

損傷橋梁の監視技術に関する調査

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：木村嘉富、七澤利明、澤田守

【要旨】

本研究では、損傷原因、状況に応じたモニタリング技術の適用手法およびモニタリング技術に必要な項目の提示を行うため、実橋でのモニタリング事例の調査および損傷橋梁の監視に係る計測技術の調査を行った。また、各種の計測技術の中で、AE（アコースティックエミッション）法に着目し、適用性を実験的に検討した。さらに、近年、損傷事例が報告されている PC 橋の腐食による PC ケーブル破断を対象とし、損傷に応じて生じる変状を構造解析により求め、監視技術の適用方法および監視技術に求められる性能について検討した。

キーワード：モニタリング、計測技術、AE 法、PC ケーブル破断

1. はじめに

今後、我が国の道路橋は更新時期を迎えるが、大量の橋梁を短期間で一斉に対応することは困難である。このため、橋梁の損傷状態や荷重状況に応じて、早急に架け替えるべき橋梁、補修・補強を行う橋梁、当面は損傷状況を監視しつつ所定の時期に対応する橋梁などを区分して対応することとなり、継続した計器などによるモニタリングを実施し、随時規制あるいは通行止めができる体制をとりながら供用を継続しなければならない橋梁も出てくることが予想される。

既に供用中の橋梁に対して、モニタリングが行われている事例もあるが、監視すべき状態を捉えるための測定項目や計器の選定など、一般化するために確認すべき項目が多い。また、センサやシステムなどモニタリング側の寿命や調査にかかる費用の面も課題であり、各種モニタリング技術について適用限界を把握し、計測の位置づけを明らかにすることが必要とされている。

本研究では、損傷原因、状況に応じたモニタリング技術の適用手法およびモニタリング技術に必要な項目の提示を行うため、実橋でのモニタリング事例の調査および損傷橋梁の監視に係る計測技術の調査を行うとともに、各種の計測技術の中で、AE（アコースティックエミッション）法に着目し、適用性を実験的に検討する。また、近年、損傷事例が報告されている PC 橋の腐食による PC ケーブル破断を対象とし、損傷に応じて生じる変状を構造解析により求め、監視技術の適用方法および監視技術に求められる性能

について検討する。

2. 実橋でのモニタリング事例の調査

2.1 国内のモニタリング事例

表-1 に国内外のモニタリング事例を示す。国内の事例において一部では、道路管理手法として用いられているケースがあるが、多くがモニタリング手法の適用性の研究や開発のために実施されているケースとなっている。前者としては、塩害橋において架け替えまでの期間中の安全措置を施した状態での変状を監視するために行われた事例¹⁾や、供用後に発生した変状に対する補修・補強効果の持続性を監視するために行われた事例²⁾がある。これらの事例では計測項目やしきい値の設定については、損傷事例に応じて個別に実施されている。後者としては、健全度評価のためのモニタリングシステムの検証のために鋼橋³⁾およびコンクリート橋⁵⁾で実施されているが、研究開発の段階である。また、個別の橋梁形式や損傷事例に応じて実施された事例もあり、長大橋における強風時や地震時の全体挙動に着目した事例⁶⁾や、鋼橋の疲労損傷に着目した事例⁹⁾¹⁰⁾がある。さらには、地震時などに生じる異常を監視するため、あるいは重量超過車両を監視するために行われている事例⁸⁾などがある。

2.2 海外のモニタリング事例

FHWA（米国交通省連邦道路局）では、2007年に発生した I-35W 鋼トラス橋の崩落事故後の新橋となるコンクリート橋（St. Anthony Falls Bridge）におい

表-1 実橋でのモニタリング事例

	実施主体	対象橋梁	実施目的	計測項目	文献
国内	国土交通省 酒田工事事務所	単純PCポステンT桁橋	損傷が過度に進行した塩害橋の長期モニタリング	たわみ、外ケーブルの軸力、反力	1)
	国土交通省 近畿地方整備局	7径間連続PRCラーメン橋	補修補強対策の効果の持続性を監視	ひずみ、たわみ、ひび割れ、温度、外ケーブル張力、支点変位	2)
	国土交通省 東京国道事務所 東京工業大学	鋼単純I桁 2径間連続鋼床版箱桁橋	モニタリングシステムの適用性検討	ひずみ、変位、温度	3)4)
	国土交通省 関東地方整備局 東京大学	3径間連続鉄筋コンクリートT桁橋	モニタリングシステムの適用性検討	ひずみ、振動、傾斜、加速度、変位、温度	5)
	本州四国連絡道路 (株)	斜張橋、吊橋、アーチ橋等	設計検証および維持管理を目的とした動態観測	地震、風速、加速度	6)7)
	東京工業大学 横浜国立大学 (株)NTTデータ	首都高速3号線、4号線、中央環状線における3橋	リアルタイム橋梁遠隔監視システム(橋梁異常リアルタイム監査技術、重量超過車両監査技術)の開発	ひずみ、変位、傾斜、映像	8)
	JR東日本 日本車輛製造(株)	下路式ワーレントラス橋 鋼単純I桁橋	破断探知線を用いた鋼橋の疲労損傷モニタリング手法の開発	鋼材の亀裂	9)10)
海外	ミネソタ州交通局 (Mn/DOT)	PCラーメン橋(1-35W)	モニタリングシステムの適用性検討	振動、ひずみ、塩化物イオン量など	11)
	米国土交通省連邦道路局 (FHWA)	LTBPP(長期橋梁性能プログラム)	劣化状態、ハザード(地震、強風、洗屈、火災など)、環境条件、(活荷重、塩分濃度など)、供用時の性能の継続的な監視	詳細不明	12)

て様々なセンサを用いたモニタリングを実施している¹¹⁾。また、2006年から20年間の研究開発プロジェクトとして「長期橋梁性能プログラム(LTBPP: Long Term Bridge Performance Program)」を発足させており、データを統計的に管理し、実態に基づいた定量的な指標の確立と予測モデルの画期的な向上を目的として、全米約60万橋のうちの数百橋を対象としてモニタリングが実施されている¹²⁾。

3. 損傷橋梁の監視に係る計測技術の調査

3.1 計測技術の分類

計測技術について、計測する物理量、対象となる現象を既往の文献等¹³⁾¹⁴⁾より整理した結果を表-2に示す。この他にも、研究過程の技術など様々な技術が提案されているが、ここでは実用化もしくは、実用化に近いと考えられる技術を記載した。

3.2 各種計測技術の概要と特徴

ここでは、表-2に示した技術から、変位・ひずみ・加速度・ひび割れおよびPCケーブル破断による変状計測に着目し、さらに、計測実績のある製品ある

いはNETIS登録されている計測技術を抽出し、適用条件、精度、コスト、耐久性等の市場調査を行った結果を示す(表-3)。なお、コストは、単純桁の中央にセンサを設置し、1年間計測およびデータ整理を行った場合の参考価格である。

(1) 変位計測技術

- 1)変位計
- 2)リング型変位計
- 3)DDシステム(NETIS登録番号:KK-080035-A)
- 4)3Dレーザースキャナ
(NETIS登録番号:CG-040019)

(2) ひずみ計測技術

- 1)動ひずみゲージ
- 2)FBG
- 3)BOTDR
- 4)OSMOS(NETIS登録番号:KT-000059-A)
- 5)SOFO

(3) 加速度計測技術

- 1)加速度計
- 2)サーボ型加速度計
- 3)MEMS加速度計

表-2 計測技術の分類

物理量	対象	技術			
変位	局部変形	変位計 LiDAR			
	振動	ピーク変位メモリ デジタルカメラ			
ひずみ	局部変形	レーザードップラー振動計	FBG		
				光ファイバ	BOTDR
					OTDR
					SOFO
		ピークひずみ記憶センサ			
	磁気ひずみセンサ				
ひずみゲージ					
	疲労	圧電材料			
応力	局部変形	EMセンサ			
	局部応力	スロットストレス			
加速度	局部変形	光ファイバ	BOCDA		
		圧電材料	圧電素子		
		加速度センサ	サーボ型・MEMS型 MICAMoto		
	振動	光ファイバ	FBG		
	剛性低下	圧電材料	圧電素子		
		振動ジャイロセンサ			
AEセンサ		スマートAEセンサ			
弾性波	破断	AEセンサ			
表面性状	腐食	圧電材料	Micro fiber composite		
		小型インピーダンス計測チップ			
		腐食環境センサ			
		腐食センサ			
	塗膜劣化	デジタルカメラ			
	その他	表面SH波センサ			
膜厚	腐食	デジタルカメラ	レーザー変位計		
き裂	腐食	AEセンサ			
	疲労	超音波装置			
		疲労センサ			
		導電性表面材			
ひび割れ	局部変形	π型ゲージ			
	材料劣化	AEセンサー			
		デジタルカメラ	ひび割れ計測		
電位差	材料劣化	ケーブル電位差計			
PH	材料劣化	pHセンサ			
温度	疲労	温度計			
	材料劣化	温度計			

4)振動測定器(CCD非接触)ユレトール(NETIS登録番号:KK-050010)

5)振動測定器(レーザー非接触)Uドップラー

(4) ひび割れ監視技術

- 1)πゲージ
- 2)スマートAEセンサ
- 3)デジタル画像による構造物の点検・分析支援システム登録(NETIS番号:CB-050020-V)
- 4)KUMONOSU(NETIS登録番号:KK-080019-A)

(5) ケーブル監視技術

- 1)スマート AE センサ

2)EM センサ

4. AE 法による監視技術の適用性の検討

AE 法は、材料内部のひび割れ発生、進展、滑りなどに伴い発生する弾性波を利用した計測法である。ここでは、各種の計測技術の中で、コンクリートの破壊の進行程度の把握の可能性がある AE 法に着目し、コンクリート部材を対象として監視技術の適用性について検討を行う。

4.1 載荷試験の概要

電食により人工的に鋼材腐食を生じさせた PC はり供試体に対して 4 点曲げ静的載荷試験を行い、試験中発生する弾性波の計測を行った。センサの設置状況を図-1 に示す。また、図-2 に PC はり供試体の寸法形状と AE 計測位置を示す。供試体は、支点から載荷点までのせん断スパンの PC 鋼より線とせん断補強鉄筋を電食で人工的に腐食させた。また、供試体は、No.1 と No.2 の 2 体であり、No.2 はプレストレスの導入を行っていない。

図-3 に作用せん断力と中央たわみの関係を示す。No.1 供試体は、140KN で供試体下面に曲げひび割れが発生した。その後、荷重を一旦除荷して再び載荷し、220N で供試体側面にせん断方向のひび割れが発生した。最大荷重は 340KN であった。No.2 試験体は、70KN で供試体下面に曲げひび割れが発生した。その後、荷重を一旦除荷して再び載荷し、180KN で供試体せん断方向のひび割れが発生した。最大荷重は 300KN であった。

4.2 検討方法

計測した AE データを各種のパラメータで整理分析し、損傷進行の把握に関する検討および損傷発生位置の特定の検討を行う。以下に検討対象とした AE パラメータを示す。

(1) Hit 数

Hit は、センサに入力した AE 信号 (一塊の AE 波形) を示し、Hit 数は計測された AE 信号の数を示す。

(2) 最大振幅値

一つの AE 信号に含まれる最大波高値 (mV) を次式により dB 表示としたもの。

$$dB = V/V_0$$

ここで、 V_0 はリファレンス電圧を示し、ここでは $V_0=1\mu V$ としている。

表-3 計測技術の市場調査結果

計測対象	計測方法		線	長期/短期	計測技術	適用条件・特徴	計測精度	耐久性 (一般環境による)	コスト※ (1年設置)
たわみ	点	静的	有	長期/短期	変位計	接触型であるため、足場等の設置が必要	±0.01mm	5年程度	530万
					リング型変位計		±0.1mm	5年程度	510万
	面的	無	短期	レーザー変位計	非接触型で足場不要であるが、ターゲットの設置・清掃が必要	1.5mm	実績は3ヶ月。試験では9ヶ月(現在継続中)	660万	
				3Dレーザースキャナ	遠距離から計測可能。ただし天候等に左右されやすく、データ整理に時間がかかる	4mm	不明(長期実績なし)	1750万	
ひずみ	点	動的	有	長期/短期	ひずみゲージ	実績も多く、安定している。長期計測の場合、接着剤の性能に依存する	±1μ	5年程度	660万
	多点				FBG	長距離で信号伝送可能。1本の光ファイバに12個のセンサが設置可能	±数μ～±10μ	5年以上の使用実績あり	1090万
	面的				OSMOS	長尺センサー(1～10m)で、静的・動的を同時に計測可能。コンクリート・土中・水中にも設置可能	±20～50μm	システム10年(実績)センサ20年	550万
		静的	長期	SOFO	測定範囲が広く(0.2m～10m)、高精度であるが、動的に計測不可	±0.2%	5年程度センサ10年	1450万	
				BOTDR	20km程度の長距離を1.0mの分解能で計測可能。計測時間が長く、動的計測はできない	±30μ～100μ	システム5年(実績)センサ10年	2180万	
	固有振動	点	動的	有	短期	サーボ型加速度計	高精度であり、設置も容易	0.0001～1m/s ² ±5%	誤差検定有効期限が6年
長期/短期		MEMS型加速度計			無線により設置可能。精度があまり高くない	39.2m/s ²	5年程度	280万	
多点		静的	無	短期	CCD非接触振動測定器	センサの取付作業等がなく簡易。天候、地盤に左右される	0.01Hz	不明(長期実績なし)	920万
単点					構造物診断用非接触振動測定システム		2mm	不明(長期実績なし)	810万
ひび割れ	点	静的	有	長期/短期	パイ型ゲージ	取扱いが容易だが、ひび割れ箇所に設置する必要あり	±0.05mm	5年程度	470万
	面的	動的		長期	スマートAEセンサー	簡易に設置可能。損傷の詳細位置の検出は困難		10年程度	270万
		静的	無	短期	デジタル画像による構造物の点検・分析支援システム	35m程度離れたところから、ひび割れ幅0.1mm以上を計測可能。ひび割れ長さはトレースする	0.1mm(35m)	不明(長期実績なし)	270万
					ひび割れ計測システム	計測距離50m程度から0.2mmのひび割れの幅と長さを計測可能	0.2mm(50m)	不明(長期実績なし)	450万
PC破断	点	静的	有		EMセンサー	簡易に設置可能。損傷の詳細位置の検出は困難	±1MPa	10年以上の使用実績あり	540万
	面的	動的		無	スマートAEセンサー	コンクリートのはつり作業が必要。PC鋼材の特性を事前に把握する必要がある		10年程度	270万

※コストで長期対応していないものは月に1回計測を行った場合を仮定

(3) エネルギー

検出された波形の面積であり、高さ1mV、長さ1μsの矩形波が入力したときの値を1eu(エネルギーユニット)と定義している。発生したAE事象の大きさを相対的に比較するための値であり、物理的なエネルギーとは異なる。

(4) RA値および平均周波数

「アコースティックエミッションによるコンクリートひび割れ監視方法¹⁵⁾」では、RA値(立ち上がり時間/最大振幅値)と平均周波数(カウント数/継続時間)から、発生しているひび割れについて、新たなひび割れの進展(主に引張型)または、既存のひび割れ面での滑動(主にせん断型)を識別する手法が示されている。しかし、判定のしきい値は明示されていないため、個別に設定する必要がある。

図-4に試験No.1におけるHit数と荷重の時間履歴を示す。ここでは、しきい値の設定を行なうため、試験時間を時間①～⑧の8つに分類している。図-5に時間②、⑧における平均周波数とRA値の相関図を示す。RA値を7とした場合に概ね分類できる傾向が見られるため、しきい値をRA値7とし、RA値7以下を引張型、7より大きいAEをせん断型とした。また、供試体No.2についても、RA値を7とした場合に概ね分類できる傾向が見られた。

4.3 AEパラメータによる損傷進行の把握に関する検討

図-5に供試体No.1について、10秒間毎のHit数、最大振幅値、エネルギー、引張型・せん断型AEのHit数、せん断型AEの割合の時間履歴を示す。

Hit数に着目すると、曲げひび割れおよびせん断ひ



図-1 AE センサ設置状況

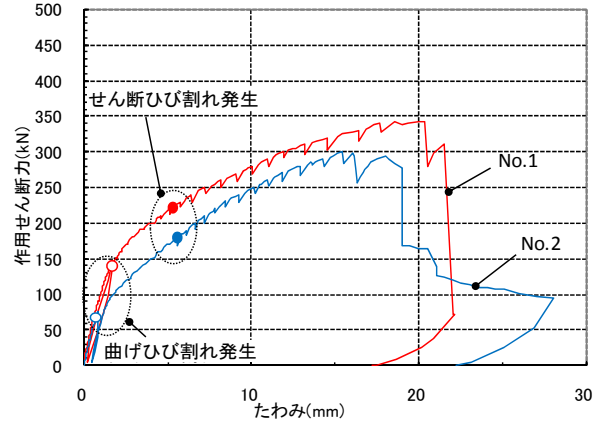


図-3 作用せん断力-中央たわみ関係

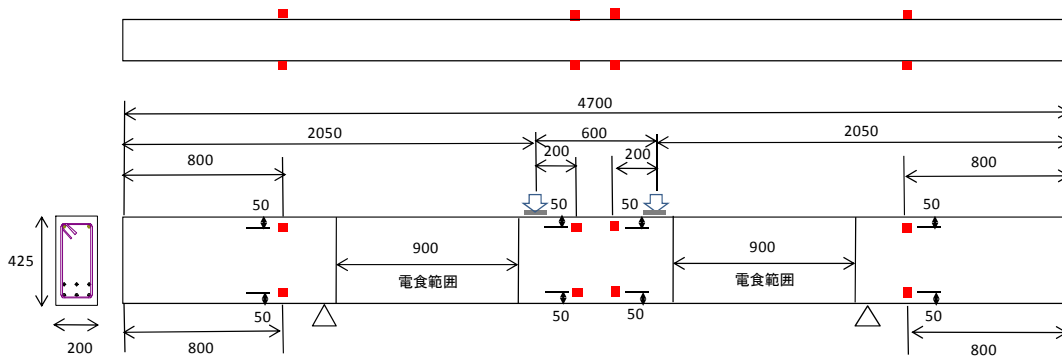


図-2 PCはり供試体の寸法形状及び計測位置 (単位:mm)

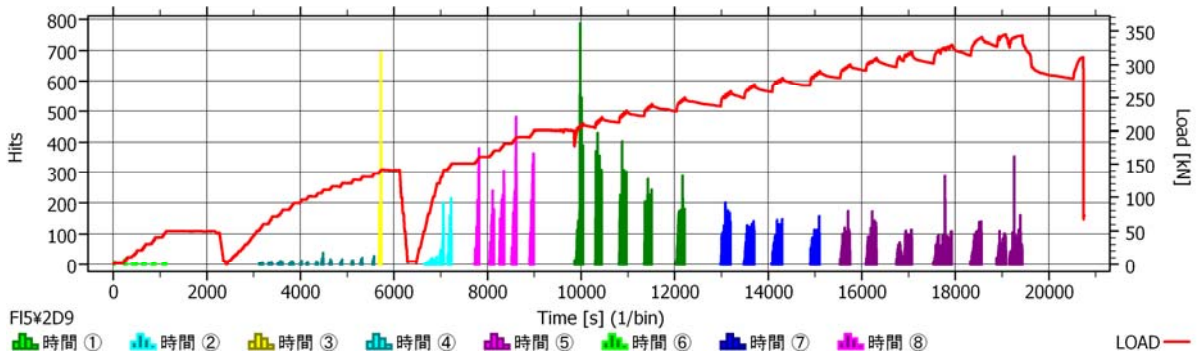
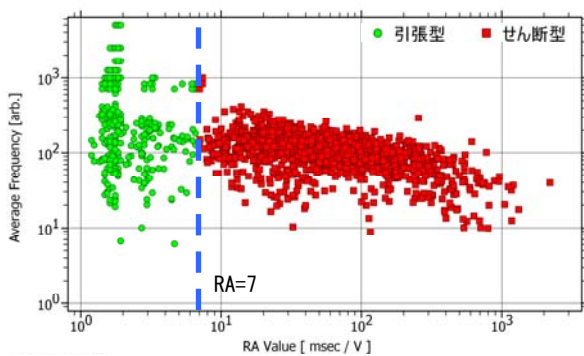
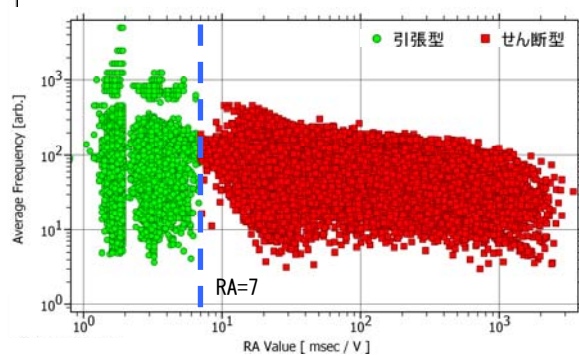


図-4 Hit数と荷重の時間履歴 (No.1)



(a) 時間②における平均周波数とRA値



(b) 時間⑧における平均周波数とRA値

図-5 平均周波数とRA値の相関図 (No.1)

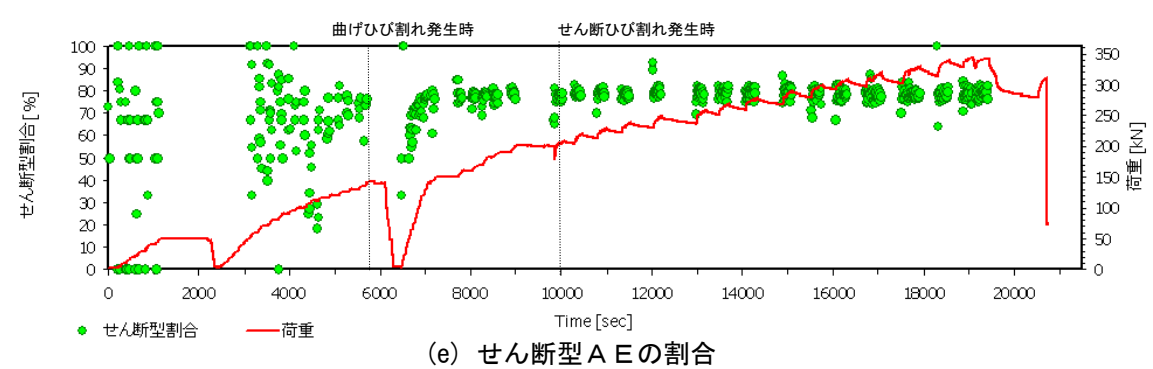
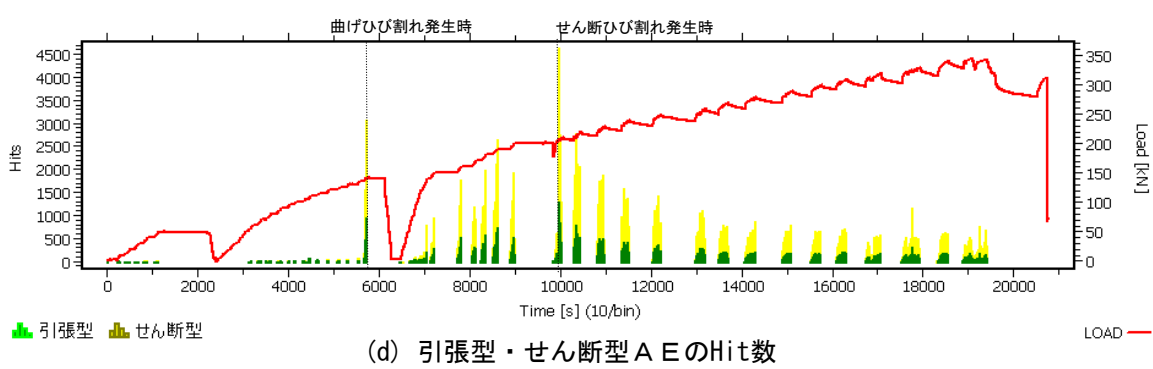
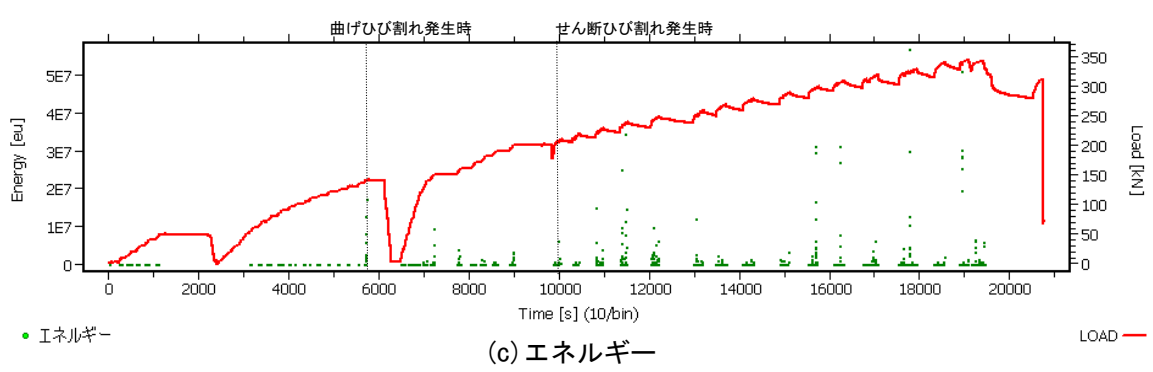
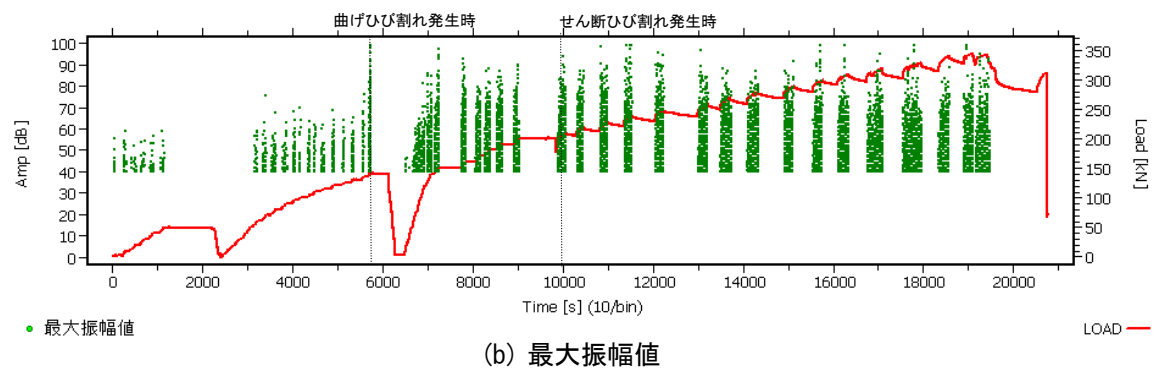
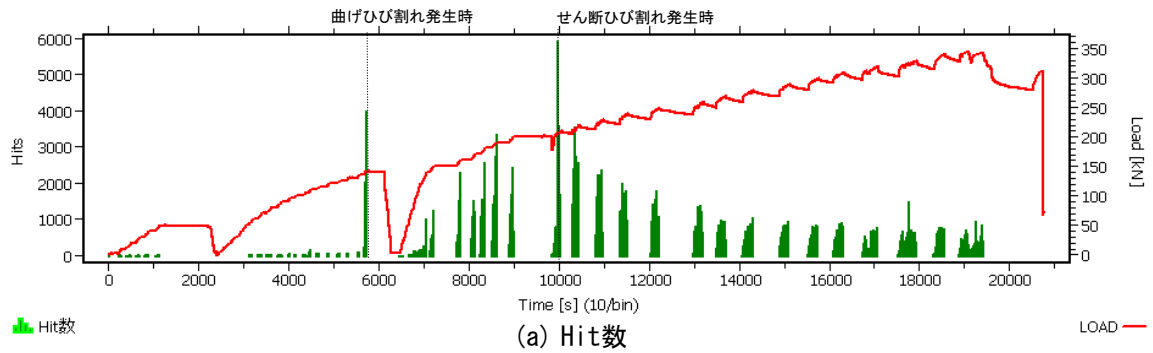


図-5 AEパラメータによる整理 (No. 1)

ひび割れ発生時に Hit 数が増加しており、供試体のひび割れ発生と AE の間に相関がみられた。材料に荷重を加える際、その応力が以前に加えられた最大値を超えない場合に弾性波が観測されない現象をカイザー効果と呼ぶ。曲げひび割れ発生前 (2500~3000 秒) においては、カイザー効果の成立が見られものの、曲げひび割れ発生後 (6500~8000 秒) においては、カイザー効果が成立していない。損傷の進行に伴いひび割れが多数発生し、せん断型のひび割れが増加したことが影響しているものと考えられる。

最大振幅値については、計測開始から曲げひび割れが発生時にかけて値が大きくなっているが、それ以降は、値がほぼ一定になっている。また、せん断ひび割れ発生時の変化はほとんど見られない。エネルギーについても、曲げひび割れ発生時に増加が見られるが、せん断ひび割れ発生時の変化は見られない。

図-5(d)(e)に RA 値および平均周波数を用いて、引張型とせん断型のひび割れに識別した結果を示す。Hit 数でみると、曲げひび割れ発生時からせん断型ひび割れが多数発生している。割合でみると、曲げひび割れ発生前では、絶対値が小さいこともあるが、ばらつきが大きい。一方、せん断ひび割れ発生後では、せん断型と引張型の割合は、ほぼ一定値 (約 80%) に収束している。

No.2 供試体についても、上記と同様の傾向が見られた。

5. 腐食により PC ケーブルが破断した橋梁の監視技術の適用方法と必要項目の検討

5.1 検討概要

近年、塩害による損傷事例として、PC ポストテンション T 桁橋の PC ケーブルが腐食し破断・断面欠損した事例が報告されている (図-6)。

このような PC ケーブルが破断した橋梁の監視を行うためには、損傷によって生じると考えられる現象に着目し、異常を判断するためのしきい値および計測レベルを明らかにし、対象となるレベルの物理量が計測可能なセンサを設置する必要がある。

ここでは単純 PC ポストテンション方式 T 桁を対象に PC ケーブル破断により桁のたわみ、ひび割れ、異常な振動、PC ケーブルの破断音等の現象 (監視パラメータ) が確認されると想定し、何 (物理量) を・どこ (監視技術) に設置すればそれらの現象の監視可能か解析的に検討を行った (図-7)。

5.2 解析条件

PC ケーブルの破断が確認された橋梁を検討対象とし、解析的に PC ケーブル破断を模擬し物理量を算出した上で、監視技術の適用性の検討を行う。解析手法は、ファイバーモデルによる解析とし、変位・ひずみ・固有周期を算出した。

(1) 検討モデル橋梁概要

表-4 に橋梁概要、図-8 に検討対象とした上部構造図を示す。

(2) 解析方法・条件

1) 検討モデル

図-9 に解析に使用した 1 径間分 (5 主桁) の骨



図-6 ひび割れ状況とはつり後の破断状況

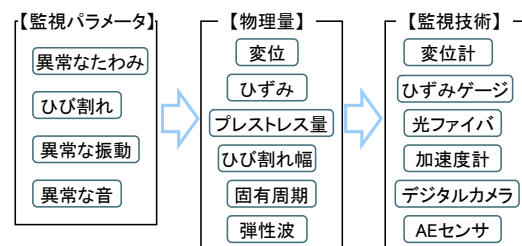
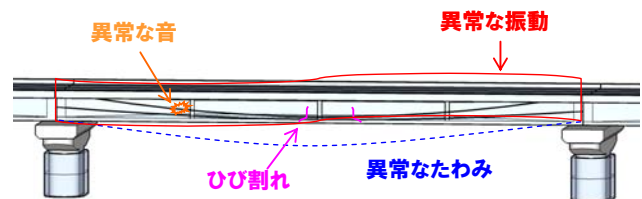


図-7 計測物理量と監視技術のイメージ

表-4 対象橋梁諸元

項目	内容
橋長 (支間割り)	140.5m (5@27.3m)
全幅員 (幅員構成)	8.8m (地覆 0.4m+車道 8.0+地覆 0.4m)
橋梁形式	PC ポストテンション方式単純 T 桁橋 5 連
架設竣工年	1966 年
橋の等級	1 等橋
適用示方書	昭和 39 年 鋼道路橋設計示方書
設計活荷重	TL-20

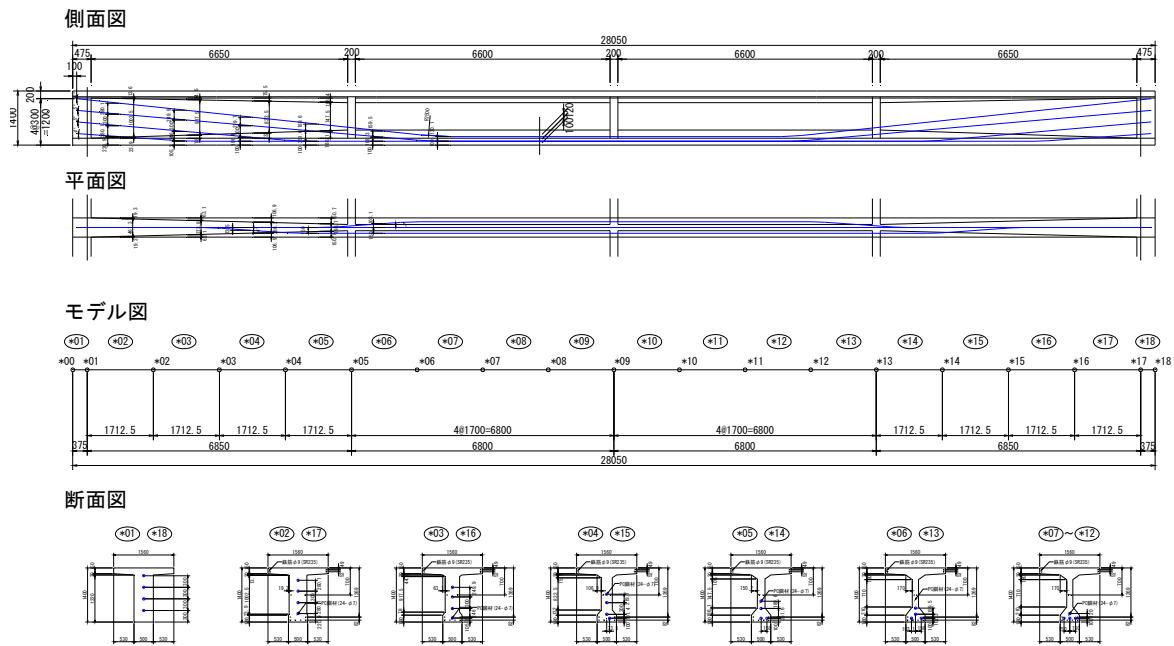


図-8 上部構造図

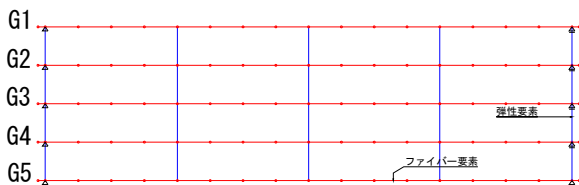


図-9 検討モデル図

表-5 材料条件

コンクリート	主桁強度	強度	N/mm ²	40
		弾性係数	kN/mm ²	31
	場所打ち部	強度	N/mm ²	30
		弾性係数	kN/mm ²	28
PC鋼材	種類	24-φ7		
	材質	SWPR1		
	断面積	mm ²	923.52	
	引張強度	N/mm ²	1500	
鉄筋	種類	φ9		
	材質	SR235		
	降伏点応力度	N/mm ²	235	

表-6 荷重条件

単位重量	鉄筋コンクリート	kN/m ³	24.5
	無筋コンクリート	kN/m ³	23.0
	アスファルト舗装	kN/m ³	22.5
	高欄自重	kN/m	60.0

表-7 輪荷重

総重量	前輪	後輪
kN	kN	kN
250.0	57.7	193.0

組みモデルを示す。主桁をファイバー要素、横桁を弾性要素でモデル化し、支間中央のたわみ、ひずみと固有振動数を算出した。

2)解析条件

材料・荷重の諸条件は、道路橋示方書Ⅰ共通編に準拠し、表-5、表-6に示す条件とした。各材料の応力ひずみ曲線は、道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編より設定した。

3)荷重条件

本検討での荷重条件は、25tトラックを橋軸方向に3台、直角方向に2台並列に並び、橋面が満載となる6台を配置することを想定して設定した。輪荷重は、既往の実橋における載荷試験¹⁰⁾を参考とし表-7

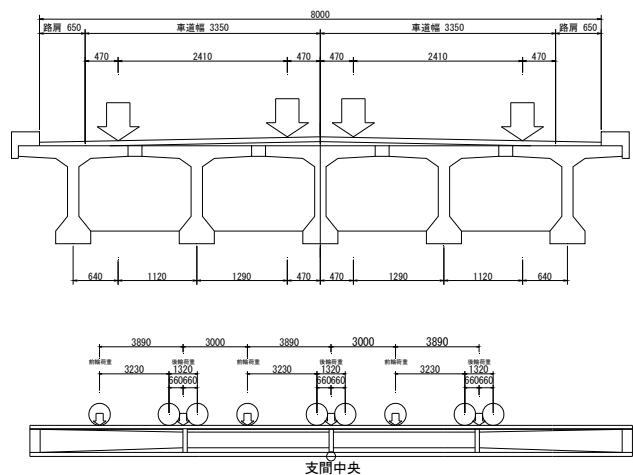


図-10 載荷位置

表-8 検討ケース

No	想定状態	PC ケーブル破断	
		率	本数
case1	健全な状態	0%	0/96
case2	全断面の鋼材腐食状態 (初期)	10.4%	10/96
case3	全断面の鋼材腐食状態 (中前期)	20.8%	20/96
case4	全断面の鋼材腐食状態 (中後期)	29.2%	28/96
case5	全断面の鋼材腐食状態 (後期)	39.6%	58/96

表-9 解析結果 (プレストレス解放)

		case1	case2	case3	case4	case5
		トラック6台	トラック6台	トラック6台	トラック6台	トラック6台
断面力	鋼材破断率	3261.8	3261.8	3261.8	3261.8	3261.8
変形量	δy (mm)	20.5	26.0	46.9	76.6	137.9
ひずみ量	コンクリート	2.352E-04	4.519E-04	8.595E-04	1.297E-03	2.094E-03
	φ (1/m)	-276.0	-309.6	-354.1	-393.0	-456.5
	上線 (μ)	41.5	300.5	806.2	1357.6	2370.1
	下線 (μ)	4073.4	4236.9	4613.4	5040.5	5849.9
	PC鋼材 (μ)	No.1 4119.3 No.2 4119.3 No.3 4119.3 No.4 4119.4	4302.3 4302.1 4302.1 4302.4	4721.5 4721.4 4721.7 4721.7	5196.4 5196.2 5196.6 5196.6	6095.6 6095.4 6095.7 6095.7
応力度	鉄筋 (N/mm2)	上線 -265.7 下線 35.3	-302.8 290.6	-336.8 786.3	-364.6 1327.1	-407.9 2320.3
	コンクリート (N/mm2)	上線 -8.74 下線 0.00	-9.71 0.00	-10.97 0.00	-12.05 0.00	-13.75 0.00
	PC鋼材 (N/mm2)	No.1 814.7 No.2 823.9 No.3 823.8 No.4 823.9	847.4 860.5 860.4 860.5	922.7 944.3 944.3 944.3	1008.1 1039.2 1039.2 1039.3	1170.0 1219.1 1219.1 1219.1
	鉄筋 (N/mm2)	上線 -53.1 下線 7.1	-60.6 58.1	-67.4 157.3	-72.9 235.0	-81.6 235.0

表-10 解析結果 (プレストレス残留)

		case1'	case2'	case3'	case4'	case5'
		トラック6台	トラック6台	トラック6台	トラック6台	トラック6台
断面力	鋼材破断率	3261.8	3261.8	3261.8	3261.8	3261.8
変形量	δy (mm)	20.5	20.8	21.2	21.6	28.4
ひずみ量	コンクリート	2.352E-04	2.473E-04	2.629E-04	2.788E-04	5.325E-04
	φ (1/m)	-276.0	-279.0	-282.8	-286.5	-323.4
	上線 (μ)	41.5	54.8	72.1	89.9	395.4
	下線 (μ)	4073.4	4525.5	5097.6	5680.4	7344.8
	PC鋼材 (μ)	No.1 4119.3 No.2 4119.3 No.3 4119.3 No.4 4119.4	4572.3 4572.1 4572.4 4572.4	5145.8 5145.7 5145.9 5145.9	5730.2 5730.2 5730.3 5730.3	7424.6 7424.5 7424.6 7424.6
応力度	鉄筋 (N/mm2)	上線 -265.7 下線 35.3	-277.5 49.9	-280.2 66.6	-282.8 83.9	-312.4 383.1
	コンクリート (N/mm2)	上線 -8.74 下線 0.00	-8.82 0.00	-8.93 0.00	-9.04 0.00	-10.11 0.00
	PC鋼材 (N/mm2)	No.1 814.7 No.2 823.9 No.3 823.8 No.4 823.9	905.1 914.5 914.4 914.5	1019.5 1029.2 1029.1 1029.2	1136.1 1146.0 1146.0 1146.1	1276.2 1277.5 1277.4 1277.5
	鉄筋 (N/mm2)	上線 -53.1 下線 7.1	-55.5 10.0	-56.0 13.3	-56.6 16.8	-62.5 76.6

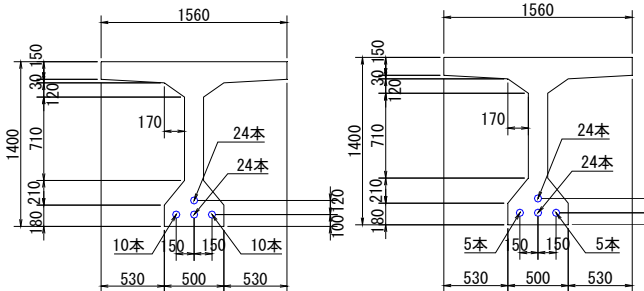


図-11 PC ケーブル破断箇所 (case4, case5)

とした。車両配置は、支間中央に最大断面力が発生する車列とし図-10のように配置することとした。

4)検討ケース

検討するケースは、表-8に示すPCケーブルの破断率を0~40%で変化させた5ケースとした。主桁ごとの破断率は同一とし、側面側から破断することとした(図-11)。鋼材の破断は、PCケーブルを削除することで表現し、鉄筋の破断は対象外としている。なお、プレストレスに関しては解放される場合と残留する場合を検討した。

5.3 解析結果

表-9にプレストレスが解放された場合、表-10にプレストレスが残留した場合のG1桁の支間中央部に着目した解析結果を示す。プレストレスの有無によって変形性能が大きく異なるため、プレストレス

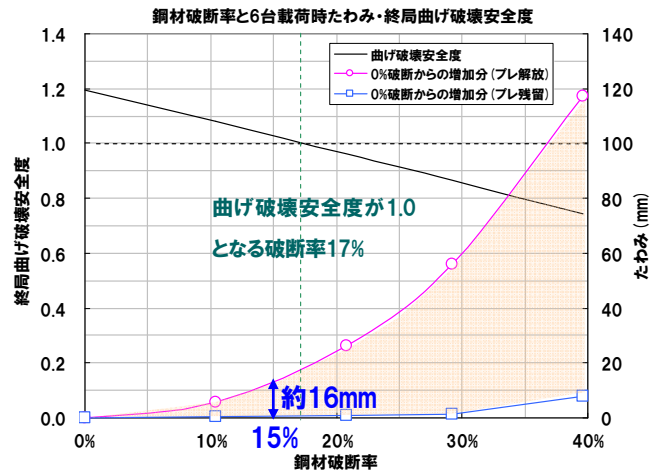


図-12 たわみの増加分

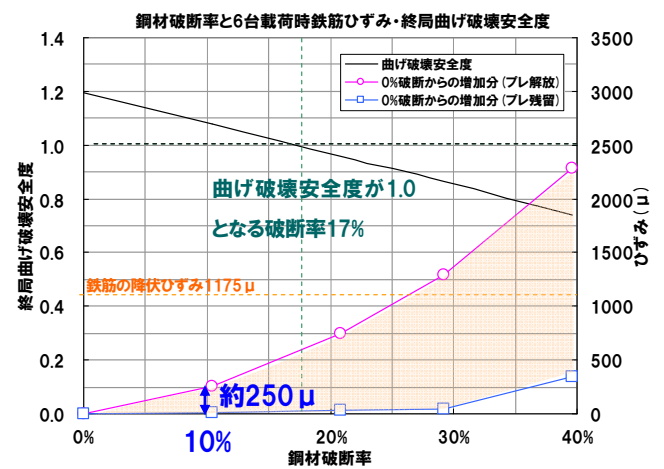


図-13 鉄筋ひずみの増加分

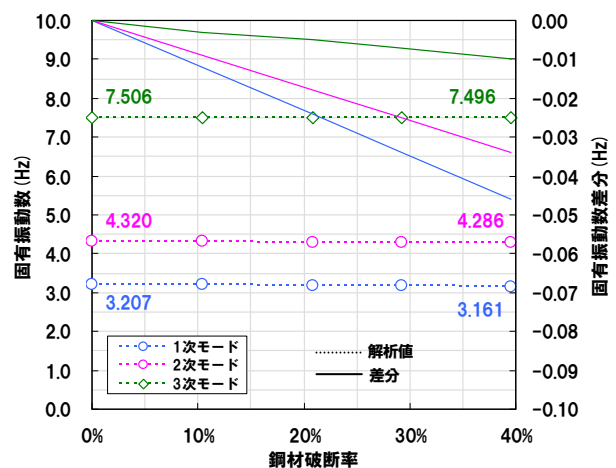


図-14 固有振動数の比較

が残留した場合には、たわみ、ひずみ等の変化が非常に小さい。

図-12~18に、プレストレス解放の条件下の、PCケーブル破断率0%(健全時)から破断率40%まで変化させた場合の物理量(たわみ・鉄筋ひずみ・固有

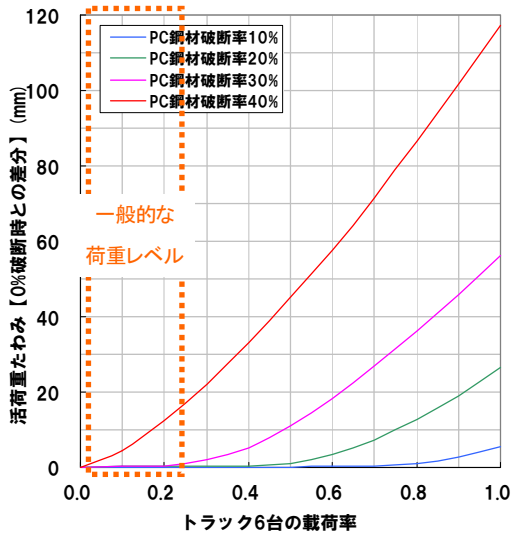


図-15 たわみの増分（ステップ解析）

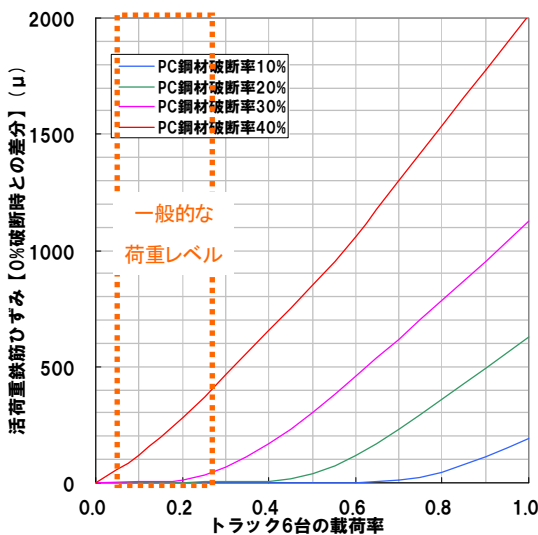


図-16 鉄筋ひずみの増分（ステップ解析）

振動数)および終局曲げ破壊安全度を示す。ここで、終局曲げ破壊安全度とは、道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編の終局荷重作用時の照査における終局耐力(破壊抵抗曲げモーメント)と終局荷重作用時モーメントの比率を表わしている。また、図中の物理量は、健全時を0とした場合の差分で整理している。たわみは鋼材破断率15%で約16mm、鉄筋ひずみは鋼材破断率10%で250μの変化が生じている。曲げ破壊安全度が1.0(PCケーブル破断率17%)を供用性の一つの判断基準と想定した場合、たわみおよびひずみは、表-3で示した何れの計測機器においても、PCケーブルの破断による変状を検知できる可能性がある。固有振動数に関しては、破断率を変化させても明確な差は見られない。コンクリートの剥落等

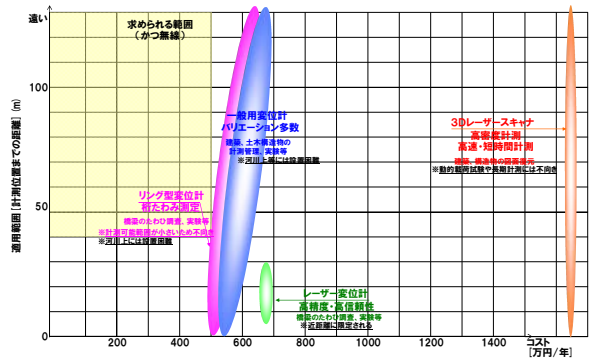


図-17 たわみ計測機器に求められる性能

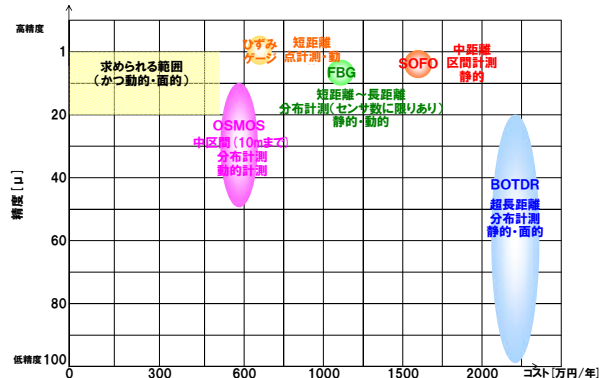


図-18 ひずみ計測機器に求められる性能

により剛性低下が生じた場合、固有振動数が変化する可能性は考えられるが、損傷がPCケーブルの破断のみの場合、変化はほとんど表れず、破断の検知には不向きである。なお、実橋梁では、プレストレスが残留する可能性も高く、想定通りに物理量が計測されない懸念があり、その場合PCケーブルの破断率を危険側に評価するため注意が必要である。

常時レベルでの荷重での監視技術の可能性について検討するため、载荷荷重をステップ解析したたわみ・鉄筋ひずみの結果を示す(図-15~16)。トラック1台程度(载荷率0.2)の荷重では、プレストレス解放の条件下であっても、PCケーブルの破断率40%を除き、差はほとんどみられない。各種の仮定に基づく構造解析の結果ではあるものの、PC橋におけるPCケーブル破断の損傷に対しては、常時交通荷重の条件での健全性モニタリングは難しいものと考えられる。

5.4 監視技術に求められる性能

ここで対象とした6台載荷で生じるたわみ、鉄筋ひずみの変状に対し、表-3で示した計測機器はすべて検知可能な計測精度を有している。計測精度の向上は利用者にとってメリットに変わりないが、緊急

性・設置個所（道路・河川と交差）等を勘案すると計測距離が重要となるとともに、異常な箇所がどこに発生するか不明であることが多いことを勘案すると中・長区間の計測（面的計測）可能であることも監視技術に求められる性能として考えられる。その他、当然のことながら低コスト化、使用性の観点から無線化についても監視技術の普及に際して求められる項目として挙げられる。これらを踏まえ、たわみ、ひずみの計測機器を例に求められる性能（案）を図-17、図-18に示す。

6. まとめ

本研究では、損傷原因、状況に応じたモニタリング技術の適用手法およびモニタリング技術に必要な項目の提示を行うため、実橋でのモニタリング事例の調査および損傷橋梁の監視に係る計測技術の調査を行った。また、各種の計測技術の中で、AE法に着目し、適用性を実験的に検討した。さらに、近年、損傷事例が報告されているPC橋における腐食によるPCケーブル破断を対象とし、損傷に応じて生じる変状を構造解析により求め、監視技術の適用方法および監視技術に求められる性能、項目について検討した。主な結果を以下に示す。

- 1) 国内外のモニタリング事例の整理を行い、近年の監視技術に係る技術開発及び採用傾向について把握した。
- 2) AEの室内試験により、PCはり供試体の破壊とHit数や最大振幅値等のAEパラメータの間にある程度相関があることを確認した。
- 3) PC橋のPCケーブル破断を想定した解析結果から、固有振動数に比べ、たわみや鋼材ひずみの変化が大きく検知の可能性のあることを確認した。
- 4) 計測技術の中で実用化またはNETISに登録されているものについて市場調査を行い、機器の概要、適用条件、精度、コスト、耐久性等について整理して計測技術に現状を把握するとともに、PC橋のPCケーブル破断の解析結果を踏まえ、たわみ、ひずみの計測機器を例に、監視技術として求められる性能、項目について示した。

参考文献

- 1) 三浦尚、見波潔、西川和廣、松村英樹：暮坪高架橋の塩害による損傷と対策—③補強後の載荷試験と長期監視体制—、橋梁と基礎、vol.28-1、

- pp.39-47、1994.1.
- 2) 土木学会：垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書、垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会、2008.3.
 - 3) 三木千壽、水ノ上俊雄、小林裕介：光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発、土木学会論文集、No.686/VI-52、pp.31-40、2001.9.
 - 4) 小林祐介、三木千壽、田辺篤史：リアルタイム全自動処理 Weig-In-Motion による長期交通荷重モニタリング、土木学会論文集、No.773/I-69、pp.99-111、2004.10.
 - 5) 恒國光義、Phan H.D. Quoc、岡崎慎一郎、西村次男、加藤佳孝、魚本健人：コンクリート道路橋の健全度モニタリング・システムの開発、東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター、ICUS Report No.9、2005.4.
 - 6) 楠原栄樹、河藤千尋：本四連絡橋の動態観測、本四技報、Vol.32 No.110、pp.24-27、2008.3
 - 7) 山田郁夫、楠原栄樹、河藤千尋：長大橋の動的挙動と振動制御、橋梁と基礎、vol.42-6、pp.15-19、2008.6.
 - 8) 竹本健一、石川裕治、宮崎早苗、佐々木栄一、三木千壽：カメラ映像を用いた通行車両の自動・リアルタイム車種推定システムの開発、第60回土木学会年次学術講演会講演概要集、1-061、pp.119-120、2005.9.
 - 9) 伊藤裕一、松尾昌武、蔣立志：破断検知線による鋼構造物疲労損傷モニタリング手法の開発、第60回土木学会年次学術講演会講演概要集、1-052、pp.101-102、2005.9.
 - 10) 吉嶺 建史、伊藤 裕一、松尾 昌武、蔣 立志 破断検知線を用いた疲労損傷モニタリング手法における破断検知線の開発第60回土木学会年次学術講演会講演概要集、1-053、pp.103-104、2005.9.
 - 11) Kevin Western：St. Anthony Falls Bridge “Smart Bridge” System, Minnesota Department of Transportation, 2008.9.
 - 12) 藤野陽三、阿部雅人：橋梁マネジメントにおけるアメリカでの新たな挑戦：土木学会誌、vol.92 no.6、2007.6.
 - 13) (社)日本鋼構造協会、鋼構造物における長寿命化・延命化技術の現状と課題、2009.11.
 - 14) (社)土木学会、コンクリート技術シリーズ76 コ

ンクリート構造物のヘルスマニタリング技術,
2007.4.

- 15) (社)日本建材産業協会：アコースティック・エミッションによるコンクリートのひび割れ監視方法 (JCMS-III B5706-2003), 2003.3.
- 16) 鈴木基行, 岩城一郎ら, 著しい塩害を受けたPC橋の静的載荷試験, 土木学会論文集 E, vol66, No.3 231-244, 2010.7.

Study for Monitoring Technology for Damaged Bridges

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY 2009-2011

Research Team : Bridge and Structural
Technology Research Group

Author : Yoshitomi KIMURA,
Toshiaki NANAZAWA
Mamoru SAWADA

Abstract : The majority of highway bridges in Japan were constructed during the 1950s–1970s. With recent rapid increase of aged bridges older than 50 years, the needs of monitoring technology for damaged bridges increases. This research was conducted propose the monitoring method of damaged bridges and to make the needs clear for bridge monitoring. The real cases of the bridge monitoring and the equipments for bridge monitoring were investigated and in the indoor examination, the correlation was examined between the deterioration of strength and AE (acoustic emission) which occurred in the test piece. Then analysis that simulated breaking the steel cable which occurred in PC bridges was carried out.

Key words : bridge monitoring, monitoring equipment, AE (acoustic emission), breaking of PC cable