

技術ノート

RC床版の塩害劣化と押し抜きせん断耐力について

Punching Failure of RC Slabs Damaged by Corrosion of Reinforcement

前 田 研 一*
Ken-ichi MAEDA橘 吉 宏**
Yoshihiro TACHIBANA

The failure mechanism and the punching strength of RC slabs damaged by corrosion of reinforcement are experimentally studied in order to obtain useful information for repair or maintenance. In the experiments, loading tests are conducted for RC slabs damaged with an accelerated galvanostatic corrosion method. It is found that the reduction in punching strength and the change of failure mechanism occurred in the damaged slabs. The modeling of failure mechanism of the damaged slabs is investigated, and it could be indicated that the punching strength of the damaged slabs is composed of the ultimate shear strength in compression zone under the loaded area and the bending strength of the main reinforcement with the bottom covers.

Keywords : failure mechanism, punching strength, RC slab, corrosion of reinforcement

1. まえがき

道路延長の増加とともに、橋梁の保全技術の確立が緊急の課題として認識されるようになり、鋼橋については疲労を中心とした保全技術が、関係機関で検討されるようになってきている¹⁾。鋼橋の構成部材であるRC床版については、古くから輪荷重の疲労による損傷が報告され、それに伴い「道路橋示方書」でも改訂の度に、床版設計法が改善されてきた。

ところで、床版の損傷が主に輪荷重による疲労として取り扱われているわが国に対し、欧米諸国では、床版の損傷はそのほとんどが融氷剤散布による塩害であり、特にアメリカではその補修費用が財政上の問題となるまでに至っている。このような塩害に代表されるRC床版の劣化については、わが国では欧米諸国との条件の差があるために「少ない」とされ、あまり重要視されなかった問題であった。しかし最近では、わが国でも欧米同様な被害の危険性のあることが指摘されるようになり、RC床版の塩害が今後増大していく傾向にあるといわれている^{2),3)}。

本文は、RC床版の塩害と腐食損傷を受けた床版の安全性を調べるために実施した試験について報告し、RC床版の保全技術を検討する際の一資料を提供するものであ

る。

2. 道路橋の塩害³⁾

ここでは、道路橋への塩分の侵入・浸透と塩害について、簡単に述べる。

(1) コンクリート内部塩分

わが国では、従来はコンクリート用骨材として河川骨材が使用されていた。ところが、高度経済成長期の建設ラッシュ時に良質の河川骨材(川砂)が不足し、それに代わる材料として昭和40年頃から多量の海砂が使用されるようになった。当時のコンクリート中の塩化物に対する社会認識は、鋼材には悪いことは知られていながらもコンクリート自体への影響は少ないとして、塩害はあまり重要視されなかった。しかしその後、塩分を含んだコンクリート構造物の劣化がその施工不良とともに顕在化するようになり、昭和52年には建設省から海砂に含まれる塩分量の規制についての通達が出され、行政上から規制が敷かれることになった。そして昭和61年には、建設省からコンクリート中の塩化物総量の規制についての通達が出され、海砂ばかりでなく混和剤等に含まれる塩化物に対しても規制が敷かれることになった。

このような行政上からの規制により、現在新設される構造物では、コンクリート内部塩分に対する問題はほぼ

*川田工業㈱技術本部中央研究室室長 **川田工業㈱技術本部中央研究室

解決されたといえるが、既存の構造物では、昭和40年代から昭和50年代初めにかけて建設されたRC構造物に、コンクリート内部塩分による塩害の発生確率が高いことがわかる。

(2) 外来塩分

橋梁については、上述したようなコンクリート内部塩分による塩害に加えて、海塩粒子や融氷剤など構造物の外部から侵入する外来塩分による被害も多い。建設省が実施した調査によると、北海道、沖縄を除く地域において、海岸より500m以内に建設されているコンクリート橋上部工では、調査対象のうち24%に塩害を生じていたことが報告されている。また、融氷剤による塩害については、寒冷地でRC床版の被害が報告されるようになってきている。

このような外来塩分の特徴は、塩分が年々蓄積され、その浸透・蓄積量は、やがては大量の含有量となることにある。海岸付近で塩害を受けたコンクリート橋の調査結果⁴⁾では、コンクリートに浸透した塩分量は、上述の内部塩分規制値よりもはるかに大きいことが報告されている。一方、融氷剤については、わが国ではスパイクタイヤが認められていたために欧米に比べて散布量が少なかったことや、加えてアスファルトの防水効果があるためにRC床版への塩分の浸透はわずかであるとされてきた。しかし最近になって、スパイクタイヤの禁止による融氷剤散布量の増加や、加えてアスファルトに防水効果がほとんど期待できないことなどが明らかになったことなどの状況があり、道路橋RC床版の塩害による劣化が今後さらに増大する可能性のあることが指摘されている。

以下の章では、塩害の増大の可能性が指摘されているRC床版の安全性を調べるために行った実験について報告を行う。

3. 腐食RC床版の載荷試験

腐食損傷を受けたRC床版に対して、必然的に安全性の評価ならびに補修・補強工法の選定が問題になってくる。輪荷重が直接に作用する道路橋床版では、腐食損傷を受けたRC床版の耐荷機構を推定することが、これらの検討に対し重要な示唆を与えてくれるものと考えられる。このような観点から、腐食損傷を受けたRC床版供試体について載荷試験を実施した。ここでは、その結果について述べる。

(1) 実験概要

載荷試験は、非腐食および腐食RC床版各2体について実施した。以下にRC床版模型概要、腐食促進方法、載荷方法について説明を行う。

a) RC床版模型

図-1に実験に用いたRC床版模型を示す。この床版模

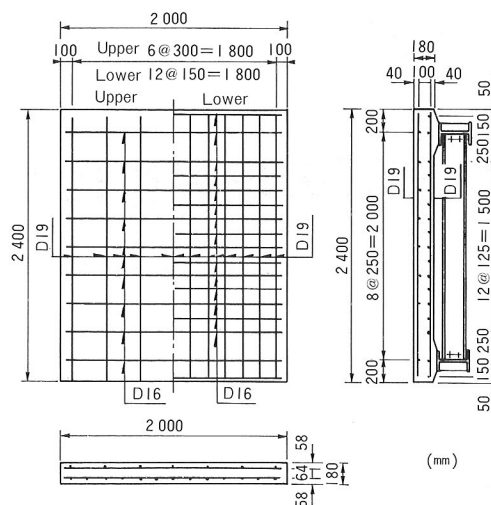


図-1 RC床版模型

型は道路橋RC床版を対象としており、複鉄筋で床版厚は18cmである。また、鋼桁との結合はスラブアンカーにより行い、3cmのハンチを設けた。なお、床版模型に用いた鉄筋の材質はSD30であり降伏強度は3680 kg/cm²、コンクリートは載荷試験時において、圧縮強度245 kg/cm²、弾性係数 2.75×10^5 kg/cm²であった。

b) 腐食促進方法

鉄筋の腐食促進法として電食法を用いた。この方法は鉄筋を強制アノード溶解させる方法であり、鉄筋が一樣に腐食し、腐食程度は積算電流量を変化させることにより調整ができる。本試験では、上鉄筋と下鉄筋ともに通電させ、電流密度0.9 mA/cm²で19日間の通電を行い鉄筋を腐食させた。この積算電流量、すなわち腐食量は、以前に電食RCばりに対して実施した載荷試験⁵⁾で、耐力低下が認められたRCばりの腐食量に対応し、この時の鉄筋断面欠損量は約5%であった。この電食法では全鉄筋がアノード溶解するために、腐食状況は必ずしも実際の状況と対応しているとは限らないが、鉄筋が全体的に腐食したRC床版に対する基礎的な資料を得る範囲であれば、妥当な結果を得ることができるものと思われる。

c) 載荷方法

載荷は、60 tまでの静的載荷で、変位制御により行った。載荷位置は図-2に示す床版中央点であり、載荷板寸

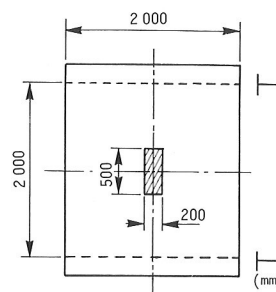


図-2 載荷位置

法は「道路橋示方書」の輪荷重を想定して $20 \times 50 \text{ cm}$ とした。

(2) 実験結果

a) 電食後の腐食ひびわれ状況

鉄筋が腐食すると、その腐食生成物の体積が2～3倍にもなるために、膨張圧によりコンクリートにひびわれを生じる。この腐食膨張ひびわれは、RCばりの場合は一般に鉄筋軸に沿って生じる。図-3に、19日間通電後の床版下面および側面に生じたひびわれ状況を示すが、この腐食RC床版では、鉄筋軸に沿ったひびわれは床版下面には顕著には現れていないことがわかる。このような目視における観察状況に対し、載荷試験後に行ったはつり調査の結果では、鉄筋は全体的に腐食しており、網目状に配置されている引張り側の主鉄筋および配力鉄筋位置で、水平面状に錆汁が広がっていることが確認された。この水平面状の錆汁は主鉄筋と配力鉄筋の間に発生し、本試験におけるRC床版では、腐食膨張ひびわれは図-4に示すように水平面状の剝離面を形成するように進展していることが確かめられた。このようなひびわれによる鉄筋の付着性状の変化が、耐力に影響を及ぼすものと考えられた。

b) 載荷試験結果

載荷試験結果の一部として、図-5に床版中央における荷重-たわみ曲線、図-6、7に載荷試験時に発生したおのおののひびわれ状況を示す。図-5に示した荷重-たわみ曲線の結果から、腐食RC床版の方が剛性が若干高いことがわかる。これに対して、押し抜きせん断耐力については腐食RC床版は非腐食RC床版に比べて低下しており、図-5に示した腐食RC床版では51.5 tであった。ここで載荷は変位制御で行っているので、押し抜きせん断破壊後に再び載荷することが可能で、再載荷時には20.1 tの耐力を有していた。もう一体の腐食RC床版については、押し抜きせん断耐力は56.5 t、再載荷時には18.3 tの耐力を有していた。一方、非腐食RC床版では2体とも60 tまでの載荷では破壊を生じなかった。

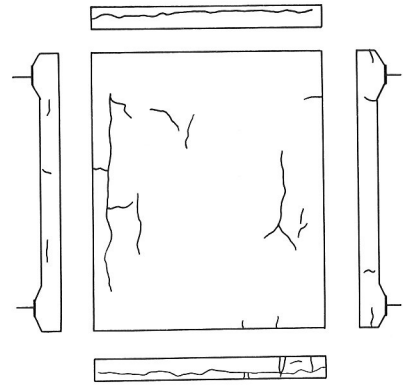


図-3 電食後ひびわれ状況

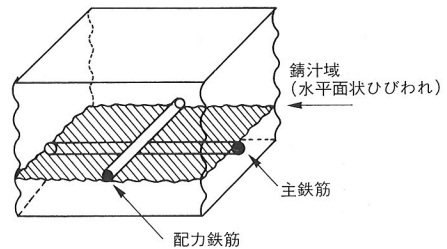


図-4 腐食膨張ひびわれ

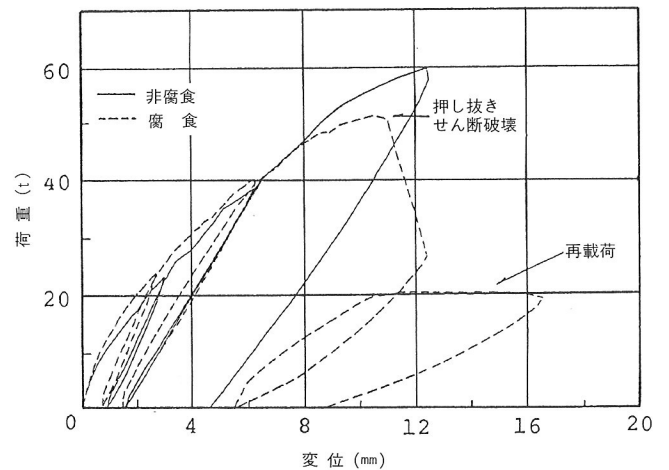


図-5 荷重-変位関係

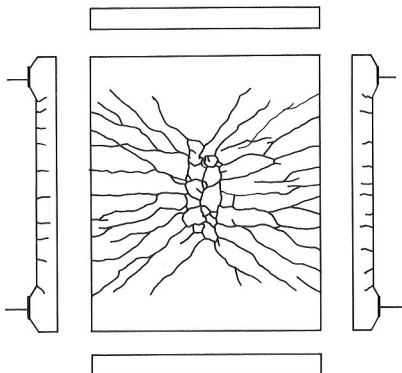


図-6 ひびわれ状況(非腐食)

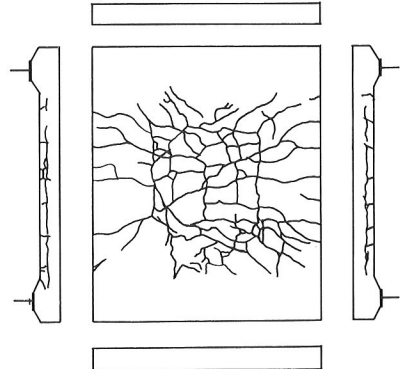


図-7 ひびわれ状況(腐食)

また、腐食RC床版の押し抜きせん断破壊状況は、載荷板直下でその載荷板の形状どおりに陥没したが、一般的なRC床版の押し抜きせん断破壊状況である陥没と同時に生じる床版下面の割裂破壊は確認されなかった。したがって、腐食RC床版の耐荷機構は非腐食RC床版と異なり、それが耐力低下と関係づけられるものと考えられた。

4. 腐食RC床版の押し抜きせん断破壊機構

実験結果から、腐食RC床版は耐力低下を生ずることがわかった。ここでは、道路橋RC床版に適していると考えられ、押し抜き耐荷機構を基礎として導き出された松井の式⁶⁾を引用し、腐食RC床版の押し抜きせん断破壊機構についての考察を行う。

(1) 健全なRC床版の押し抜きせん断破壊

(1)式で示した松井の式は、RC床版の破壊機構に基づいた耐力算定式であり、図-8に示すように載荷板直下のせん断破壊と、引張り側鉄筋のダウエル作用によるかぶりの割裂破壊が耐力に寄与するとして導き出された式である。

$$P = \tau_{s, \max} \cdot 2(a + 2X_m)X_d + 2(b + 2X_d)X_m + \sigma_{t, \max} \cdot 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m \quad \cdots (1)$$

ここに、

a, b : 載荷板の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の辺長 (cm)

X_m, X_d : 主鉄筋および配力鉄筋に直角な断面の引張り側コンクリートを無視した断面の中立軸距離 (cm)

d_m, d_d : 主鉄筋、配力鉄筋に対する有効高さ (cm)

C_m, C_d : 引張り側主鉄筋、引張り側配力鉄筋の中心とコンクリート下表面との距離 (cm)

$\tau_{s, \max}$: コンクリートの最大せん断応力度 (kg/cm²)

$\sigma_{t, \max}$: コンクリートの最大引張応力度 (kg/cm²)

(1)式によると、載荷試験に用いた非腐食RC床版では71.1 tの耐力を有して、最大荷重である60 tでは破壊を生じないことになり、実験結果を裏付けている。

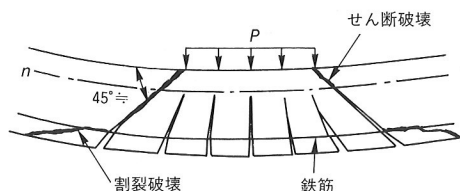


図-8 健全な床版の押し抜きせん断破壊⁶⁾

(2) 腐食RC床版の押し抜きせん断破壊

(1)式において、第1項は載荷板直下のせん断破壊、第2項は引張り側鉄筋のダウエル作用によるかぶりの割裂破壊が耐力に寄与する項をそれぞれ表している。腐食RC床版では、前述した水平面状の腐食膨張ひびわれの存在や破壊形状の相違から判断すると、第2項であるダウエル作用が耐力に寄与する影響が、非腐食RC床版に比べて小さいことが容易に推定される。図-9(a)に示すように、健全なRC床版ではこのダウエル作用によりコンクリートに引張応力が導入され、割裂ひびわれを生じる。しかしながら、腐食RC床版では、前出の図-4に示したように、この割裂ひびわれと同じ方向に鉄筋錆の膨張によって生じた水平面状のひびわれが存在するので、ダウエル作用そのものがほとんど効かなくなる。すなわち、図-9(b)に示すように、せん断ひびわれを介して鉄筋に伝達される鉛直力Vにより、引張り側主鉄筋を含めたかぶり部が剥がれるように挙動することは明らかであり、このために実験では、床版下面にダウエル作用による明確な割裂破壊の跡が現れてこなかったものと推測された。

(3) 腐食RC床版の耐荷機構

以上に示したような状況から判断して、腐食RC床版の破壊モデルとして、図-10に示すモデルを仮定することができる。この破壊モデルでは、耐力に寄与する項目とし

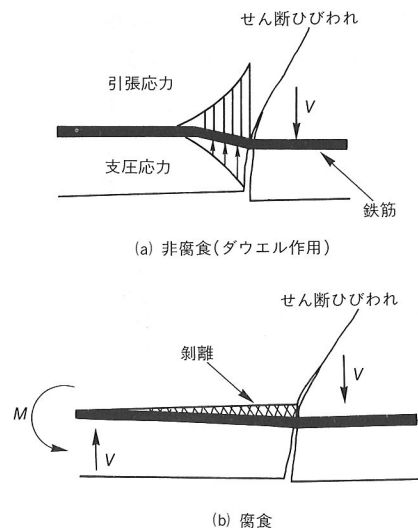


図-9 せん断ひびわれにおける力の伝達

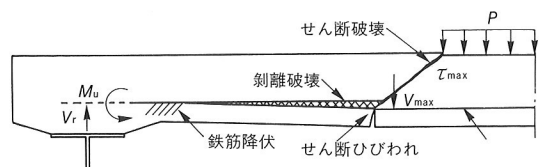


図-10 腐食床版の押し抜きせん断破壊

て、(1)式の第1項と同様な載荷板直下のせん断破壊に加えて、せん断ひびわれを介して伝達され得る最大の鉛直力 V_{max} を考え、この二つの項目により腐食RC床版の耐力が決定されるとした。この最大の鉛直力 V_{max} とは、図-10に示すように、上述した引張り側主鉄筋を含めたかぶり部で構成された断面の鉄筋降伏による破壊抵抗モーメント M_u とつりあう力であるとした。

図-10の破壊モデルに従えば、載荷板直下でせん断破壊を生じた後でも、図-9(b)に示すような力の伝達機構が成り立ち、実験において再載荷時に有した耐力と V_{max} とが一致することが推測される。ここで、載荷板直下のせん断破壊の耐力への寄与分については(1)式の第1項に従うと仮定し、この第1項で算定した値に、実験で再載荷時に有した耐力を加えて腐食RC床版の耐力を評価した値を表-1に示す。この値は、実験において得られた腐食RC床版の耐力とほぼ一致していることがわかる。

表-1 腐食RC床版の押し抜きせん断耐力

模型番号	(1)式第1項 A	再載荷時の耐力 (実験値) B	A+B	押し抜きせん断 耐力(実験値)
No.1	38.1 t	20.1 t	58.2 t	51.5 t
No.2	38.1 t	18.3 t	56.4 t	56.5 t

したがって、 V_{max} を解析的に算定することができれば、腐食RC床版の耐力を推定できることが予想される。この破壊モデルの妥当性や耐力の推定法については、文献7)を参照願いたい。

5. あとがき

本報告で、腐食RC床版の耐力低下の原因は、主鉄筋および配力鉄筋位置に生じた水平面状の腐食膨張ひびわれが、鉄筋のダウエル作用の押し抜きせん断耐力に及ぼす効果を低減させ、RC床版の耐荷機構に変化をもたらすためであることを示した。実験において腐食をさらに進行させると、やがてはかぶりコンクリートが剥がれ落ちる状態にまで至り、図-10の破壊機構から推測すると、床版の耐力がさらに低下することが容易に理解できよう。

本実験は電食による例であるが、前述したように床版模型では腐食膨張ひびわれは表面には顕著に現れなかった。このことは、実橋床版の検査において目視で判定される劣化部よりも広い範囲に腐食が進行している可能性のあることを示唆しており、実構造物を維持管理するうえでは、鉄筋の腐食や構造内部のひびわれを検出する非破壊検査法が必要不可欠になるものと考えられる^{8)~11)}。また、補修・補強工法の選定についても、このひびわれに対する処理が検討項目の一つになるものと考えられる。

本報告で、腐食損傷を受けたRC床版の耐力低下とその

劣化要因とを明らかにすることができ、本文が、合理的な診断・補修技術を確立するための一検討資料になれば幸いである。

参考文献

- 1) たとえば、(社)日本橋梁建設協会：保全(土木)関係資料作成(平成元年度)，1989年。
- 2) 小林：コンクリート構造物の早期劣化問題とその背景，土木施工，25巻7号，pp.40~48，1984年。
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：特集・鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化，コンクリート工学，Vol.25，No.11，1987年。
- 4) 和泉・小西：塩害PC橋補修の現状，川田技報，Vol.4，pp.255~260，1985年。
- 5) 橘・梶川・川村：鉄筋腐食によって損傷を受けたRCばりの挙動に関する考察，土木学会論文集，第402号/V-10，pp.105~114，1989年。
- 6) 前田・松井：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文集，第348号/V-1，pp.133~141，1984年。
- 7) 橘・梶川・川村：鉄筋腐食により損傷を受けたRC床版の押抜きせん断耐力に関する一考察，土木学会論文集，第426号/V-14，1991年に掲載予定。
- 8) 梶川・前田・作田・橘・富澤：自然電位法によるRC床版の鉄筋腐食検査，橋梁と基礎，Vol.21，No.11，pp.5~10，1987年。
- 9) 町田・作田・橘・梶川：赤外線放射温度計によるRC床版の劣化部検出法に関する基礎実験，土木学会第43回年次学術講演会概要集(VI)，1988年。
- 10) 前田・作田・町田・橘・富澤：RC床版の劣化部調査における非破壊検査法の適用，川田技報，Vol.8，pp.26~35，1989年。
- 11) 橘・前田・重石・梶川：AE法のRC床版劣化度検査法への適用に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，11-1，pp.337~342，1989年。