

2. 道路橋被災状況把握技術の検討

2. 1 東北地方太平洋沖地震における道路橋の被災事例分析

東北地方太平洋沖地震後に実施された橋梁緊急点検結果（直轄国道本線橋 1,831 橋）の内、対象橋梁 1,504 橋について、通行障害をおこしていた橋梁の損傷原因や損傷箇所、適用基準、構造形式、耐震補強の有無等の整理を行い、被災パターンの類型化を行った。¹⁾²⁾

2. 1. 1. 被災状況の詳細整理

本研究の目的が、道路橋の地震被害や通行障害を、面的情報としてリアルタイムに把握する技術の検討にあるため、対象橋梁 1,504 橋のうち、耐荷性、及び、走行性に関して、何らかの被害を受けた 485 橋（走行性に関する被災橋梁 450 橋＋耐荷性に関する被災のみの 35 橋）について、特に着目して被災状況の詳細整理を行った。詳細整理は、後述する（1）～（13）の項目について実施した結果、以下の内容が判った。

- ・対象橋梁（485 橋）の内、98%以上が計測震度V弱以上の地震によって被災していた。
- ・対象橋梁（485 橋）の約半数が、1961～1980 年の高度経済成長期に架設されていた。
- ・本線橋の 98%が桁橋形式の橋梁であった。
- ・本線橋、側歩道橋ともに、支承形式はタイプ A 支承が殆どであった。
- ・本線橋、側歩道橋ともに、杭基礎形式が約半数と最も高い割合を示しており、ケーソン基礎を有する橋梁は少なかった。
- ・本線橋での踏掛版設置有無の割合は、同程度であった。
- ・本節橋、側歩道橋ともに、昭和 55 年以前の基準で設計された橋梁が約 60%を占めていた。
- ・本線橋の殆どは、「3 箇年プログラム」以上の耐震補強が実施されていた。

対象橋梁と被災度の関係を表 2-1 に示す。

表 2-1. 対象橋梁と被災度の関係

		耐荷性に関する被災度					合計	
		As：落橋	A：大被害	B：中被害	C：小被害	D：被害なし		
走行性に関する被災度	a：通行不能	11	1	5	3	9	29	450
	b：通行注意	1	12	15	70	323	421	
	c：被害なし	0	0	10	25	1019	1054	
合計		12	13	30	98	1351	1504	

耐荷性のみに関する被災橋梁
(走行性に関する被災なし)：35 橋

耐荷性に関する被災橋梁：153 橋

走行性に関する被災橋梁：450 橋

※「As：落橋」の 12 橋は総て、津波により流出した橋梁であったが、内 1 橋は、流出後に仮橋が設置されており、緊急点検時には、「b：通行注意」の判定となったものである。

(1) 計測震度

対象橋梁は、計測震度IV以上で何らかの被災を受けており、被災橋 485 橋の内、98%以上の計測震度がV弱以上となっている（図 2-1）。

(2) 地盤の最大加速度（PGA）

被災橋 485 橋の約 94%が 300gal 以上となっている（図 2-2）。

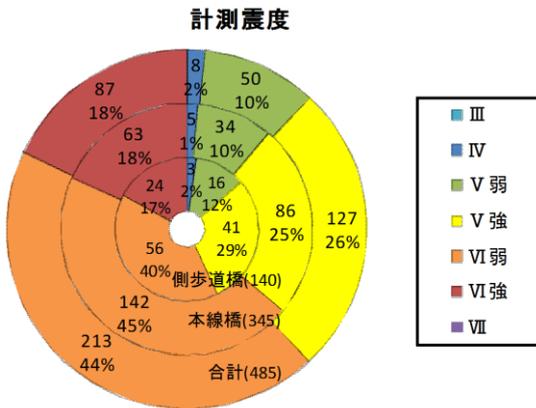


図 2-1. 計測震度（被災橋 485 橋）

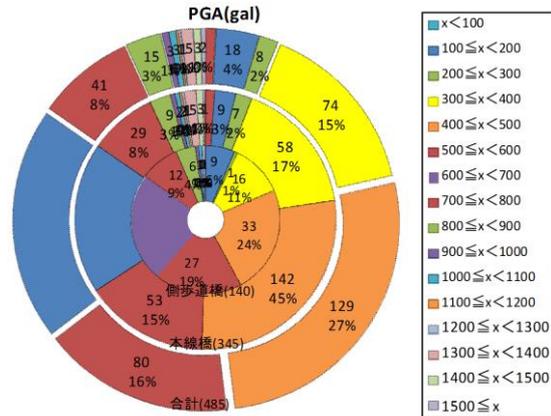


図 2-2. 最大加速度（被災橋 485 橋）

(3) 地盤種別

被災橋の内、約 80%がⅡ種地盤以上であり、Ⅲ種地盤（軟弱地盤）は少ない。「不明」は、ボーリング調査結果等、地盤条件が判る資料が見付からなかった橋梁である（図 2-3）。

(4) 橋の等級

本線橋の内、70%が 1 等橋であったが、側歩道橋については「等級不明」が殆どである（図 2-4）。

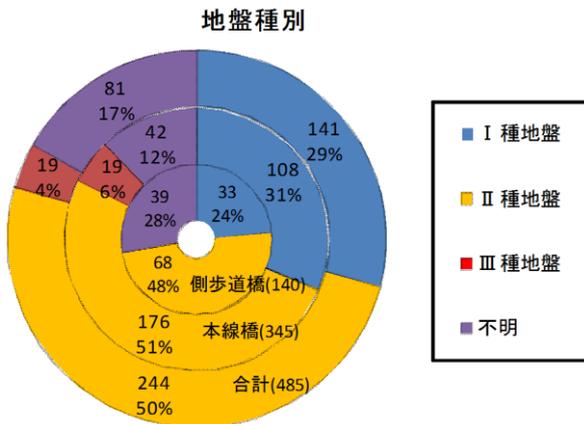


図 2-3. 地盤種別（被災橋 485 橋）

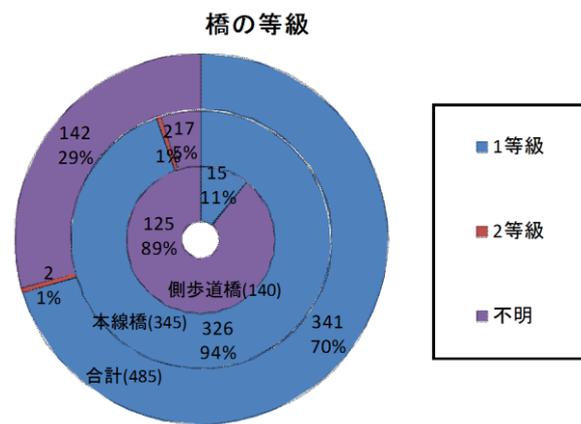


図 2-4. 橋の等級（被災橋 485 橋）

(5) 架設年

1961 年～1980 年の 20 年間に架設された橋梁が約半数を占めており、側歩道橋については、比較的、1971 年以降に架設された新しいものが多い（図 2-5）。

(6) 材料

被災橋は、鋼橋とコンクリート橋ではほぼ同数となっている。「その他」に類する橋梁は、鋼橋とコンクリート橋から構成されている連続橋であった（例. PC プレテン方式単純 T 桁橋+鋼 3 径間連続鈹桁橋）（図 2-6）。

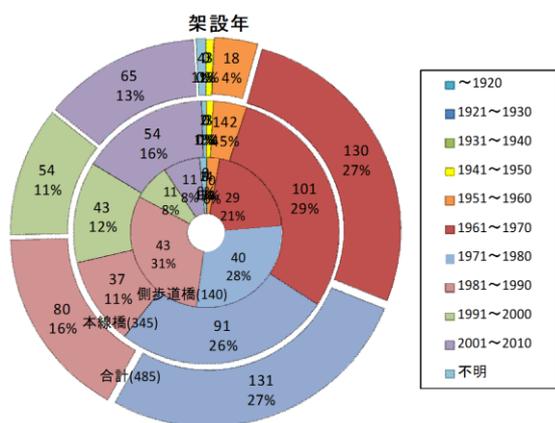


図 2-5. 架設年 (被災橋 485 橋)

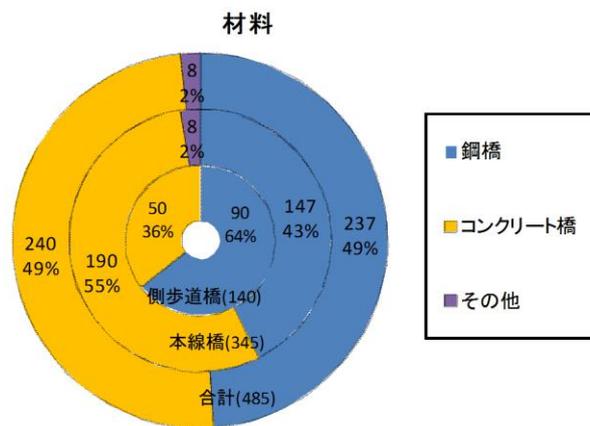


図 2-6. 材料 (被災橋 485 橋)

(7) 上部構造形式

本線橋の 98%が桁橋形式となっている。「特殊橋梁」に類するものは、ラーメン橋 (4 橋)、ボックスカルバート (2 橋)、トラス橋 (3 橋)、アーチ橋 (3 橋) となっている (図 2-7)。

(8) 支承形式

本線、側歩道橋ともに、タイプ A 支承が殆どである (図 2-8)。

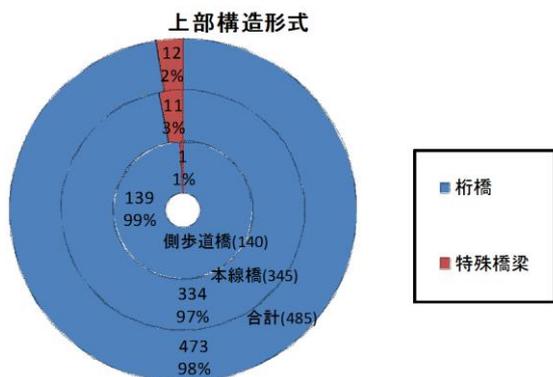


図 2-7. 上部構造形式 (被災橋 485 橋)

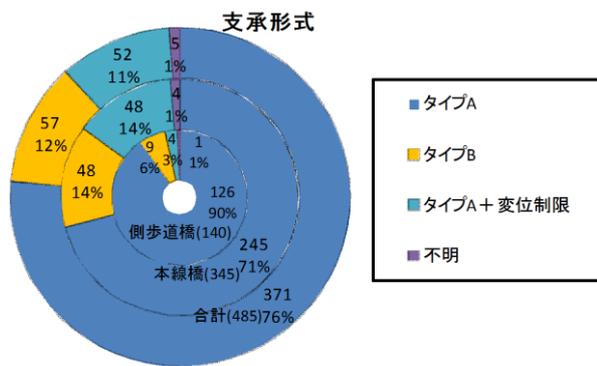


図 2-8. 支承形式 (被災橋 485 橋)

(9) 橋台の基礎形式

本線橋、側歩道橋ともに、杭基礎形式が約 50%と最も高い割合を示しており、ケーソン基礎を有する橋梁は少ない。「不明」は、橋梁定期点検調査書、橋梁台帳、図面がなく、基礎形式を特定出来なかった橋梁である (図 2-9)。

(10) 橋台アプローチ部の形式

本線橋では、踏掛版の有無の割合は同程度となっている。平成14年道示以前は、側歩道橋に踏掛版を設置する必要がなかったため、設置されている側歩道橋は少ない。「不明」は、橋梁台帳等に記載がないため確認出来なかった橋梁である(図2-10)。

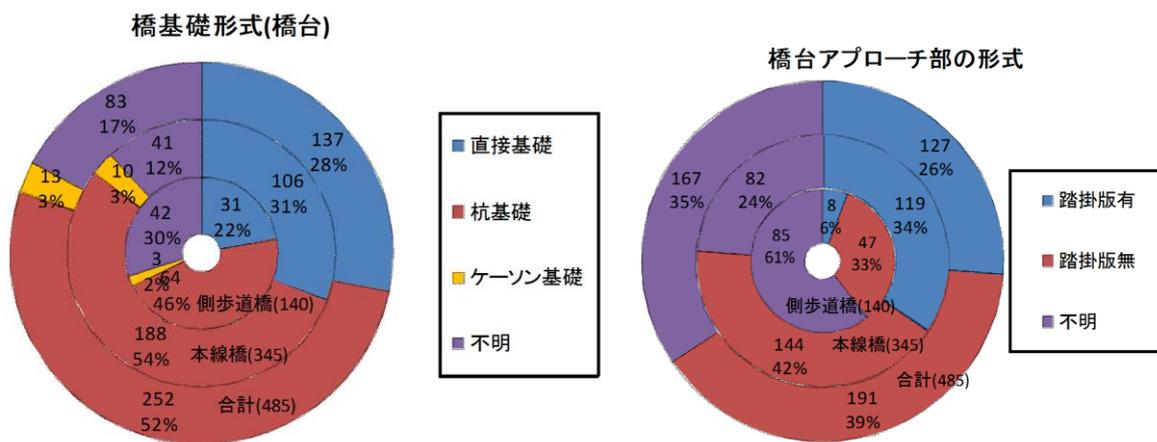


図 2-9. 橋台の基礎形式 (被災橋 485 橋) 図 2-10. 橋台アプローチ部の形式 (被災橋 485 橋)

(11) 設計当初基準

本線橋、側歩道橋ともに、昭和55年以前の基準で設計された橋梁が約60%を占めている。「不明」は、定期点検調書、橋梁台帳等の資料が入手出来なかった橋梁である(図2-11)。

(12) 耐震補強の有無

本線橋の殆どで「3箇年プログラム」以上の耐震補強が実施されている。側歩道橋は、「3箇年プログラム」に該当する橋台を有しない単純橋が多い傾向にあり、耐震補強実施率も低くなっている。「不明」は定期点検調書、橋梁台帳等が無く、耐震補強の経緯が不明な橋梁である(図2-12)。

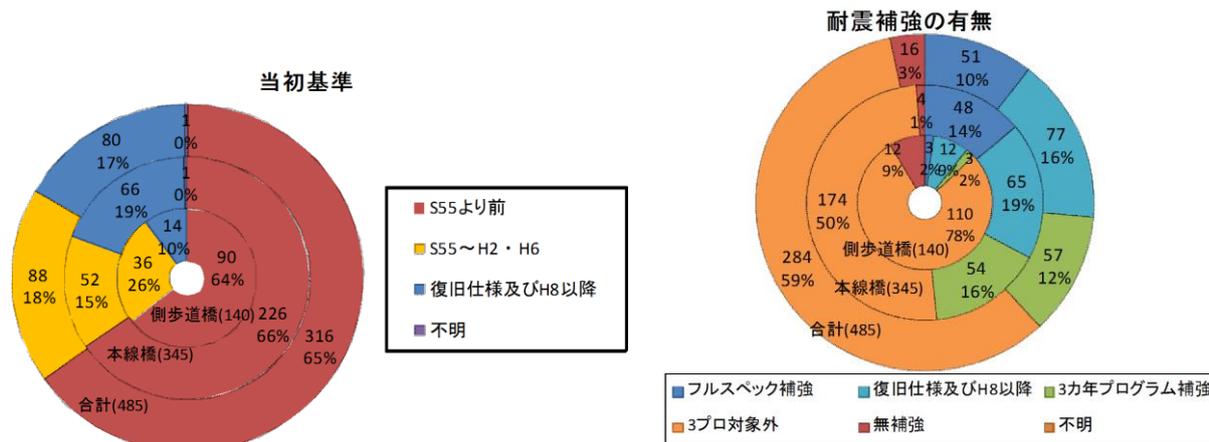


図 2-11. 設計当初基準 (被災橋 485 橋)

図 2-12. 耐震補強の有無 (被災橋 485 橋)

(13) 落橋防止システムの設置

本線橋の落橋防止システムは、殆どが、落橋防止構造となっている。集計は、被災橋 485 橋の内、定期点検調査や橋梁台帳から判断出来た 148 橋のみで行った (図 2-13)。

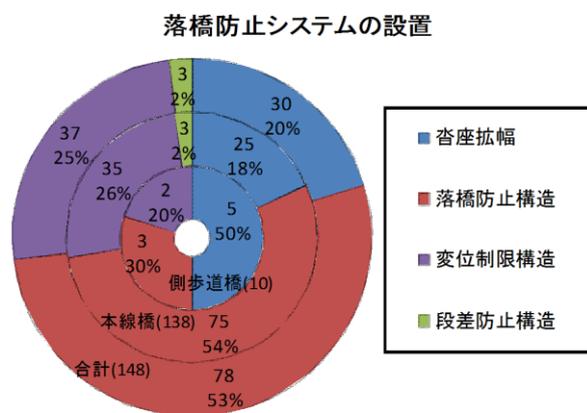


図 2-13. 落橋防止システムの設置

2. 1. 2. 被災状況のパターン化と相関分析

予め、通行障害の原因となる主な被災形態は、「落橋」、「橋脚の傾斜」、「橋台背面盛土の沈下」、「伸縮装置の段差」の 4 つを想定していたが、情報整理の結果、「橋台背面盛土の沈下」に類するものが全体の約 8 割、「伸縮装置の段差」が約 1 割である事がわかった (図 2-14)。そこで、被災橋梁の被災状況 (走行性) を確認する方法としては、桁端部及び橋台背面アプローチ部に着目した変位計測が有効であると結論付けた。

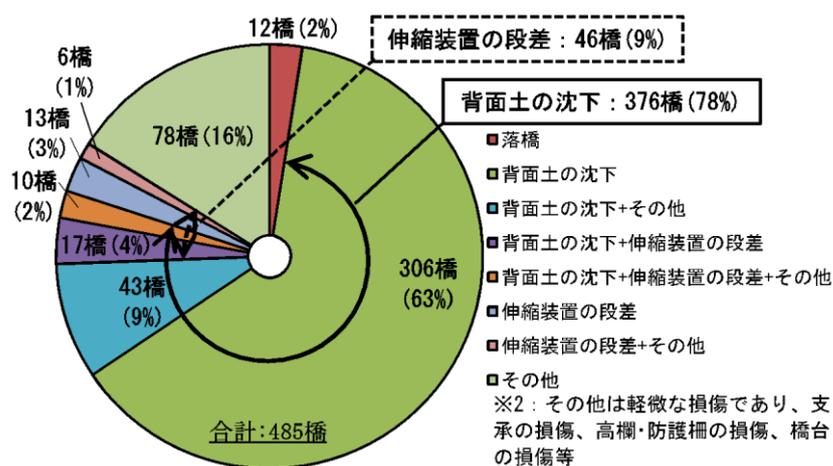


図 2-14. 道路橋の被災原因別の内訳

(1) フォールトツリー分析 (FTA 分析)

地震後に通行障害をおこしていた被災橋梁 450 橋の中でも、緊急点検において、「路面段差による通行注意」と判定されていた 376 橋に着目し、フォールトツリー分析 (以下、「FTA」という)

を行った。

【FTA 分析の実施手順】

- ① 分析対象としたい事象（トップ事象）を決め、FT 図の最上位に置く。
- ② トップ事象を引き起こす要因となる中間事象を列挙し、上位事象との因果関係を AND ゲート（下位事象が総て発生した場合に、上位事象が発生する）、及び、OR ゲート（下位事象のいずれか一つが発生した場合に上位事象が発生する）等を用いてツリー状に展開し、再開に基本事象を設定する。
- ③ 得られた分析結果から、トップ事象を引き起こす主要因を明らかにし、対策等を立案する。

本研究では、「As：落橋」等、通行障害となる被災項目を頂上事象として FTA を実施し、道路橋の被災状況を把握するために必要な基本事象を明らかにする判断材料とした。

FTA 分析の結果、路面段差の約 90%が橋台背面アプローチ部で発生しており、その要因は、「橋台背面盛土の沈下・流出」であった。また、残りの約 10%は、桁端部で発生しており、その要因は、「伸縮装置の変位」、「支承本体の損傷」であった。「路面段差による通行注意」の FT 図を図 2-15 に示す。

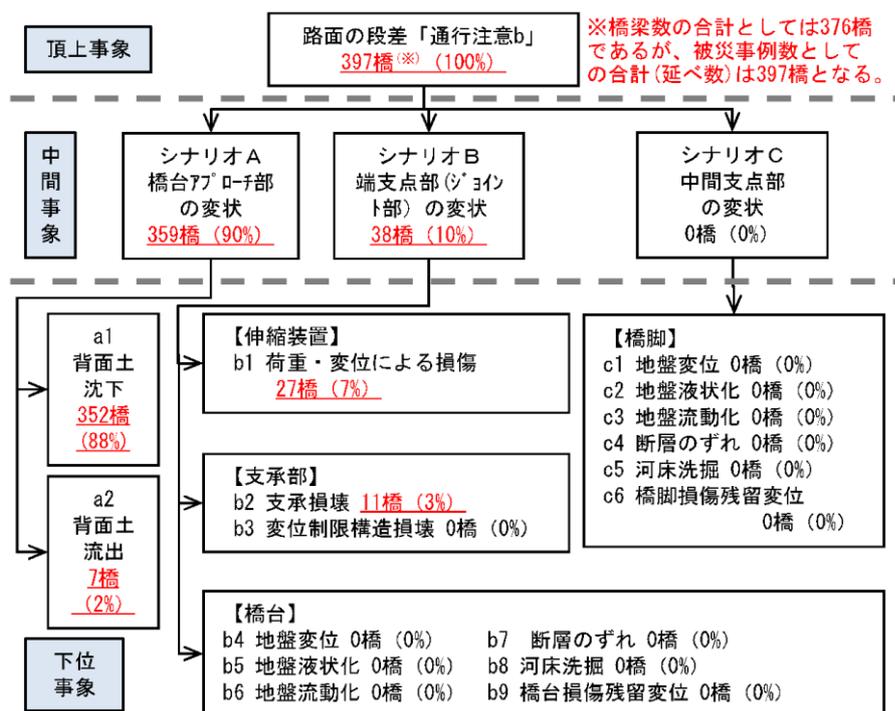


図 2-15. 「路面段差による通行注意」の FT 図

2. 1. 3. 橋台背面アプローチ部の段差に関する詳細分析

地震後に通行障害を起こしていた被災橋梁 450 橋のうち、本線橋 317 橋を対象に橋台背面の異常有無と踏掛版の設置有無を整理した。橋台背面盛土の沈下量と舗装摺り付けの有無の関係を表 2-2 に、橋台背面盛土の沈下量と踏掛版設置有無の関係を図 2-16 に示す。

地震後の摺り付け補修は、段差 10cm 未満では実施されていなかった。緊急点検からも、10cm 以下の路面段差は、緊急車両の通行に致命的な影響を与えないことがわかった。

表 2-2 より、橋台背面アプローチ部の段差が 10cm 以上の橋梁では、すべての橋梁で舗装摺り付けが実施されており、10cm 未満の段差の場合では舗装摺り付けが実施されていない橋梁も存在した。このことから、橋台背面アプローチ部の段差が 10cm 以上となると、通行車両の走行に支障になると想定される。この結果を後述する背面盛土アプローチ部の段差の閾値設定に反映した。

また、図 2-16 より橋台背面盛土の沈下量が 10cm を超える橋梁は、すべて踏掛版がない橋梁であり、踏掛版の設置が橋台背面盛土の沈下抑制に効果があることが確認できた。このことから、踏掛版が設置されている橋梁においては、橋台背面アプローチ部の変位把握は省略できると考えられる。

なお、「橋台背面盛土の沈下」や「伸縮装置の段差」を原因とする、橋台背面アプローチ部の段差は、多くの橋梁で、車道部全体に、面的に発生していたが、一部の橋梁では、車道の一部のみに段差が生じており、段差発生箇所を一部に限定することは出来なかった。

表 2-2. 車道部橋台背面盛土の沈下量と舗装摺り付けの有無の関係

車道部の通行注意bの125橋 背面土の段差量	舗装摺り付けの有無		
	有り	無し	合計
50mm未満	22 橋	64 橋	86 橋
50mm以上～100mm未満	14 橋	17 橋	31 橋
100mm以上～150mm未満	3 橋	0 橋	3 橋
150mm以上～200mm未満	2 橋	0 橋	2 橋
200mm以上	3 橋	0 橋	3 橋
合計	44 橋	81 橋	125 橋

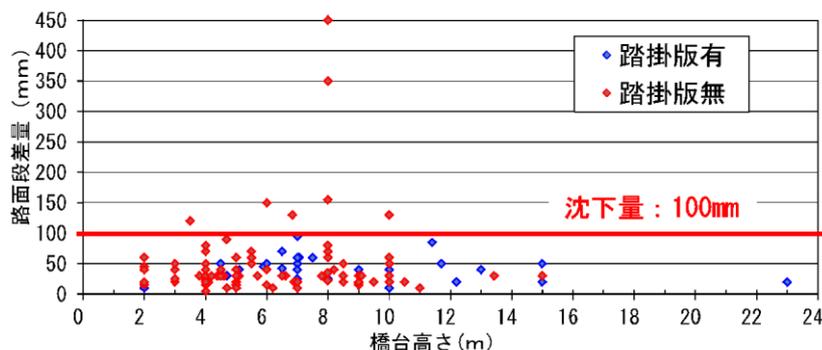


図 2-16. 橋台背面盛土の沈下量と踏掛版有無の関係

2. 2 道路橋被災状況把握技術の具体的手法の検討

2. 2. 1. 既存技術の整理

「橋台背面盛土の沈下」、及び、「伸縮装置の段差」を把握するもっとも簡便な手法は、変位計測となる。「橋台背面盛土の沈下」では、計測対象が「土」となるが、「土」は、一度沈下すると元には戻らない性質がある。一方、「伸縮装置の段差」では、計測対象が「構造物」となるが、「構造物」は、地震時に伸縮装置の許容変位内を動き、その後、元に戻る性質がある。従って、道路被災状況把握技術の具体的手法の検討は、「橋台背面盛土の沈下」と「伸縮装置の段差」の計測に分けて行った。

(1) 「橋台背面盛土の沈下」に関する既存計測装置

「橋台背面盛土の沈下」について、既存の変位計測装置の整理を行った(図 2-17)。総合評価の結果(表 2-3 参照)、接触型のワイヤー巻取り式変位計(詳細を図 2-18 に示す)が推奨案となったが、地中への設置方法に課題が残った。なお、表 2-3 の評価は、客観的に評価できるように、目安として各機器の性能や他の機器との相対的な評価を行い、5段階評価としている。

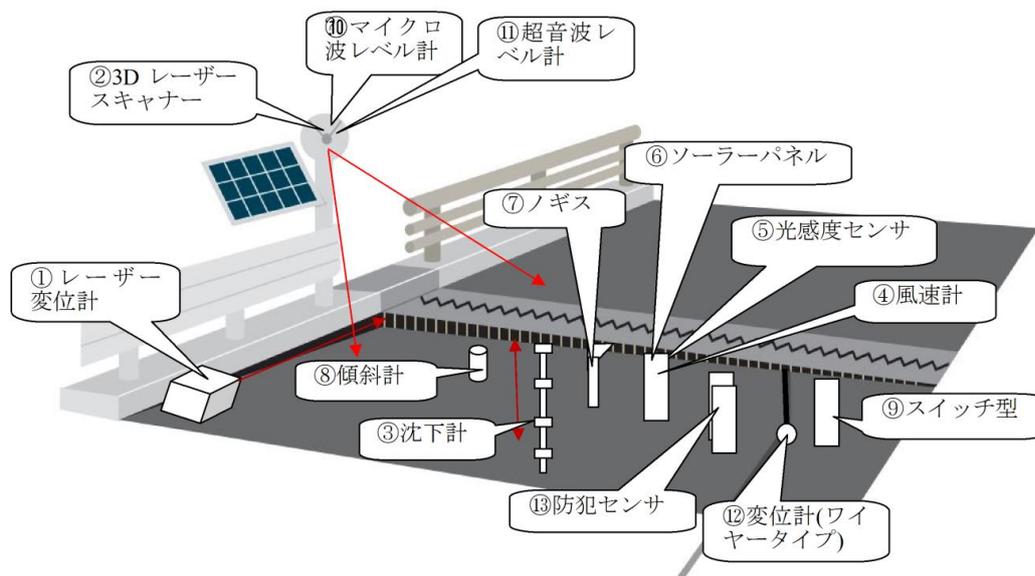


図 2-17. 「背面土の沈下」に対する既存計測装置

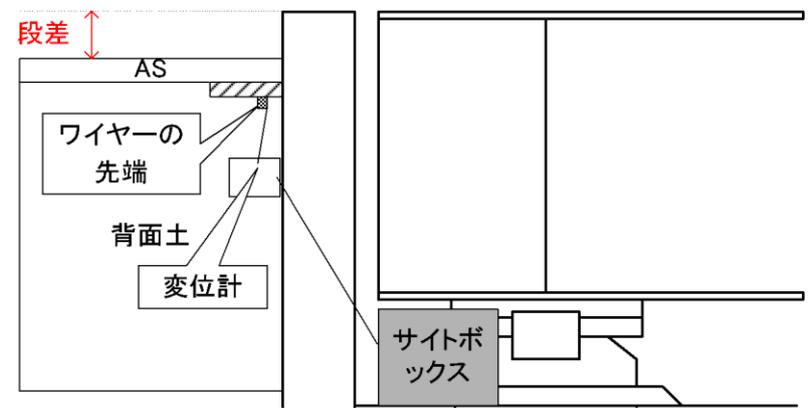
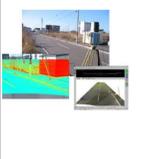
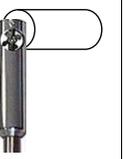


図 2-18. 接触型ワイヤー巻取り式の変位計

表 2-3 . 「橋台背面盛土の沈下」に関する既存技術の比較

比較項目	沈下量を把握する計測方法						閾値以上の沈下の有無を把握する計測方法					
	②3D レーザースキャナー	③沈下計	⑦ノギス	⑩マイクロ波レベル計	⑪超音波レベル計	⑫変位計（ワイヤー）	①レーザー変位計	④風速計	⑤光感度センサ	⑥ソーラーパネル	⑧傾斜計	⑨スイッチ計
比較項目												
計測器設置箇所	路上	地中	地中	路上	路上	地中	路面	パラベット	地中	地中	地中	地中
概要	・レーザーによるスキャニングによって正常時との比較の差で検知	・ボーリング孔内でアンカーを不動点として、変位を計測する	・段差ができた際に、支持金具がノギスを動作し計測する	・路上5mからマイクロ波で計測し変状を検知する	・路上5mから超音波で計測し変状を検知する	・ワイヤーを固定したASの下の板の変位を計測する	・路面で段差ができた際に、計測距離が短くなることで検知	・パラベットを貫通させ、段差ができた際に風が通れば検知する	・光感度センサをパラベット等に埋め込み、段差ができた際に光を感知する	・段差ができた際に固定されたソーラーパネルが発電し電圧を検知する	・沈下の際に指定の値の傾斜を検知する	・沈下の際にスイッチを板が触れて反応する
精度	2mm	1mm	0.01mm	20mm	1mm	0.01mm	0.5mm	設置位置	設置位置	設置位置	15度	設置位置
防塵防水	2	5	5	4	4	5	2	2	1	5	5	2
電源(計測器側)	2 消費電力が多い	5 配線不要	5 配線不要	4 支柱に配線	4 支柱に配線	4 配線が必要	4 路上のため容易	4 橋台側に配線可能	3 路下に配線が必要	3 路下に配線が必要	4 配線が必要	5 配線不要
設置工事	1 路面のため設置検討が必要	1 路面工事有	1 路面工事有	2 照明柱等への設置検討	2 照明柱等への設置検討	1 路面工事有	4 路面のため設置検討が必要	1 パラベット及び路面工事が有	1 路面工事有	1 路面工事有	1 路面工事有	1 路面工事有
計測器交換しやすさ	3 調整が必要	1 路面工事有	1 路面工事有	2 路面工事不要	2 路面工事不要	1 路面工事有	2 路上のため容易	1 路面工事有	1 路面工事有	1 路面工事有	1 路面工事有	1 路面工事有
動作確認とインターフェース	3 既存技術有	3 既存技術有	3 手動のロガー有	3 既存技術有	3 既存技術有	3 既存技術有	3 既存技術有	3 強制的	3 強制的	3 電圧計測のロガー有	3 既存技術有	3 既存技術有
その他	1 設備工事が大規模／比較処理に時間を要する	2 別の現場で実績あり	1 自動計測の開発が必要／無線の認識距離不明	1 電波法により屋外での利用不可	1 計測対象が原則フラット風の影響有	3 地中への設置方法は検討が必要	1 環境による誤差が大きい	1 動作検証を事前に行う必要がある検知できるか不明	1 動作検証を事前に行う必要がある検知できるか不明	1 事前動作検証が必要(発電不足)検知できるか不明	2 別の現場で実績あり	2 別の現場で実績あり
費用(起点のみ)	約2,000万円/台(計測器のみ)	約300万円/一式	14万円(自動計測部分除く)	約150万円/一式	約150万円/一式	約90万円/一式	約230万円/式	約数千円～数万円/台(計測器のみ)	約数千円～数万円/台(センサのみ)	数万円(パネルのみ)	約275万円/一式	約275万円/一式
評価	1 高価で、大規模設備工事が有	2 路側に配線不要機器が大きい	1 動作検証が必要一部新規開発有	1 現時点では利用不可	2 計測検証が必要	3 安価で種類も各社有	1 誤差が大きい	1 動作検証が必要新規開発有	1 動作検証が必要新規開発有	1 動作検証が必要新規開発有	2 路下に配線不要	2 路下に配線不要

(2) 「伸縮装置の段差」に関する既存計測装置

「伸縮装置の段差」についても、既存の変位計測装置の整理を行った（図 2-19）。総合評価の結果（表 2-4 参照）、防塵防水性、及び、経済性に優れる、接触型のワイヤー巻取り式変位計が推奨案となった（詳細を図 2-20 に示す）。なお、表 2-4 の評価は、表 2-3 と同様に、客観的に評価できるように、目安として各機器の性能や他の機器との相対的な評価を行い、5 段階評価としている。

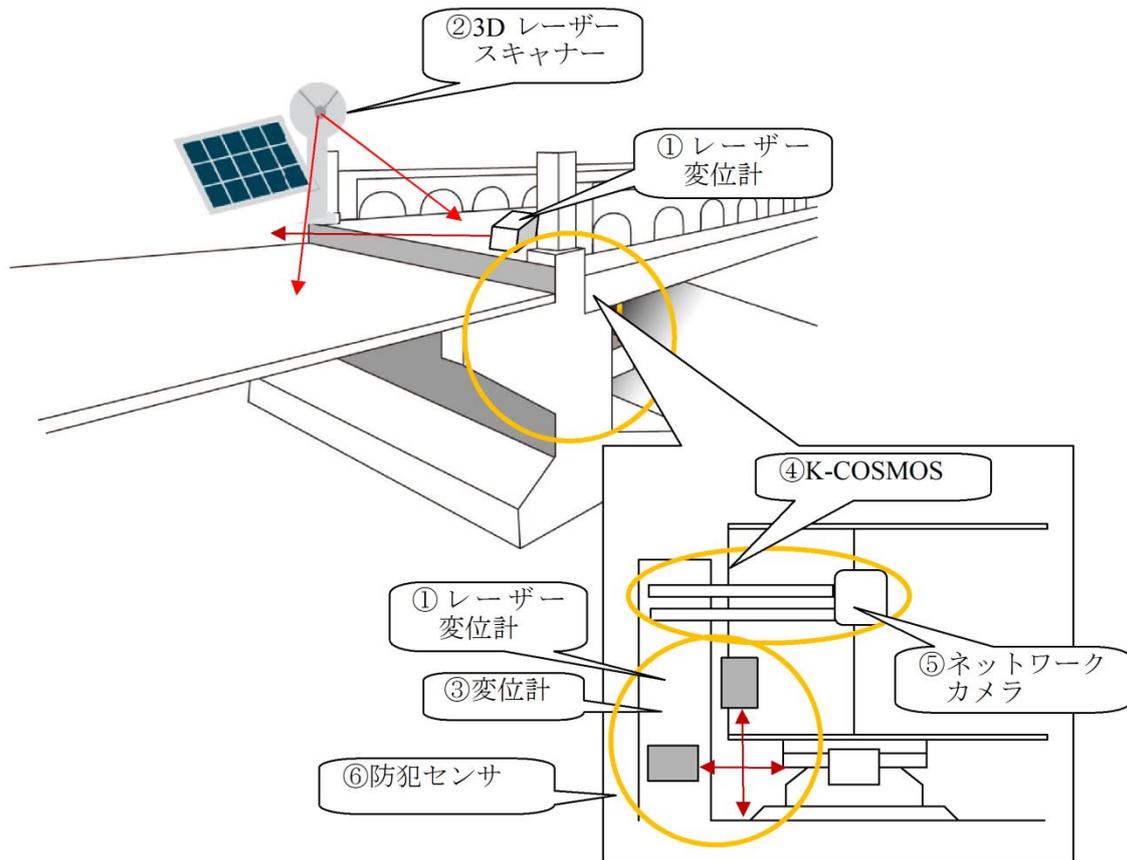


図 2-19. 「伸縮装置の段差」に対する既存計測装置

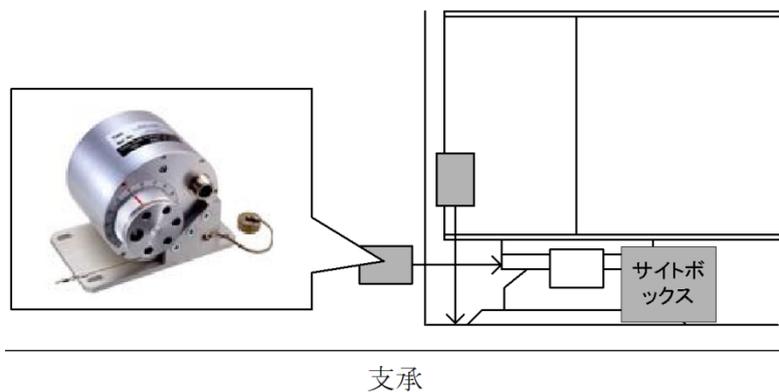


図 2-20. 接触型ワイヤー巻取り式の変位計

表 2-4 . 「伸縮装置の段差」に関する既存技術の比較

比較項目	段差量を把握する計測方法			閾値以上の段差の有無を把握する計測方法		
	①レーザー変位計	②3D レーザースキャナー	③変位計	④K-COSMOS	⑤ネットワークカメラ	⑥防犯センサ
計測器設置箇所	路面または支承	路上	支承	路下	路下	路下
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・路上側：レーザーを用いて路面の変位を計測する ・支承側：段差ができた際に、計測距離が変位することで反応する 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザーによるスキャニングによって正常時との比較の差で検知 	<ul style="list-style-type: none"> ・橋台等の固定点と支承周辺を変位計とインバー線で接続し、支承の水平変位および鉛直変位を計測する 	<ul style="list-style-type: none"> ・K-COSMOSの車載型をセンサと見立てる ・アンテナ及び電源を管に通し、伸縮部分に固定し大きな変状があれば、配線の接続が外れ、不通になる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ネットワークカメラをセンサと見立てて使用する ・ネットワーク及び電源を管に通し、固定し大きな変状があれば、接続が外れ、検知する 	<ul style="list-style-type: none"> ・段差ができれば、センサがスライドし、磁気パネルから離れるとセンサが検知する
精度	0.5mm	2mm	0.01mm	設置位置による	設定位置による	設置方法による
防塵防水	2	2	5	1	4	1
電源(計測器側)	4 路上のため容易	2 消費電力が多い	4 配線必要	4 配線必要	4 配線必要	4 配線必要(ローガーのみ)
設置工事	3 路面のため設置検討が必要	3 路面のため設置検討が必要	4 路面工事無	3 安価だが継続的運用が可能か	4 路面工事無	4 路面工事無
計測器交換しやすさ	4 路上のため容易	3 調整が必要	3 路面工事無	4 交換が容易	4 交換が容易	4 交換が容易
動作確認とインタフェース	4 既存技術有	4 既存技術有	5 既存技術有	1	4 既存技術有	4 既存技術有
その他	1 環境による誤差が大きい	1 設備工事が大規模/比較処理に時間を要する	4 ワイヤータイプのため、伸縮方向はどちらでも対応	1 変状があっても信号を自ら発するわけではない/数年後に廃止予定	3 ネットワークに簡単に接続できる	1 電池の寿命が短い(約1年程度)なので、電池交換が頻繁に必要
費用(起点のみ)	約230万円/式	約2,000万円/台(計測器のみ)	約90万円/一式	約10万円/台(材料費等)	約15万円/台(省内ネットワーク利用)	センサ・ローガー・ソフト・通信費：月々490円/式(2年契約)
評価	1 誤差が大きい	1 高価で、大規模設備工事が必要	4 実績有/背面土の沈下に可能性有	1 数年後に廃止予定	2 接続は容易/動作検証が必要	2 改良等がほとんどできない

(3) 電源設備に関する既存技術

東北地方太平洋沖地震では、停電、光ケーブルの断線、電話回線の不通・混線等が発生し、通信機能の麻痺状態が続くことで、被災状況の把握に時間を要した。災害時に、リアルタイムで道路橋被災情報を入手する為には、地震発生時の計測手法や計測値の確実性だけでなく、電源確保、通信確保も重要となってくる。

電源設備に関する既存技術の整理を行った結果、日常は商用電源（写真 2-1）を使用することとした。バックアップ電源は、太陽光発電（写真 2-2）、及び、風力発電（写真 2-3）について、本研究にて検討することとした。

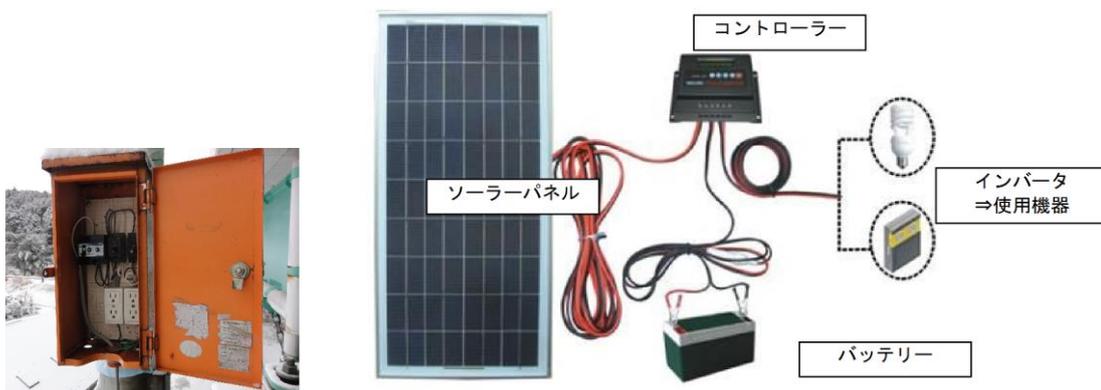


写真 2-1. 商用電源の現場設置状況イメージ

写真 2-2. 太陽光発電システムの全体イメージ



写真 2-3. 風力発電システムの全体イメージ

(4) 通信に関する既存技術

データ通信に関する既存技術の整理を行い、初期コストは掛かるが、国土交通省の光通信網を利用することも併せて検討した結果、安価で利用し易い携帯電話による通信を推奨案とした。インターネットによるモバイル通信と道路管理用光ケーブル網の比較を表 2-5 に示す。

表 2-5. 通信回線の比較

	インターネット (モバイル通信)	道路管理用光ケーブル網
特 長	工事が不要 セキュリティ対策、バックアップ 体制は契約した会社次第となる	高速通信、安定性 継続的な通信費はかからない
通信速度	5.7Mbps (例)	1,000Mbps
通信機器	データ通信カード	メディアコンバータ (LAN→光通信)
工 事	不要	道路管理用光ケーブル網への接続工 事が必要
費 用※	6,000 円/月	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機器類：IP 変換装置, IP 変換 IF, 光伝送設備等 1,400,000 円 (機器類計) ・ 工事費：IP 変換装置据付調整, 光伝送設備据付, システムインテグレーション等 1,700,000 円 (工事費計) ・ 合計 3,100,000 円 (経費込み) ※CCTV 設置費用参考

※費用は概算額。

2. 2. 2. 被災状況把握に有効な計測方法の選定

(1) 橋台背面盛土内の沈下量を把握するための計測位置および計測装置

前述の通り、橋台背面盛土内の沈下量を計測する位置は、1箇所限定することが出来ず、面的に計測する必要がある。

また、既存技術では、コストが掛かる上、広範囲を計測出来ない等の課題が残る。そこで、センサを車線単位で橋台面盛土内に設置し、閾値を超えると反応するセンサを開発することとした。本研究では、前述した各仕様のセンサを比較した結果、表 2-3 及び表 2-4 において高い評価となった接触型のワイヤー巻取り式変位計を採用し、本研究の目的に対応したセンサを開発し、模擬実験、及び、実橋での試行により検証することとした。

センサの設置場所は橋台背面盛土内となるため、設置したセンサが故障した場合は大掛かりな工事が必要となる。そこで、センサ自体の故障を極力少なくするため、その耐久性も重視して、開発することとした。

(2) 桁端部の段差量を把握するための計測位置および計測装置

桁端部の段差量を計測する手法としては、支承の沈下量（鉛直方向）、及び、水平方向移動量（橋軸方向・直角方向）を計測出来る機器として、表 2-3 及び表 2-4 において高い評価となった接触型ワイヤー巻取り式変位計（既存技術）を採用することとした。桁端部の段差量を計測するワイヤー式変位計の測定精度は 1cm もあれば良いため、精度は低くとも、低コストと出来るセンサを製作した。

桁端部周辺に設置したセンサが故障した場合、高所作業車や橋梁点検車、足場等の設置が必要となるため、センサの設置場所は、出来るだけアクセスし易い場所を選定することとする。尚、風雨に曝されるような場所を選定する場合は、防水対策等も行うこととする。

(3) センサの耐久性

センサの耐久性は、修理、及び、交換が 10～15 年は不要となるようにし、補修工事等で交換することとした。バッテリーは、橋梁定期点検（5 年ごと）での交換を想定し、最低でも 5 年間は交換不要となるようにした。