

塩害劣化したプレテンションPC桁の疲労破壊性状

長岡技術科学大学 博(工) ○田中 泰司
 長岡技術科学大学 陸 賢
 長岡技術科学大学 修(工) 山口 貴幸
 長岡技術科学大学 博(工) 正会員 下村 匠

Abstract : Fatigue strength of 35 year-old pre-tensioned beams which had been deteriorated by chloride induced corrosion were investigated in this study. Four beams were taken from Urokozaki bridge which had been constructed near the coast in Niigata prefecture. Then, two of these beams were loaded to examine the fatigue strength. Fatigue test were conducted under simple support condition. Failure mode and fatigue strength depended on the distribution of corrosion. As a result, it is cleared that fatigue strength can be safely estimated by using JSCE equations if the degree of corrosion is known.

Key words : Corrosion , Prestressed concrete , Fatigue

1. はじめに

飛来塩分量の多い日本海沿岸や、凍結防止剤が散布される山間部において、高度成長期につくられたPC橋梁の塩害が深刻化している。塩害によってPC鋼材に腐食が生じた橋梁を維持管理するためには、現有性能を適切に把握することが不可欠である。その際、橋桁のように、繰り返し荷重を受ける部材については、静的な構造性能と疲労強度の両方を評価する必要がある。一般的に健全なPC橋では、活荷重による鋼材の応力振幅が小さいため、疲労破壊が生じる恐れはほとんどない。しかし、PC鋼材の腐食が進行すると、プレストレス力が低下し、鋼材の応力振幅が大きくなり、最終的には活荷重による疲労破壊が生じる可能性が高くなる。

鋼材腐食が生じたPC部材の疲労強度については、これまでに材料試験レベルでの研究が行われているが、部材レベルでの研究は行われていないのが現状である。そこで本研究では、塩害劣化が生じた実橋梁を試験対象として疲労試験を行うことで、プレテンションPC桁における鋼材腐食と疲労強度についての検討を行うこととした。

2. 疲労試験の概要

本研究では、新潟県糸魚川市にある自転車・歩行者専用道で供用されていた鱗崎橋を研究対象とした。表-1に鱗崎橋の概要を、図-1に撤去時の外観を示す。鱗崎橋は、橋長10.4mのプレテンションPC桁橋である。海岸線から約15mという過酷な塩害環境下にあったために、下フランジに腐食ひび割れやさび汁が発生していた。4本の主桁すべてを試験室内に運搬し、このうち山側の2本の主桁(C桁、D桁)で疲労実験を行った。

試験体の断面配筋図を図-2に示す。試験体はI型断面であり、下フランジには $\phi 2.9$ の2本より線が32本、 $\phi 2.9$ の単線が2本配置されていた。上フランジには $\phi 2.9$ の2本より線が4本、 $\phi 2.9$ の単線が2本配置されていた。せん断補強筋には $\phi 6$ の丸鋼が350mm間隔で配筋されていた。ウェブから直径が約65mmのコンクリートコアを採取し、圧縮試験を行ったところ、圧縮強度と弾性係数はC桁で57.2N/mm²、27.2kN/mm²、D桁で49.8N/mm²、26.2kN/mm²だった。

表-1 鱗崎橋の概要

上部工形式	プレテンション式PC単純桁 (4主I桁)
竣工	昭和50年(推定)
橋長	10.4m
支間長	9.8m
海岸からの距離	約15m



図-1 解体・撤去時の鱗崎橋の外観

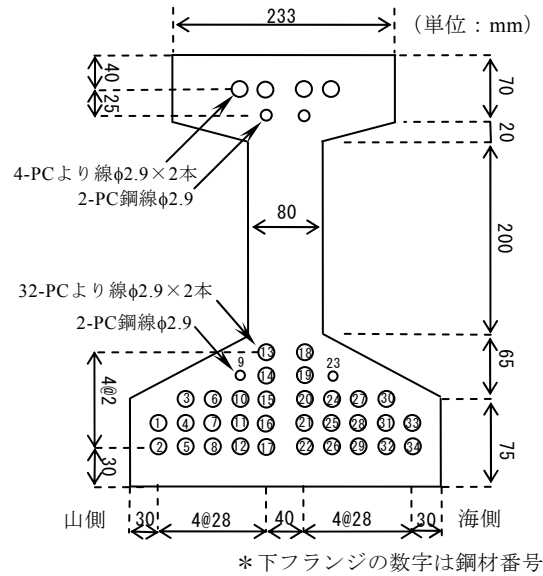


図-2 試験体の断面配筋図

図-3に荷重方法を示す。支持条件は単純支持とし、荷重スパンを6.0mとして疲労試験を行った。等曲げ区間が1mになるように、加力分配梁を介して2点集中荷重を行った。試験体の疲労強度は、内部の腐食分布に大きく依存すると予想されたが、荷重前の段階では鋼材の腐食量が不明であったので、事前に疲労荷重を設定することが難しい状況であった。そこで、疲労試験に先立ち、静的な荷重を行い、中央変位が14.1mmに達したときの荷重を読み取った。その荷重を上限値に、下限値を10kNとして疲労試験を行うこととした。なお、静的荷重時の中央変位は、現実的な試験回数範囲内で確実に疲労破壊が生じることを念頭に定めた。具体的には、PC鋼材の腐食量が全区間にわたって均等に50%であると仮定し、疲労破壊回数が2000回となるような荷重振幅と中央変位を土木学会式より求めた。その結果、C桁の荷重振幅は10~140kN、D桁の荷重振幅は10~122kNとして疲労試験を行うこととした。この際の作用曲げモーメントおよび作用せん断力の最大値は、C桁で設計荷重(自重+群衆荷重)作用時の約1.7倍、D桁で約1.5倍であり、かなり大きい。約C桁では約2000回までは0.3~0.5Hz、それ以降は1Hzの速度で荷重を行った。D桁では0.5Hzの速度で荷重を行った。荷重中は、荷重と中央変位を、動ひずみ測定機を用いて測定した。また、静的荷重後、2000回荷重後、破壊後のそれぞれでひび割れ観察を行った。

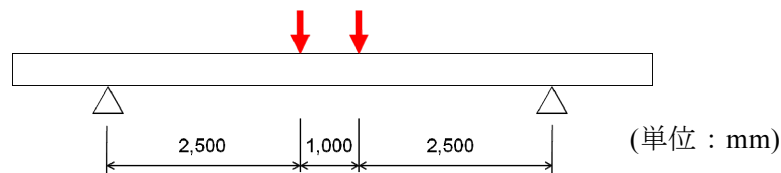


図-3 荷重試験方法

3. 試験結果と考察

図-4に荷重回数と中央変位の関係を示す。1~50回までは毎回の最大値と最小値をプロットし、それ以降は100回または1000回毎を基本に測定値をプロットした。C桁、D桁ともに、荷重回数の増加とともに、ひび割れが進展し、変形量の振幅が増加する結果となった。特にC桁では、破壊にいたるまでに、残留変形量が徐々に増加し、破壊に至るまでにPC鋼材の破断音が断続的に何回か確認された。C桁では、荷重回数が約48,000回のときに、D桁では約20回のときに変形量が急増して破壊に至った。なお、本来は疲労試験の1サイクル目から中央変位の最大値は14.1mmとなるべきであるが、今回使用した疲労試験機は、荷重荷重がゼロから徐々に増加する仕様となっていたため、荷重回数が約10回まで中央変位の

最大値が14.1mmを下回っている。

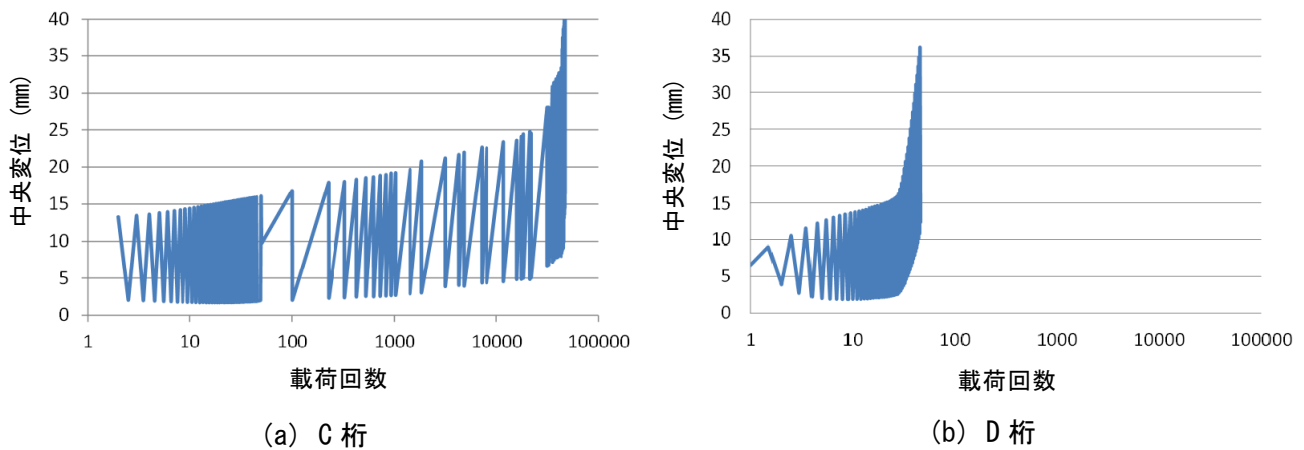


図-4 荷回数に中央変位に与える影響

破壊状況と鋼材の腐食状況の相関性を見出すために、ひび割れ状況の確認とともに、鋼材の腐食量測定を行うことにした。PC鋼材の腐食量測定の手順を図-5に示す。荷重試験終了後、まず試験体を50cm間隔で切断した。次に各ブロックからPC鋼材を一本ずつはつり出して、クエン酸二アンモニウム

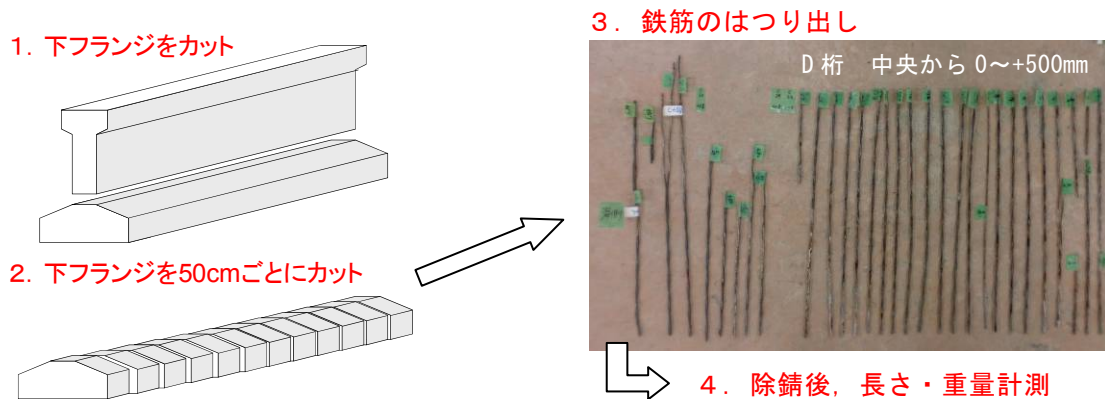
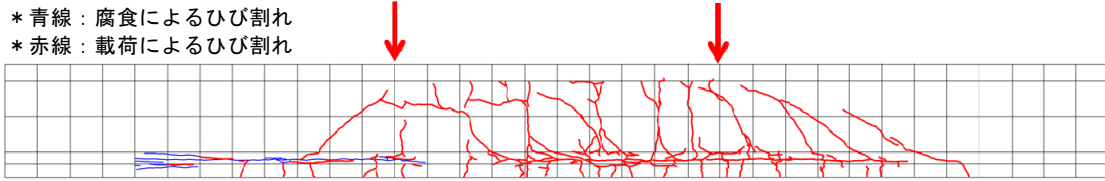


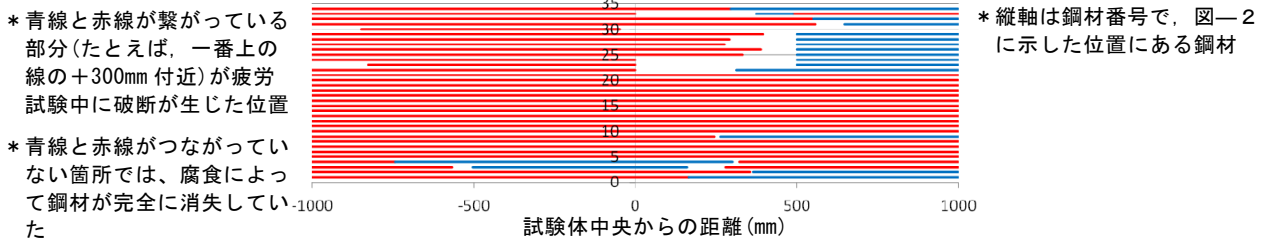
図-5 PC鋼材の腐食量測定の手順

水溶液に浸漬し、除錆した。最後にPC鋼材の長さ重量を測定して、各鋼材の腐食量を算出した。

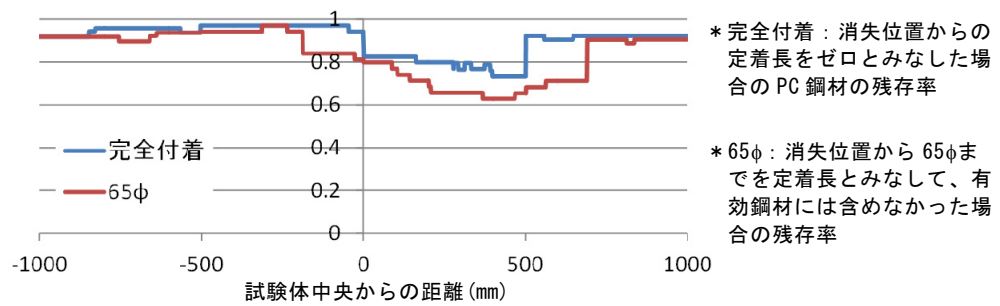
図-6に、C桁の(a)ひび割れ図、(b)鋼材の破断・消失状況、(c)鋼材の断面残存率をそれぞれ示す。また、図-7にD桁の(a)ひび割れ図、(b)鋼材の破断・消失状況、(c)鋼材の断面残存率をそれぞれ示す。図-6(b)、図-7(b)に示すように、対象橋梁では、細径のPCより線が使用され、腐食劣化が進行していたために、所々でPC鋼材が腐食しきって消失していた。また、C桁では、これらとは別に疲労荷重により破断した箇所も数か所、確認できた。残存部の平均腐食量を断面平均することで、図-6(c)、図-7(c)を算出した。別途実施した静的な曲げせん断試験¹⁾において、腐食量の断面平均を用いて曲げ耐力やひび割れ発生荷重を評価すると、過大評価となることが明らかとなった。これは、消失部近傍のPC鋼材は、コンクリートとの付着力が不十分であるので、有効には機能しないためである。これに対し、図-8に示すように、定着長さを65φと仮定し、その区間のPC鋼材は耐力には寄与しないものとして除外して、有効鋼材量を算出すると、耐力をおおむね安全側に評価できることを確認している。そこで、図-6、7では、鋼材の材端から65φまでを除外した場合の断面残存率も算出した。



(a) 破壊後のひび割れ図

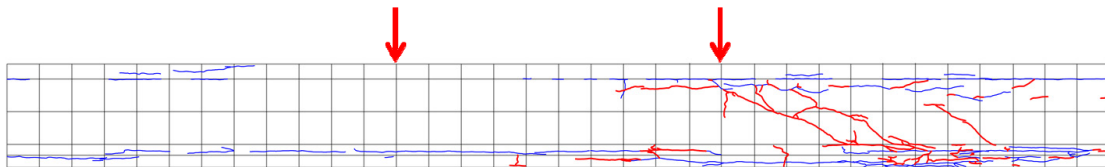


(b) PC 鋼材の破断・消失位置

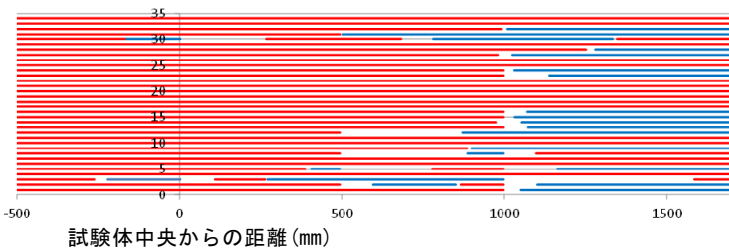


(c) PC 鋼材の残存率

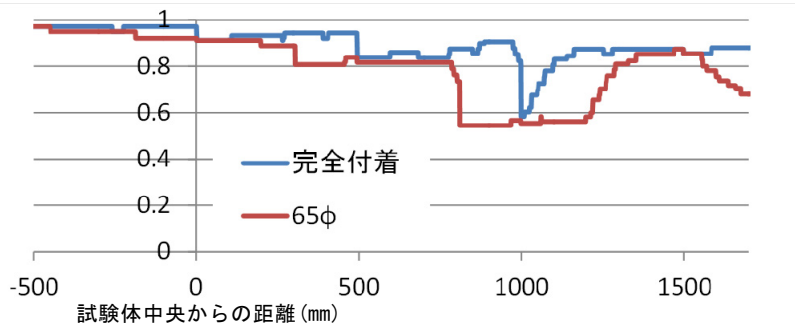
図-6 C 桁のひび割れ状況と PC 鋼材の腐食状況の関係



(a) 破壊後のひび割れ図

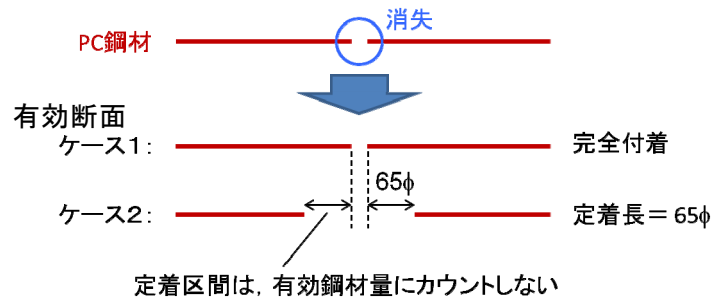


(b) PC 鋼材の破断・消失位置



(c) PC 鋼材の残存率

図-7 D 桁のひび割れ状況と PC 鋼材の腐食状況の関係



図－8 腐食による消失箇所の有効断面の考え方

C桁では、等曲げ区間におおむね一定間隔で曲げひび割れが発生し、載荷回数の増加とともに、これらの曲げひび割れが徐々に進展していった。終局時には中央から+300mm付近のひび割れが急激に大きく開口した。図－6 (b)と比較すると、この位置では鋼材の消失が多く、疲労試験中に鋼材破断が生じた位置ともおおむね一致する。このことから、C桁では等曲げ区間のうち、もっとも腐食が進行していた部分で、PC鋼材が疲労により破断し、破壊が生じたと考えられる。

D桁では、第1回目の載荷で、等曲げ区間の外側（中央から+1000mmの位置）に曲げひび割れが発生した。数回疲労載荷を行った際に、曲げひび割れを起点にせん断ひび割れが発生した。さらに数回載荷を行うと、せん断ひび割れは載荷点付近まで進展し、その後は、載荷回数とともにせん断ひび割れの開口が大きくなり、破壊に至った。PC鋼材の消失位置や残存率の分布に着目すると、D桁では等曲げ区間内の腐食量が少なく、破壊位置周辺での腐食量が局所的に大きかったことがわかる。そのため、C桁とD桁の破壊形式が異なった原因は、腐食が進行していた場所の違いによるものと推定できる。

4. 設計式による疲労寿命予測

PC鋼材の腐食が、部材の疲労強度に与える影響を評価するために、設計式による疲労寿命予測結果と実験値との比較を行った。疲労寿命の検討は、実験で破壊が生じた断面を対象として計算を行った。表－2に検討断面の位置とPC鋼材の有効断面の残存率を示す。完全付着を仮定した場合と、定着長を65φとした場合のそれぞれで有効断面の残存率を算出し、疲労寿命を計算した。

表－2 疲労寿命の検討断面の位置とPC鋼材の有効断面の残存率

試験体	PC鋼材の有効断面の残存率		検討断面の位置（試験体中央からの距離）	
	完全付着	定着長=65φ	完全付着	定着長=65φ
C桁	73.2%	62.8%	+399mm	+380mm
D桁	58.3%	54.4%	+999mm	+810mm

C桁では、PC鋼材の疲労破断が生じて破壊に至ったと推定されるので、式1に示すPC鋼材の疲労強度に関する土木学会式²⁾を用いて、寿命予測を行った。

$$f_{prd} = 280 \frac{10^a}{N^k} \left(1 + \frac{\sigma_{pp}}{f_{pud}} \right) \tag{式1}$$

ここに、 f_{prd} は疲労強度、 N は疲労寿命である。係数 a 、 k はPC鋼材の場合はそれぞれ1.14、0.19である。 σ_{pp} は永久荷重による鋼材応力で、道路橋示方書³⁾の許容値である1,170N/mm²を仮定した。 f_{pud} はPC鋼材の引張強度で、規格値である1,840N/mm²を仮定した。なお、検討断面の作用モーメントと鋼材応力の関係は、ファイバー解析により求めた。その際、残存しているプレストレス力は、図－6、7 (c)に示した鋼材断面積の残存割合に比例すると仮定した。

D桁では、等曲げ区間の外側でコンクリートがせん断疲労破壊したと推定されたが、せん断破壊の場合たとえ鋼材が腐食していても、コンクリートで破壊が生じるので、コンクリートのせん断耐力式

が準用できると考えられる。そこで、式2で示される、コンクリートのせん断疲労強度式を用いて、寿命予測を行った。

$$V_{rcd} = V_{cd} \left(1 - \frac{V_{pd}}{V_{cd}} \right) \left(1 - \frac{\log N}{11} \right) \tag{式2}$$

ここに、 V_{rcd} はせん断疲労強度、 V_{cd} は静的なせん断耐力、 V_{pd} は永久荷重によるせん断力である。式2は、せん断補強筋がない部材に対する疲労強度式であるが、対象とする部材のせん断補強筋間隔は有効高さよりも大きいので、せん断補強筋は耐力に寄与しないと考え、式2で評価することとした。また、腐食の影響は、静的なせん断耐力の算定において、有効鋼材量を減少させることで考慮した。

図-9にC桁の実験値と計算値の比較を、図-10にD桁の実験値と計算値の比較を示す。腐食を考慮した計算値は、いずれの場合も実験値よりも安全側の評価となった。この理由のひとつとして、実際の鋼材の強度が計算で仮定した値よりも大きかった可能性が挙げられる。また、せん断疲労に関しては、健全な場合の静的強度の計算値よりも疲労試験の実験値のほうが強度が大きかったことから、静的強度に対する評価式が安全側に構成されていることが原因のひとつとして挙げられる。これらの影響については課題が残されたものの、今回の実験では、疲労強度が急激に低下するような現象は生じなかったといえる。ただし、この知見の適用範囲は、局部腐食による応力集中の発生を相互に緩和しあえるような、鋼材の本数が比較的多いプレテンションPC桁に限定される可能性があるため、鋼材本数が少ない場合については、別途検討が必要である。

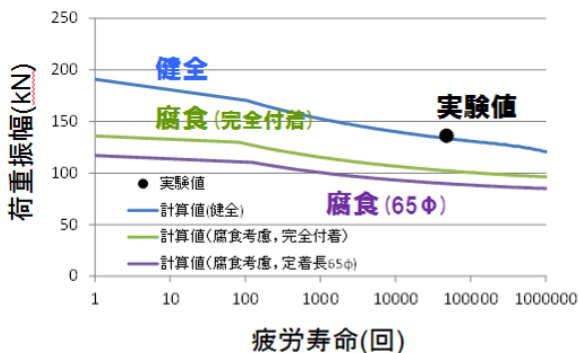


図-9 C桁の疲労寿命の試算結果と実験値との比較 (PC鋼材の破断に対する疲労寿命を評価)

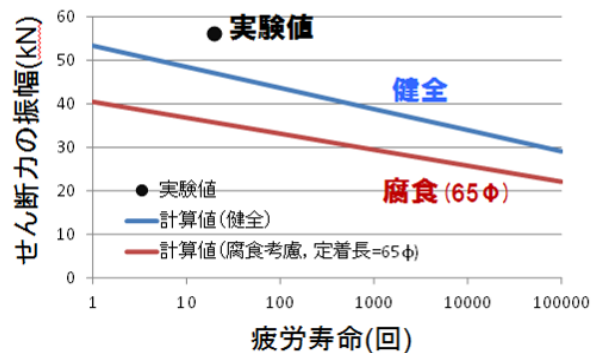


図-10 D桁の疲労寿命の試算結果と実験値との比較 (コンクリートのせん断破断に対する疲労寿命を評価)

5. まとめ

本研究では、塩害によって鋼材腐食が進行したプレテンションPC桁の疲労載荷試験を行った。同じ載荷条件であっても、試験体の腐食分布の違いによって疲労強度や破壊形式は異なる結果となった。これらの試験体の鋼材の腐食分布を測定したところ、腐食がもっとも進行していた場所と破壊位置はおおむね一致した。また、鋼材の本数が比較的多いプレテンションPC桁の場合、応力集中の影響は鋼材間で相互に緩和されるので、腐食による有効断面の減少を考慮して示方書式により疲労強度を算定すれば、結果として、疲労強度は安全側に評価されることが示された。

参考文献

- (1) 田中泰司, 山口貴幸, 陸賢, 井林康: 鋼材腐食が生じたプレテンションPC桁の曲げせん断性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, pp. 1127-1132, 2011
- (2) 道路橋示方書・同解説, 日本道路協会, 2002
- (3) 2007年制定コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, 2008