

3. 実物大実験による検証

3. 1 目的

本研究では、道路橋の被災状況を計測する装置として、既存技術である接触型センサであるワイヤー巻き取り式の変位計を採用した。この計測装置は、以降で示す要求性能を満足した上で、コスト削減を図ったものとした。この計測装置を橋梁に設置し、必要な情報を効果的かつ確実に入手するには、計測精度等の性能を確認することが必要である。また、採用したセンサは既存技術であるが、地中に設置して計測する際の仕組みについては検討が必要であり、その計測精度は実験による検証を行う必要があった。

よって、ここでは実物大実験を活用して、計測方法や計測精度等の妥当性の確認を行った。この結果を用いて、試行フィールドに道路橋被災状況把握システムの試行的に設置し、設置要領(案)やシステム仕様(案)の取りまとめに反映させた。

3. 2 計測装置の要求性能

3. 2. 1. 計測値の要求性能

道路管理者が被災情報を把握するためには、計測値の要求性能を整理して、その検証を行うことが必要となる。

また、桁端部の変位を把握するための計測装置は、計測精度や計測範囲だけでなく、変状への追従性やトリガー機能等の確認が必要である。

橋台背面盛土アプローチ部の変状を計測する計測装置は、既存技術では設置費用が大きくなる上、広範囲を計測できない等の課題が残るため、センサを車線単位で橋台背面盛土内に設置し、閾値を超えると反応するセンサ(ON/OFFセンサ)を開発することとした。このような地中内に設置する計測装置は、地盤の沈下に計測装置が追従するかといったことが、確実かつ適正に観測を続けるために重要な項目である。実物大実験では、開発したON/OFFセンサを有する計測装置の精度(確実性)について確認した。

以下に計測値の要求性能を一覧に整理する。

表 3-1. 要求性能一覧

要求項目	内容・仕様
計測精度	1mm の精度を有することが必要である。 注意の閾値は 2cm と設定しており、1cm 単位の変状を正確に計測するために 1mm と設定している。
計測範囲	最大計測値を 500mm 以上とすることが必要である。 東北地方太平洋沖地震の事例から、通行障害となる段差は 100mm 程度である。しかし、緊急車両等が 100mm 以上の段差を通行する可能性があるため、最大計測値を 500mm 以上とした。

3. 2. 1. 機器の要求性能

計測装置に求める要求性能は、表 3-2 の通りとした。

表 3-2. 要求性能一覧

要求項目	内容・仕様
設置位置等の配置条件、 環境条件	・屋外に設置するため、監視局や測定器は防滴処理
データ確認・保存・ 伝送機能	・変位計からのデータを計測用 PC にて確認・保存するために、測定器、スイッチボックス、計測用ソフトウェア、データ通信用ソフトウェアを用いる
正常動作テスト機能	・計測用 PC に正常にデータが保存されているか、常時チェックし、正常に計測されない場合はエラーメールを配信
起動制御機能 遠隔操作機能	・計測値の異常、計測装置の異常を知らせる機能 (メール発報機能) ・インターネット接続の環境構築 (携帯電話機能)
非常用電源切換機能	・停電により商用電源からの電源供給が不可能となった場合、バッテリーからの電源供給に切り替わること

3. 3 実物大実験による計測方法の検証

3. 3. 1. 「橋台背面盛土の沈下」計測に関する動作確認

計測装置の動作確認は、予備実験（土槽実験）と実物大実験の2段階で実施した。

(1) 予備実験（土層実験）

①実験概要

鋼製実験土層（H1.2m×W1.2m×L1.2m）を使用して、地盤の沈下法による挙動差異（単調載荷・両端単調載荷による違い、載荷板形状による違い、地盤高による違い）、計測ワイヤー保護管の地盤追従性、及び、沈下板形状の違いによる挙動差異の確認・検証を行った。各検討CASEの内容は次の通りである（表3-3、図3-1参照）。

CASE1、CASE2は、計測ワイヤー保護管の地盤追従性を確認するため、沈下板を土槽底版に固定し、載荷板の形状の違いが計測値に影響するかどうかを検証した。

CASE3～CASE5は沈下板形状や載荷方法の差異が計測値に影響するかどうかを検証した。

表 3-3. 事前予備実験の検討 CASE 一覧

CASE	沈下板	載荷方法	載荷板	地盤高	ジャバラ管
1	30×30cm 土槽底版固定	単調載荷	30×30cm	100cm	φ100mm、L=100cm
2	30×30cm 土槽底版固定	単調載荷	φ15cm	100cm	φ100mm、L=100cm
3	L70×W30cm	両端単調載荷	30×37cm (2個)	120cm	φ65mm、L=40cm
4	L20×W20cm	両端単調載荷	30×37cm (2個)	120cm	φ65mm、L=40cm
5	L40×W20cm	両端単調載荷 (片持ち)	30×37cm (2個)	120cm	φ65mm、L=40cm

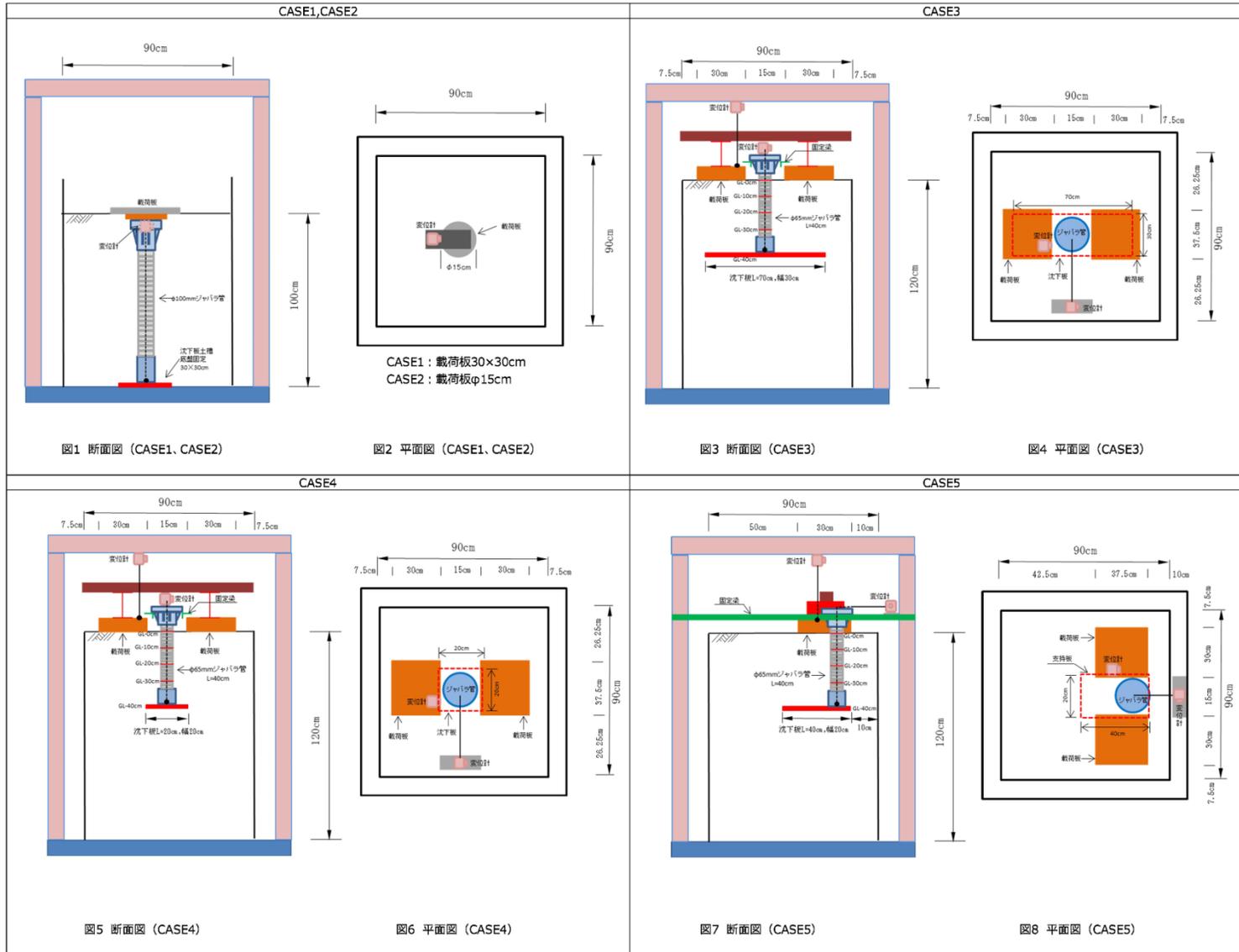


図 3-1. 各検討ケースの実験概要

②検証方法

土槽実験の検証方法と検証内容は、以下の通りである。

1. 地盤の沈下再現の確認

地表面に設置した載荷板をジャッキにより強制沈下させ、実物大実験で実施予定の輪荷重による沈下状態を再現し、地盤の沈下挙動を確認した。沈下確認は、載荷後に土槽の一面を開き、沈下板を開削して、目視観察により行った（CASE1～CASE5）。

2. 変位計の動作確認

沈下板を土槽底版に固定して、ワイヤー変位計のワイヤー変形防止策として設置する保護管（ジャバラ管）の追従性、及び、計測値の確認を行った（CASE1～CASE2）。

※ジャバラ管は、アルミ製で伸縮自在なものを採用した。

3. 沈下板の挙動確認

3種類の沈下板形状について、地表面載荷による地盤内部沈下の追従性確認を行い、沈下板形状の違いにより、変位計測値の違いが生じるかどうか検証した（CASE3～CASE5）。

③検証結果

土槽実験の結果、及び、次の実物大実験に向け、得られた課題となった。得られた課題を踏まえ、実際の被害で発生することが想定される背面盛土の沈下量 30cm 程度を実物大実験で強制的に発生させ、精度検証等を行った。また、実物大実験ではH鋼と油圧ジャッキを組み合わせることで、液状化や盛土流出等により橋台背面の盛土全体が沈下する現象を再現した。実物大実験の詳細については次節で述べる。

【実験結果】

1. 地盤の沈下再現の確認

ジャッキによる強制沈下でも、輪荷重による沈下現象が再現出来た。沈下板は、地盤に追従して沈下しており、開削により確認した結果、沈下板と地盤の間に空洞は生じていなかった。また、地表面と地盤内部（深度方向）での沈下量を比較すると、地盤内部の方が、沈下量が少なく、深度が深くなるに従い変位量が減少していた。

2. 変位計の動作確認

保護管（ジャバラ管）の設置により、計測用ワイヤーに直接、地盤変位による外力が加わることなく、安定した計測値を得ることが出来た。また、地盤中の保護管が、沈下にも追従していることが確認出来た。

3. 沈下板の挙動確認

地盤内部の沈下に対して、沈下板の寸法、及び、設置位置を変化させても、地盤沈下に追従出来ていることが確認出来た（図 3-2）。

【得られた課題】

1. 土槽の境界条件、及び、土槽面積との関係から、沈下面積に制限が出来てしまうため、十分な沈下量まで計測することが出来なかった（CASE3～CASE5 の最大沈下量は 5cm～7cm 程度）（図 3-2）。
2. 地震時には、道路直下地盤の液状化などが原因で、盛土全体が沈下する様な現象が発生するが、そこまでの沈下現象を再現するには至らなかった。

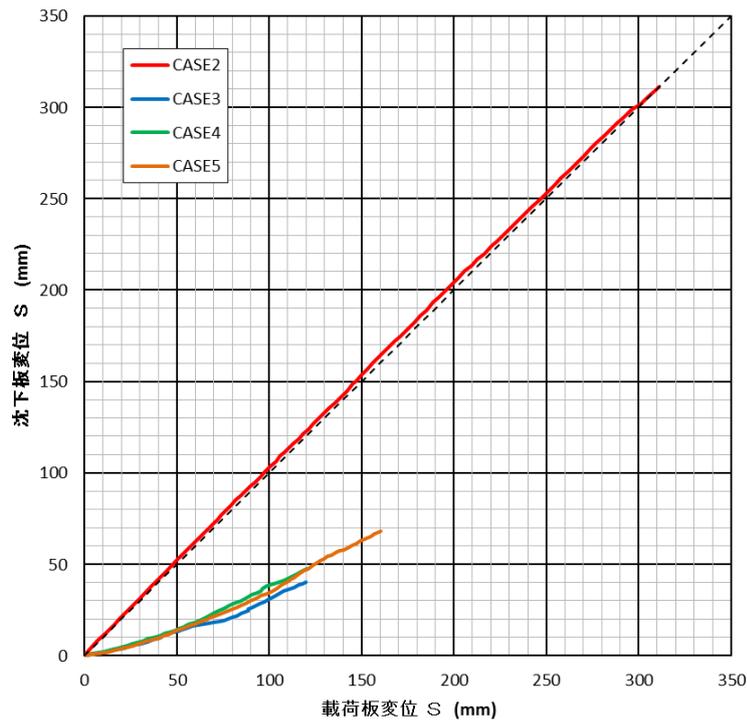


図 3-2. 予備実験での沈下板変位と荷荷板変位の関係

(2) 実物大実験

①実験概要

予備実験（土槽実験）結果を基に、実物大実験では、盛土規模、沈下板形状、変位計の種類、沈下板設置深度のバリエーションを増やして行い、地震時地盤沈下現象の再現、計測ワイヤー保護官の地盤追従性、沈下板形状の違いによる挙動、及び、従来型変位計と試作型変位計の計測値の確認・検証を行った。

各 CASE の沈下板重量は 5kg で統一されているが、その形状が異なっている。平面形状が異なることに因る沈下板の設置圧の差異、襷の有無による水平抵抗の差異等が比較できる様、各 CASE の沈下板形状を設定した。

各検討 CASE の内容は次の通りである（表 3-4、図 3-3 参照）。

表 3-4. 実証実験の検討 CASE 一覧

項目	沈下方法	沈下位置	変位計	沈下板形状		沈下板設置深度	備考
CASE2	背面側鉛直沈下 (全面平均沈下) 同一深度, 板形状	地表面-1.74m	従来型	角型30×30cm t=8mm 重量 5.0kg	上部ひだ有(十字タイプ) 襷H30mm	地表面から-1.2m	背面側の地盤を全面的に沈下させる。沈下板の大きさの違いによる基本沈下量を計測する。また、襷無しの沈下板を設置して襷の効果の確認を実施。
			従来型	角型15×15cm t=28mm 重量 5.0kg			
			試作型	角型20×20cm t=16mm 重量 5.0kg	襷無し		
			試作型	角型20×20cm t=16mm 重量 5.0kg			
CASE3	背面側鉛直沈下 (全面平均沈下) 同一深度, 板形状, 設置方向	地表面-1.74m	従来型	角型10×40cm t=16mm 重量 5.0kg	縦断方向に長い 上部ひだ有(十字タイプ) 襷H30mm	地表面から-1.2m	背面側の地盤を全面的に沈下させる。沈下板の形状および設置方向による違いを把握する。
			試作型	角型20×45cm t=0.8mm 重量 5.0kg			
			従来型	角型10×40cm t=16mm 重量 5.0kg	横断方向に幅広 上部ひだ有(十字タイプ) 襷H30mm		
			試作型	角型20×45cm t=0.8mm 重量 5.0kg			
CASE4	背面側鉛直沈下 (全面平均沈下) 深度調整, 板形状, 設置方向	地表面-1.74m	従来型	角型15×15cm t=28mm 重量 5.0kg	地表面-0.6m 上部ひだ有(十字タイプ) 襷H30mm	地表面から-0.6m	背面側の地盤を全面的に沈下させる。沈下板設置深度の違いによる計測値の違いを把握する。
			従来型	角型20×20cm t=16mm 重量 5.0kg		地表面から-1.5m 上部ひだ有(十字タイプ) 襷H30mm	
			試作型	角型15×15cm t=28mm 重量 5.0kg	地表面から-1.5m 上部ひだ有(十字タイプ) 襷H30mm		
			試作型	角型20×20cm t=16mm 重量 5.0kg			
CASE5	背面側鉛直沈下 (全面平均沈下) 深度調整, 板形状, 設置方向	地表面-1.74m	従来型	角型15×15cm t=28mm 重量 5.0kg	地表面-0.6m 上部ひだ有(十字タイプ) 襷H30mm	地表面から-0.6m 傾斜地盤	背面側の地盤を全面的に沈下させる。傾斜地盤および密地盤を施工し地盤状況違いによる沈下計測値を把握する。
			従来型	角型20×20cm t=16mm 重量 5.0kg		地表面から-1.2m 密地盤	
			試作型	角型15×15cm t=28mm 重量 5.0kg	地表面-1.2m 上部ひだ有(十字タイプ) 襷H30mm		
			試作型	角型20×20cm t=16mm 重量 5.0kg			
CASE6	背面側鉛直沈下 (全面平均沈下) 深度調整, 板形状, 設置方向	地表面-1.74m	無し	-	-	-	背面側の地盤全面を平均的に沈下させる。沈下を測定する変位計ボックスを取外し、障害物の無い状態で天端の沈下状況を確認する。
			無し	-	-	-	
			無し	-	-	-	
			無し	-	-	-	

注) 実証予備実験をCASE1として記述している。

橋台背面沈下実験

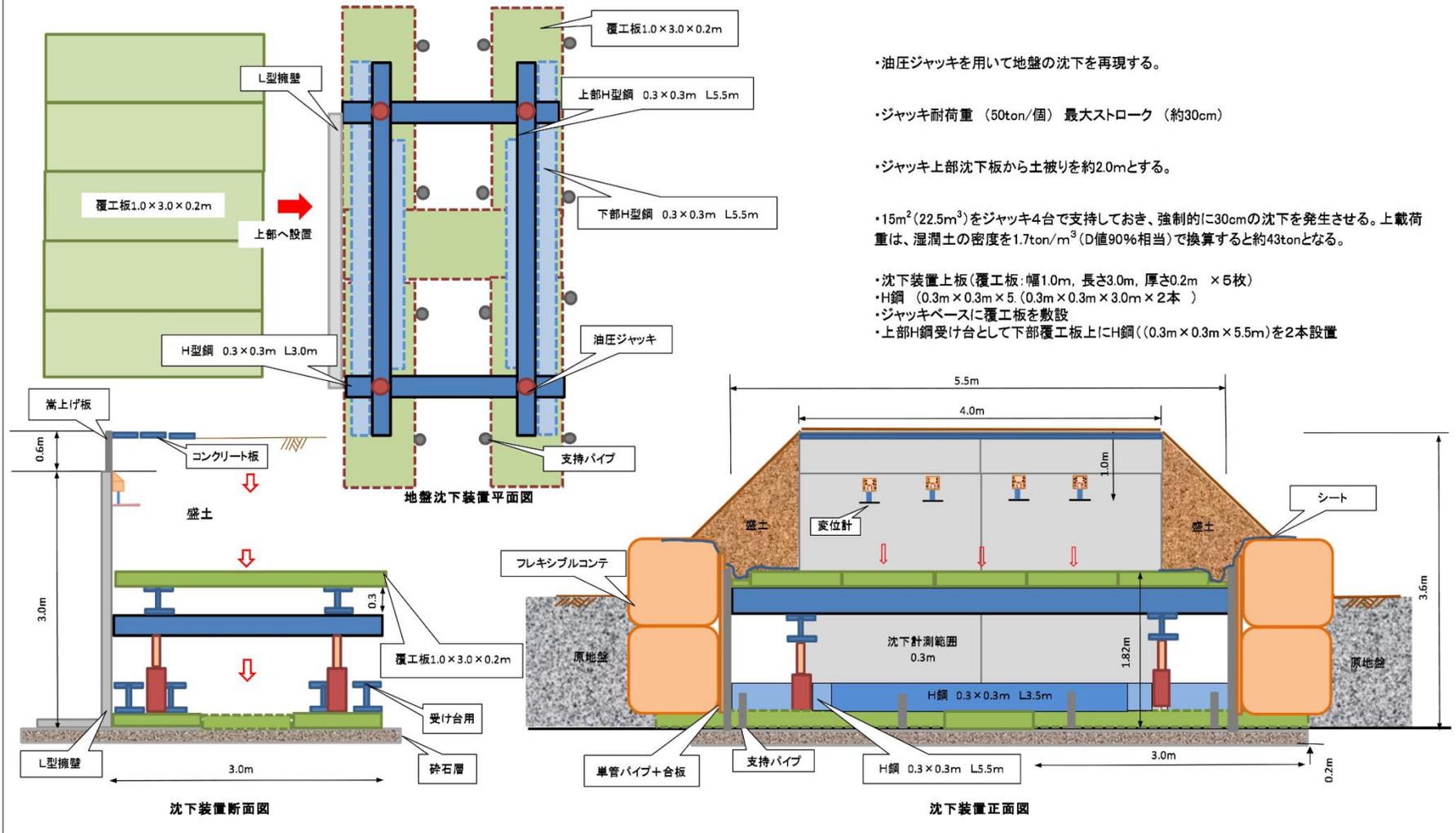


図 3-3. 実験概要

②検証方法

実物大実験の検証方法と検証内容は、以下の通りである。

1. 地盤の沈下再現の確認

予備実験（擁壁実験）結果を踏まえ、エアージャッキではなく、油圧ジャッキによる沈下装置を製作した。装置は、4 台の油圧ジャッキ（50t/台）と鋼材を組み合わせて強化し、油圧により沈下制御を行うものである。再現する沈下範囲は10cm～30cmとした。

※沈下面積は12.0m²とした。

2. 変位計の動作確認

変位計は、従来型と試作型を1CASE×各2台の計4台設置して、変位計の差異によって、計測値に差異が生じるかどうかを検証した。計測ワイヤー保護管（ジャバラ管）は、予備実験（擁壁実験）と同じく、ポリエチレン製のφ45mmの保護管を採用し、その地盤追従性の確認を行った。

※ジャバラ管は、25cm～100cmの伸縮が可能なものを採用した。

3. 沈下板の挙動確認

沈下板は、地盤との馴染みが良く、地盤追従性がさらに向上する様、沈下板上部に、襷（ひだ）を十字に設けた鋼製板、及び、襷無の鋼製板を、重量5kgで製作可能な平面形状と組み合わせた多種類、製作して設置し（写真3-1～写真3-3）、計測値に差異が生じるかどうかの検証を行った。検証項目としては、沈下板形状、沈下板設置方向、沈下板設置深度、及び、沈下時に側方移動が生じた場合の地盤密度による計測値の差異とした。



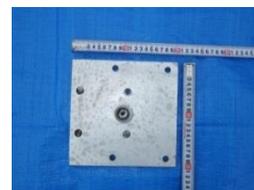
角型 30×30cm 襷有



角型 15×15cm 襷有



角型 20×20cm 襷有



角型 20×20cm 襷無し

写真 3-1. CASE1 の沈下板形状



角型 10×40cm 襷有（横断方向、縦断方向）



角型 20×45cm 襷有（横断方向、縦断方向）

写真 3-2. CASE2 の沈下板形状



角型 20×20cm 襷有



角型 15×15cm 襷有



角型 20×20cm 襷有



角型 15×15cm 襷有

写真 3-3. CASE3・4 の沈下板形状

③検証結果

実物大実験の検証結果を以下に示す。

1. 地盤の沈下再現の確認

盛土を作製し、各 CASE、約 30cm の盛土沈下を行ったが、総ての CASE において、沈下の再現が出来た。

2. 変位計の動作確認

従来型変位計に対し、試作型変位計の計測値は、ほぼ同様の値を示し、従来型と同程度の能力で計測可能であることが確認出来た。

計測ワイヤー保護管（ジャバラ管）は、実験後に、地盤開削による目視確認を行ったが、地盤沈下に充分追従しており、計測値等への影響は見受けられなかった。また、盛土作製時の破損が懸念されたが、損傷についても確認されなかった。

3. 沈下板の挙動確認

沈下板は、総ての CASE において、地盤沈下に追従していることが確認された。沈下板形状、及び、沈下板設置方向については、沈下追従性に大きな差異は見受けられなかった。検証結果より、以下に列挙する条件を満たせば、実際の現場状況に応じた沈下板形状を選択出来ることが確認出来た（図 3-4 参照）。

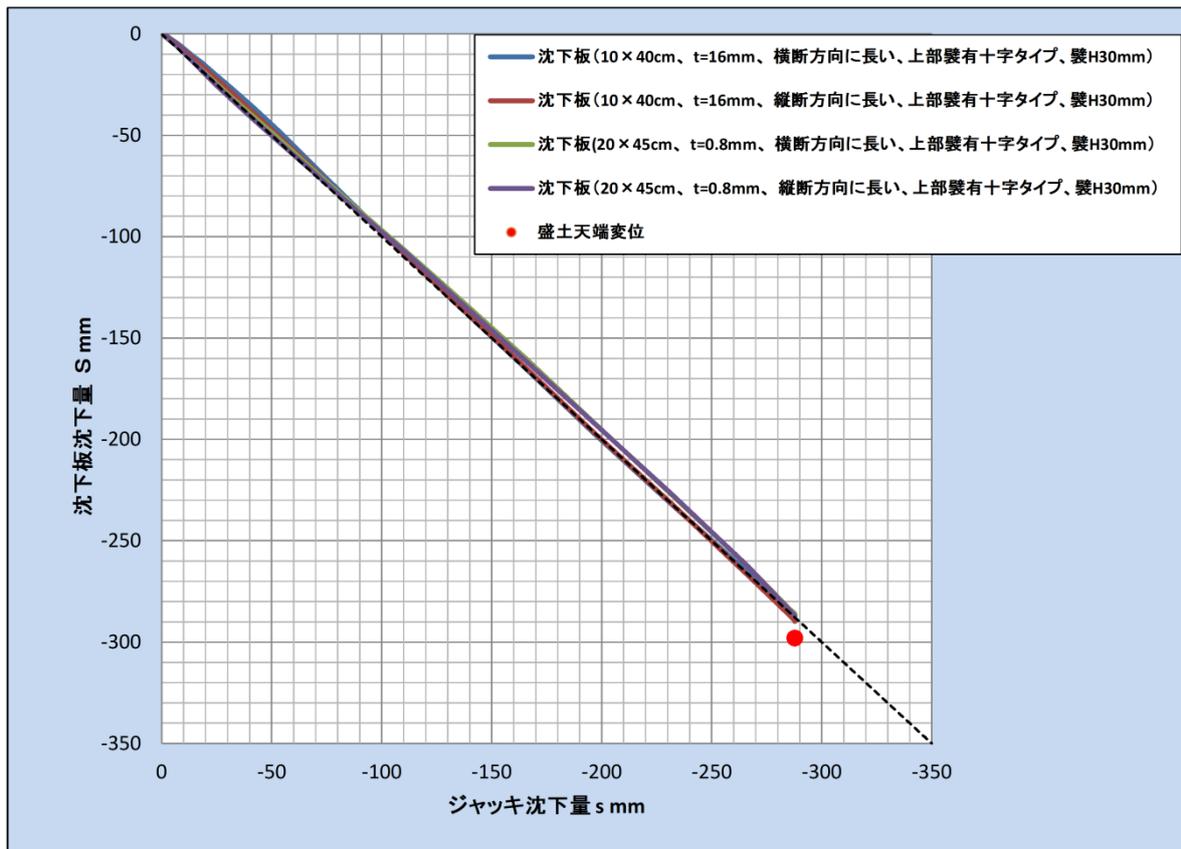


図 3-4. 実物大実験でのジャッキ沈下量と沈下板沈下量の関係

④成果

検証の結果、得られた成果を以下に記す。

1. センサ部と沈下板を繋ぐワイヤーが斜めになる、若しくは、沈下板が橋台背面盛土に干渉するなどしない。
2. 保護管（ジャバラ管）の伸縮に必要な 5kg 以上の重量の沈下板とする。
3. センサ部の大きさに影響されることなく、橋台背面盛土内に取り付け易い形状（あまり大きくなく、ハンドリングが良い形状）の沈下板とする。

3. 3. 2. 桁端部の変位計測に関する動作確認

桁端部の変位を計測する機器は、既存の接触型ワイヤー巻取り式変位計に、新たな機能を追加する改良を行った変位計を使用することとした。そこで、その精度（確実性）、耐久性、経済性等について、実物大実験による動作確認を行った。

計測装置の動作確認は、既存変位計の動作確認と新たに追加した機能の動作確認の 2 パートに項目別けして実施したが、各実験での検証項目と検証内容、及び、検証結果は表 3-5 の通りである。これらの検証内容の詳細は以降に記す。

(1) 検証概要

①検証内容

表 3-5. 検証項目と検証内容の一覧

検証項目		検証内容	検証結果	
既存機能の検証	1	正常動作確認	サーバに計測値が送信されているかどうかを検証する。	WEB上の計測値を閲覧し、正常作動を確認した。
	2	データ送信・閾値に関する観測データの確認	閾値を超える沈下を強制的に発生させ、設定メールへの送信が実行されるかどうかを検証する。	異常値になった場合の発報を確認した。 強制変位量とシステムの計測変位量が一致していることを確認した。
	3	遠隔操作	システムをシャットダウンし、計測の強制終了を行った場合に、エラーメールの送信が実行されるかどうかを検証する。	システム異常であることを知らせる発報を確認した。
新たに追加する機能の検証	1	2段階閾値	強制沈下100mmで「走行注意」、強制沈下200mmで「走行不可」のエラー送信を実行するかどうか、検証する。	100mm増加でデータ送信/パトライト、200mm増加でデータ送信/パトライト/エラーフラグを確認した。
	2	トリガー機能	別途製作した監視局の小型試作機を、変位計に対応させ、アンプ等を介さずセンサを直接接続した場合にも、閾値を逸脱した時点でWEB側へデータが送信されるかどうかを検証する。	監視局の小型試作機の抵抗ボリュームを回し、設定された閾値を逸脱した時点でWEB側へデータが送信されることを確認した。 トリガー機能を利用して、電源ラインが正常かどうか、計測値が異常となった場合に、データ送信を行うことを確認した。
	3	同一橋梁内・別橋梁との無線化検討	同一橋梁の片側橋台に設置した無線センサが、別橋台に設置した監視局で受信出来るかどうかを検証する。 隣接橋梁の監視局を1つに集約し、無線を利用して、複数橋梁の監視が可能かどうかを検証する。	同一橋梁に取り付けた監視局間での無線による送受信を確認した。 別橋梁に取り付けた監視局間での無線による送受信確認を行った結果、障害の有無に関わらず、300mまでは90%以上の成功率で双方の送受信を確認した。
	4	商用電源からバッテリー駆動への切替	停電により商用電源からの電源供給が不可能となった場合に、バッテリーからの電力供給に切り替わるかどうかを検証する。	停電した場合の送信、エラーフラグ、バッテリー切替えを確認した。 復電した場合の送信、エラーフラグ機能を確認した。
	5	供給電源に関する検討	非常用電源として、太陽光発電、風力発電、及び、バッテリー電源の有用性を検証する。	バッテリー電圧と日照時間との関係をグラフ化し、各電源方法に必要な容量を算出した。
	6	ウェブシステム	閾値を超える沈下を強制的に発生させ、被災状況把握システムの作動と被災発生箇所がウェブ上で確認出来るかどうかを検証する。	「注意：黄」、「警告：赤」、「落橋：黒」がWEB上の地図に表示されることを確認した。
	7	段差発生時の通行注意喚起	車両通行に障害を与えるレベルの段差が発生した場合に、トリガー機能を利用して、「注意喚起」のパトランプが点灯するかどうかを検証する。	パトライトの電源がONとなることを確認した。

②対象橋梁

実験は、構内の、鋼橋（北横断橋1号橋）とPC橋（北横断歩道橋）の計2橋を対象橋梁として行った。各橋梁の全景写真を写真3-4～写真3-7に示す。

橋梁名：北横断橋二号橋

橋梁形式：鋼単純鈹桁橋

基礎形式：杭基礎

竣工年：1976年4月

橋長：44.9m（支間：44.0m）



写真3-4. 全景



写真3-5. 計測装置設置箇所

橋梁名：北横断歩道橋

橋梁形式：PC単純中空床板橋（想定）

基礎形式：杭基礎（想定）

竣工年：1978年6月

橋長：35m程度（想定）



写真3-6. 全景



写真3-7. 計測装置設置箇所

④ システム概要

システムの概要を図 3-5 に、監視局の写真を写真 3-8～写真 3-11 に、実験に使用した計測装置一覧を表 3-6～7 に示す。

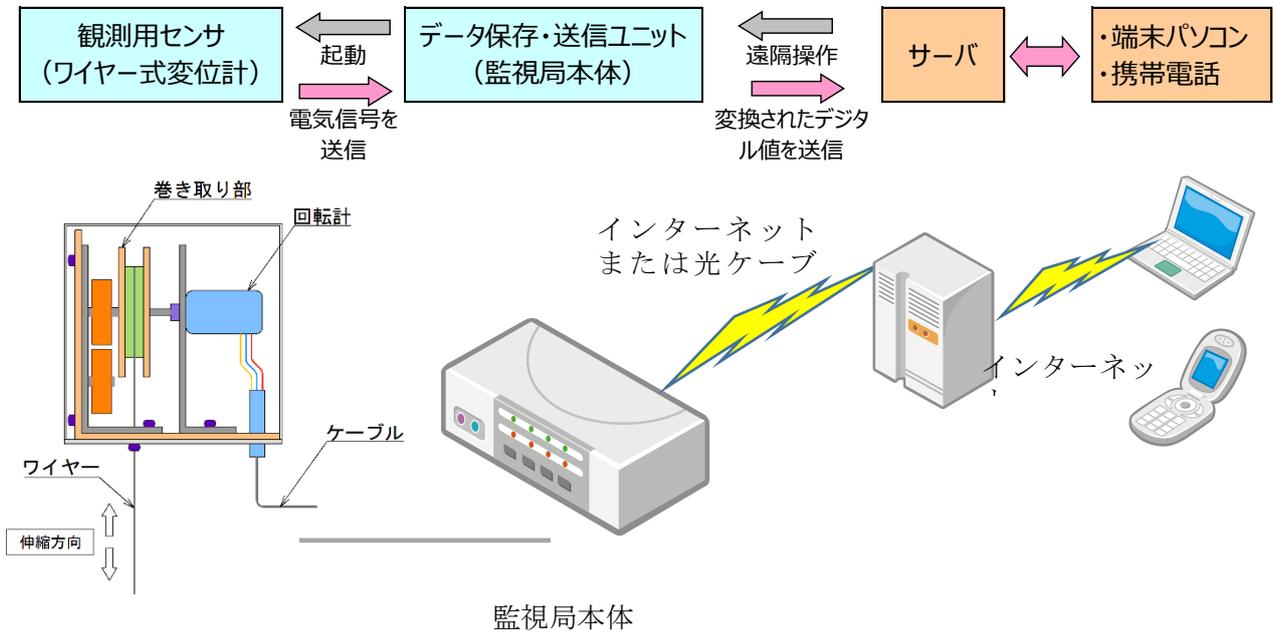


図 3-5. 全体概要図



写真 3-8. 監視局設置状況：北横断橋 1 号橋



写真 3-9. 監視局設置状況：北横断歩道橋



写真 3-10. 監視局内部①



写真 3-11. 監視局内部②

表 3-6. 北横断 1 号橋（使用機器一覧）

項目	名称	仕様	数量	複数数量の内訳
観測機器 (桁端部)	大容量ワイヤ式変位計	ひずみゲージ式, 0~500mm=5.0mV/V(10000 ×10 ⁻⁶ ひずみ), ケーブル長20m	3	3方向 (鉛直+橋軸+直角)
	3方向同時取付架台	SUS304製	1	
アナログIFユ ニット	センサ用アンプ基板	入力:5.0mV/V(10000×10 ⁻⁶ ひずみ), 出力:0-2V	3	
	AD変換基板	入力数:8ch, 入力:0-2V, ADC:18bit,	1	
	有線通信機	RS-485双方向通信	1	
監視局	CPU基板	ADC10bit以上, アナログ入力6ch以上, 外部電源制御2ch以上	1	
	3G無線機	NTTDoCoMoFOMA用	1	
	3G無線機用アンテナ		1	
	有線通信機	RS-485双方向通信	1	
	GPS受信機		1	
	太陽電池パネル	DC12V60W	1	
	密閉型鉛蓄電池	DC12V60Ah	1	
	太陽電池充放電制御器	定格入力, 19V6A 4段階充放電制御, 温度補正機能	1	PWM充電, トリクル充電、フロート充電、放電
	防水コネクタ	IP65以上	4	桁端部センサ3, 太陽電池パネル1
	防水筐体	IP65以上	1	

表 3-7. 北横断歩道橋（使用機器一覧）

項目	名称	仕様	数量	複数数量の内訳
観測機器 (桁端部)	大容量ワイヤ式変位計	ひずみゲージ式, 0~500mm=5.0mV/V(10000 ×10 ⁻⁶ ひずみ), ケーブル長20m	2	2方向 (橋軸+直角)
	大容量ワイヤ式変位計	可変抵抗式, 0~1000mm=0~10KΩ, ケーブル長20m	1	1方向 (鉛直)
	3方向同時取付架台	A6063 アルミフレーム製	1	白アルマイト仕上げ
アナログIFユ ニット	センサ用アンプ基板	入力:5.0mV/V(10000×10 ⁻⁶ ひずみ), 出力:0-2V	2	
	センサ用信号変換基板	入力:0-5V, 出力:0-2V	1	1方向 (鉛直)用
	AD変換基板	入力数:8ch, 入力:0-2V, ADC:18bit.	1	
	有線通信機	RS-485双方向通信	1	
監視局	CPU基板	ADC10bit以上, アナログ入力6ch以上, 外部電源制御2ch以上	1	
	3G無線機	NTTDoCoMoFOMA用	1	
	3G無線機用アンテナ		1	
	有線通信機	RS-485双方向通信	1	
	GPS受信機		1	
	太陽電池パネル	DC12V6W	1	
	風力発電機	DC12V2W	1	
	密閉型鉛蓄電池	DC12V60Ah	1	
	太陽電池充放電制御器	定格入力, 19V6A 4段階充放電制御, 温度補正機能	1	PWM充電, トリクル充電、フロート充電、放電
	防水コネクタ	IP65以上	4	桁端部センサ3, 太陽電池パネル1
	防水筐体	IP65以上	1	

(2) 動作確認の詳細

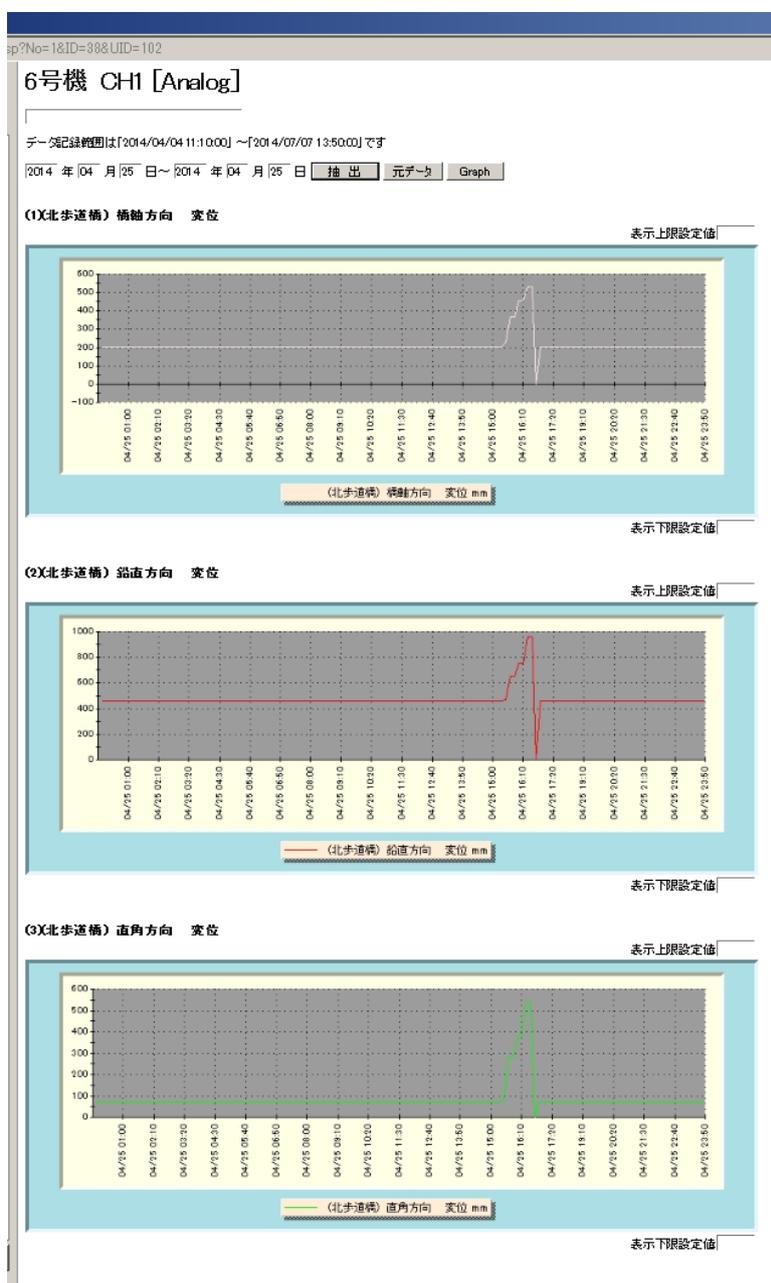
①既存変位計の動作確認

a. 正常動作確認

変位計に、閾値を超えない範囲の強制変位を与え、変位計の計測データが、監視局、及び、サーバに、計測値が送信されているかどうかを確認した結果、WEB 上で計測値を閲覧する事が出来、変位計の正常作業を確認出来た。

以下に、強制変位を与えた時間を含む、計測履歴を示す(図 3-6)。グラフ横軸は日付、縦軸は変位を示す。グラフ内の計測値が大きく変動している箇所が、強制変位を与えた時刻である。平常時は 1 日 4 回の正常動作確認としたが、強制変位を与える前後でも、安定して計測出来ていることが確認出来る。

【北横断橋 1 号橋】



【北横断歩道橋】

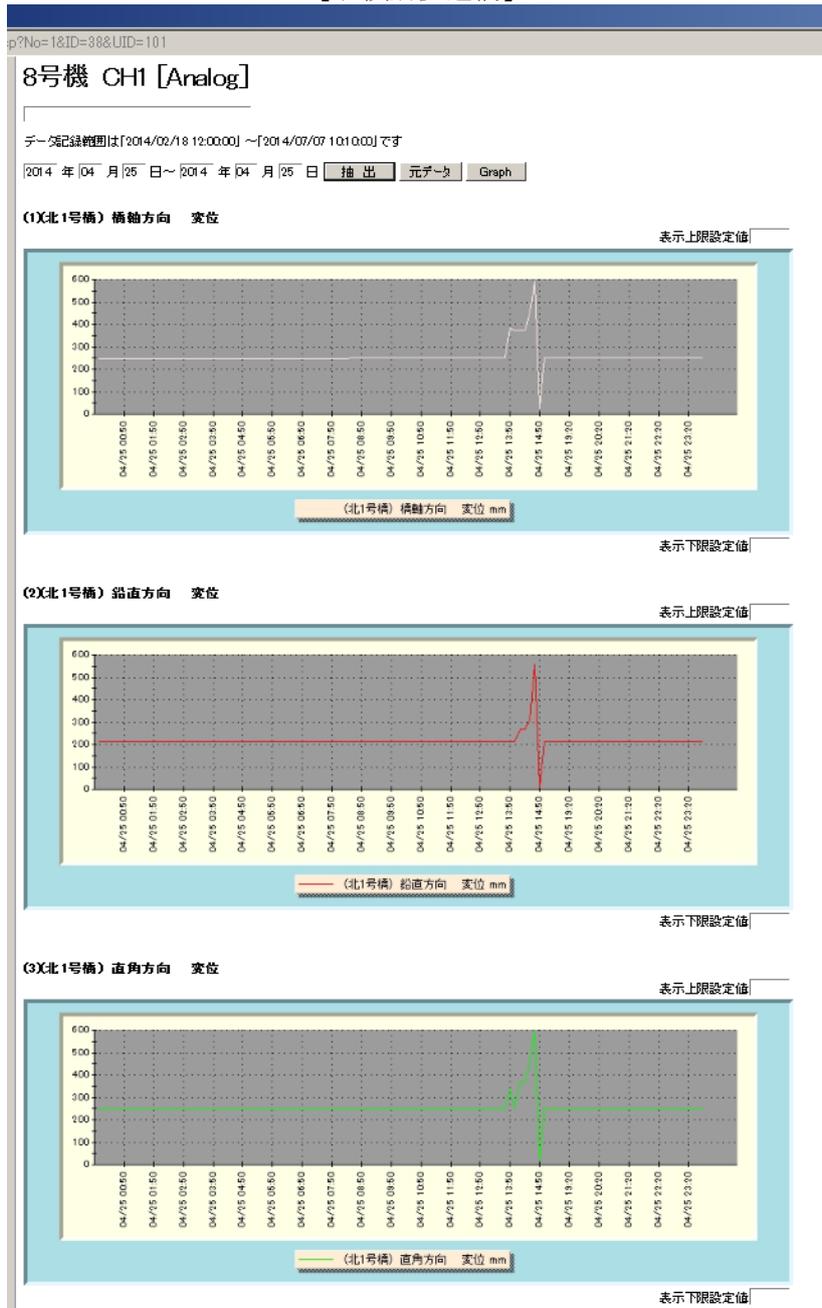


図 3-6. 変位量の計測履歴



写真 3-12. 計測機設置状況：北横断橋 1 号橋



写真 3-13. 計測機設置状況：北横断歩道橋

b. データ送信・閾値に対する観測データの確認

閾値を超える沈下を強制的に発生させ、端末PC、及び、携帯電話へのメール送信が実行されるかを確認を行った。

結果、強制的に引っ張ってクリップで固定することで発生させた変位量とシステムが計測している変位量が一致していることを確認した（図 3-7）。

【北横断橋 1号橋】



【北横断歩道橋】

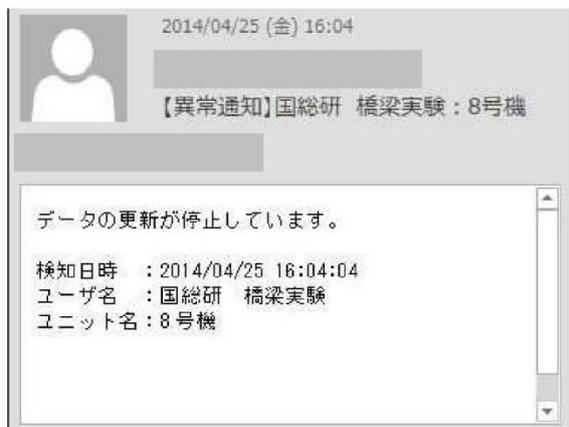


図 3-7. 強制変位量とシステムに送信された計測値

c. 遠隔操作

監視局の電源を強制的にシャットダウンし、システム異常を知らせる警告メールが発進されることを確認した (図 3-8)。

【北横断橋 1 号橋】



【北横断歩道橋】

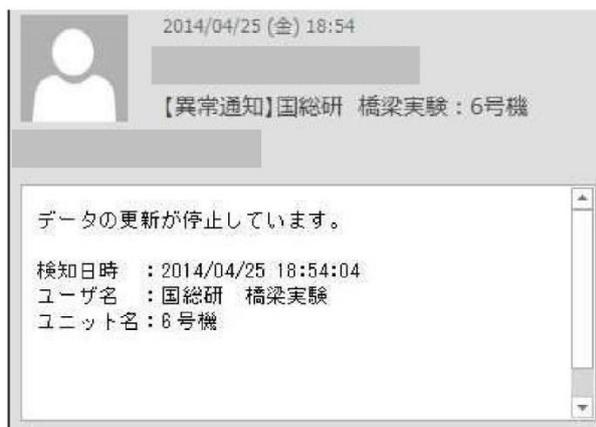


図 3-8. WEB 上での警告メール確認画面

②新たに追加した仕様の動作確認

a. 2段階閾値

人工的に計測装置に強制沈下を与えることで動作確認を行った。強制沈下 100mm で「通行注意」、強制沈下 200mm で「警告 (走行不可)」のエラー送信 (異常通報) を実行するかについて検証した。その結果、WEB 上で計測値の変化を確認出来た (図 3-9)。ここで、「通行注意」とは段差等が発生し、通行に少なからず支障を与える状態を指し、「警告 (走行不可)」とは段差等が発生し、物理的に走行できない場合、あるいは安全に走行できない状態を指す。また、強制沈下量とした 100mm、200mm については、後述する「4. 4 閾値の設定」にて設定した値としている。

□ は、強制変位 100mm (基準値 500mm→計測値 614mm) に増加したため、パトランプが点灯した。

□ は、強制変位 200mm (基準値 500mm→計測値 807mm) に増加したため、パトランプが点灯し、データ送信、エラーフラグを確認した。



図 3-9. WEB 上での確認画面

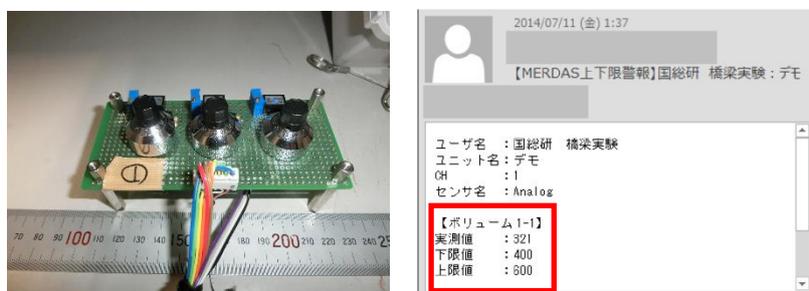
b. トリガー機能

別途製作した監視局の小型試作機を、変位計に対応させ、アンプ等を介さずセンサを直接接続した場合にも、閾値を逸脱した時点で WEB 側へデータが送信されるかどうかを確認した。

※トリガー機能：指定した条件に合致する変更が行われると自動的に起動され、指定された処理を行う機能のこと。

【実験 1】

監視局の小型試作機の抵抗ボリュームを回し、設定された閾値を逸脱した時点で WEB 側へデータが送信されることが確認出来た。図 3-10 中の表は、変位計に変化があった倍に送信されるメールと Web 上の変位を示す一覧である。計測変位が、499mm→340mm→321mm と変化した際にメールが送信されている事が判る。



No	記録日時	ボリューム 1-1 [mm]	ボリューム 1-2 [mm]	ボリューム 1-3 [mm]	センサ1-1 [mm]	ボリューム 2-1 [mm]	ボリューム 2-2 [mm]	ボリューム 2-3 [mm]	センサ2-1 [mm]	ダミー
1114074	2014/07/11	499.000	501.000	505.000	410.000	510.000	511.000	511.000	504.000	509.000
1114096	2014/07/11 1:33:40	340.000	501.000	505.000	410.000	510.000	511.000	511.000	505.000	497.000
1114097	2014/07/11 1:34:30	321.000	501.000	504.000	410.000	510.000	511.000	511.000	504.000	515.000
1114098	2014/07/11 1:35:10	321.000	501.000	504.000	410.000	510.000	511.000	511.000	505.000	511.000

図 3-10. Web 上での確認画面

【実験 2】

トリガー機能を利用して、電源ラインが正常かどうか、計測値が異常となった場合に、データ送信を行うことが確認出来た。

c. 同一橋梁内・別橋梁との無線化検討

1. 同一橋梁内の無線化検討

北横断 1 号橋の A1 側を監視親局とし、A2 側を監視子局とし、両者間で、無線による双方向データ通信を行った。また、A2 側の観測データを A1 側から低消費電力指令（スリープ）を送信し、A2 側がスリープ状態となるのを確認した。図 3-11 に、無線通信記録を示す。1-2 行目は子機から親機へ応答反応していることを、3 行目は親機から子機に指令が出されていることを、4 行目は子機から親機へ応答反応していることを示している。

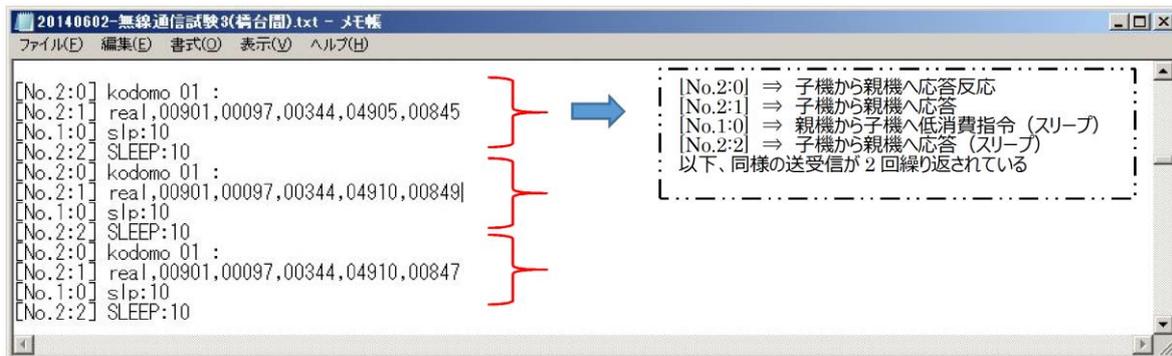


図 3-11. WEB 上での確認画面

2. 別橋梁との無線化検討

障害物のない道路上で、監視子局を監視親局から徐々に距離を離し、無線による通信が不可能となる距離を確認した。また、親局と子局の間に障害がある場合についても確認したが、障害の有無に関わらず、300mまでは90%以上の成功率で双方の受送信を確認出来た（表3-7）。

表3-7. 無線通信結果

	200m	250m	300m	350m	400m
通信回数	79	152	264	116	123
不通回数	4	8	25	40	92
成功率	94.9%	94.7%	90.5%	65.5%	25.2%

無線検討には、以下に記述する3機能を重視して、TOCOS ワイヤレスエンジン TWE-Strong を使用した。

【検討に使用した無線の性能】

①低消費電力

非常に小さい消費電流（送信時：28mA、受信時：23.5mA、ディープスリープ時：1.3 μ A）で動作する。

②瞬速起動

IEEE802.15.4/Zigbee 無線モジュール TWE-Strong は、起動時間が短く、無駄な電力消費が少ない。そのため、低レイテンシ（遅延時間）での通信が可能である。

③長距離通信

パワーアンプを追加しながら低消費電力を保ち、内臓アンテナで最長1,700m、外部アンテナで最長3,110mの長距離通信が可能である（数値はカタログ値）。

図3-12に、別橋梁との無線化検討を行った結果を示す。



図 3-12. 無線化検討結果図

d. 商用電源からバッテリー駆動への切替

停電により商用電源からの電源供給が不可能となった場合に、バッテリーからの電力供給に切り替わるかどうかを確認した。

1. バッテリー低下を知らせるシステムの構築

北横断歩道橋の補足電源である太陽電池は6W と小さく、日照時間によっては、必要電圧まで復元出来ない場合があり、以下の内容のメールを確認し、システムの確実性を確認した（図 3-13）。

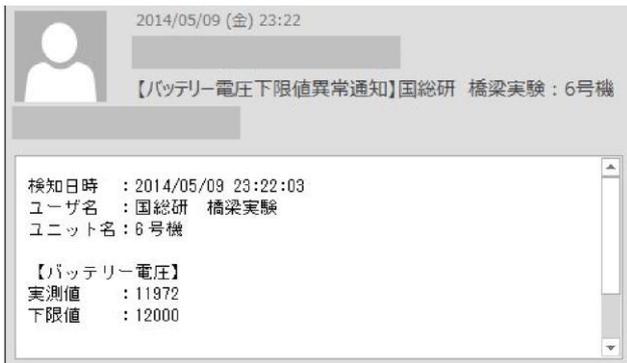


図 3-13. WEB 上での確認画面

2. バッテリーからの電源供給に切り替えるシステムの構築

強制的に停電を発生させ、以下システム（図 3-14）の動作確認を行った。

- ・ AC 停電発生：1 回のみデータ送信→バッテリーに切り替え
- ・ AC 停電復旧：1 回のみデータ送信→エラーフラグ

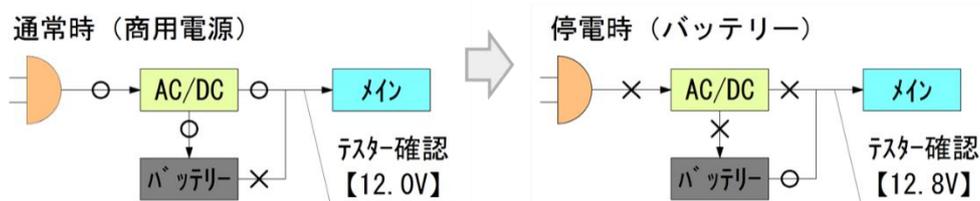


図 3-14. 供給電源の切替イメージ

3. 通電の確認

テスターによる確認（商用電源 12.0V、バッテリー12.8V）と WEB によるエラーフラグの確認を行った。図 3-15 は、Web 上の電源状態の確認画面で、0000 は、正常時「0000」、異常時「0800」の内、総て正常時「0000」を表示していることが確認出来る。

記録日時	ユニットID	機器名	ソーラーパネル電圧	バッテリー電圧	空気流量	観測時刻	データ送信時刻	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	ErrNo	グラフ比較
2014/05/17 6:00:00	108	デモ	14000	12190	2004221952	10min	08	Analog						0000	過去履歴
2014/05/17 17:00:00	102	6号機	14000	12229	2000060416/2004221952	10min	08	Analog						0000	過去履歴
2014/05/17 17:00:00	108	8号機	14000	14083	198880768/2004221952	10min	08	Analog						0000	過去履歴

エラーフラグ
 正常時 0000
 異常時 0800

図 3-15. WEB 上での確認画面

e. 供給電源の検討

電源設備は大きく別けて、商用電源、発電機、太陽光発電システム、風力発電システムの4つが存在するが、本実験では、非常時の供給電源として、太陽光発電システム+バッテリーを使用した。太陽光発電の容量は、60W (写真3-14) と6W (写真3-15) の2タイプを比較し、その適用性を検討した。また、積雪地域で有効となる小型風力発電 (写真3-16) についても、その適用性について検討した。



写真 3-14. 60W 太陽光発電
(8 万円程度)



写真 3-15. 6W 太陽光発電
(8 千円程度)



写真 3-16. 小型風力発電
(3 万円程度)

実験の結果、風力発電ではシステム稼働時に必要な発電量が得られず、太陽光発電の方が十分な発電量が確実に得られることが確認出来た (図 3-16)。

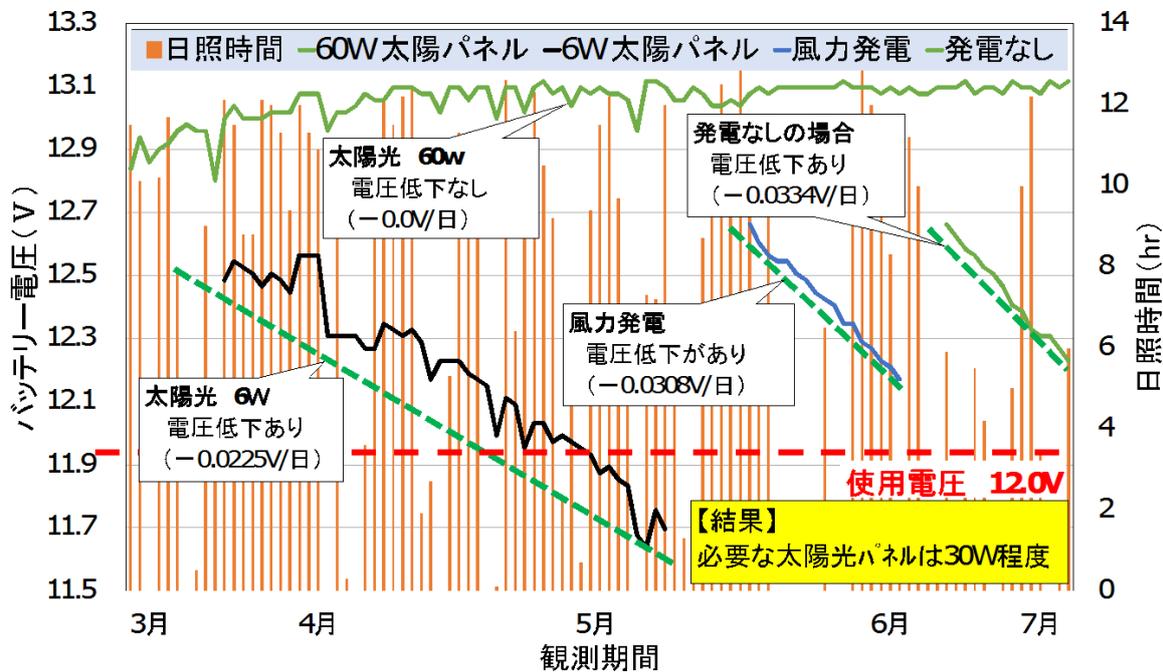


図 3-16. 風力発電と太陽光発電の検証結果

※太陽光パネルに必要な発電量 30W は、別途、以下に示す電力計算により算出した値。

【太陽光パネルに必要な発電量の算出】

- ・平均使用電流 0.0655A (1時間あたり)
- ・太陽電池パネルの必要ワット数 計算
1日あたりの使用消費電流 (平均電流×24時間)
 $0.0655A \times 24 \text{時間} = 1.572A$
- ・充電必要電流量 (使用電流×1.2(充電効率))
 $1.572 \times 1.2 = 1.8864A$
- ・1日の充電時間 (昼間の光線が安定している時間：平均3.5時間と仮定)
必要太陽電池電流 電源電圧を12Vとすると
 $1.8864 / 3.5 = 0.539A$ $0.539 \times 12 = 6.468W$

以上より、6.468W以上の太陽電池パネルでO.K.

悪天候で無充電状態が連続5日程あっても監視可能なように考慮すると、
 $6.468W \times 5 \text{日} = 32.34W$ の太陽電池パネルが必要である為、30W程度出力可能な
太陽電池パネルを使用することとした。

f. ウェブシステム

計測対象橋梁を含む地図を表示し、計測値が閾値を超過した場合に、「津波による被害(落橋)」、「警告」、「注意」の3段階で表示フラグ色を変化させて、地図上に反映させる。その他、全橋梁のリストから平面図へリンクさせる、橋梁のフラグをクリックすることで計測値(詳細情報)を確認することが出来る、等の機能も有したシステムとした(図3-17)。

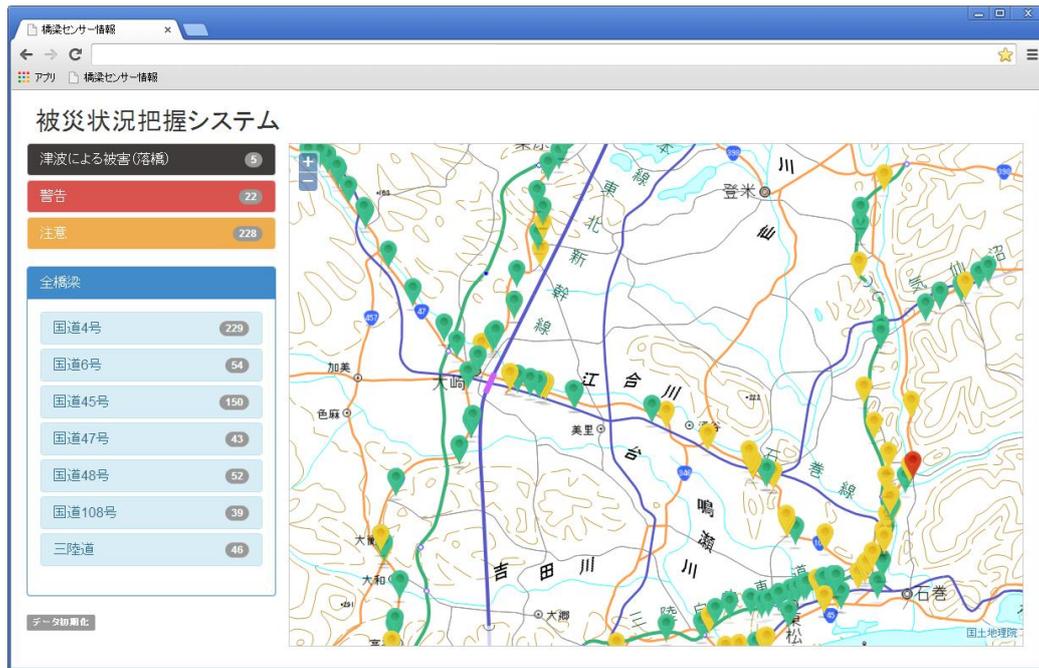


図 3-17. 被災状況把握システム画面

g. 段差発生時の通行注意喚起

車両通行に障害を与えるレベルの段差が発生した場合に、トリガー機能を利用して、「注意喚起」のパトランプが電源 ON となった事を確認出来た（写真 3-17）。



写真 3-17. パトランプ点灯

(3) 外部環境条件における計測値の検証

ここでは、外部環境条件が影響する、計測値、及び、計測機について、参考文献 12)～15)に基づき検証を行った。外部環境条件は、温度、湿度、風、紫外線、雨水、車両荷重、動植物、排泄物、結露、粉塵、塩分、材料特性（コンクリートのクリープ・乾燥収縮等）等が挙げられるが、ここでは、特に、当該システムへの影響が大きい条件として、①温度、②雨水、③凍結、④車両荷重に着目した検証を行った。検証内容と検証結果一覧を表 3-9 に示す。

表 3-9. 検証内容と検証結果一覧

対象項目	環境条件	検証内容	検証結果	評価
①桁変位	温度	温度変化による変位	橋軸：温度差 9°C⇒9mm 理論値 (8.9mm) と相関性が非常に良い 鉛直：ほとんど発生しない	理論値による変位を考慮して評価する
	車両荷重	たわみ (桁端回転) による移動 (水平)	最大 3mm (理論値は 6mm)	変位は瞬間的に生じる弾性変位で、システムの計測サイクルも加味すると、無視して問題ない。
		たわみ (桁端回転) による変位 (鉛直)	最大 0.1mm 程度	変位は微小であり無視して問題ない
②計測装置の作動	常時	恒温・同変位による値の変化 (初期段階での測定値の変化)	変化は生じない	影響ない
	温度	温度による影響	-5°C~50°C：問題ない -20°C：計測器内部が凍結	作動可能温度 -5°C~50°C
③計測装置の防水	雨水	計器内への水の侵入 (散水試験・水中試験)	水中に入れた場合、浸水確認	一般的な風雨は影響ない
④太陽光パネルの妥当性	太陽光	電圧低下量	日中 (12:00) に 14V 以上確認 (使用限界電圧：11.5V)	妥当である。
⑤橋台背面アプローチ部の計測値	車両荷重	車両荷重による鉛直変位	確実に作動していることを確認	妥当である。

①桁変位

a. 温度

鋼 2 径間連続鉄桁橋（支間長 $L_s=44.5\text{m}$, 伸縮桁長 $L_t=89.0\text{m}$ ）を対象橋梁として、上部工桁の変位を 1 週間（1 時間毎）計測した結果を図 3-18 に示す。グラフより、理論値と計測値の相関性が非常に良い事が判る。

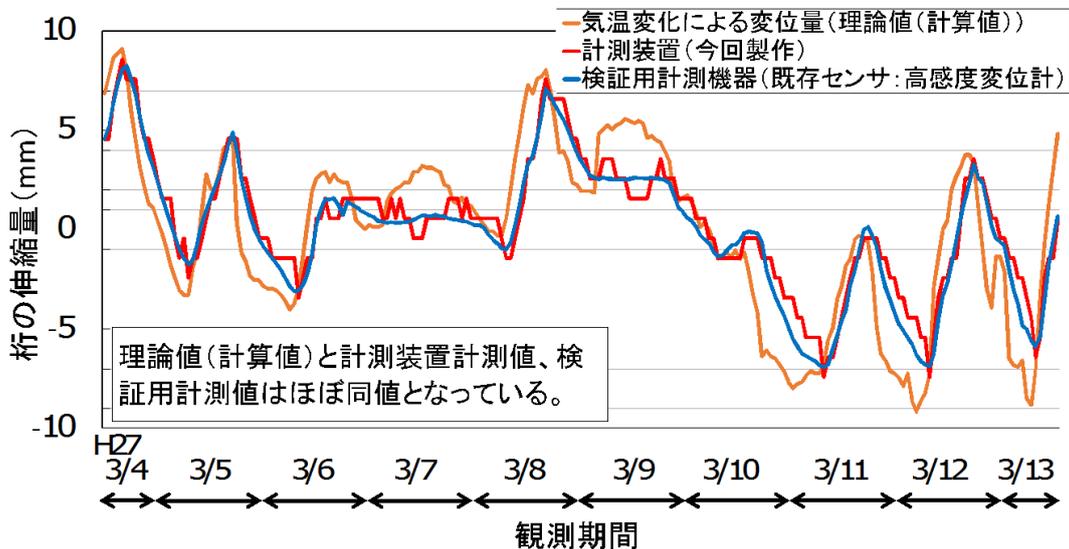


図 3-18. 温度変化による計測誤差の検証結果

b. 車両荷重

車両通行での桁回転による変位が 3mm 程度生じている（図 3-19 参照）が、相対的に大きな変位量でないことや、車両による変位の発生は瞬間的であること、弾性変位であることなどから、段差計測への影響を考慮する必要はないと判断した。

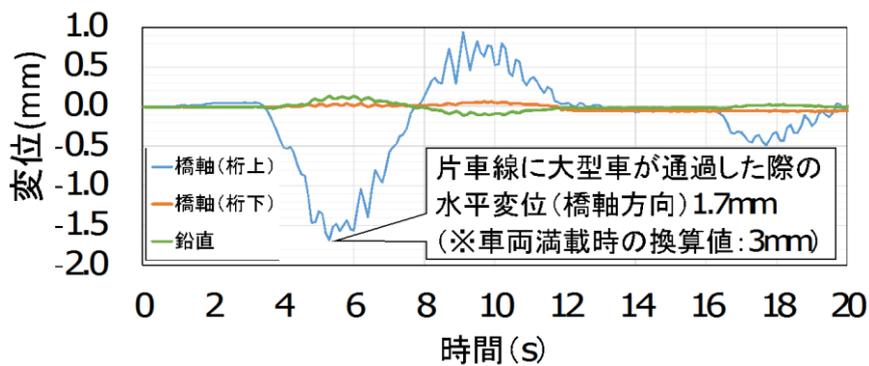


図 3-19. 交通荷重による計測誤差の検証結果

②計測装置の作動

a. 常時状態

初期設置時として6時間計測した結果、総て同変位量であり、問題ないことが確認出来た。

b. 温度変化による作動確認

- ・低温状態（5℃）：常時状態と同値であり、問題ないことが確認出来た。
- ・高温状態（ドライヤーで5分間加熱した状態）：常時状態と同値であり、問題ないことが確認出来た。
- ・作動可能な最低温度：-5℃では計測器内部のスプリングは凍結せず、計測可能であった。
- ・凍結状態（-20℃）：ケーブル引込み口からのケーブル引出しは可能であったが、計測器内部のスプリングが凍結したため、ケーブルが巻き上げられず、戻らない状態となった。解凍後は、常温状態と同値を示し、復旧することを確認した。

③計測装置の防水

センサを30分間、完全に水中に入れた場合、浸水が確認された（写真3-18参照）。



写真3-18. 浸水試験結果

④太陽光パネルの妥当性

太陽光パネルを実橋に設置し、電圧量変動により、太陽光パネルの妥当性を確認した。日中(12:00)に14V以上に蓄電されており、健全に作動出来ることが確認出来た(図3-20参照)。

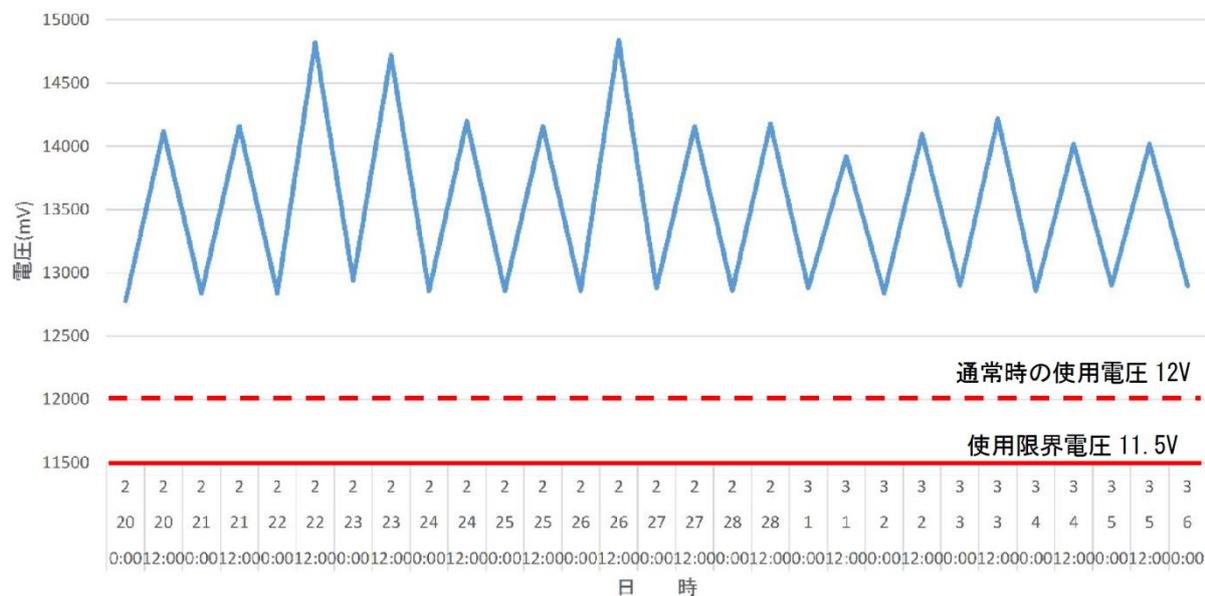


図3-20. バッテリー電圧の確認(太陽光パネル)

⑤橋台背面アプローチ部の計測値

橋台背面アプローチ部の計測装置を利用して、使用するロガーに直接接続して計測を行い、確実に作動していることを確認した(図3-21参照)。

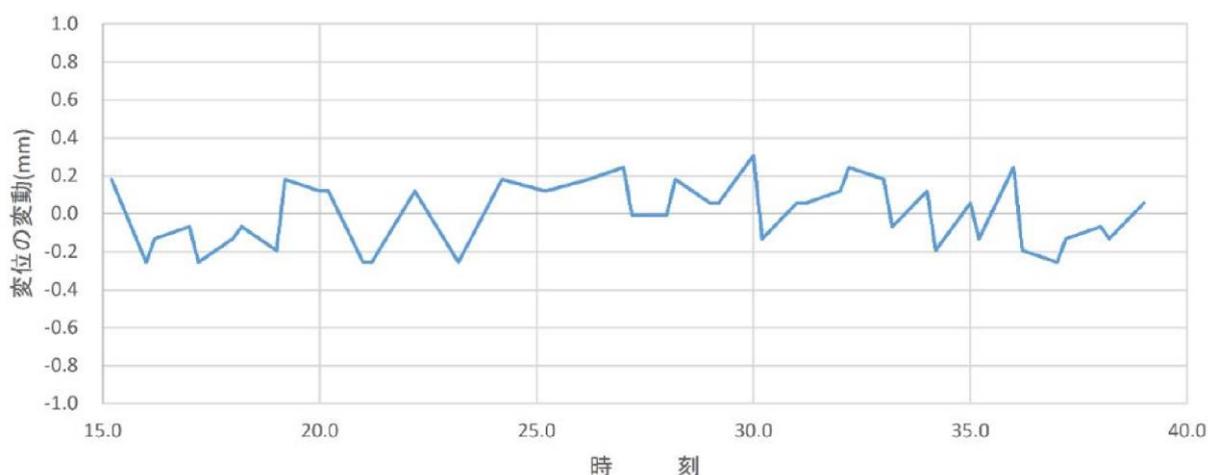


図3-21. 橋台背面アプローチ部計測の変位変動