

第2章 塗装鉄筋の疲労による劣化評価に関する検討

2.1 疲労試験の検討

2.1.1 疲労メカニズムの整理

1章で整理した塗装鉄筋に作用する外力の中から、塗装鉄筋で着目すべき箇所と考えられる劣化状態を表 2.1.1 に整理した。整理にあたっては、コンクリート部材を構成している鉄筋(対象鉄筋及び交差鉄筋)、結束線や、コンクリートのひびわれ等を考慮することとした。

表 2.1.1 部材中の位置及び考えられる劣化状態

着目箇所	発生する現象	可能性のある劣化状態	再現するための試験方法
ひびわれ面	引張による鉄筋の伸び	塗膜の剥がれ	塗装鉄筋単体の疲労試験
		塗膜の破断	
		塗膜の劣化	
		ピンホールの拡大	
	せん断による鉄筋の伸び	塗膜の剥がれ	塗装鉄筋単体の疲労試験
		塗膜の破断	
		塗膜の劣化	
		ピンホールの拡大	
ひびわれへの水分の浸入	塗膜の劣化	暴露試験	
ひびわれ近傍	引張による塗装鉄筋とコンクリートのこすれ	塗膜の剥がれ	鉄筋コンクリート供試体による疲労試験
		塗膜の破断	
		塗膜の劣化	
		ピンホールの拡大	
	引張による塗装鉄筋のフシとコンクリートの接触	塗膜の剥がれ	鉄筋コンクリート供試体による疲労試験
		塗膜の破断	
		塗膜の劣化	
		ピンホールの拡大	
	せん断による塗装鉄筋とコンクリートのこすれ	塗膜の剥がれ	鉄筋コンクリート供試体による疲労試験
		塗膜の破断	
		塗膜の劣化	
		ピンホールの拡大	
コンクリートとの接触	コンクリート成分による	塗膜の劣化	鉄筋コンクリート供試体による疲労試験
		塗膜の劣化	
交差鉄筋付近	引張による塗膜同士のこすれ	塗膜の剥がれ	鉄筋コンクリート供試体による疲労試験
		塗膜の破断	
		塗膜の劣化	
		ピンホールの拡大	
結束線付近	引張による塗装鉄筋と結束線のこすれ	塗膜の剥がれ	鉄筋コンクリート供試体による疲労試験
		塗膜の破断	
		塗膜の劣化	
		ピンホールの拡大	
コンクリート中	コンクリートとの接触	コンクリート成分による	暴露試験
		塗膜の劣化	

2.1.2 コンクリート構造物に作用する応力

コンクリート部材の鋼材に作用する応力状態を表 2.1.2 に整理した。以上から比較的大きい引張力が作用し、かつ高サイクルの繰り返しが作用する RC 床版が疲労に対して最も厳しいと考えられるため、疲労試験の対象とする。

表 2.1.2 コンクリート部材の鋼材に作用する力

部材の種別	鋼材	作用する力			
		死荷重時	活荷重時	地震時(L-1)	地震時(L-2)
RC 橋脚	主鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> 軸力が作用。 数十 N/mm^2 以下の小さな圧縮応力。 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 許容応力度以内の圧縮応力～引張応力 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 降伏強度以内の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 降伏応力度程度の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。
	せん断補強鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> ほとんど作用しない。 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しは数回～数十回。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しは数回～数十回。
RC 橋台	主鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> 軸力が作用。 数十 N/mm^2 以下の小さな圧縮応力。 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 許容応力度以内の圧縮応力～引張応力 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 降伏強度以内の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 降伏応力度程度の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。
	せん断補強鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> ほとんど作用しない。 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しは数回～数十回。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しは数回～数十回。
PC 桁	配力鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> 曲げが作用。 数十 N/mm^2 以下の圧縮応力度。 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 許容応力度以内の圧縮応力～引張応力 繰返しは、少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 降伏強度以内の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げとせん断力が作用。 降伏応力度程度の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。
	せん断補強鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> ほとんど作用しない。 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しはほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しは数回～数十回。 	<ul style="list-style-type: none"> せん断力が作用。 引張応力 繰返しは数回～数十回。
RC 床版	主鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> 曲げが作用。 数十 N/mm^2 以下の引張応力度。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げが作用。 許容応力度以内の圧縮応力～引張応力(配力鉄筋より大きい) 支間が短く、繰返しは、多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げが作用。 降伏強度以内の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げが作用。 降伏応力度程度の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。
	配力鉄筋	<ul style="list-style-type: none"> ほとんど作用しない。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げが作用。 許容応力度以内の圧縮応力～引張応力 支間が短く、繰返しは、多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げが作用。 降伏強度以内の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。 	<ul style="list-style-type: none"> 曲げが作用。 降伏応力度程度の圧縮応力～引張応力が作用 繰返しは数回～数十回。

注 1) RC 桁は今後、塗装鉄筋を用いて建設されることは少ないと判断し対象外とする。

注 2) ボックスカルバートは RC 床版と同等と考え、省略した。

2.1.3 試験の形態と確認できる事項

表 2.1.3 に塗装鉄筋に対する試験形態と、実際に確認できる内容を整理した。

ひびわれ発生後のコンクリート部材においては、ひびわれ面近傍の応力集中により、鉄筋とコンクリートの間で微少なずれが生じ、繰り返しの塗り膜の疲労による損傷の恐れがある。そのため、コンクリートとの相互作用が模擬できる模型供試体に対して繰り返しの試験を行い、塗り膜の疲労を評価する必要がある。一方で今後の試験方法の提案、検討といった側面も考慮した場合、簡易にできる試験方法が求められる。本検討においては表 2.1.5 より、塗装鉄筋単位モデルと同時に確認できる塗装鉄筋とコンクリートの棒部材モデルを採用することとした。

表 2.1.3 塗装鉄筋に対する試験形態と内容

モデル	試験概要	再現性の課題	評価
単鉄筋モデル	塗装鉄筋単体の疲労試験	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートとの相互作用が試験できない ・塗り膜と塗り膜の相互作用は試験できない ・容易で安価である。 	塗り膜自身の疲労による損傷を確認するため、予備試験として実施するのが望ましい
棒部材モデル	RC 供試体の疲労試験	<ul style="list-style-type: none"> ・せん断による作用は試験できない ・1 軸引張疲労試験であり、容易である ・RC 床版との相関をキャリブレーションする必要がある 	他の試験と比較して安価で容易であり、コンクリートとの相互作用が確認できるため、疲労試験として望ましい
梁モデル	RC 梁の疲労試験	<ul style="list-style-type: none"> ・せん断による作用は2点荷重が必要 ・試験費用は比較的高価となる ・RC 床版との相関をキャリブレーションする必要がある 	棒部材モデルよりも高価となる割りに、疲労に対して明確な結果が得られない
模型床版モデル	RC 床版（模型）疲労試験	<ul style="list-style-type: none"> ・RC 床版の応力状態をほぼ再現できる ・試験費用は高価となる ・模型床版と実床版の相関をキャリブレーションする必要がある 	荷重後の塗り膜の確認方法に問題があり、塗装鉄筋塗り膜の評価としては試験の汎用性が低い
実大床版モデル	RC 床版（実大）疲労試験	<ul style="list-style-type: none"> ・RC 床版の応力状態を再現できる ・試験費用は最も高価となる 	模型床版モデルよりも試験費用が高価となり汎用性がさらに低い

2.1.4 疲労試験における荷重回数

RC 床版中の鉄筋を接した塗装鉄筋の疲労試験において、適切な荷重回数について考察する。

1) 塗装鉄筋の疲労限界状態

塗装鉄筋の塗装は、鉄筋又は RC 床版が疲労破壊するよりも長期間、その機能を保持する必要はない。塗装鉄筋の塗装が、輪荷重の繰り返しの作用により、その機能を失う場合、表 2.1.4 のような状態が想定される。なお、支間 2.5m の鉄筋コンクリート床版を想定して、疲労破壊回数を算定した結果、鉄筋の疲労破壊と押抜きせん断疲労破壊では、鉄筋の疲労破壊が先行する結果となった。

表 2.1.4 限界状態の区分

区 分	限 界 状 態	破 壊 の 回 数
鉄筋の疲労破断	RC 床版の鉄筋が、輪荷重の繰り返し载荷により、曲げ引張応力を受けて疲労により破断する状態。	支間 2.5m、床版厚さ 240mm の床版鉄筋の疲労破断回数は約 1500 万回。 1 日 1 方向大型車が 1 万台として約 4.1 年に相当。
床版の押抜き疲労破壊	RC 床版のコンクリートが、輪荷重の繰り返し载荷により、亀甲状のひび割れが発生し、押抜きせん断破壊となる状態。	支間 2.5m、床版厚さ 240mm の床版に松井による S-N 曲線を用いた場合 ¹⁾ 、押抜きせん断疲労破壊の破壊回数は 313,000 万回。 1 日 1 方向大型車が 1 万台として約 860 年に相当。
塗装の疲労損傷	RC 床版の塗装鉄筋の塗装が、輪荷重の繰り返し载荷による影響で損傷する状態。	塗装鉄筋の塗装の S-N 曲線は得られていない。

注)鉄筋は主鉄筋 D16ctc125、配力鉄筋 D16、輪荷重は 1 軸 100kN

2) RC床版の押抜きせん断疲労試験結果における鉄筋の疲労破断

RC 床版の疲労試験は、今まで数多く行われている。しかし、試験結果において、押抜きせん断疲労破壊した床版では鉄筋の疲労破断は見られておらず、実橋でもコンクリート塊の抜け落ちが先行している(写真 2.1.1)。これは、上記の計算で用いた鉄筋の S-N 曲線は、鉄筋の完全片振り疲労試験によるものであり、コンクリート中に埋め込まれたものと異なるためと想定される。このため、鉄筋に疲労破壊が起こる外力作用による変動を与えることで、実橋で問題となる RC 床版の押抜きせん断疲労破壊までの鉄筋に対する条件より、鉄筋の疲労の観点からは過酷な状況を生じさせていると考える。



写真 2.1.1 実橋で RC 床版のコンクリート塊が抜け落ちた事例

3) 载荷試験のパラメータ

以上より塗装鉄筋の疲労試験における载荷回数は、鉄筋の疲労破断の回数を基に設定する。

既往の鉄筋の疲労試験結果では、200 万回を超える試験結果²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾が少なく、また、変動応力を小さくすると疲労限以下となることも考えられる。このため、表 2.1.5 に示すパ

ラメータで載荷試験を実施することとした。

表 2.1.5 載荷試験のパラメータ

	パラメータ	標準的な決め方	備考
鉄筋径	D16	RC 床版としての鉄筋径 支間 2.5m、厚さ 240mm の設計より決定	
コンクリート強度	24N/mm ²	RC 床版としてのコンクリート強度	
載荷荷重	下：20N/mm ² 上：180N/mm ²	設計上は上：140N/mm ² (許容応力度)、下：20N/mm ² (死荷重)だが、可能な範囲で大きめの値(床版以外の部材における常時の許容応力度)とした。	
載荷回数	100 万回 200 万回 400 万回	通常、疲労試験は 200 万回が多いが、疲労による影響が無いことを確認するために、その倍の 400 万回を選定した。	

2.1.5 供試体形状

コンクリートに埋込んだ鉄筋を引抜いた場合には、表面から 6 φ ~ 10 φ の区間は付着切れを起すことが、既往の実験で確認されている⁸⁾。

RC 床版中の鉄筋も同様であると考えた場合、鉄筋を D16 とすると、その区間長はひびわれより 96mm ~ 160mm に相当する(ただし、上記値は一般の鋼材における値であり、塗装鉄筋ではさらに長くなる可能性がある)。コンクリートと鉄筋のずれ量は、ひびわれ表面で最大となり、反対に付着している部分では 0 となる。図 2.1.1 にひびわれ付近の鉄筋の付着状態の模式図を示す。

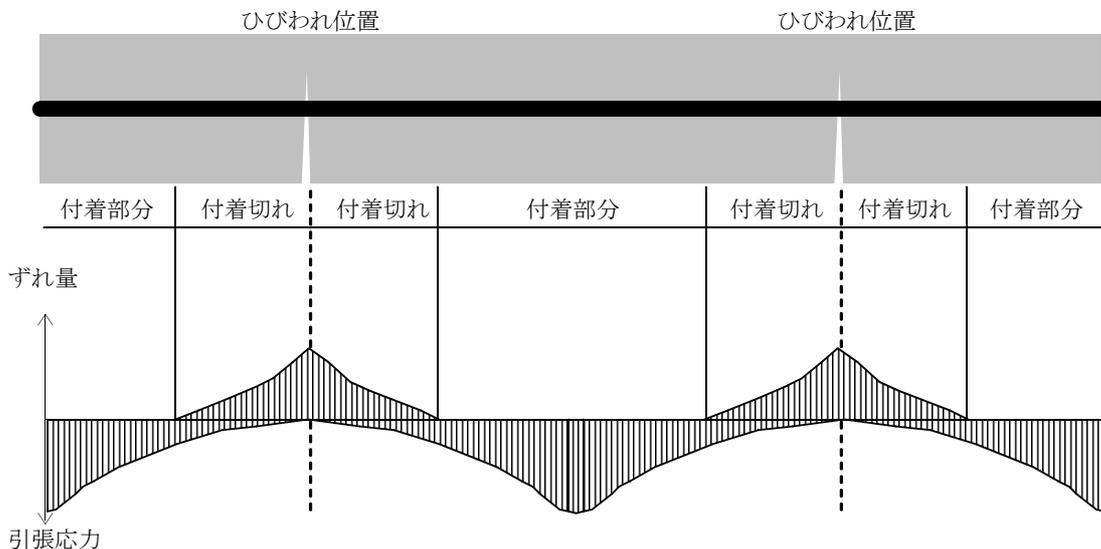


図 2.1.1 ひびわれ付近の鉄筋の付着状態の模式図

本検討の実験においては、一般的な供用条件下で塗膜の疲労が生じるか否かを検証するために、コンクリートと鉄筋のずれ量を実現象より小さくできない。したがって両引きで試験を行う場合のコンクリート部分の最低長さを 300mm 程度確保することが必要である(図 2.1.2 参照)。

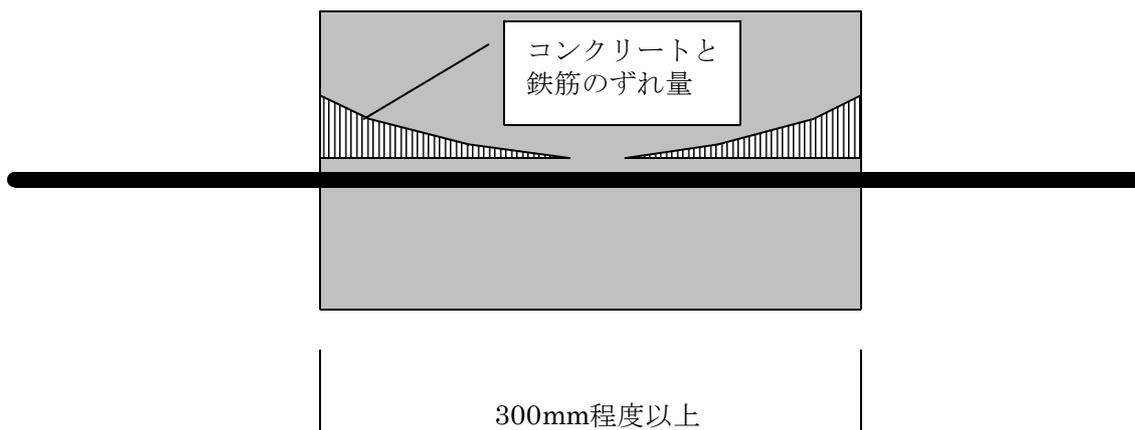


図 2.1.2 両引き試験での供試体寸法

一方、鉄筋表面の塗膜が RC 床版中での活荷重作用時に受ける力は、ひびわれ近傍ではひびわれのない部分とは異なり、図 2.1.3 のように部分的なものになることが想定される。このとき鉄筋は軸方向の引張応力とひびわれ部の段差によるせん断応力を受けるが、設計荷重時程度では、ひびわれ部に発生する段差は小さく、主鉄筋のせん断変形は大きくはならないと考えられる。このため今回の疲労試験では、これら作用のうち主に鉄筋の受ける引張応力と、直交する鉄筋同士の干渉の影響に着目するものとした。

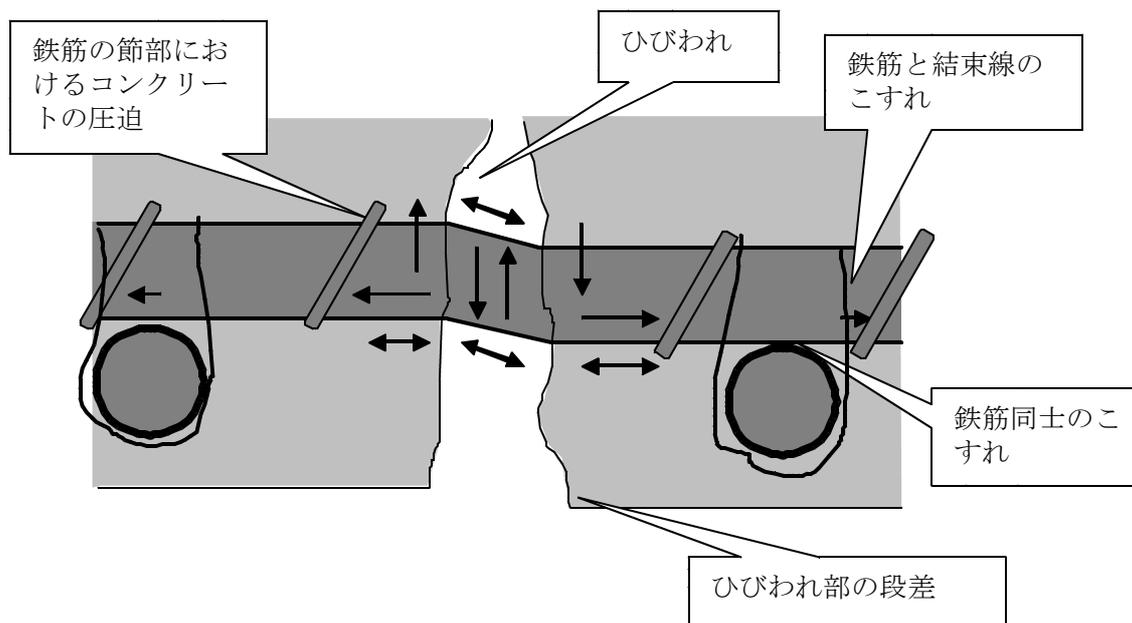


図 2.1.3 活荷重作用時に RC 床版の主鉄筋の受ける応力状態

試験は塗装鉄筋 1 本をコンクリートで覆った供試体に対し、ひびわれを発生させ、両引きで塗装鉄筋塗膜が受ける繰り返し応力を作用させる。試験中には載荷点側の塗装鉄筋の挙動を確認する。載荷終了後、供試体を解体、塗装鉄筋を切り出し、供試体の載荷側とひびわれ部に、外観目視や耐食性試験を行い、疲労の影響を考察することとした。