

土木構造物の疲労

杉本 一郎

構造物技術研究部
(鋼・複合構造)

谷村 幸裕

構造物技術研究部
(コンクリート構造)



すぎもと いちろう



たにむら ゆきひろ

はじめに

鉄道土木構造物にはコンクリート構造，鋼構造，基礎・土構造，トンネルなどがあります。古くは木橋も用いられました。また，近年では，複合構造をはじめとした新しい構造形式も多数開発されています。このように時代と共に変化してきた土木構造物ですが，明治時代に鉄道が開通して以来，多くの鉄道輸送を支え，十分にその役目を担ってきました。

これらの土木構造物は災害などの異常時に崩壊しないことはもちろんですが，通常の供用状態においても，列車を安全に走行させることが求められます。そして，その際に課題となるのが疲労です。土木構造物の疲労は，列車などの活荷重や風などの外力が繰返し作用すると，材料にひずみが繰返し生じ，これが累積されて疲労き裂となって表れ，最終的に構造物に損傷を及ぼす現象です。一般にはひずみの代わりに応力が用いられます。応力とは構造物に荷重が

働いた時に構造物の内部に生じる力のことです。航空機や機械の分野では，破壊に対して大きな要因として広く知られていますが，土木構造物の分野においても構造物の寿命を支配する要因の一つとなっています。

この疲労変状が生じる代表的な土木構造物として，鋼構造物とコンクリート構造物が挙げられます。鋼構造物では鋼材の疲労，コンクリート構造物では鉄筋やコンクリートの疲労が問題となります。以下，ここでは鋼構造物と鉄筋コンクリート構造物の疲労について材料別にご紹介します。

疲労とは

鋼構造物やコンクリート構造物に生じる疲労は，列車の通過により生じるものが大半です。特に列車本数が多い構造物では，疲労に対する検討が重要となります。

列車が通過する際に構造物に生じる応力の繰返し状況を図1に示します。ここでは橋を代表として，橋の中央部に生じる応力波形を示します。図1より，列車の車両長に満たない短い長さの橋では，1列車の通過により編成列車数と同等もしくはそれ以上の繰返し数が生じていることが見て取れます。このことから，疲労は，列車の本数だけでなく，橋の長さ（実際には着目する部材の影響線長）にも依存することがわかります。

この列車が通過する際に構造物に生じる最大応力と

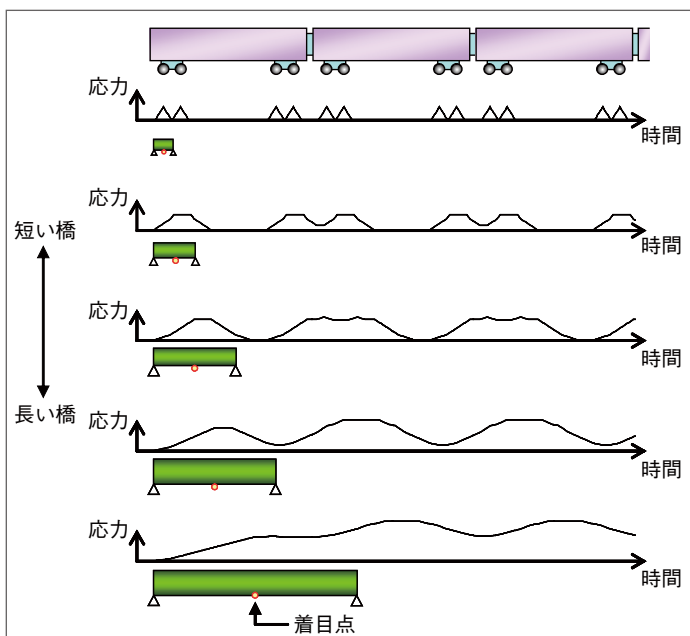


図1 橋の長さや列車通過時に発生する変動応力の関係

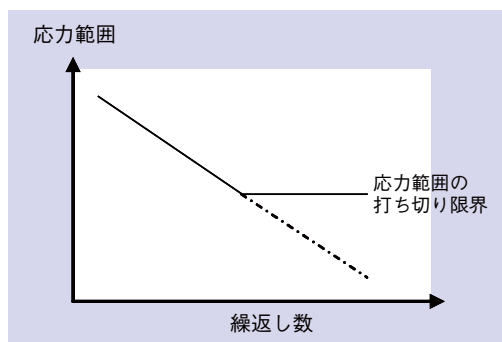


図2 S-N線図



図6 桁試験体の疲労試験状況

ります。また、レール継ぎ目位置なども疲労き裂が発生しやすい箇所となります。図7に縦桁・横桁の連結部に生じた疲労き裂の例を示します。このほか、支点部も疲労き裂が発生しやすい箇所となっています。これは、経年により支点部の沈下や支持状態の変化などによることが考えられます。

最近では、鋼材と鋼材を鋸で接合した、リベット構造と呼ばれる鋼構造物を、さらに供用し続けることが求められていることから、長寿命域におけるリベット構造の疲労についての研究も進められています。

このようなことから、近年では、列車が通過した状態を再現した疲労試験、長寿命域の疲労試験、および実構造に近い状態での疲労試験も行われるようになってきました。図6には実際の鋼鉄道橋を試験体とした疲労試験の例を示します。これらの疲労試験から継手形状別の疲労強度等級が定められています。そして、先に述べた累積疲労損傷度を用いて疲労の照査を行うとともに、構造ディテールや溶接品質、製作にも留意を払い、疲労の問題が生じない構造物を目指しています。

検査と補修

鋼構造物では明治時代より疲労に対する配慮が行われてきました。現在、既に設計で想定していた年数を超えて古い鋼構造物が供用できるのはこのことが大きく寄与しています。しかしながら、疲労変状は、発見することが難しく、日常の供用状態において、少しずつ進行して、突然破壊に至るといった特徴もっています。海外においても、疲労き裂により構造物が崩壊した事例があります。そのため、日常の検査において疲労変状を早期に発見し、対策を行うことが非常に重要となります。これまで構造物に生じてきた変状を、鉄道土木構造物等維持管理標準などにまとめていますので、それらを参考にしつつ、十分な検査を行うこと

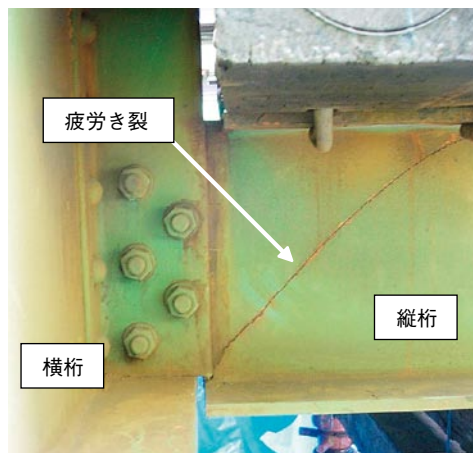


図7 縦桁・横桁連結部に生じた疲労き裂

が重要となります。

また、鋼構造物は補修・補強が行いやすいことが利点の一つとして挙げられますが、補修・補強方法を誤るとかえって弱点箇所となるので注意が必要となります。特に近年、溶接に適さない鋼材に現場で溶接補強を行っている例が見られます。現場で溶接補修を行った箇所から疲労き裂が発生している事例も見られていることから、現場で溶接補修を行う場合には十分な注意が必要となります。併せて、このような溶接補修が行われた箇所は十分な検査を行うことが重要となります。

鉄筋コンクリート構造の疲労破壊

鉄筋コンクリート構造は、鉄筋とコンクリートから構成されている複合構造であり、鉄道の橋梁や高架橋などに広く用いられています。その耐荷機構は、主に鉄筋が引張力を、コンクリートが圧縮力を受け持っており、それぞれの材料が一定以上の力を繰返し受けることにより疲労破壊に至ることがあります。したがって、鉄筋コンクリート構造の疲労は、これを構成する鉄筋やコンクリートなどの材料における疲労の問題として捉えることができます。鉄道橋梁や高架橋の設計では、列車の通過に伴って生じる繰返し荷重に対して主に鉄筋の疲労を検討し、十分に安全となるように設計されています。

異形鉄筋の疲労

鉄筋コンクリート構造物の鉄筋には、かつては丸鋼が用いられていましたが、戦後、強度の高い異形鉄筋の開発が進み、東海道新幹線の建設以降は異形鉄筋が用いられるようになりました。異形鉄筋とは、表面に節と呼ばれる凹凸を付けた鉄筋で、コンクリートとの一体性が大幅に改善されます。しかし、この凹凸により応力集中が生じるため、疲労が問題となることが懸念され、安全性確保のための



図8 鉄筋の疲労試験状況



図9 疲労破断した鉄筋の破断面

研究が進められました。図8に、鉄筋の疲労試験の状況を、図9に、疲労破断した鉄筋破断面の状況を示します。通常、鉄筋を一方向に引張破断させると、破断面は伸びて小さく絞った形状となりますが、疲労破断では伸びや絞りが見られないのが特徴です。図9の鉄筋では、左下からき裂が発生し、载荷の繰返しによって徐々にき裂が進展し、断面の半分程度まで進展した頃に限界に達して、残った部分が一気に破壊して、破断に至ったものと考えられます。

ところで、実際の構造物において、その長さが鉄筋一本の長さよりも長い場合は、継手を用いて鉄筋を配置します。継手は、その形状や加熱の影響により、母材よりも疲労強度が低下する場合がありますので、設計でこれを考慮して

おく必要があります。鉄筋の継手には、ガス圧接継手が多く用いられていますが、このほかに機械式継手や溶接継手など様々な継手が用いられる場合があります(図10)。このほか、曲げ加工などによっても疲労強度が低下します。

また、構造物の建設後、劣化によって鉄筋が腐食する場合がありますが、これも疲労強度に影響を及ぼします(図11)。鉄

筋が腐食すると断面が欠損するので静的な強度が低下しますが、腐食すると断面が不均一に欠損しますので、応力集中が生じて疲労強度はさらに低下することが知られています。

コンクリートの疲労

コンクリートの疲労は、道路橋の床版で自動車の車輪の通過に伴ってひび割れや陥没が生じ、問題になる場合があります。しかし、鉄道橋の場合、列車荷重はレールやまくら木、軌道スラブなどを介して伝達されることや、コンクリートに生じる応力が小さいことなどから、コンクリートの疲労が問題となるケースはほとんどありません。

おわりに

以上、土木構造物における鋼構造物とコンクリート構造物を代表として、構造物の観点から疲労に関して述べました。

鉄道土木構造物には、疲労以外にも腐食、中性化などの要因による損傷が見られます。今後、これらの要因に対する研究開発を進め、構造物の安全性のさらなる確保に努めていきたいと考えています。[RRR]



図10 鉄筋の各種継手

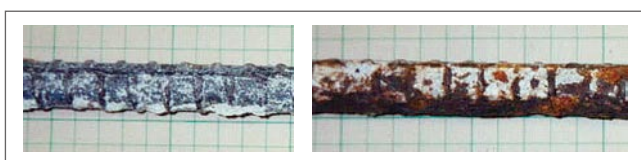


図11 健全な鉄筋(左)と腐食した鉄筋(右)

文献

- 1) 伊藤文人, 近藤時夫, 阿部英彦: 全国新幹線網用構造物の疲労を考慮する場合の許容応力度, 構造物設計資料, 1972
- 2) 土木学会: 鋼橋における劣化現象と損傷の評価, 1996
- 3) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂, 1993
- 4) 三木千壽: 鋼構造, 共立出版, 2007
- 5) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説, 丸善, 2007