間隙水圧計(WP2)と土壌水分計(SM1,SM2)について、2018年4月1日から7月10日までのデータを取得し、降雨量に対する変化を分析した。この期間において、降雨に伴い地下水位と土壌水分率が上昇している6つの期間について、降雨と地下水位上昇との関係を分析した結果の一部を表 7.1.1 に示す。各行の色は図 7.1.8 の色の期間に対応している。なお、この期間において地下水位は5月13日~5月31日、下段の土壌水分計は4月1日~5月7日のデータが機器の不良により欠損している。図 7.1.8 の地下水位も土壌水分率も降雨に伴って値が上昇しており、土壌水分率については斜面下段の方が中段よりも大きな値を示していることから斜面下段の方がより多く雨水を貯留することが考えられる。また、累積雨量と時間の関

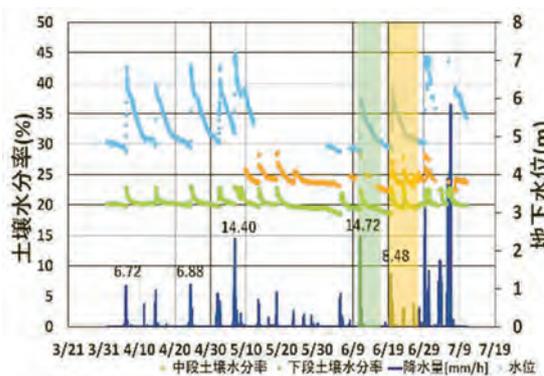


図 7.1.8 降雨による地下水位と土壌水分率の変動

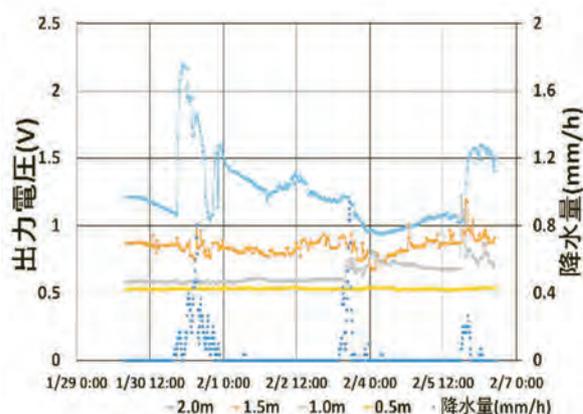


図 7.1.9 降雨に伴う電圧の変化

係を変化率で表すと、期間中の総降雨量や最大時間別降雨量の大小に関わらず、短時間で多く雨が降るほど地下水位や土壌水分率の上昇に要する時間が短いことがわかり、降雨開始から土壌水分率の上昇にかかる時間は長いもので 10 時間程度であることから覆土の効果がみられる。

#### (d) パイプ型地下水位計測機の作製と設置

多点観測の実施を念頭におき、降雨に伴う地下水位の簡易計測機器として、地表面からの深さ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0m における地下水の有無を計測するパイプ型地下水位計測機を作製し設置した(図 7.1.5 参照)。設置後 2019 年 1 月 1 日～2 月 6 日までのデータを取得し、降雨に伴う出力電圧の変化を表したものを図 7.1.9 に示す。2 月 5 日 20:50 からの降雨に伴って、地表面から 2.0m, 1.5m に設置してあるセンサにおける電圧が上昇していることから、この降雨に伴って地下水位が図 7.1.10 のように 1.5m～1.0m の間まで上昇したことが分かる。

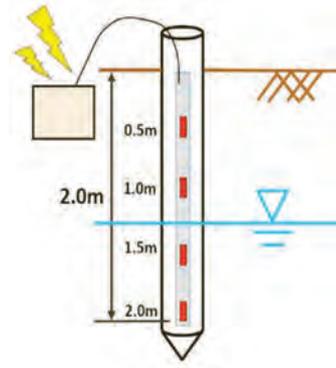
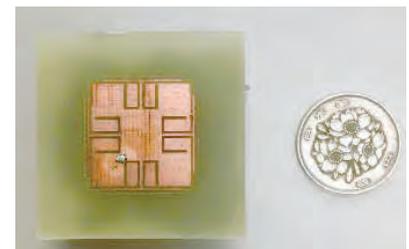
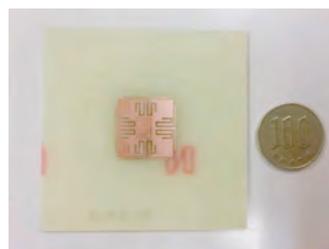


図 7.1.10 地下水位計測機のイメージ

### 7.1.3 無線通信関連の研究【藤本】

#### (a) 斜面地でのモニタリング用アンテナの開発

前年度に設計したアンテナ（写真 7.1.1(a)）のシミュレーション値と測定実験値の誤差が大きかったため、アンテナ形状の簡素を行い、前年度と同程度の特性を持つアンテナ（写真 7.1.1(b)）を設計した。また同時にアンテナの小型化も図った。再設計したアンテナにおいても、まだシミュレーション値と測定値間に誤差があるが、前年度作成したアンテナから大幅な誤差の改善が達成できた。



(a) 昨年度の試作アンテナ (b) 本年度の試作アンテナ  
写真 7.1.1 斜面地でのモニタリング用アンテナ

#### (b) リセット回路用レクテナの開発

レクテナはアンテナと整流回路より構成されるが、整流回路は前年度に設計を終えている。本年度はアンテナ部の設計を行った。レクテナ用アンテナには高利得特性が要求される。本研究では、1 素子で約 10dBi（従来の 4 素子平面アレイアンテナと同等）の利得を有する平面アンテナ（写真 7.1.2）の設計を行った。

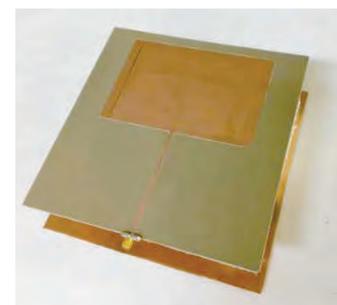


写真 7.1.2 高利得平面アンテナ

#### (c) センサ回路用レクテナの開発

本研究では、センサ回路用レクテナを提案している。レクテナの整流回路の負荷部分にコンデンサを装荷し、センサ回路を駆動するための直流電源としての可能性を、シミュレーションおよび測定実験により検証している。提案された整流回路（写真 7.1.3）で

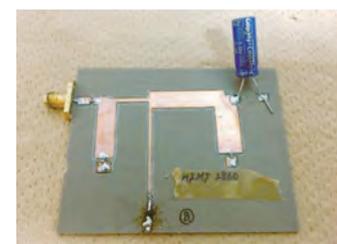


写真 7.1.3 試作した整流回路

は、受信アンテナへの入力が-5dBm のとき、3 日でセンサ回路を駆動するための電圧を供給できることを明らかにした。

#### 7.1.4 屋外設置電子機器の簡易避雷方式の検討および開発【藤島】

ワイヤレスセンサネットワークのセンサノードの中でも、情報の中継を担う中継機（ルータ機能を持つセンサノードなど）は地表からできるだけ高い場所への設置が求められる。すると、設置場所によっては、落雷の被害を受ける可能性がでてくる。そこで、屋外に設置するセンサノードなどの機器を雷害から守るための対策について、検討・試作・実験室における性能評価を行っている。さらに、佐世保市の斜面地においてフィールドテストを実施中である。具体的には、雷害対策法として、単体のセンサノードの保護を目的とした避雷ケージ（図 7.1.11）、および、複数のセンサノード群の一括保護を目的とした簡易避雷針を考案しており、性能評価やフィールドテストなどの結果を踏まえて改良中である。本報告では、今年度実施した避雷ケージの改良について(a)耐雷特性と(b)避雷ケージを介した通信性能について簡単に紹介する。

##### (a) 避雷ケージの耐雷特性

写真 7.1.4 に示したようにセンサノードまわりを避雷ケージで囲むことで、雷から保護することを目的としている。雷雲から下りてくる雷を雷インパルス電圧印加試験により模擬雷として発生させて耐雷性能を強化した。模擬雷は、写真 7.1.5 に示すように避雷ケージの導体と橋絡してケージ内部に侵入しないことを確認した。しかし、ケージ側面からは模擬雷が内部のセンサノード模型に橋絡することがあることもわかった。

##### (b) 避雷ケージを介した通信性能

センサノードまわりを避雷ケージで囲むことで、雷から保護するとともに通信性能の向上を図る。ケージを構成する導体の長さを通信電波の波長を考慮して調整することで、アンテナの役割を付与することを期待している。試作したケージを介した場合と、無い場合とで、受信信号強度(RSSI 値)の測定を行ったところ、図 7.1.11 に紫の線で示したようにケージの導体がある 60 度付近で若干下がったものの、全方位にわたって、ケージ無しの場合と同等の通信性能が確保されていることが分かった。

来年度以降も今年度の結果を踏まえて避雷ケージをさらに改良して、実証試験に取り組みたいと考えている。

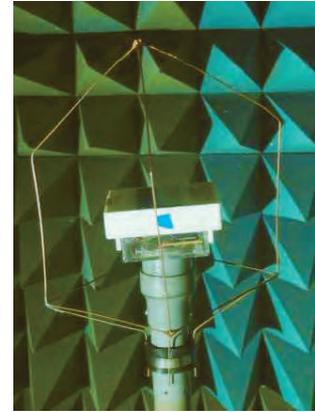


写真 7.1.4 避雷ケージ付きセンサノード



写真 7.1.5 避雷ケージに橋絡する模擬雷

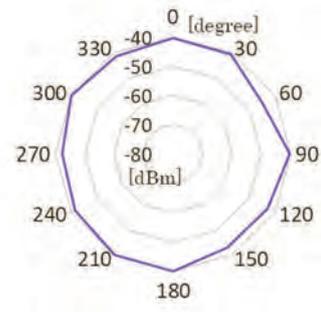


図 7.1.11 避雷ケージを介した RSSI 値分布

## 7.2 国土交通省 NETIS「挟締金具リキマン」を使用した補強法

### 国土交通省 NETIS「挟締金具リキマン」を使用した補強法

中原 浩之

#### 1 はじめに

建築構造物にせよ土木構造物にせよ、構造的にはほぼ OK だけれども、少し心配なので、ちょっとだけ補強したいというニーズは多いのではないかと。言い換えると、損傷がよほど激しい構造物は、すでに補強されているか撤去されているので、上記のような、少し補強すれば大丈夫という構造物がたくさん存在しているものと思われる。

長崎大学の構造工学コースでは、このような、若干の構造性能向上のため補強したいという要求に応えるための簡易補強法について研究を行っている。具体的には、図-1 に示す挟締器具を用いた補強法である。なお、本製品は、「挟締金具リキマン」という呼称で、国土交通省 NETIS(新技術情報提供システム) に登録(登録番号:KK-170012-A)<sup>1</sup>されており、今後のさらなる活用が期待されている器具である。使用例を写真-1 に示す。これは、熊本地震で被害を受けた橋(木山川橋)<sup>2</sup>の調査の折に撮影したものである。

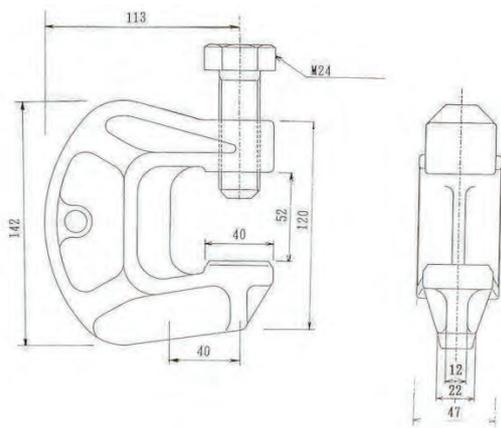


図-1 接合金物の外観<sup>1</sup>



写真-1 熊本地震の際の橋の復旧工事<sup>2</sup>

#### 2 実験と考察

図-2 にリキマン金具接合の一軸引張実験の結果を示す。この図は、板厚 11mm と板厚 16mm の表面に錆加工を施し、両者をリキマン金具 1 個もしくは 2 個でつないだものの引張荷重-ずれ変位関係である。実験の様子を写真-2 に示す。

この実験では、ボルト接合の様に、両者の母材間をつなぐ材がないため、摩擦力を上回る引張力が作用した場合、そのまま滑ってしまい引張力を保持することが難しいことが予想された。しかし、実験からは著しい耐力低下が見られず、予想とは異なる優れた接合性能を発揮することが分かった。

引張荷重-ずれ変位関係を見ると、実験では、引張力を摩擦伝達していると考えられる領域とそれ以降では異なる挙動を示していることが分かる。前者の最大値を「すべり荷重」と定義する。実験結果を整理する際は、明瞭な主すべりがない場合は 0.5mm のすべり量に対する荷重をすべり荷重とした<sup>3,4</sup>。

図-2 をみると、0.5mm 以下では、ほぼ弾性挙動を示し、徐々に軟化しつつも耐力上昇する、冷間成形鋼管の引張試験に見られるようなラウンドハウス型の荷重-変位関係を示す。弾性状態のように見える部分は、鋼材の摩擦抵抗により応力伝達が行われている部分と考えられる。これの最大値を「すべり荷

重」と定義して、本補強に用いる許容強度とした。値は、添付の資料を参照して、リキマン金具1個あたり35kNとした。上の荷重-変形関係によると、すべり荷重をこえても、引張抵抗力は漸増する。これは、リキマン金具に用いられている硬度の高いボルトが母材に食い込む掘り起こし挙動を示しているものと思われる。このように、リキマン金具の接合部は、耐力低下をおこすことなく、安定した応力伝達機構を保持するため、補強に用いる際に、接合部の破壊を許容することにした。「すべり荷重」以降に終局強度を迎えることになるが、実験では変形計測できた範囲内での耐力低下を観測できなかった。従って、安全側に評価して、35kNの1.5倍を終局強度とした。

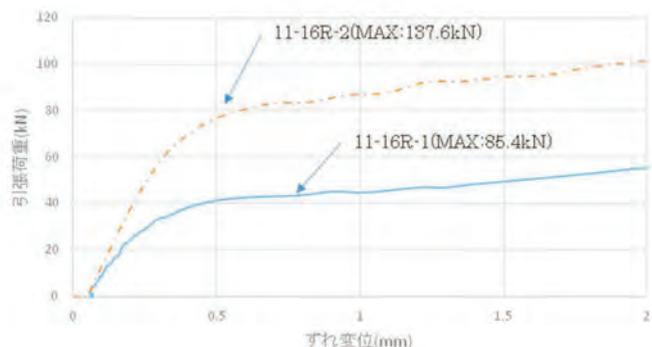


図-2 引張荷重-ずれ変位関係 (鑄加工) 写真-2 実験の様子

写真-3 に試験後の試験体表面の様子を示す。リキマン金具のねじ先端部が母材に食い込み、これが引張方向にずれていることが分かる。このような挙動により、母材の塑性性状が、図-2の荷重-変形関係に現れ、リキマン金具による接合部の変形性能を保持しているものと考えられる。

本研究では、一軸引張試験だけでなく、合計13万3千回の繰返し載荷実験、3ヶ月のリラクゼーション試験、耐震補強骨組の耐震補強材の接合に使用した際の挙動観測実験を実施している。いずれの実験でも、リキマン金具の有用性が示される結果となっている。機会があれば、近い将来、本紙面で紹介したい。



写真3 試験後の試験体表面

### 3 おわりに

本稿で示した結果は、実験研究に基づく結果で、こうした基礎資料を得ることができるのが大学の良いところでもある。このように数頁にまとめてしまうと、一見簡単にデータを取得しているように見えるが、全ての実験で大変な苦労があった。一軸引張試験で使用した 2000kN 試験機は、数十年来、制御盤の調整を行っておらず、また、ねじ部のクリーニングも実施されていなかった。繰返し載荷実験に使用した疲労試験機については、数十年来、オイル交換がなされていなかった。耐震補強骨組の実験に使用した加力フレームも、数十年来使用されていなかった。これらを稼働するようにして、実験環境を整えるところから初めて、やっとここまでたどり着いた。関係各位に謝意を表したい。

地方大学は、インフラ長寿命化センターが果たしている役割と同様に、地域貢献が求められている。これらの実験施設が常に稼働して、地域の企業等に活用していただくことも、地域貢献の重要な一部となろう。

#### <参考文献>

1. 国土交通省 NETIS : 登録番号 KK-170012-A,  
[http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG\\_NO=KK-170012](http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=KK-170012)
2. 日本コンクリート工学会 : 熊本地震に関する特別委員会報告書, 2018
3. AISC-Research Council on Structural Connections : Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts, Jun. 1994
4. 日本建築学会, 鋼構造接合部設計指針, 2006