

維持管理分科会報告書
ー供用後 10 年間のモニタリングー

目 次

1. はじめに	1
2. モニタリングの目的	1
3. 構造物に予想される変状とモニタリング項目	2
3. 1 構造物のモニタリング	2
3. 2 垂井高架橋に予想される変状とモニタリング項目	4
4. モニタリングの種類	5
4. 1 初期の状態確認	6
4. 2 常時監視	13
4. 3 定期点検	15
4. 4 臨時点検	17
5. モニタリングの方法と閾値	18
5. 1 モニタリングの方法	18
5. 2 モニタリングの閾値	19
5. 3 静的載荷試験	22
5. 4 衝撃振動試験	27
6. モニタリングの実施体制等	32

1. はじめに

本報告は、平成 18 年 7 月 27 日に第一回委員会を開催した「垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会」(H18.7.27～H19.7.23)において、供用後 10 年間実施するモニタリングについてその項目、方法、頻度、閾値等を設定した結果を取りまとめたものである。なお、本報告は、本委員会で検討した資料をもとに、支承を含む上部工に特化した内容について整理したものであるが、記述内容についての理解が得られやすいように、モニタリングの一般的事項について、土木学会の既往の文献等を参考にして維持管理分科会で追加検討した重要項目をも含めることとした。

本報告書では、目視観察や何らかの計測を行うことにより構造物の状態を監視する行為のすべてを「モニタリング」と定義することとしており、ここで述べるモニタリングには、1 回の計測行為により得たデータから評価を行うものとある期間における連続計測により得たデータをもとに評価を実施するものの両方が含まれている。また、ここに記載したモニタリングは、10 年間継続的に実施するものであるため、必要に応じて内容の見直し等を行い効果的な運用を図ることが望ましい。

2. モニタリングの目的

モニタリングの主な目的は、本高架橋の供用後における想定外の変状の発生を早期に適確に把握し、補修・補強対策として実施したひび割れ注入工法、表面被覆工法、上面増厚工法、外ケーブル工法等の効果の持続性を監視するために実施するものである。

垂井高架橋上部工におけるモニタリングでは、「初期の状態確認」「常時監視」「定期点検」「臨時点検」において、必要な情報が得られるよう、点検する部位、部材に応じて監視、点検を実施する。

本モニタリングには、中間報告書に提案された橋脚付け根部ウェブ変形、ひび割れ幅の動き、下床版の平均ひずみの計測に加え、桁たわみ等の常時監視や新たなひび割れの発生や既存のひび割れの進展を確認するひび割れ追跡調査も含まれる。ひび割れ状況の調査においては、開通直前のひび割れ状況を今後の初期値と位置づけて、開通後の劣化現象を正確に把握できる体制作りを構築する。

3. 構造物に予想される変状とモニタリング項目

3. 1 構造物のモニタリング

構造物を長期間にわたって適切に維持管理していくためには、まず、構造物の状態を把握するために的確な点検を行い、点検結果に基づいて劣化原因を正しく推定し、構造物の性能評価を行って効果的な補修・補強対策を施すことが重要である。また、構造物の維持管理では、あらかじめ、その構造上の特徴や、補修や補強などの履歴を十分把握した上で方策を検討することが大切である。

土木学会コンクリート委員会・コンクリート構造物のヘルスマニタリング研究小委員会のレポート¹⁾を参考に「橋梁のモニタリングシステムの構築手順」についてまとめると次のようになる。

すなわち、橋梁のモニタリングシステムの理想的な構築手順は、まず構造物のどのレベルで何をモニタリングするのか、その事象を決定しなければならない。具体的には、橋梁の崩壊や転倒などの全体レベル、桁や柱あるいは床版などの部材レベル、または支承部や付帯設備などの特殊箇所など、モニタリングを行うレベルや箇所を検討する必要がある。これが決定されれば、続いて、モニタリングによって何を計測するか、その項目を決めることになる。

計測項目決定後は、モニタリングを実施する期間、頻度および必要精度を適切に決定するとともに、構造物の性能の評価方法についても十分検討する。引き続き、後述するセンシング手法を選定し、さらにデータの転送方法や記録方法についても検討を加える。この際、モニタリングを行うための費用を算出し、コスト評価を行うことも重要である。コスト評価の結果によっては、センシング手法の再検討が必要となる場合もある。

このような手順を経て、モニタリングを開始する。モニタリングによって得られた結果から性能の評価を行い、問題がある場合は、必要な対策を講じることとなる。特に問題がない場合は、モニタリングは一旦中止する選択肢もありえる。

橋梁において、構造物に要求される性能とそれに対する性能指標およびモニタリング項目の例を表 3.1.1 に示す。要求される性能は、対象とする構造物における全体レベル、部材レベル、および特殊箇所のそれぞれで異なる場合もありえることから、この表では、それぞれに分けて性能指標とモニタリング項目が示してある。性能の項目は、基本的に、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】に準じており、安全性能、使用性能、第三者影響度に関する性能、耐久性能を取り上げている。また、モニタリング項目は、各性能指標を評価するのに必要な情報を示しており、定量的な評価方法が存在するものに対しては、評価式へのインプットデータとなり得るものである。

表 3.1.1 性能指標とモニタリング項目の例（参考文献 1）の表－3 を参考に作成）

構造レベル	性能	床版橋，RC 合成桁橋，PC 橋	
		性能指標	モニタリング項目
全体レベル	安全性能	剛体安定 風・地震時応答特性	変位・ひずみ・変形，剛性， 振動，応力，荷重
	使用性能	橋梁の使用性能は部材レベルの性能とする	
	耐久性能	時間経過後の安全性能	沈下，構造系の変化
部材レベル	安全性能	断面耐力 疲労耐力 じん性	荷重 材料物性 断面諸元
	使用性能	走行性	変位・ひずみ・変形， 表面および内部の欠陥（ひび割 れ等発生状況，ポットホール）
	第三者影響度に関 する性能	はく離，はく落	表面および内部の欠陥（はく 離・浮き等の発生状況）
	耐久性能	時間経過後の各性能	材料劣化（鋼材の腐食，コンク リート劣化） 表面および内部の欠陥（ひび割 れ等の発生状況）
特殊箇所	安全性能	断面耐力 ケーブル破断	荷重，材料物性，断面諸元， ケーブル張力，ケーブル破断
	使用性能	走行性	表面および内部の欠陥（ひび割 れ等発生状況，ポットホール）
	第三者影響度に関 する性能	間詰め床版部のはく 離，はく落	表面および内部の欠陥（はく 離・浮き等の発生状況）
	耐久性能	時間経過後の各性能	材料劣化（ケーブルの腐食）

3. 2 垂井高架橋に予想される変状とモニタリング項目

垂井高架橋は、コンクリートの収縮とその拘束が原因で生じた多数のひび割れが問題となったこと、また、それらに対する対策としてひび割れ注入補修を施したうえで床版上面に増厚補強を施し、さらに外ケーブル工法で補強を行うといった種々の複雑な履歴を有している。したがって、ことさら本高架橋に対するモニタリングでは、構造物に大きな変状が現れる前にその予兆を捉えることが重要である。しかしながら、従来型の点検方法は、目視検査を主体としたものであり、表面に現れない内部の変状やごく軽微な変状については把握が困難なケースもありえる。したがって、垂井高架橋では、構造物表面での劣化のみを主に目視により捉える従来型の点検方法だけでなく、さらに何らかの計測を行って内部情報や構造物の挙動を評価することが有効と考えた。そこで本委員会では、対象とする垂井高架橋に関する経緯や特徴、あるいは予想される変状の種類等を踏まえ、予防保全を前提とした点検の具体的な手法について検討した。その結果を表 3. 2. 1 に示す。

表 3. 2. 1 垂井高架橋に想定される変状とそれに対するモニタリング測定項目

構造		要因と損傷状況	想定状態	測定項目	備考
桁全体		コンクリートの収縮、ひび割れが増加し、振動・たわみも増える。 地震・衝突等により損傷が発生する。	剛性低下	桁たわみ（振動）	閾値を設定する重点項目 () 内は参考計測項目
個別	ウェブ(桁)	コンクリートの収縮が進み、ひび割れが増える。	剛性低下	ウェブ変形(ハンチ部ひび割れ幅)	
	上床版	輪荷重の繰返し载荷により増し厚部が分離する。 輪荷重の繰返し载荷によりひび割れが増加する。	床版の異常振動の増加 水・塩分等による錆の発生	上床版ひずみと自然電位	参考計測項目
	支承	コンクリートの収縮がさらに進行した場合に支承の水平変位限界に近づく。	水平移動可能性が低下（特に地震時）	支承変位	
	ケーブル定着部・偏向部	後施工した定着部・偏向部が変状する。	緊張力の変化	ケーブルの張力	
	シート	シートと接着部が経年劣化する。	浮き・はがれの発生	外観変状	
	その他			桁内外の温度	

4. モニタリングの種類

本委員会におけるモニタリングの種類を表 4.1.1 に示す。供用後のモニタリングとしては、表中の 4 種類を考えており、必要な情報が得られるように、点検する部位、部材に応じた適切な監視または点検を実施する。それぞれの点検の具体的な内容は次節以降に示す。

なお本委員会では、補修対策効果の確認を目的として、補修前後に静的載荷試験と衝撃振動試験を実施しており、これらの試験も供用開始前の初期値として位置づけ今後のモニタリングの項目に加えている。

表 4.1.1 モニタリングの種類

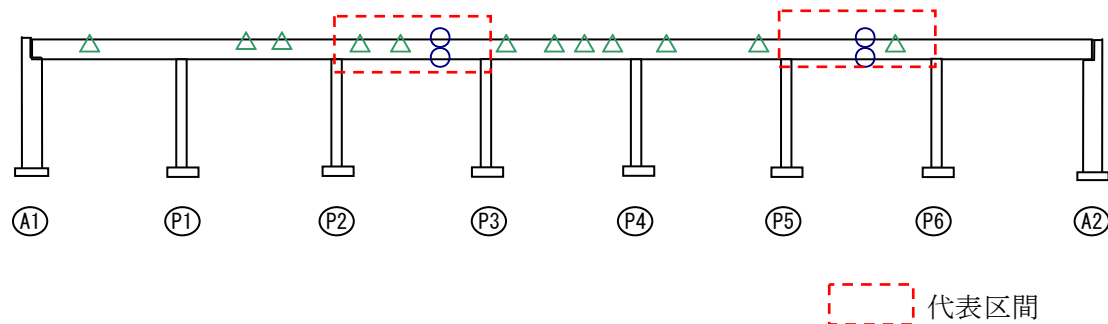
種類		測定項目	主な目的	方法	頻度
初期の 状態確認	計測器 による 確認	下床版平均ひずみ	下床版のひずみの動きを確認	光ファイバ(2点)	1年間 常時1時間毎 監視
		上床版平均ひずみ	上床版のひずみの動きを確認	光ファイバ(2点)	
		ひび割れ幅	新たなひび割れ発生の把握、既存ひび割れの進展を確認	亀裂変位計(12点)	
	目視に よる確認			目視	供用開始後 3ヶ月、12ヶ月
	静的載荷試験	桁の静的挙動	大型車両載荷時の桁の静的挙動を計測することにより剛性を確認	水管式沈下計、ひずみゲージ、光ファイバ、亀裂変位計	補修対策後 供用開始前
	衝撃振動試験	橋体の振動特性	衝撃力載荷時の橋の振動特性を計測することにより剛性を確認	速度計	
常時監視		桁たわみ	桁のたわみの変化により変位を確認	水管式沈下計(7点)	常時1時間毎
		橋脚付け根部のウェブ変形	P2橋脚ウェブ付近の斜めひびわれの動きを観察し、変形の有無を確認	光ファイバ(12点)	
		桁内外の温度	各種計測データへ温度影響をインプット	熱電対(11点)	
		支承の変位	支承の変位量により状態を確認	変位計(9点)	
定期点検		ひび割れ幅	新たなひび割れ発生の把握、既存ひび割れの進展を確認	目視	供用開始後1年目は 2回/年、(3ヶ月、 12ヶ月)2年目以降は 1回/年
		上床版下面の変位	上床版下面の変位から床版の状態を確認	目視 デジカメ	
		支承の変状	支承本体・変位制限装置の状態確認	目視	
		剥落防止シートの状態	剥落防止シートの状態を確認	目視	
		鉄筋の腐食	鉄筋の腐食を計測することにより耐久性を確認	自然電位	2年に1回実施、また、 臨時点検において異常 があった場合にも実施
		外ケーブルの張力	張力の変動を測定、予備ケーブル緊張の有無を判断	ロードセル	
		橋体の振動特性	橋の振動特性を計測することにより剛性低下の有無を確認	速度計あるいは加速度計	
臨時点検 *震度4以上の地震 時及び異常時		上床版下面の変位	上床版下面の変位から床版の状態を確認	目視	随時
		支承の状態	支承本体・変位制限装置の状態確認	目視	
		シート(剥落防止)の状態	剥落防止シートの状態を確認	目視	

4. 1 初期の状態確認

供用開始後の初期の状態確認は、表 4.1.1 に示したように常時監視（遠隔監視）で把握できない全橋に渡るひび割れの進展状況（床版の平均ひずみについては常時監視）の把握を目的として、目視および計測器による点検を行うものであり、供用開始後 1 年間を対象にひび割れ調査を主とした点検を行うものである。

初期の状態確認の計測機器配置図を図 4.1.1 に示し、ひび割れ重点点検箇所全体図を図 4.1.2 に示し、その詳細図を図 4.1.3～図 4.1.7 に示す。

さらに、初期の状態確認の一環として、供用開始前に静的载荷試験と衝撃振動試験を実施しており、その詳細は 5.3, 5.4 節に述べる。



記号	項目	方法	位置	数量
△	ひび割れ幅	亀裂変位計	—	12基
		目視	代表区間	—
○	下床版平均ひずみ	光ファイバー	P2～P3, P5～A6	2基
○	上床版平均ひずみ	光ファイバー		2基

図 4.1.1 初期の状態確認の計測機器配置図

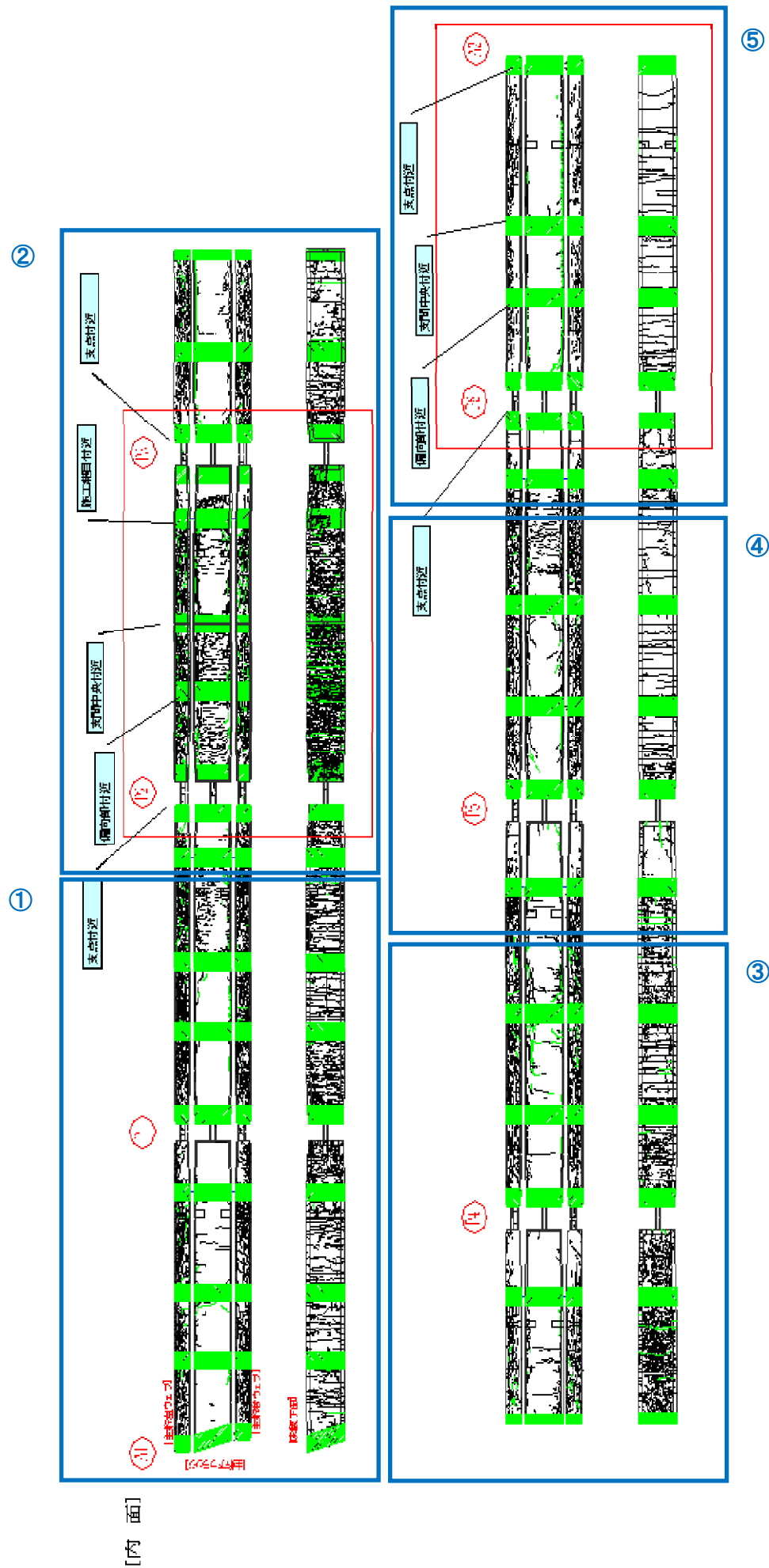


図 4.1.2 ひび割れ重点検箇所全体図

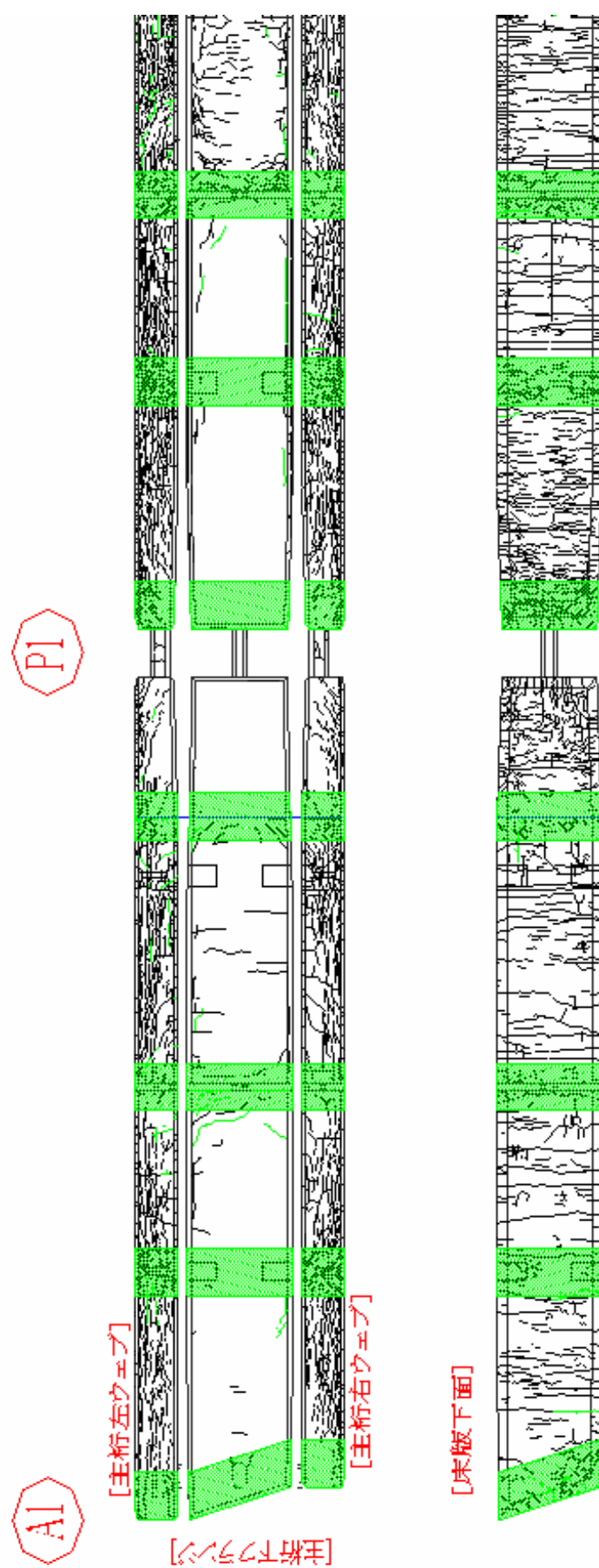


図 4. 1. 3 ひび割れ詳細図①

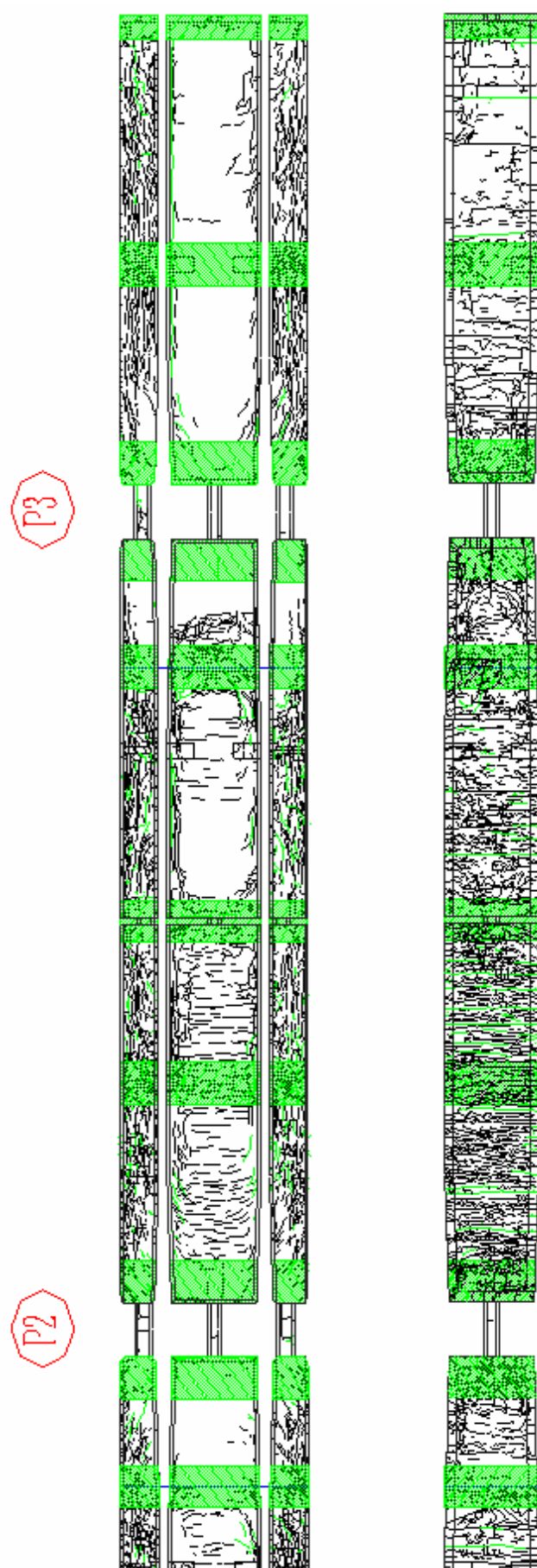


図 4.1.4 ひび割れ詳細図②

P4

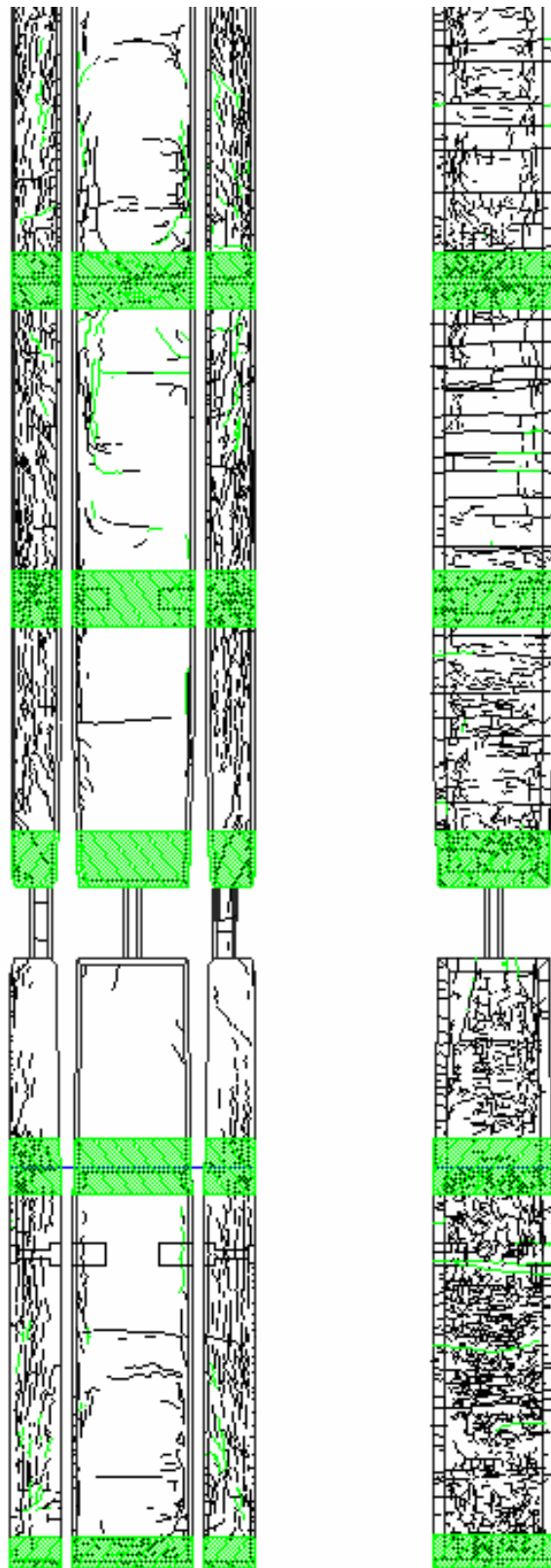


図 4.1.5 ひび割れ詳細図③

P5

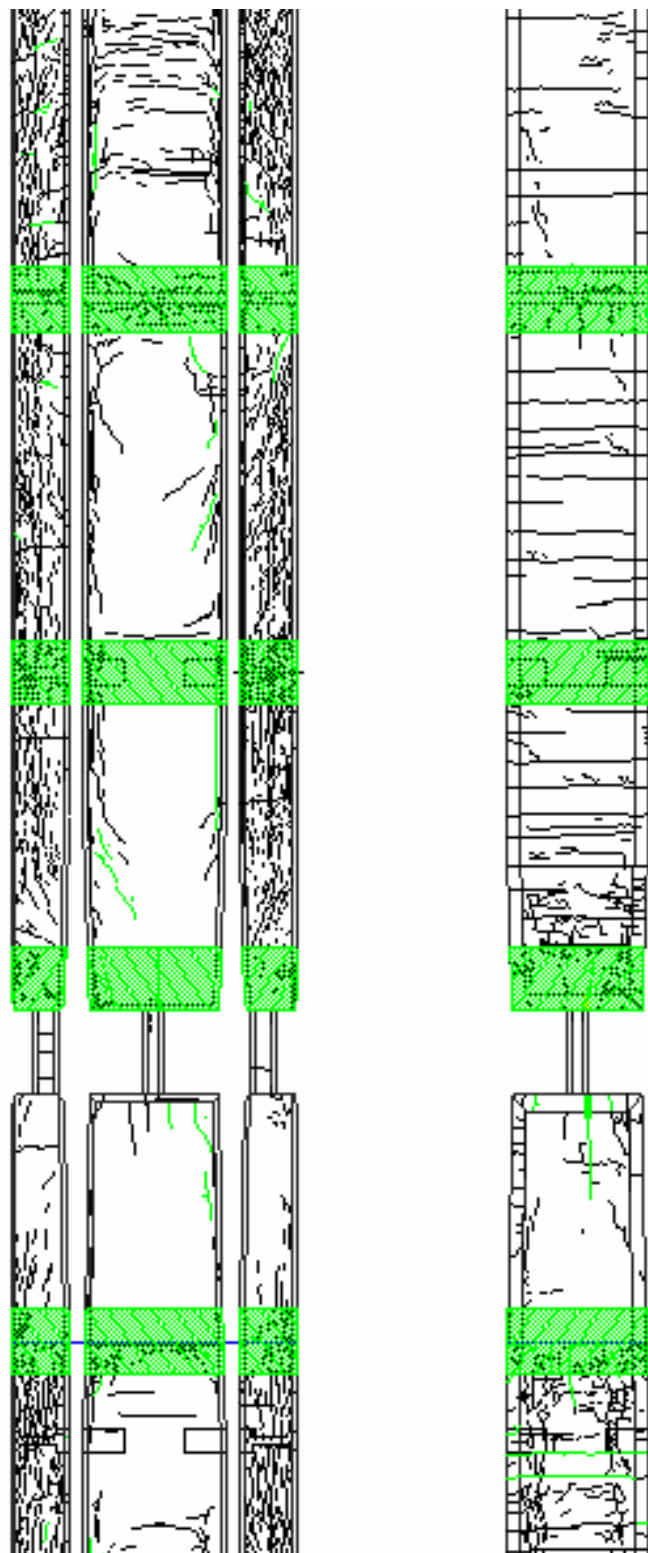


図 4. 1. 6 ひび割れ詳細図④

A2

P6

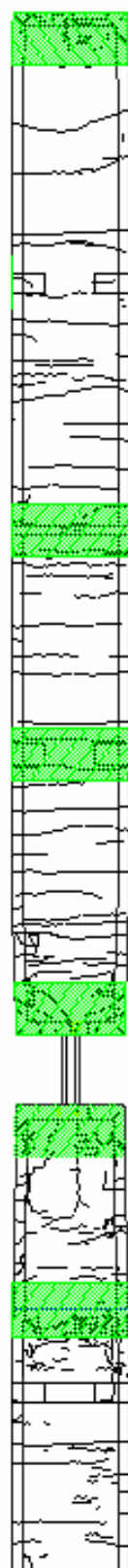
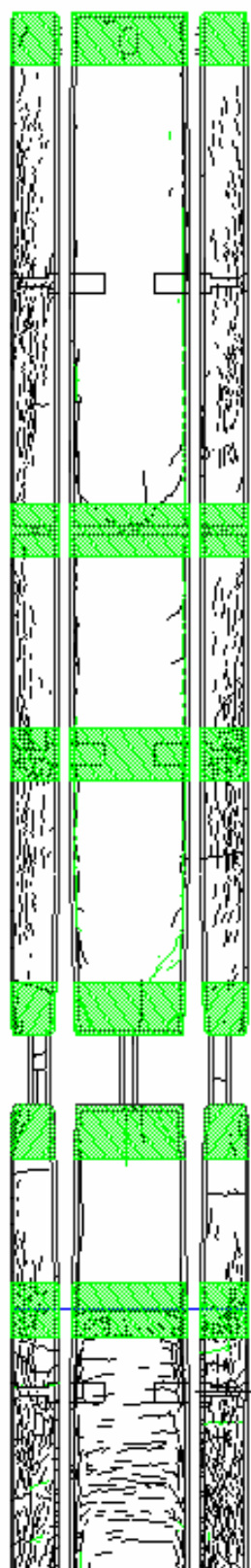


図 4.1.7 ひび割れ詳細図⑤

4. 2 常時監視

供用開始後の常時監視は、変状、変位、損傷の発生の検知を目的として、垂井高架橋上部工に設置した計測機器により連続計測（1時間毎）を行い、データを送受信するシステムを構築する。なお、事前に定められている閾値を超過した場合には、自動警報システムにより道路管理者及び関係者に連絡出来るものとした。

常時監視において実施する項目と監視内容等を表 4.2.1 に示す。また、計測器配置図を図 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 常時監視項目および方法

項 目	内 容	方 法	位 置	数 量	頻 度
桁たわみ	桁のたわみの変化により、変状を確認する。	水管式 沈下計	箱桁内	7点	1時間毎
橋脚付け根部 ウェブ変形	P2橋脚ウェブ付近の斜めひび割れ(補修済み)の動きについて確認する。	光ファイバー	箱桁内	12点	1時間毎
桁内外の温度	計測データの補正のために計測する。	熱電対	箱桁内	11点	1時間毎
支承変位	ゴム支承の変形量により異常の有無を確認する。(横軸方向及び横軸直角方向)	変位計	A1	3点	1時間毎
			A2	3点	
			P1	3点	

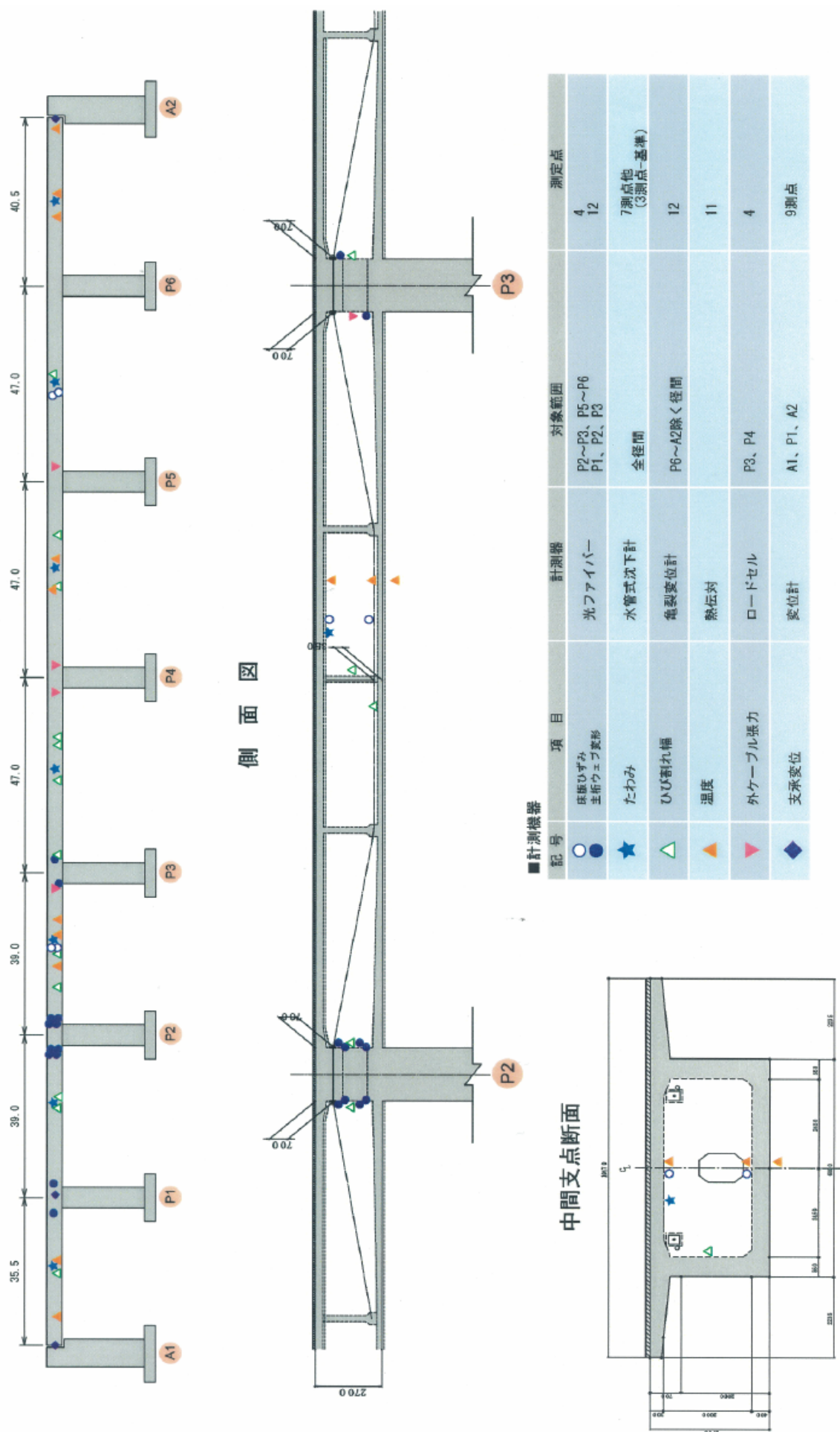


図 4.2.1 常時監視の計測器配置図

4. 3 定期点検

供用開始後の定期点検は、常時監視を補完する事を目的として、目視を主とした点検を行うものである。点検頻度は、2年目以降については「1回／年」とする。

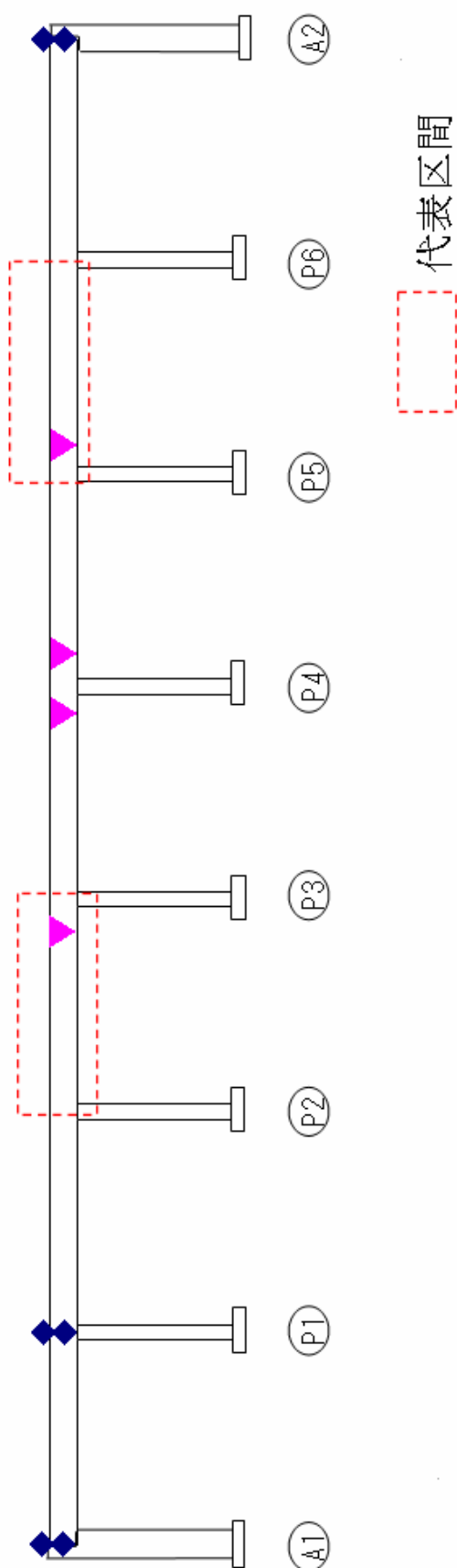
定期点検において実施する点検項目と点検内容等を表4.3.1、表4.3.2に、また、計測機器配置図を図4.3.1に示す。

表 4.3.1 定期点検項目一覧(1)

項 目	内 容	方 法	位 置	数 量	頻 度
ひび割れ幅	ひび割れの進展や新たな発生の有無について確認する。	目視， クラックスケール等	代表区間または全体箱桁内	---	供用開始後 2年目以降 1回/1年 代表区間 但し2年に1回 全径間のひび 割れ点検を実施する。
上床版下面の変状	疲労によるひび割れに着目して，上床版下面の変状を桁内から確認する。		代表区間 箱桁内	---	
支承	ゴム支承の機能障害や沓座モルタル及び変位制限装置の損傷の有無について確認する。		A1, P1, A2	6カ所	
剥落防止シートの状態	繊維シートの剥離，浮き等の有無を桁下から点検する。		箱桁外全面	---	

表 4.3.2 定期点検項目一覧(2)

項 目	内 容	方 法	位 置	数 量	頻 度
鉄筋の腐食	上床版の下面において自然電位を測定することにより，鉄筋の腐食状況を確認する。	自然電位法 ※入力抵抗が100MΩ/V以上	上床版下面全面	---	供用開始後 1回/2年 臨時点検において異常があった場合にも実施
外ケーブル張力	ケーブル張力を測定し，予備ケーブル緊張の必要性を判断する。	ロードセル	---	4基	
橋体の振動特性	橋の振動測定から得られた固有振動数を基に，剛性の低下の有無について確認する。	衝撃振動試験	全径間 箱桁内	---	



記号	項目	方法	位置	数量
	ひび割れ幅		代表区間 または全体	—
	上床版下面の変化		P2～P3, P6～A2	—
◆	文承		A1, P1, A2	3ヶ所
	剥落防止シートの異状		箱桁外全面	
	鉄筋の腐食	自然電位法	上床版下面	—
▼	外ケーブル張力	ロードセル	—	4基
	橋体の振動特性	加速度計	全径間	

図 4.3.1 定期点検の計測機器配置図

4. 4 臨時点検

供用開始後の臨時点検は、震度4以上の地震が発生した場合および車両の衝突等による異常が確認された場合に実施する点検であり、目視と簡単な機器を使用して点検を行うものである。また、臨時点検により発見された損傷の内容によっては、今後新設されるモニタリング評価委員会により対策の検討を行う場合がある。

臨時点検の実施基準を表4.4.1、点検項目と内容を表4.4.2に示す。

表 4. 4. 1 臨時点検の実施基準

事 象	実施基準	備考
地 震	震度4以上	橋本市または五條市における地震発生時
車両の 衝突等	—	大型車両の衝突等による損傷発生時

表 4. 4. 2 臨時点検項目一覧

項 目	内 容	方 法	位 置	数 量	頻 度
上床版下面の変状	疲労によるひび割れに着目して、上床版下面の変状を桁内から確認する。	目視、クラックスケール等	代表区間 箱桁内	---	地震 (震度4以上) 車両の衝突等
支承の変状	ゴム支承の機能障害や沓座モルタル及び変位制限装置の損傷の有無について確認する。		A1, P1, A2	6カ所	
剥落防止シートの状態	繊維シートの剥離、浮き等の有無を桁下から点検する。		箱桁外全面	---	

5. モニタリングの方法と閾値

5. 1 モニタリングの方法

供用開始後のモニタリングに際して設置するセンサは表 5. 1. 1 の通りである。

供用開始後のモニタリング用センサ選定にあたっては、以下のように点検する部位、点検の期間等を検討し比較選定した。

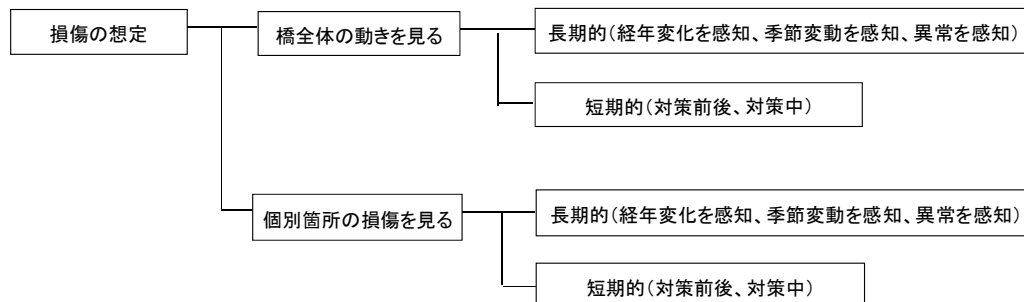


表 5. 1. 1 モニタリングセンサ設置位置一覧

	設置位置	目的	A1	P1	P2	P3	P4
ひずみゲージ	内・上床版下面直角・橋軸方向	床版ひずみ	② ② ② ② ②	② ② ② ② ②	② ② ② ② ②	② ② ② ② ②	② ② ② ② ②
光ファイバー	下床版上面	ひずみ			①		
	上床版下面	ひずみ			①		
	主桁左ウェブ	変位変形		①	② ②	①	
	主桁右ウェブ	変位変形		①	② ②	①	
	水管式沈下計	たわみ					
亀裂変位	主桁左ウェブ	ひび割れ幅	①	①		① ①	
	下床版上側	ひび割れ幅		①	①		①
	主桁右ウェブ	ひび割れ幅			①		①
熱電対	温度		① ②	①	③		
ロードセル	外ケーブル張力					①	①
支承の変位	橋梁全体の動き		①	①			

	設置位置	目的	P4	P5	P6	A2	合計数	配置方針
ひずみゲージ	内・上床版下面直角・橋軸方向	床版ひずみ	② ② ② ② ②	② ② ② ② ②	② ② ② ② ②		70	載荷試験設置のひずみゲージを継続配置、但し測定は P2-P3、P6-A2間を当面計測
光ファイバー	下床版上面	ひずみ		①			2	載荷試験設置の光ファイバーの内、ひび割れの多かった P2-P3 区間近傍に設置のもの、及び比較的損傷の少なかった P5-P6 区間支間中央
	上床版下面	ひずみ		①			2	設置の計器を継続配置
	主桁左ウェブ	変位変形					6	
	主桁右ウェブ	変位変形					6	
	水管式沈下計	たわみ					7	各径間の支間中央のたわみを測定
亀裂変位	主桁左ウェブ	ひび割れ幅		①			5	載荷試験設置の亀裂変位計を継続配置
	下床版上側	ひび割れ幅	①				4	(1年程度のデータ状況によりさらに計測するかを判断する。)
	主桁右ウェブ	ひび割れ幅		①			3	
熱電対	温度		②		②	①	12	桁内上下の表面温度、各査位置の外気を測定
ロードセル	外ケーブル張力						2(4)	ひび割れの多かった P2 P3、P3 P4 間に設置
支承の変位	橋梁全体の動き					①	3	各橋脚片側寄の橋軸・直角・鉛直方向変位を測定

注) ひずみゲージは、各支間 1/16L、1/4L、1/2L、3/4L、15/16L の位置に取付る

○中の数字は設置数を表す。

5. 2 モニタリングの閾値

供用後の桁全体に対する構造的・安全性に影響を及ぼす変状，損傷発生を未然に防止するため，桁たわみと橋脚付け根部ウェブ変形値について閾値を設定し計測監視を行うこととした．今回設定した閾値は，あくまでも暫定的なものであり，今後，計測値の変動傾向等を確認しながら，必要に応じて随時設定値の見直しを検討するのが望ましい．

閾値設定のフローを図 5.2.1 に示す．

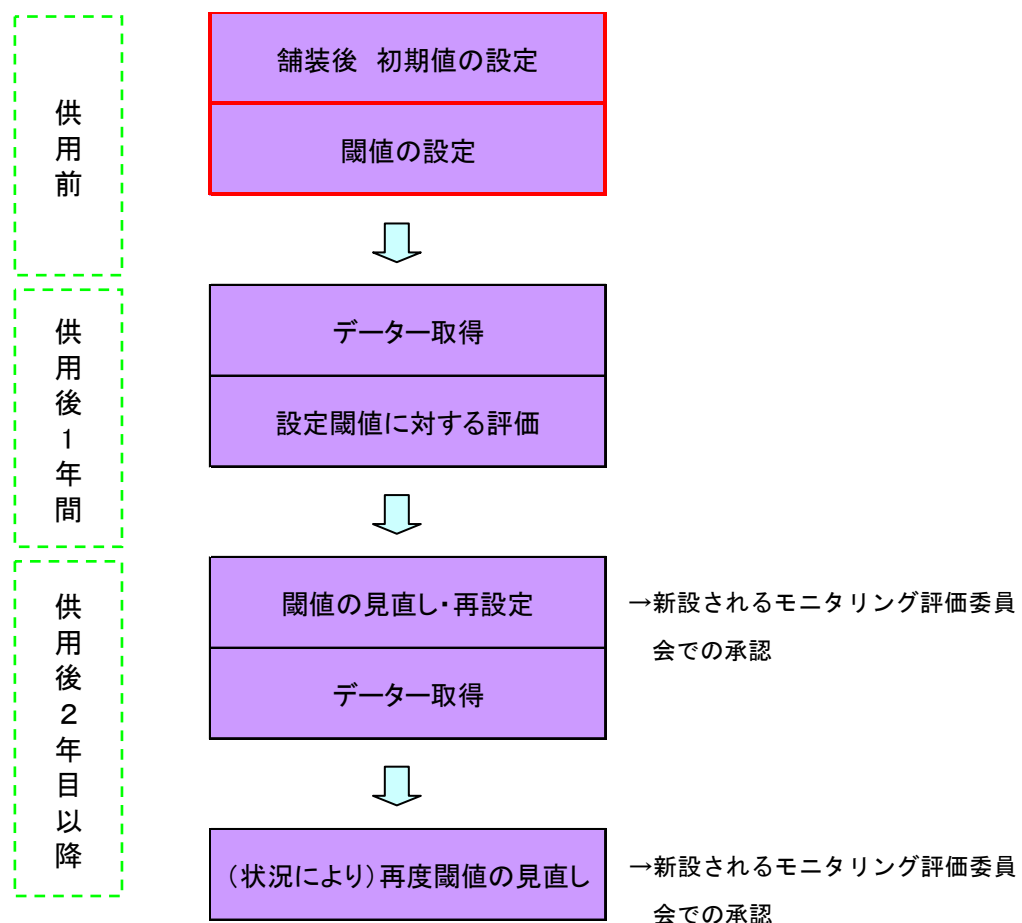


図 5.2.1 閾値設定のフロー

供用後のモニタリングに際しては、常時計測における「たわみ測定値」を警報発信の指標としてシステムを構築する。常時計測時の閾値のレベルを表 5.2.1 に示し、具体的な閾値を図 5.2.2 に示す。なお、桁の曲げ破壊時の終局たわみの解析値は、150mm 以上である。

表 5.2.1 たわみの閾値（最初に設定した値）

閾値レベル 1 :	本閾値を超えた場合には、何らかの変状が起きている可能性があるとして、その後の橋の状態を注意深く監視するための値。	15mm
閾値レベル 2 :	本閾値を超えた場合には、モニタリング評価委員会を開催し対応を検討する値レベル 1 超過により、橋の状態を注意して監視し、変状に対処するため実際には超過する事は無いと考えられる値。	30mm

その他の計測項目における閾値を表 5.2.2 に示す。たわみ以外の項目については、橋脚付け根付近の斜めひび割れが入っていた箇所についてのウェブ変形について閾値を設定し、監視する。

なお、ここに設定した閾値は、供用開始後一年程度の状況を見て、今後新設されるモニタリング評価委員会で見直すこととしている。

表 5.2.2 その他の計測項目の閾値（最初に設定した値）

測定機器		初期値	管理基準値				補足	設定根拠	備考
			下限値	下限注意値	上限注意値	上限値			
光ファイバー (ウェブの変形)		舗装完了後に設置しゼロセット	—	—	0.10 mm	0.20 mm		0.2mm以上のひび割れが入る可能性を検知する事を目的とし上限値を設定、その1/2の値を注意値とする。	閾値設定項目
支 承 変 位 計	A1	気温8℃時→0 その時の変形50mm(−50mm)		−30mm	55 mm		桁が伸びる方向を+	施工中の計測値及び設計計算書	参考計測項目
	P1	気温8℃時→0 その時の変形15mm(−15mm)		−45mm	30 mm		A2方向を+		
	A2	気温8℃時→0 その時の変形60mm(−60mm)		−30mm	50 mm		桁が伸びる方向を+		
亀裂変位計 (ハンチ部水平ひび割れ)		舗装完了後に設置しゼロセット	—	—	0.10 mm	0.20 mm	—	0.2mm以上のひび割れが入る可能性を検知する事を目的とし上限値を設定、その1/2の値を注意値とする。	
光ファイバー (上下床版ひずみ)		舗装完了後に設置しゼロセット	—	—	0.10 mm	0.20 mm	—		
ロードセル		舗装完了後の2日間の平均値を初期値とする。			0.6 Pu	0.84 Pu		上限値、上限注意値:道示Ⅲ 4.2.4、3.4	
			0	660 kN	1163 kN	1628 kN		Pu=1938kN(SEE F-200PH)	

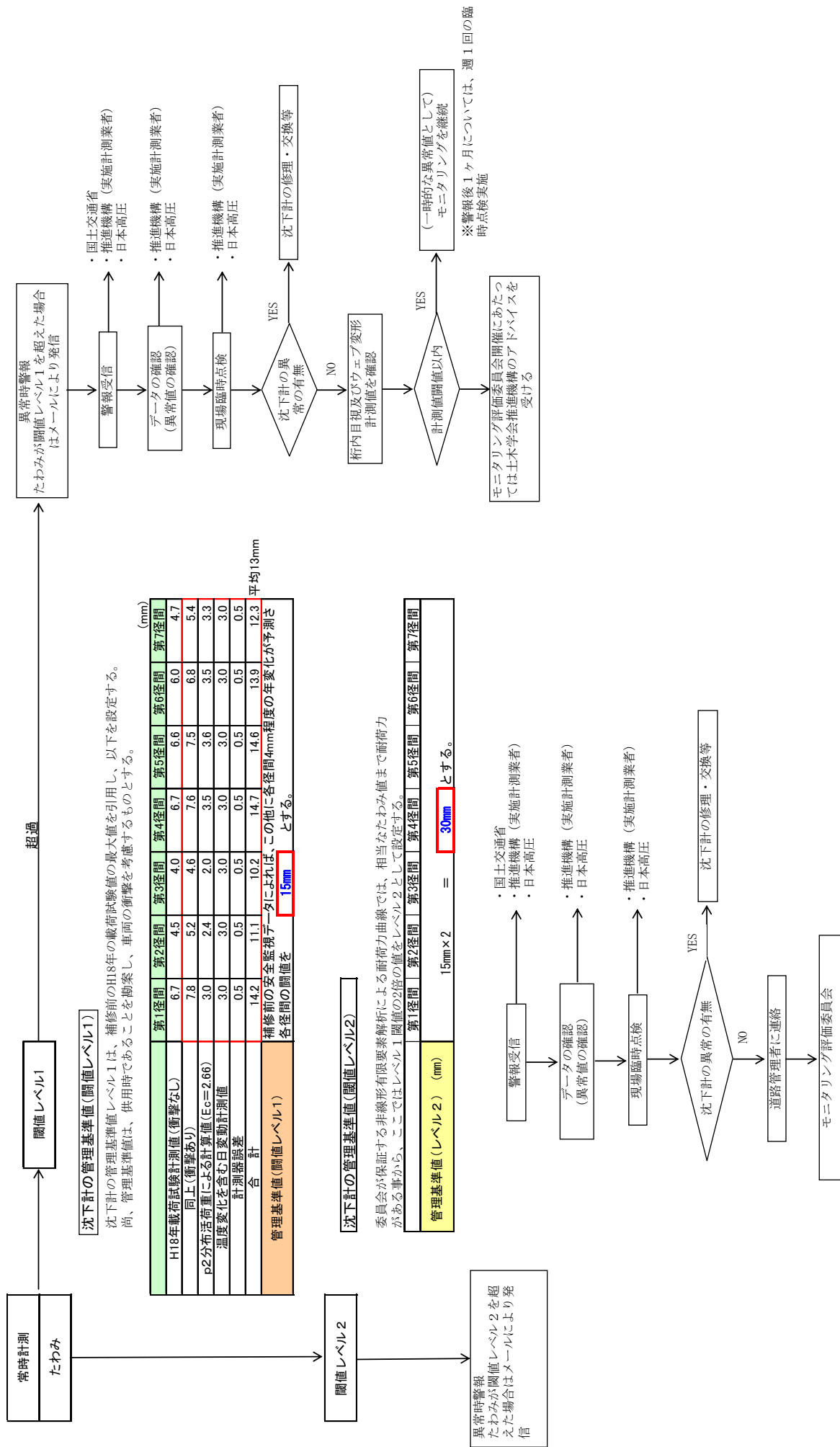


図 5.2.2 常時計測時の閾値

5. 3 静的載荷試験

(1) 静的載荷試験の目的

補修補強対策実施後の橋の健全性を確認し、改善効果を検証するために載荷試験を実施した。また、この載荷試験のデータは、供用開始後のモニタリングをする際の初期値として活用する。載荷試験は、補修補強工事開始前及び対策完了後に行った。

(2) 載荷条件および載荷位置

載荷荷重は、25 tトラック×6台（実総重量：146.20 t）を使用した。これは、主桁設計時B活荷重の約9割、B活荷重による曲げモーメントの約7割に相当する。

なお、補修対策前の載荷試験の荷重車の実総重量は、145.92 tであり、今回適用した載荷荷重は、補修対策前に比べて0.2%程度大きい。

載荷試験の項目およびおもな目的を表 5.3.1 に示し、具体的なセンサの設置位置を表 5.3.2 に示す。

表 5.3.1 載荷試験項目

測定項目	主な目的	トラック載荷試験	
		対策前	対策後
下床版平均ひずみ	活荷重作用時の下床版支間中央ひずみの確認（対策効果の確認）	●	●
		光ファイバー、ゲージ	
上床版平均ひずみ	増し厚による上床版発生応力度の低減をひずみの動きで確認（対策効果の確認）	●	●
		光ファイバー、ゲージ	
橋脚付け根部ウェブせん断変形	P2橋脚ウェブ付近の斜めひびわれの動きを観察し変形の有無を確認	●	●
		高感度変位計・光ファイバー	
桁たわみ	桁のたわみの変化により対策効果を確認	●	●
		水管式沈下計	
ひび割れ幅	新たなひびわれ発生の把握、既存ひびわれの進展を確認（対策効果・対策持続性を確認）	●	●
		目視・亀裂変位計	
橋全体の寸法・動き		●	●
		3次元計測器（対策前後どちらかで計測）	

表 5.3.2 載荷試験のセンサ設置位置

	設置位置	目的	A1	P1								P2								P3								P4							
ゲージ す み	外・上床版上面直角方向	床版疲労	②1/16 ②1/4 ②1/2 ②3/4 ②15/16	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②		
	内・上床版下面直角・橋軸方向	床版疲労	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②		
光 フ ァ イ バ ー	下床版上面	曲げ剛性																																	
	上床版下面	床版疲労																																	
	主桁左ウェブ	変位変形																																	
	主桁右ウェブ	変位変形																																	
亀 裂 変 位	水管式沈下計(たわみ)	剛性																																	
	主桁左ウェブ	ひび割れ幅																																	
	下床版上側	ひび割れ幅																																	
	主桁右ウェブ	ひび割れ幅																																	
	熱電対	温度	①			②																													
	高感度変位計	せん断変形																																	
	ロードセル	外ケーブル張力																																	
	三次元測量	橋梁全体の動き																																	

	設置位置	目的	P4	P5								P6								A2	合計数
ゲージ す み	外・上床版上面直角方向	床版疲労	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	70
	内・上床版下面直角・橋軸方向	床版疲労	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	70
光 フ ァ イ バ ー	下床版上面	曲げ剛性																			11
	上床版下面	床版疲労	①																		14
	主桁左ウェブ	変位変形	①																		9
	主桁右ウェブ	変位変形																			9
亀 裂 変 位	水管式沈下計(たわみ)	剛性																			21
	主桁左ウェブ	ひび割れ幅																			7
	下床版上側	ひび割れ幅																			5
	主桁右ウェブ	ひび割れ幅																			3
熱電対	温度	温度																			11
	高感度変位計	せん断変形																			2
	ロードセル	外ケープル張力																			2
	三次元測量	橋梁全体の動き																			

○中の数字は設置数を表す。

注) ひずみゲージは、各支間1/16L、1/4L、1/2L、3/4L、15/16Lの位置に取付る

(3) 計測結果

各径間において、荷重車を支間中央に載荷した場合の鉛直変位を表 5.3.2 に示す。ここで示した鉛直変位は、各径間の両支点を基準とした支間中央断面のたわみである。

さらに、補修対策前後の全断面有効時の剛性に対する載荷試験時のたわみから算出した桁の曲げ剛性との比率（剛性比とする）の変化を図 5.3.3 に示す。

表 5.3.2 鉛直変位の計測結果

対象径間	全断面有効時の剛性による計算値 (mm)		実測値 (mm)					たわみ比 ④／③
			補修対策前(平成18年度)		補修対策後(平成19年度)			
	補修対策前 ①	補修対策後 ②	③	①／③	④	①／④	②／④	
A1～P1径間	3.7	3.4	6.7	(0.55)	4.9	(0.76)	【0.69】	0.73
P1～P2径間	2.5	2.3	4.5	(0.56)	3.2	(0.78)	【0.72】	0.71
P2～P3径間	2.0	1.9	4.0	(0.50)	2.8	(0.71)	【0.68】	0.70
P3～P4径間	3.7	3.4	6.7	(0.55)	5.1	(0.73)	【0.67】	0.76
P4～P5径間	3.7	3.5	6.6	(0.56)	5.0	(0.74)	【0.70】	0.76
P5～P6径間	3.6	3.4	6.0	(0.60)	4.7	(0.77)	【0.72】	0.78
P6～A2径間	3.9	3.6	4.7	(0.83)	4.4	(0.89)	【0.82】	0.94

*1：（ ）内数値は、補修対策前の計算値に対する比率，【 】内数値は、対策後の計算値に対する比率

*2：全断面有効時の剛性による計算値は、高欄剛性を考慮した。

解析モデルは、コンクリート断面を PC 鋼材、鉄筋のヤング係数比で換算した棒モデルを適用

主桁のヤング係数： $E_c=2.6 \times 10^4 \text{N/mm}^2$

壁高欄 "： $E_c=2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$

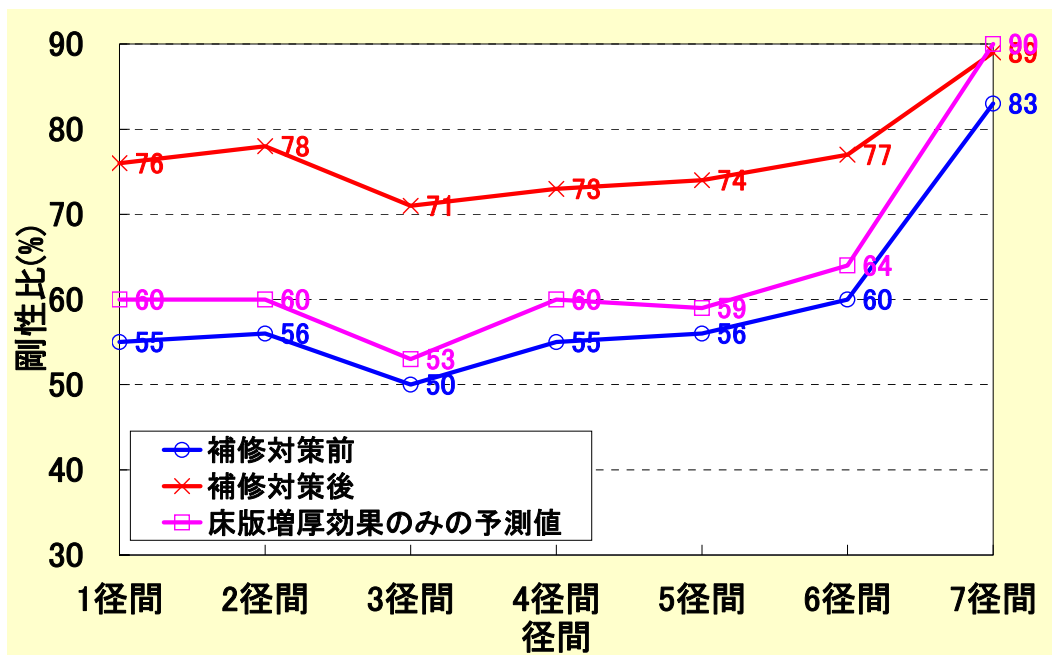


図 5.3.3 補修対策前後の主桁の剛性の変化

P2～P3, P5～P6 径間における補修対策前後の荷重による鉛直変位分布を図 5.3.4, 図 5.3.5 に示す. 同径間は, 平成 16 年度の荷重試験において, 前者はひび割れが多い傾向にあること, 後者は発生たわみがやや大きい傾向にあったことから着眼された径間である. 同図には今回の計測結果とともに, 補修対策前の結果と計算値も併記している. なお, 計算値は温度変化による影響は考慮していない.

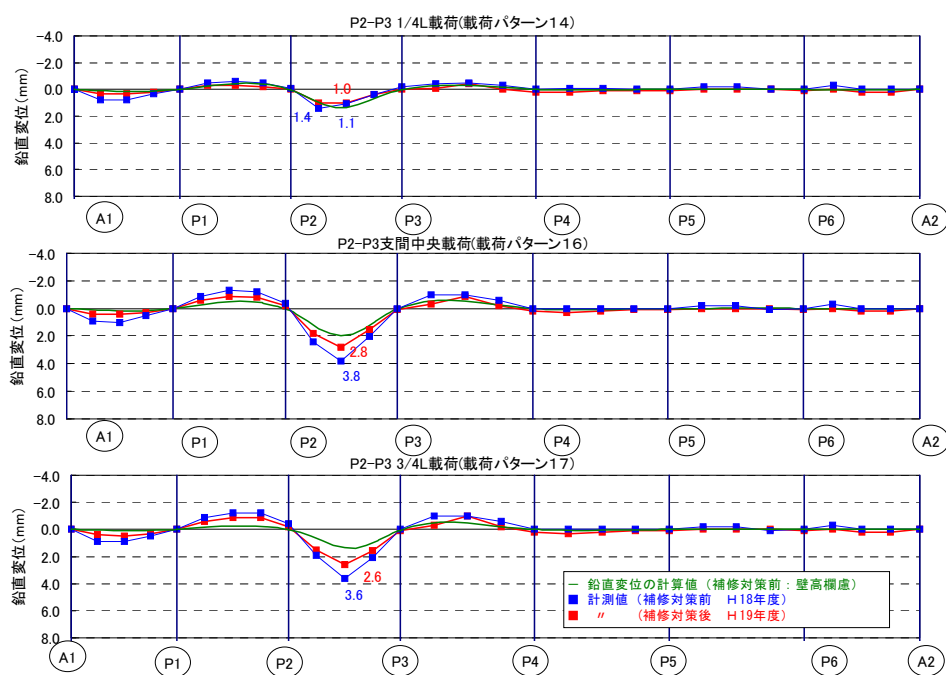


図 5.3.4 荷重による主桁の鉛直変位分布 (P2～P3 径間に載荷)

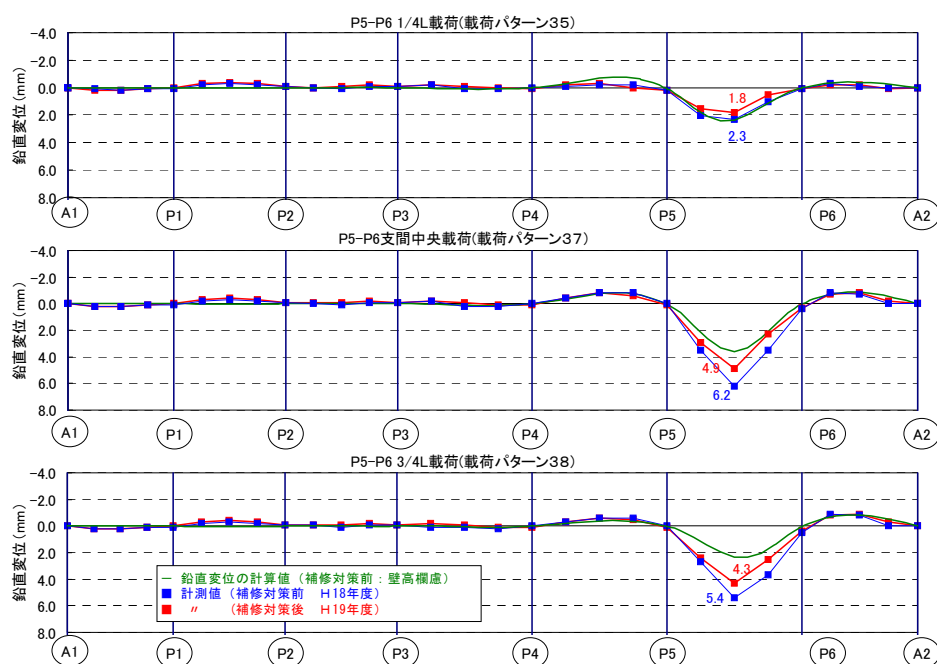


図 5.3.5 荷重による主桁の鉛直変位分布 (P5～P6 径間に載荷)

(4) 載荷試験判定基準

載荷試験に対する基本の考え方は対策前の測定値に比べ対策後の測定値が良い方向の値となる事とし以下に各項目と判断の基準を記す。具体的な数値は、対策前の測定値と解析値を比較し解析に対する係数を補正する等により対策後の解析値を算出し効果の確認を行う事とする。

基準値を満たさなかった場合においては、測定値の検討・解析を行い委員会での協議により対策を検討する。

表 5.3.3 載荷試験判定基準

項目	判断基準の考え方	基準値
下床版平均ひずみ	対策前後で平均ひずみの値が増加していない事	対策前ひずみ $\geq$ 対策後ひずみ
上床版平均ひずみ	対策前後での平均ひずみの低減度合いを解析と比較	対策前ひずみ $\geq$ 対策後ひずみ
ウェブせん断変形	P2・P3橋脚部のウェブ斜めひびわれの動きを観察し、せん断による変形の有無を確認	新たなひびわれの有無 ひずみの増加
たわみ	対策前後でのたわみの大きさを解析と比較	対策前たわみ $\geq$ 対策後たわみ
橋体の振動特性	対策前後での振動特性を比較	対策前振動数を基に対策後を固有値解析により算出した振動数 $\leq$ 対策後振動数
ひび割れ幅	対策前後でのひびわれ幅動きでひびわれ開き抑制効果を検証	対策前ひびわれ幅の動き $\geq$ 対策後ひびわれ幅の動き

5. 4 衝撃振動試験

(1) 衝撃振動試験の目的

本調査は、垂井高架橋の補修対策前後に衝撃振動試験を実施することにより、桁の振動特性を把握し、補修対策効果を評価すると共に供用開始前の初期値を把握することを目的とした。

具体的には、測定結果から得られた固有振動数に対して、設計値に基づいて振動解析を行った結果と比較し、主桁の剛性を評価した。

これら結果は、補修対策の効果を評価するための基礎データとして利用し、供用後に実施するモニタリングの基礎データとしても利用する。

(2) 検討方針および検討内容

衝撃振動試験は、測定で得られた応答波形を周波数分析し、主桁の固有振動数および固有振動モードを把握する。

構造物の剛性の評価は、設計モデルの条件に基づき、解析モデルを作成し、この解析モデルを用いて、部材剛性（主桁）を様々に変化させる固有値解析を行い、実測固有振動数と解析固有振動数が一致するまで繰り返し計算を行い、最終的に収束したときに設定した部材剛性が実橋の評価値としている。桁の剛性を補修対策前の評価結果と比較することで、補修対策効果を把握することが可能である。

なお、固有振動数は質量と部材剛性から式（2.5.1）で表される。健全なほど（部材剛性が高いほど）固有振動数は高い。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.5.1)$$

ここに、 f ：固有振動数、 K ：部材剛性、 M ：部材の質量

補修対策前後の測定ケースを表 5.4.1 にまとめて示す。

表 5.4.1 補修対策前後の測定ケース

	測定ステップ	備 考	実 施 日
①	補修対策前	無対策時	H18. 9. 27～H18. 9. 30
②	ひびわれ注入後	ひびわれ注入工施工後	H18. 12. 9～H18. 12. 11
③	PC鋼材緊張後	PC鋼材緊張工施工後	H19. 4. 19～H19. 4. 20
④	補修対策後（載荷試験前） 補修対策後（載荷試験中） 補修対策後（載荷試験後）	床版増厚後	H19. 6. 19～H19. 6. 23

(3) 衝撃振動試験の結果

対象橋梁に速度計を設置して重錘加振時の応答波形を収録した。

対象橋梁は連続桁であるため、隣接桁も同時測定し、隣接桁の影響も含めた振動特性を把握するために、図 5. 4. 1 に示すように、各径間の 1/4 点、1/2 点、3/4 点および隣接桁の 1/4 点に速度計を設置し、1/2 点と 3/4 点を加振した。

測定方法を図 5. 4. 2 に示す。測定は桁内部で実施し、下フランジの版の振動の卓越を避けるため、図 5. 4. 3 に示すように、速度計は天井に設置した。

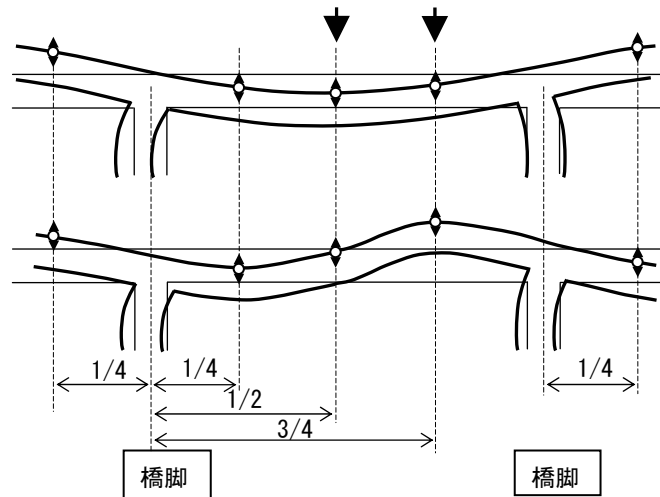


図 5. 4. 1 測定で得られる振動モード

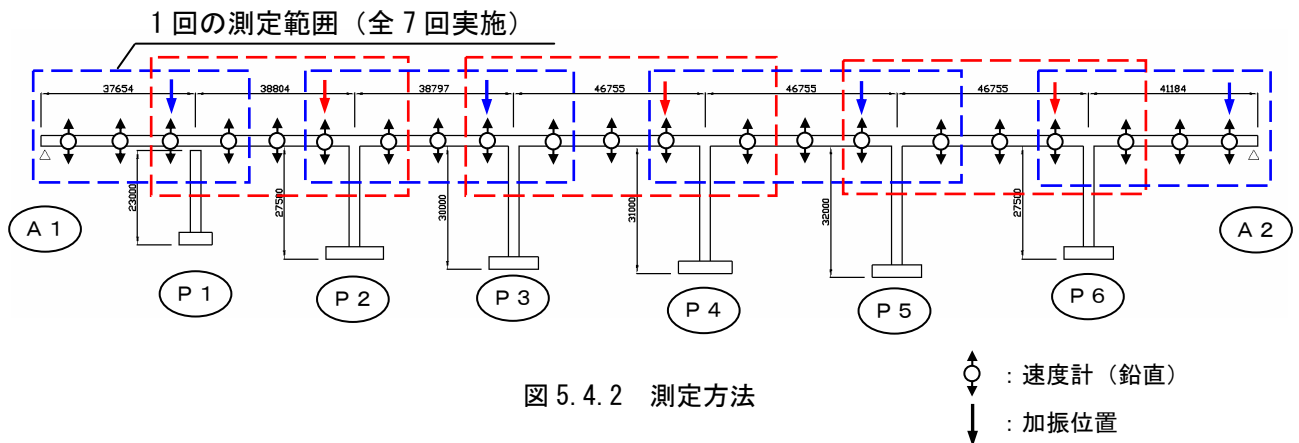


図 5. 4. 2 測定方法

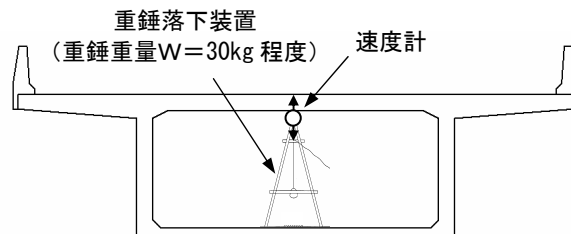


図 5. 4. 3 桁内部での試験方法

固有振動数を表 5.4.2 にまとめた。この表には、補修対策前、ひび割れ注入後、P C 鋼材緊張後の固有振動数もあわせて示した。1 次の固有振動数を比較すると、補修対策前に対してひび割れ注入後は 3%～13%上昇し、P C 鋼材緊張後は 5%～11%上昇し、補修対策後は-3%～5%変化した。

表 5.4.2 補修対策前後の実測固有振動数

	スパン L(m)	状況	1次		2次		3次	
			実測 固有振動数 f(Hz)	(変化率)	実測 固有振動数 f(Hz)	(変化率)	実測 固有振動数 f(Hz)	(変化率)
1径間(A1～P1)	38.0	補修対策前	3.8	1.00	16.9	1.00	23.8	1.00
		ひびわれ注入後	4.3	1.13	17.4	1.03	23.4	0.98
		PC鋼材緊張後	4.2	1.11	19.8	1.17	26.9	1.13
		補修対策後(載荷試験前)	4.0	1.05	12.9	0.76	27.7	1.16
		補修対策後(載荷試験後)	4.0	1.05	12.9	0.76	27.5	1.16
2径間(P1～P2)	39.0	補修対策前	3.9	1.00	16.9	1.00	23.9	1.00
		ひびわれ注入後	4.3	1.10	17.4	1.03	24.9	1.04
		PC鋼材緊張後	4.2	1.08	20.3	1.20	24.9	1.04
		補修対策後(載荷試験前)	4.0	1.03	13.2	0.78	28.1	1.18
		補修対策後(載荷試験後)	4.0	1.03	13.2	0.78	28.1	1.18
3径間(P2～P3)	39.0	補修対策前	5.1	1.00	16.9	1.00	24.0	1.00
		ひびわれ注入後	5.4	1.06	17.8	1.05	21.8	0.91
		PC鋼材緊張後	5.4	1.06	21.1	1.25	28.9	1.20
		補修対策後(載荷試験前)	5.2	1.02	14.5	0.86	29.5	1.23
		補修対策後(載荷試験中)	5.2	1.02	14.5	0.86	29.5	1.23
		補修対策後(載荷試験後)	5.2	1.02	14.6	0.86	29.2	1.22
4径間(P3～P4)	47.0	補修対策前	3.5	1.00	15.7	1.00	21.5	1.00
		ひびわれ注入後	3.6	1.03	16.9	1.08	21.5	1.00
		PC鋼材緊張後	3.7	1.06	19.7	1.25	22.8	1.06
		補修対策後(載荷試験前)	3.4	0.97	10.9	0.69	24.2	1.13
		補修対策後(載荷試験後)	3.4	0.97	11.0	0.70	24.0	1.12
5径間(P4～P5)	47.0	補修対策前	3.5	1.00	15.7	1.00	21.2	1.00
		ひびわれ注入後	3.6	1.03	16.9	1.08	21.5	1.01
		PC鋼材緊張後	3.7	1.06	19.9	1.27	22.6	1.07
		補修対策後(載荷試験前)	3.4	0.97	12.0	0.76	24.9	1.17
		補修対策後(載荷試験後)	3.4	0.97	12.1	0.77	24.9	1.17
6径間(P5～P6)	47.0	補修対策前	3.5	1.00	15.9	1.00	21.4	1.00
		ひびわれ注入後	3.6	1.03	20.0	1.26	21.4	1.00
		PC鋼材緊張後	3.7	1.06	19.3	1.21	22.6	1.06
		補修対策後(載荷試験前)	3.4	0.97	11.0	0.69	26.9	1.26
		補修対策後(載荷試験後)	3.4	0.97	11.1	0.70	26.6	1.24
7径間(P6～A2)	41.0	補修対策前	4.4	1.00	16.8	1.00	24.8	1.00
		ひびわれ注入後	4.6	1.05	20.9	1.24	24.4	0.98
		PC鋼材緊張後	4.6	1.05	20.4	1.21	22.7	0.92
		補修対策後(載荷試験前)	4.4	1.00	13.2	0.79	26.4	1.06
		補修対策後(載荷試験後)	4.4	1.00	13.3	0.79	26.4	1.06

(4) 振動解析の結果

振動解析を行うにあたっての解析モデルは、橋梁全体系のモデルとし、設計モデルと同様のものを用いた。ただし、地盤ばね定数は設計では基礎底面の集約ばねのみを設定しているが、本検討ではフーチング側方の地盤を地表面まで考慮して設定した。主桁と橋脚のコンクリートの剛性については、衝撃振動試験時のひずみレベルは一般的に微小であることから、弾性係数はC E B－F I P設計指針の動弾性係数を初期値として設定した。

解析モデルを図 5. 4. 4 に示す。

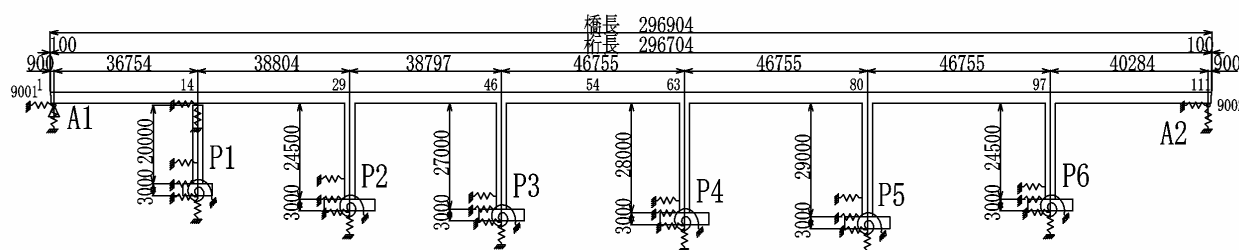


図 5. 4. 4 解析モデル

補修対策後（载荷試験後）の 3 径間（P 2～P 3）主桁の実測固有振動数・実測固有振動モードと、解析固有振動数・解析固有振動モードを比較した結果を表 5. 4. 3 に示す。これより、解析値は実測値と比較的良く一致しており、解析結果は実測値を説明できる精度でシミュレーションできていると考えている。

表 5. 4. 3 主桁の実測値と解析値の比較（3 径間（P2～P3）主桁：载荷試験後）

	振 動 モ ー ド 図	
	実 測	解 析
1 次	$f = 5.2\text{Hz}$	$f = 5.2\text{Hz}$
2 次	$f = 14.6\text{Hz}$	$f = 14.6\text{Hz}$
3 次	$f = 29.2\text{Hz}$	$f = 28.6\text{Hz}$

(5) 衝撃振動試験による主桁の剛性の評価結果

衝撃振動試験における主桁の剛性は、補修対策前の全断面有効時の剛性を初期剛性として、衝撃振動試験から得られる桁の固有振動数を用いて振動解析によって算出した桁の曲げ剛性に対する比率（剛性比とする）として評価した。なお、主桁の初期剛性には、設計ヤング係数 $2.98 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ から推定した動弾性係数 $3.88 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を用いた。

主桁の剛性は対策前が初期剛性に対して 36%～64%であったのに対してひび割れ注入後は 41%～66%、P C 鋼材緊張後は 41%～66%、補修対策後は 59%～68%と評価され、補修対策効果が確認された。

補修ステップごとの主桁剛性の変化を図 5.4.5 にまとめたが、補修対策前と比較して、ひび割れ注入後の主桁の剛性は上昇しており、P C 鋼材緊張後では剛性の上昇は少なく、補修対策後はさらに剛性が上昇した。なお、補修対策後の剛性の評価は、補修前の上面増厚をしない断面を初期剛性とした場合と、上面増厚を考慮した断面を初期剛性とした場合の 2 通りを示している。

以上の様に、衝撃振動試験によって補修前後の主桁の剛性の評価ができ、供用開始後の剛性の変化をモニタリングすることが可能であることがわかった。

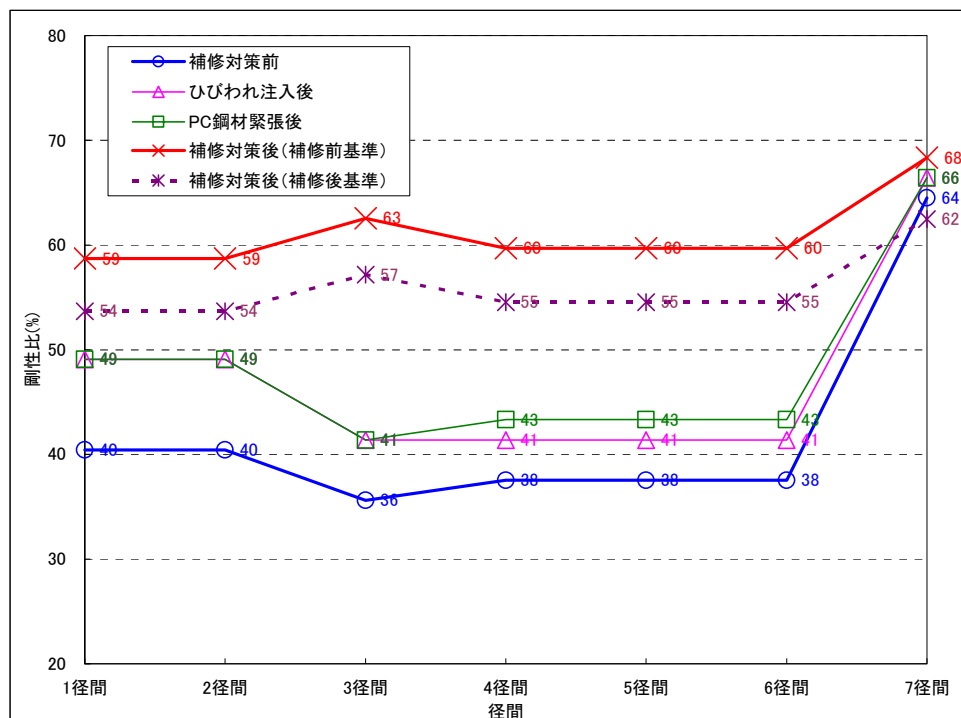


図 5.4.5 補修ステップごとの主桁の剛性の変化

6. モニタリングの実施体制等

モニタリングの全体システムの概要を図 6.1.1 に示す。本報告に示すモニタリングは、管理者が関係機関と連携を取りながら主体的に実施することを基本とする。部会で取り上げられたモニタリング計画全体の実施体制のモデルを図 6.1.2 に示す。なお、この図中には、平成 20 年度に新たに発足するモニタリング評価委員会を含めている。

4. モニタリングの全体システム

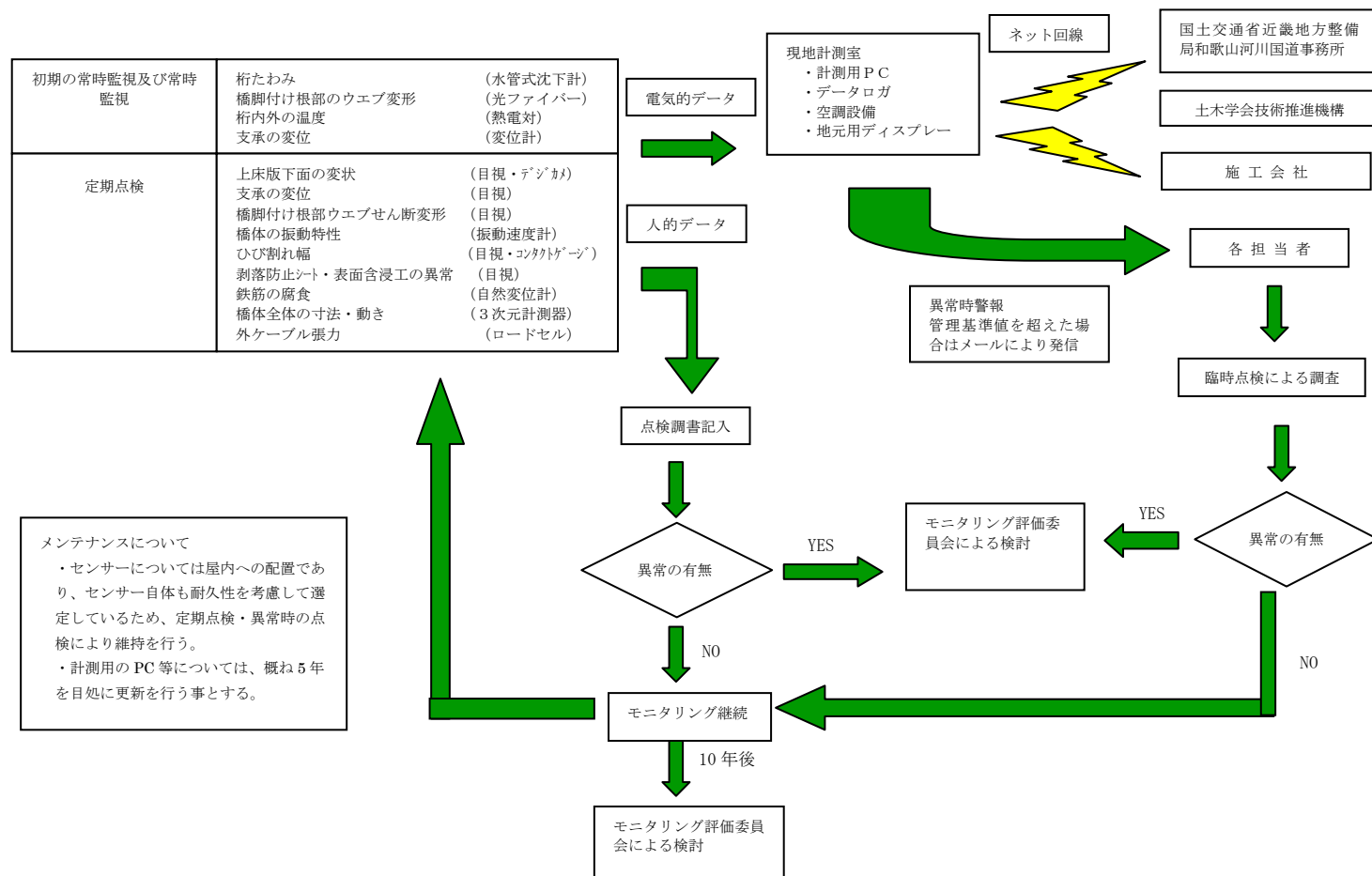
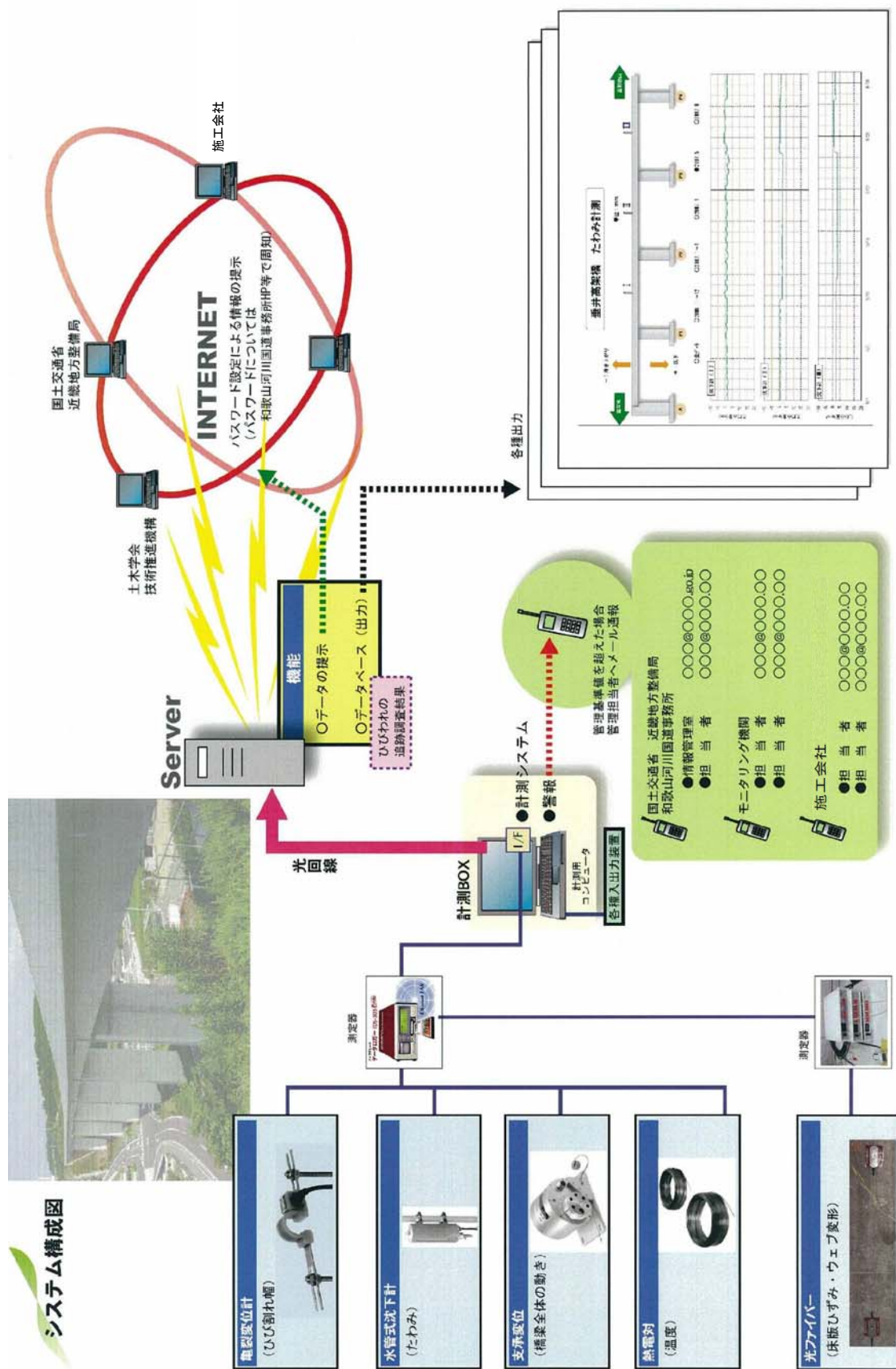


図 6.1.1 モニタリングの全体システム



＜参考文献＞

- 1) コンクリート委員会・コンクリート構造物のヘルスマニタリング研究小委員会：【委員会報告】コンクリート構造物の構造ヘルスマニタリング（SHM）の研究動向と設計手法，土木学会論文集，No. 795/V-68， pp. 1-16， 2005. 8