

PC桁の損傷と振動特性に関する実験的研究

(株)高速道路総合技術研究所 正会員 工修 ○青木 圭一

Abstract : Corrosion and breaking of the PC wire has been concern by the PC grout problem. For this reason, soundness diagnosis method of the PC Bridge has been demanded. Therefore, using the PC girder that length is 9m long with changing prestressing amount, the vibration test of the PC girder was carried out. As a result, crack width of PC girder increases with the reduction of the prestressing, The characteristic frequency was reduced from about 15Hz to 13Hz. On the other hand, logarithmic damping ratio is increased from 0.07 to 0.15. From the above, it was found that it is possible to grasp the breaking of the PC wire by measuring the the characteristic frequency or logarithmic dampig ratio.

Key words : vibration test, health assessment, characteristic frequency, damping coefficient

1. はじめに

わが国におけるPC橋は、約60年を超える歴史を有している。その間、様々なPC橋が建設され、道路橋においては実に6万橋¹⁾を超える橋梁が建設されている。また、NEXCOが管理する高速道路の橋梁のうち、連数比で約3割をPC橋が占め、資産数では約1万連にも達している。

一方で、過去に建設されたPC橋において老朽化に伴う損傷や劣化も多数報告されている。特に、ポストテンション方式におけるPCグラウトの充填不足が主な原因と思われる損傷も散見されている。

例えば、海外では、Bickton Meadows歩道橋、Ynys-y-gwas橋、ベルギーのスヘルデ川橋に架かる橋梁では、PC鋼材の腐食による破断が主な原因で落橋に至っている。また、落橋に至らずともAngel Road橋やTaf Fawr橋、Folly New橋、M1 Blackburn Road橋、Botley Road橋、Niles Channel橋、Mid Bay橋においてPC鋼材の深刻な腐食や破断が発見されているとの報告もある^{2) 3)}。

わが国においても、暮坪陸橋⁴⁾や須井川橋⁵⁾、新赤石橋⁶⁾、妙高大橋⁷⁾などでは、PC鋼材が腐食・破断している事例が報告されている。更に、高速道路のポストテンション橋においては、PCグラウトの充填が十分でないものが、調査箇所数の約25%もあることが報告⁸⁾されており、PC鋼材の腐食・破断が懸念されている。

このような状況に対して、PC橋の健全性を診断する手法は、目視による点検が中心となっており、点検技術者の経験や能力等の主観によっているのが実情である。このため、今後は客観的な指標による診断技術が求められている。そこで、橋梁振動特性のモニタリングからPC橋の健全性が把握できれば、健全性の1次診断が可能となり、客観的なPC橋の健全性把握が可能となるが、PCグラウト充填不足に伴うPC鋼材の破断に着目した振動特性について研究されたものはない、

そこで、本論文では、PC鋼材が破断した場合のPC桁の振動特性の変化について、実験桁を用いてその特性を明らかとしたものである。

2. 振動実験

2.1 実験桁の概要

実験に用いた実験桁は、図-1に示す幅0.4m×高さ0.6m×長さ9mのポストテンション方式PC桁である。PC実験桁で使用した材料・規格を表-1に示す。また、PC実験桁の全景を写真-1に示す。PC実験桁には、

φ32 PC鋼棒を1本配置しているが、プレストレス力の調整が可能となるように、PC鋼棒にワセリンを塗布し熱収縮チューブで被覆し、シース内へ挿入した後にPCグラウトを充填させている。この方法でPC鋼棒とPC桁の縁切りを行い、PC鋼棒の緊張力の調整を可能としている。この概要を図-2に示す。

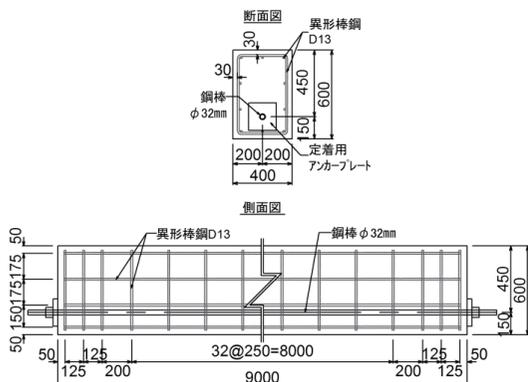


図-1 PC実験桁の諸元



写真-1 PC実験桁の全景

表-1 PC桁の主要材料の規格・強度

主要材料		規格・強度等
コンクリートの設計基準強度		36 N/mm ²
7日平均圧縮強度		38.4 N/mm ²
鉄筋	D13	SD345
PC鋼棒	φ32	SBPR930/1080

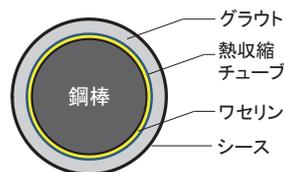


図-2 PC鋼棒の縁切りの概要図

2.2 振動実験の概要

実験は、PCグラウトの充填不足によりPC鋼材が腐食・破断し、導入プレストレス量が減少したことを想定して、導入プレストレス量を順次漸減させ、その都度、起振器により振動実験を実施した。導入プレストレス量は、死荷重状態でフルプレストレスとなるよう490kNを目標として設定し、この導入プレストレスを100として、この値の90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%、20%、10%、0%を目標として導入プレストレス量を漸減させた。また、振動実験では、それぞれの導入プレストレス量において、スイープ実験により固有振動数を、強制加振後の自由減衰振動から減衰定数を求めた。なお、減衰定数算定においては、加速度計により振動波形を分析することで振動特性を求めた。実験フローを図-3に示す。また、起振には、永久磁石により振動させる起振器を用いた。起振器の仕様を表-2に示す。

また、緊張力の管理には、圧縮センターホール型荷重計を用い、加速度の計測にはひずみゲージ型加速度計、ひずみの計測にはゲージ長90mmの1軸ひずみゲージを使用した。計測位置図を図-4に示す。

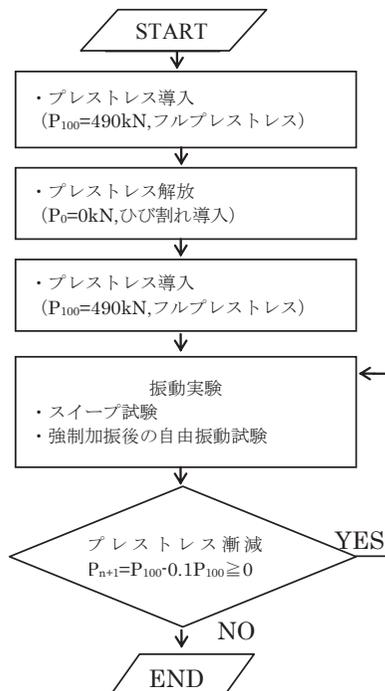


図-3 振動実験のフロー

なお、プレストレス漸減させる振動実験前に、全プレストレスを解放させてPC実験桁に前もってひび割れを導入させている。これは、振動実験中のひび割れ進展の抑制および実験の再現性の確保のためである。また、PC実験桁の支持は、一方はφ100mm×L500mmの鋼製ローラーによって水平・回転とも自由とし、他方は同様の鋼製ローラーおよび凹型の鋼板によって回転のみ自由とした単純支持である。

表-2 起振機の仕様

項目	内容
最大加振力	490 N
最大加速度	152.9 m/s ²
最大変位	150 mm
周波数範囲	0.1 Hz～1,000 Hz
質量	48.0 kg
入力波	正弦波

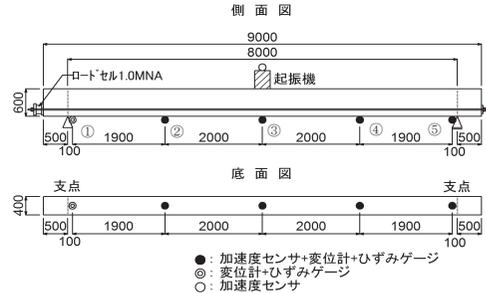


図-4 PC実験桁の載荷位置と計測位置図

3. 振動実験結果

3.1 導入プレストレスとひび割れ

導入プレストレスを漸減させるにつれて、桁中央部にひび割れが発生した。このひび割れは、図-5に示すとおり、導入プレストレス40%未満で急激に増大した。また、導入プレストレスの漸減の状況を桁下面のひずみゲージで測定したものを図-6に示す。図-6はフルプレストレスの状態を0とし、導入プレストレス量を漸減させるにつれて増加する桁下面の増加ひずみを示している。ひび割れ幅の増大にもなつて測点③におけるひずみが増加していない。

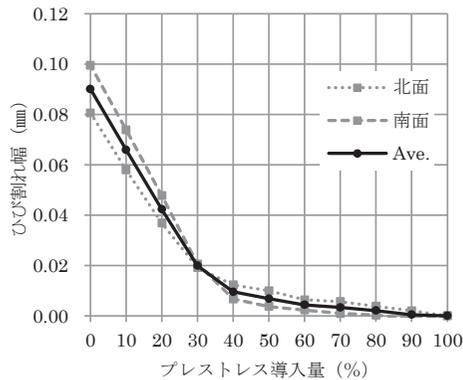


図-5 PC実験桁中央のひび割れの状況

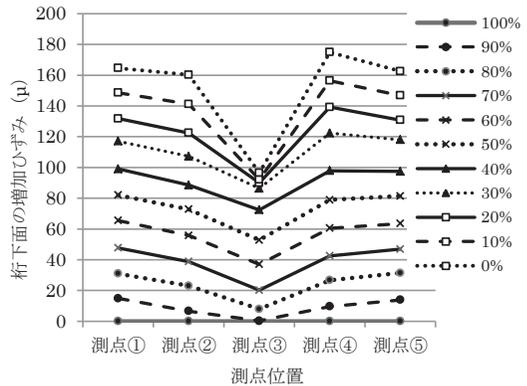


図-6 PC実験桁下面のひずみ増加の状況

3.2 固有振動数

起振器の周波数を連続して可変させるスイープ振動実験により、PC実験桁の導入プレストレス量と固有振動数の関係を求めた。スイープ振動実験は、起振器の振動周波数を連続可変させ、その振幅が最大となる点を固有振動数として求めるものである。スイープ実験による固有振動数を図-7に示す。

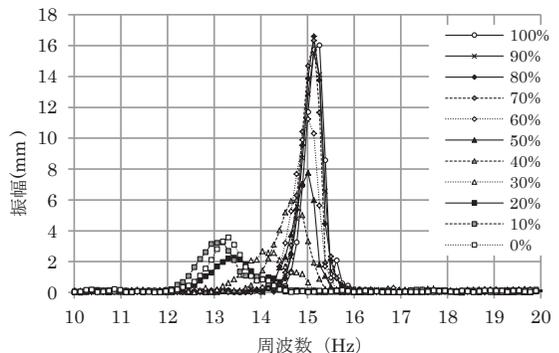


図-7 導入プレストレス量と固有振動数

また、表-3および図-8には、計算値による固有振動数を合わせて示す。計算によるPC実験桁の固有振動数は、一定軸力が働く梁の横振動のとみなせば、式 (1) , (2) よって表わされる⁹⁾。

$$f = \frac{1}{2\pi} \left\{ \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \right\} \sqrt{l - \frac{H}{He}} \quad \dots (1)$$

$$He = k \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad \dots (2)$$

ここに、 f : 固有振動数 (Hz) , l : 支間長 (m) , E : 静弾性係数 (N/m²) , I : 断面二次モーメント (m⁴) , ρ : 密度 (kg/m³) , A : 断面積 (m²) , H : 導入プレストレス (N) , He : オイラーの座屈荷重 (N) , k : PC鋼棒の支持条件 (両端固定=4) である。

なお、ここで、PC鋼棒はネジ式の固定方法を採用しており、厳密には両端固定ではないが、定着具により回転は拘束されるものと考え両端固定として計算している。

計算値は導入プレストレス量が漸減するにもなって固有振動数は比例的に減少する。一方、実験結果では、導入プレストレス量が100~40%までは大きな変化はなく、40%未滿で急激に振動数が小さくなっており、これはひび割れ幅が増大した導入プレストレス量の時である。つまり、PC桁の固有振動数は、ひび割れの発生に影響し、ひび割れ幅が増大するとともに小さくなる傾向を示す。

表-3 固有振動数の実験と計算に比較表

導入プレストレス	計算値 (Hz)	実験値 (Hz)
100% (490kN)	14.8	15.2
90% (441kN)	14.6	15.1
80% (392kN)	14.4	15.1
70% (343kN)	14.2	15.1
60% (294kN)	14.1	15.0
50% (245kN)	13.9	15.0
40% (196kN)	13.7	14.7
30% (147kN)	13.5	14.0
20% (98kN)	13.3	13.4
10% (49kN)	13.2	13.2
0% (0kN)	13.0	13.3

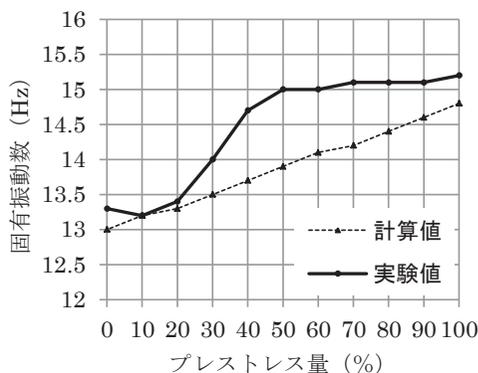
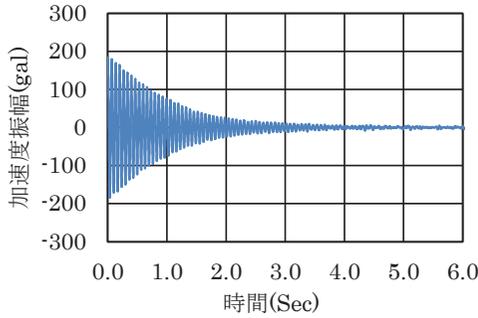


図-8 固有振動数の実験と計算の比較図

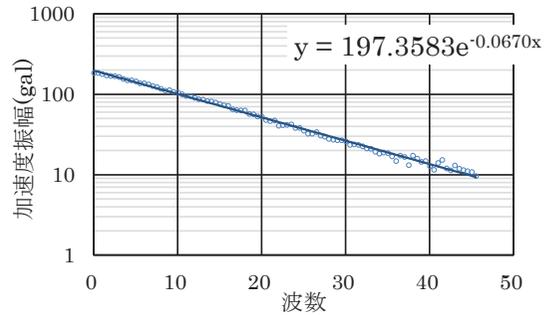
3.3 減衰定数 (対数減衰率)

導入プレストレス量を漸減させつつ、起振器により 2.3.2 の実験で求めた固有振動数で PC 桁を強制加振した後、加振を停止して PC 桁の減衰自由振動波形を振動が収束するまで測定し、減衰定数 (対数減衰率) を算出した。具体的には強制加振停止後の減衰自由振動波形を減衰開始時から時系列に収集し、これを加速度振幅順に整理し対数表示し、その傾きを求めて対数減衰率を算定した。対数減衰率は、加速度振幅が 10gal を下回るまでの時点までとし、最小二乗法により求めた。

図-9 に導入プレストレス 100% の場合、図-10 に導入プレストレス 0% の場合を示す。導入プレストレス量 100% の場合は、最大加速度振幅は 200gal 程度、加速度振幅が収束するまで約 5 秒、10gal まで収束するのに 50 波数を要し、対数減衰率は 0.067 である。一方、導入プレストレス量 0% の場合には、最大加速度振幅は 100gal 程度、収束まで約 1.5 秒、10gal まで収束するのに約 15 波数、対数減衰率 0.14 であり、導入プレストレス量 100% に比べ減衰が大きいことが分かる。

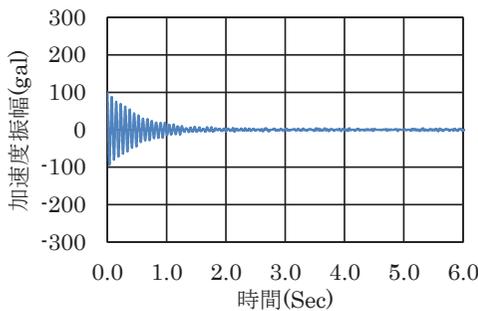


(a) 減衰自由振動波形の時系列図

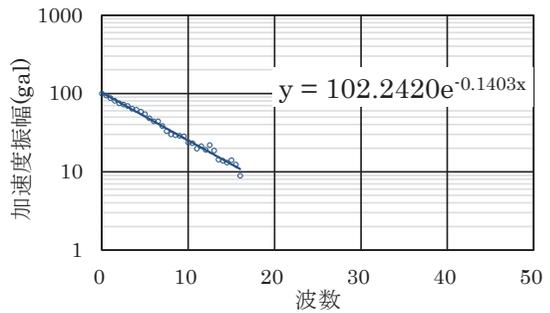


(b) 減衰自由振動波形の対数変換図

図-9 導入プレストレス100%の減衰自由振動波形



(a) 減衰自由振動波形の時系列図



(b) 減衰自由振動波形の対数変換図

図-10 導入プレストレス0%の減衰自由振動波形

3.4 ひび割れと固有振動数と対数減衰率の関係

PC実験桁において、導入プレストレス量を100%から0%まで変化させながら、ひび割れ幅、固有振動数、対数減衰率を実験的に明らかにした。

ここで、導入プレストレス量とひび割れ幅、固有振動数、対数減衰率についてあらためて整理する。

図-11に導入プレストレス量と対数減衰率の関係を固有振動数とともに示す。対数減衰率は、導入プレストレス量が40%程度までは微増であるが、導入プレストレス量が更に減少すると顕著に変化し急激に増加している。これは、固有振動数が大きく変化した時と同じ導入プレストレス量であり、固有振動数と対数減衰率には一定の関係が伺える。そこで、図-12に固有振動数と対数減衰率の関係を整理し示す。固有振動数と対数減衰率のは比例関係が伺え、固有振動数が大きいと対数減衰率は小さく、固有振動数が小さいと対数減衰率が大きい傾向を示している。

また、図-13に、ひび割れ幅に着目して対数減衰率および固有振動数の関係を示す。ひび割れ幅が大きいと固有振動数は小さく対数減衰率は大きい。一方、ひび割れ幅が小さいと固有振動数は大きく対数減衰率は小さくなっており、その変化は0.04mm以下で大きく変化している。

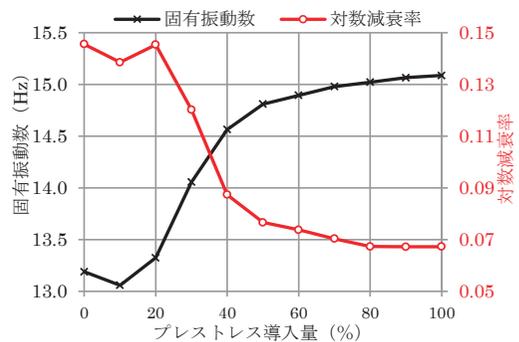


図-11 導入プレストレス量と振動特性の関係

既に2.3.2で示したとおり、固有振動数はひび割れ幅に影響を受け、固有振動数と対数減衰率のは比例関係が成立する。つまり、導入プレストレス量が減少し構造物にひび割れが発生した場合、そのひび割れによって固有振動数は小さくなり、一方、対数減衰率が大きくなる傾向を示すことが判明した。

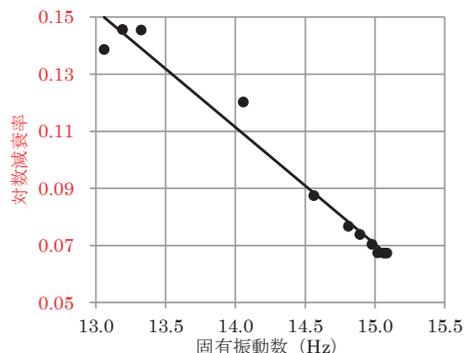


図-12 対数減衰率と固有振動数の関係

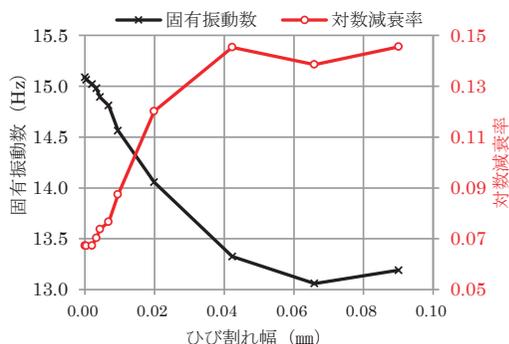


図-13 ひび割れ幅と振動特性の関係

4. まとめ

以上の結果をまとめると、下記のことが判明した。

- 1) 導入プレストレス量の減少により固有振動数は小さくなる。その傾向は一定ではなく、ひび割れ幅が顕著になる急激に小さくなる。
- 2) 固有振動数と対数減衰率には比例関係がある。つまり、対数減衰率の変化が顕著に表れるのは、固有振動数と同様にひび割れ幅が顕著となった時である。
- 3) 減衰定数 (対数減衰率) は、導入プレストレス量が減少すると大きくなる傾向を示す。その傾向は、ひび割れ幅が顕著になると、急増する。

以上、損傷したPC橋を模擬した実験桁により、振動特性を明らかにした。これにより、固有振動数または減衰定数 (対数減衰率) を継続的に測定することによって、定量的にPC橋の損傷をモニタリングすることが可能であることを示した。今後は、実PC橋の測定方法、測定幅などの検証を実施し、PC橋の健全性把握に努めてまいりたい。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所：平成24年度道路構造物に関する基本データ集，国土技術政策総合研究所資料第776号，2014年1月
- 2) Florida Dot :Mid Bay Bridge Post-tensioning system Evaluation,2001 Febrary
- 3) Concrete Society UK :Durable bonded post-tensioned concrete bridges. 2nd edition, 2001
- 4) 三浦尚，西川和廣，見波潔，上阪康雄：暮坪陸橋の塩害による損傷と対策-(2)PC鋼材の腐食とその補強対策，橋梁と基礎，pp37-40，1993.12
- 5) 鴨谷 知繁，森川 英典，白川 祐太：実橋の腐食ひび割れを考慮した塩害劣化PC 橋の安全性低下予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，2010
- 6) H.Minagawa, Y.Koda, M.Hisada : Inspection of PC bridge girders severely damaged in coastal environment, Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, pp653-660, 2009.
- 7) 小林憲一，大平英生，登石清隆，羽田伸介：妙高大橋のPCケーブル破断調査と対策，橋梁と基礎，Vol45，No.9，2011.9.
- 8) 東日本高速道路，中日本高速道路，西日本高速道路：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書，pp47，2014.1.22
- 9) 西岡隆；土木工学基礎シリーズ4 構造振動解析，(株)培風館，昭和62年4月30日