

## 鉄筋腐食によるコンクリート片の剥離強度評価解析手法の構築

|          |             |        |
|----------|-------------|--------|
| 名古屋大学大学院 | 学士 (工学)     | ○大島 直樹 |
| 名古屋大学大学院 | 正会員 博士 (工学) | 中村 光   |
| 名古屋大学大学院 | 博士 (工学)     | 三浦 泰人  |
| 名古屋大学大学院 | 博士 (工学)     | 山本 佳士  |

Abstract : In this research, a numerical method to evaluate delamination strength of cover concrete with rebar corrosion-induced crack was developed. The method is based on Rigid Body Spring Model (RBSM) in which crack propagation analysis due to rebar corrosion and delamination analysis subject to surface load on cover concrete are combined. Using the numerical method, delamination strength in various corrosion level with different concrete cover and stress condition in the concrete during corrosion and loading can be discussed. From delamination analysis results, load reached delamination strength within small displacement increment, and the obvious difference of delamination strength was not observed by corrosion level, though it became higher with increase of cover thickness. Therefore, it is guessed that the spalling risk of cover concrete with same cover thickness is almost same independent on corrosion level.

Key words : Delamination analysis, Corrosion-induced crack, Internal stress, RBSM

## 1. はじめに

近年、塩害や中性化による鉄筋腐食が数多くの構造物に生じている。鉄筋腐食は鉄筋の減肉による構造性能の低下だけではなく、構造物内部にひび割れが進展することによるコンクリート片の剥落を招く危険性がある。鉄筋腐食によるコンクリート片の剥落は発生頻度が高く、車両や人への第三者被害につながり、安全性に関わることから、維持管理上の重要な事象である。

コンクリート片の剥落には、鉄筋腐食による内部ひび割れの進展が密接に関係している。既往の研究では、腐食膨張圧と内部ひび割れ進展の関係について実験と解析の両面から検討がされており、かぶりと鉄筋径によるひび割れモードの分類<sup>1)</sup>や、ひび割れ進展解析手法の開発<sup>2)</sup>が行われている。また、腐食ひび割れが発生した場合のかぶり部分の耐荷力を実験的に検討する研究も行われている<sup>3)</sup>。しかし、剥落に至るまでの力学的なメカニズムや、内部ひび割れの状態や腐食の程度と、物理的、人的損害の大きさとしての剥落リスクとの関係性は未だ明らかになっていない。また、内部ひび割れ性状はかぶり、鉄筋径、腐食領域の分布といった多様な要因に影響されることが確認されている<sup>4)</sup>。剥落のメカニズムの解明とともに、ひび割れ進展に影響する要因を幅広く検討するため、鉄筋腐食によるかぶりの剥離・剥落挙動を再現可能な解析手法の構築が望まれる。

そこで本研究では、鉄筋腐食によるひび割れ進展を明確に再現できる剛体バネモデル (RBSM) <sup>4)</sup>を用いた腐食解析と剥離解析を統合させることにより、鉄筋腐食による剥離解析手法の構築を行った。構築した解析手法を用いて、かぶりを変化させた供試体モデルに対し、腐食の程度に応じたコンクリートの剥離挙動を評価し、剥離強度に影響する要因について検討を行うとともに、剥落リスクについて考察を行った。

## 2. 解析手法

### 2.1 RBSM

本研究では、コンクリート部材をボロノイ分割によってランダムな形状を有する剛体要素に分割し、各要素をバネでつなぐRBSMを用いて解析を行った。RBSMは隣接する要素間の相対距離によってひび割れ幅を直接計算することが可能である。各要素重心には6自由度の剛体変位を設定し、要素境界面上には図-1に示すように表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には垂直バネ1つとせん断バネ2つが配置されており、これによって回転バネの非線形挙動に相当する抵抗特性を再現できる。コンクリートの構成モデルの詳細は割愛するが、既往の文献<sup>4)</sup>を参照していただきたい。

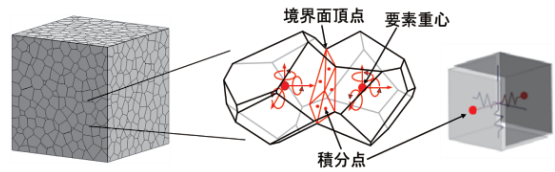


図-1 ボロノイ分割と要素境界面

### 2.2 解析フロー

本研究で構築した解析手法は腐食解析と剥離解析で構成される。図-2に本解析手法の概要図を示す。腐食解析により、腐食膨張圧によって生じる内部ひび割れや表面ひび割れの性状を評価する。そのうち、剥離解析によって剥離挙動の解析を行う。剥離解析では、剥離強度の評価および荷重によるひび割れの進展等を評価する。

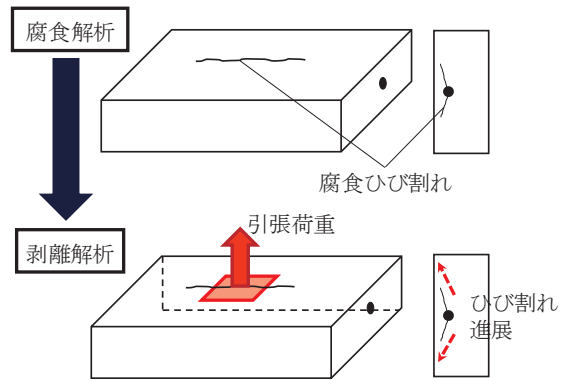


図-2 解析手法の概要

### 2.3 腐食解析

本研究では、Khoaらによって開発された鉄筋腐食解析手法を用いた<sup>5)</sup>。鉄筋コンクリート供試体は図-3のように鉄筋、腐食生成物、コンクリートの3層の材料モデルによって構成され、腐食生成物層と鉄筋要素境界面上に配置されている垂直バネに自由膨張ひずみを初期ひずみとして作用させることで腐食膨張をモデル化し、腐食ひび割れを発生、進展させている。また、ひび割れの発生に伴う、かぶり面側の鉄筋腐食が促進される現象を考慮するため、鉄筋表面に幅0.1mm以上の鉛直ひび割れが発生したのち、図-4のように腐食膨張圧はかぶり面側90°の鉄筋周上に導入されるモデルとした。なお、本解析では腐食生成物のかぶり面方向の浸透を考慮した腐食膨張圧の低減を行っている。

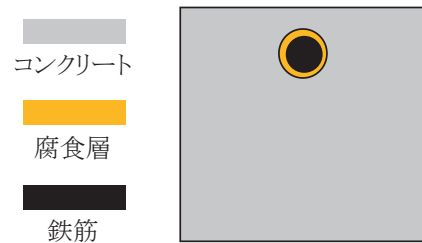


図-3 鉄筋コンクリートモデル

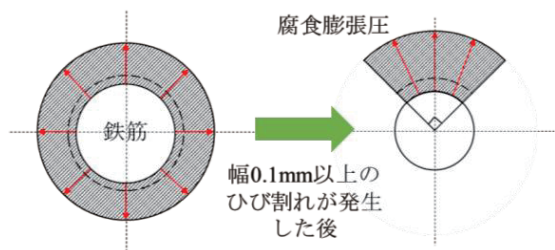


図-4 鉄筋周上の腐食膨張圧の集中

### 2.4 剥離解析

剥離解析では、腐食鉄筋上面のコンクリート表面に荷重を作用させて行った。荷重は任意の領域のコンクリート要素を上向きに変位制御することにより荷重した。荷重値は制御要素に作用する鉛直方向の力の和、変位は制御要素の変位の平均として出力し、剥離強度は荷重-変位関係における荷重の最大値とした。また、供試体断面の応力分布から、荷重に対して抵抗する位置や、かぶりの変形状態から、剥落の可能性のあるかぶりの大きさを推定することができる。

### 3. 腐食進展時および剥離進展時における内部損傷評価

#### 3.1 解析モデル

本研究では、平面的に広がりのある床版内の鉄筋が腐食した場合を想定し、供試体側面の腐食ひび割れ進展への影響を小さくするため、供試体モデルの幅を1000mmと十分大きくした(図-5)。また、厚さは道路橋床版を対象として200mmとした。剥離挙動に対する水平ひび割れの影響を主に検討するため、二次元的なひび割れ進展となるように供試体の奥行きは50mmと短くし、奥行き方向に様な腐食ひび割れが生じるように鉄筋には様な膨張圧を作用させた。コンクリート中には、直径19mmの鉄筋要素をかぶり15mm, 30mm, 45mmの位置に配置した。

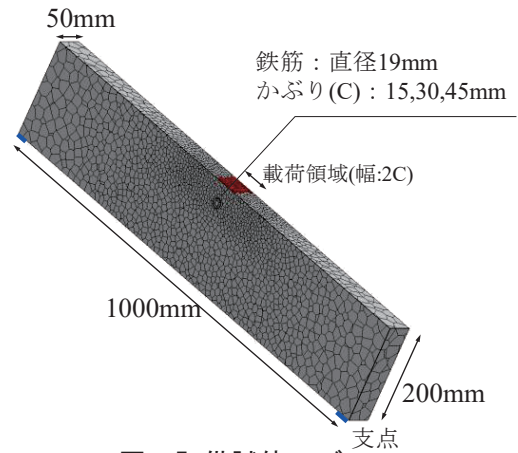


図-5 供試体モデル

既往の研究<sup>1)</sup>により提案されたひび割れパターンの分類によると、本解析モデルのかぶり15mmの場合には剥離ひび割れのモードとなることから、本研究では剥離解析における荷重領域を決定する際、剥離ひび割れが鉄筋からかぶり面に向かって斜め上方に45°の角度で進展すると仮定し、かぶり厚さ2倍の供試体中央幅30mmの範囲を荷重領域とした。かぶり30mm, 45mmの場合についてはひび割れモードが異なると予想されるが、かぶり15mmの場合と同様にかぶりの2倍の供試体中央幅60mm, 90mmの範囲を荷重領域とした。また、支点の拘束による腐食ひび割れ進展への影響を小さくするため、図に示すように供試体両端部に幅20mmの支点を配置した。コンクリートの材料特性としては、圧縮強度を37.25MPa, 引張強度を2.05MPa, ヤング係数を $2.70 \times 10^4$ MPaとした。

#### 3.2 腐食進展過程での内部ひび割れと内部応力の評価

剥離挙動を正確に把握するためには、鉄筋腐食によるひび割れ進展を適切に評価する必要がある。本研究では腐食進展過程における内部ひび割れと内部応力状態について検討を行い、剥離解析における荷重によるひび割れ進展に及ぼす影響について検討した。

図-6に各かぶりの供試体の腐食率1, 5, 15%時点における内部ひび割れおよび内部の鉛直方向引張応力分布を示す。図-6中における青色部分には引張応力は発生しておらず、対して赤色の部分にはコンクリートの引張強度程度の大きな応力が作用していることを表している。かぶりが小さい15mmの場合では、ひび割れがかぶり面へ進展し、剥離ひび割れモードとなっていることが確認できる。また、内部ひび割れの端部に腐食膨張圧による鉛直応力が集中しており、腐食が15%程度まで進行してもコンクリート内部に応力が集中していることが分かる。かぶり30mmの場合、内部ひび割れは水平方向に供試体側面方向へ進展しているが、かぶり15mmの場合と同様にひび割れ端部に応力が集中し

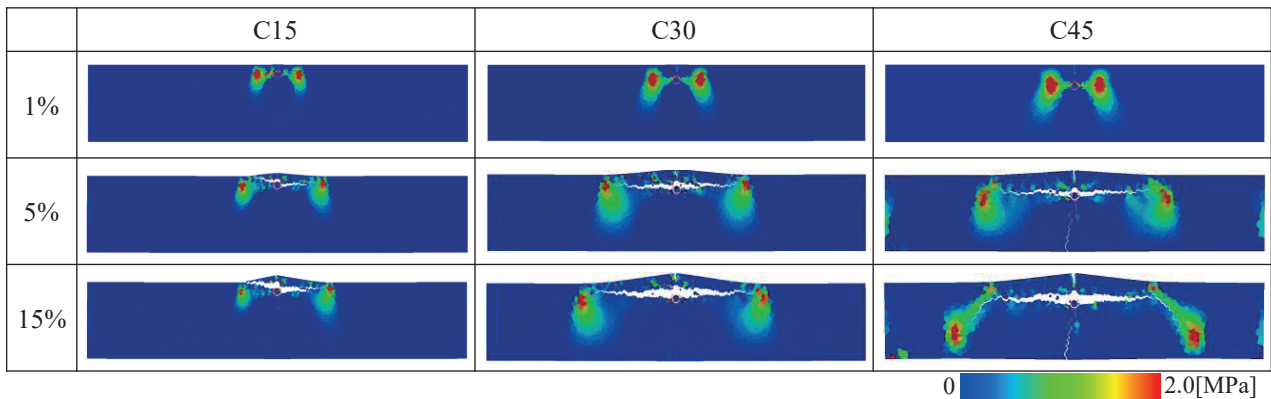


図-6 腐食解析における各かぶりの腐食ひび割れおよび鉛直方向引張応力分布

ている。かぶり45mmの場合では、腐食の進行に伴って内部ひび割れは水平方向からかぶり面と供試体底面の両方へ進展し、他のかぶりの場合と同様にひび割れ端部に応力が集中している。さらに、かぶりが45mmの場合では5.0%程度の腐食率で供試体底面から鉛直にひび割れが生じることが確認された。これは、かぶり面側に集中した膨張圧の反力が底面に伝わり生じたものと考えられる。

図-7にかぶり15mm, 30mm, 45mmの供試体に対する、腐食の進行に伴う水平ひび割れ長さの関係を示す。なお、水平ひび割れ長さは図-8に示すように鉄筋から0.1mm以上のひび割れ幅をもつ位置までの長さとした。水平ひび割れ長さは、同じ腐食量の場合もかぶり大きいほど長い傾向がみられる。また、いずれのかぶりにおいても水平ひび割れはひび割れ発生から腐食率5%までに急速に進展し、そののち、緩やかに進展を続ける挙動を示した。次に、図-9に腐食の進行に伴う鉄筋上方のコンクリート表面のひび割れ幅の変化を破線で、鉄筋側面位置の内部ひび割れの幅の変化を実線で示す。いずれのかぶりの場合においても、腐食量2%以上になると内部ひび割れは表面ひび割れよりも大きく開き、腐食量に概ね比例して増加している。水平ひび割れ長さは腐食率5%までに急速に進展したのち、進展はゆるやかになるが、内部ひび割れ幅は増加を続けることから、ある程度まで水平ひび割れが進展したのちは、かぶりの浮きが進行する挙動へ変化することが解析的に示された。

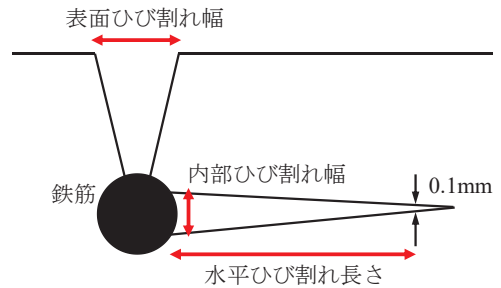


図-8 表面ひび割れ, 内部ひび割れ, 水平ひび割れ長さの定義図

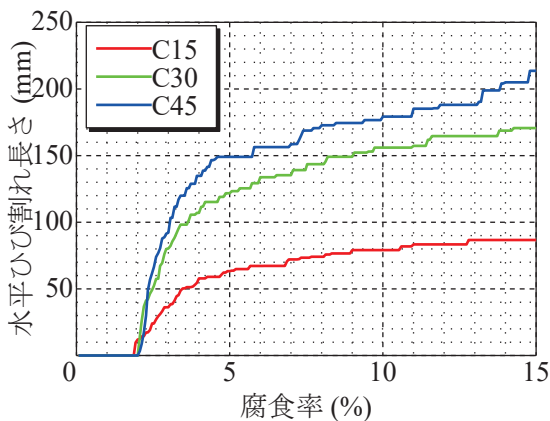


図-7 腐食に伴う水平ひび割れ長さの変化

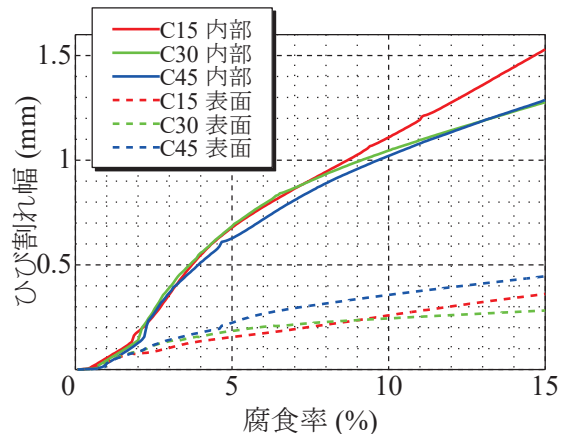


図-9 腐食に伴う表面, 内部ひび割れ幅の変化

### 3.3 剥離挙動の評価

3%, 5%, 10%, 15%の腐食解析を行ったのち、剥離解析を行った。それぞれのかぶりに対する荷重-変位関係を図-10~12に示す。荷重-変位関係において、変位0mmにおける荷重値が負として算出されているが、これは腐食解析によって生じた解析上の不平衡力による影響であると考えられる。なお、同一のかぶりであれば変位0mmにおける荷重値の絶対値は腐食率によらず同程度であった。いずれのかぶりの場合も0.1~0.2mmまで荷重が増加したのち、かぶり15mmと30mmでは荷重値は一定となり、かぶり45mmでは荷重が低下する挙動が見られた。また、3つの図を比較すると、かぶり大きいほど剥離強度は大きくなる傾向が見られる。さらに、腐食の程度が剥離強度に及ぼす影響に注目すると、かぶり45mmの場合、腐食率3%以上では剥離強度が低下する傾向が見られたが、かぶり15mmと30mmの場合では、腐食率の増加に伴い内部の損傷が広がっているにもかかわらず、腐食率3%以上で剥離強度に大きな差は見られなかった。剥離解析時の変形や応力状態の一例として、かぶり30mm、腐食率3%の供試体において、腐食率が3%に到達した時点、載荷後、変位が0.1mm, 0.5mm, 1.0mmに達

したそれぞれの時点での変形、鉛直方向の引張応力分布を図-13に示す。変形に注目すると、荷重によって腐食膨張で生じたひび割れが供試体側面方向に進展し、鉄筋側面位置の内部ひび割れの幅も大きくなる挙動が確認できる。また、応力分布に注目すると、荷重-変位関係において荷重が一定値となる変位0.1mm以降も水平ひび割れ端部には鉛直方向の引張力が集中し、ひび割れが進展しやすい状態であることが分かる。そのため、荷重が一定値となっている範囲では変形量によらず内部の応力状態は大きく変わらないことが確認された。

### 3.4 剥落リスクに対する考察

剥離解析では、荷重載荷後に小さな変位で剥離強度に達し、そののちは荷重が概ね一定となり、ひび割れ長さの進展やひび割れ幅の拡大が図-13に示したように確認された。そこで、かぶり30mm、腐食率3%の場合に対し、剥離解析での変位に対する表面ひび割れの幅の変化を破線で、内部ひび割れの幅の変化を実線で、荷重-変位関係を赤線で図-14に示す。変位0mm時点が腐食後の状態であり、腐食によって生じた表面ひび割れの幅は0.14mm、内部ひび割れの幅は0.39mmであった。それに対し、剥離解析による剥離強度時の表面ひび割れの幅は0.14mm、内部ひび割れの幅は0.50mmであった。剥離強度に至るまでの内部ひび割れの変形量は0.11mmであり、腐食によって生じた0.39mmの内部ひび割れと比較しても非常に小さい変形で剥離強度に達することが分かる。かぶり30mmの場合、腐食量によらず剥離荷重が同等であり、剥離荷重後の応力分布に大きな差がないことから、今回の解析では、3%以上の腐食が発生したのちは腐食量や変形量によらず同等の剥落の可能性があることを示唆している。また、変位に対する内部ひび割れの幅の増加に比べて表面ひび割れの幅の増加は非常に小さいことが分かる。このことから、剥離部に変形が生じていたとしても表面に現れるひび割れ幅の変化は小さいと推察され、目視による剥落の危険がある領域の発見が困難である可能性があることが示唆される。次に、剥離解析での変位に対する水平ひび割れ長さの変化を実線で、荷重-変位関係を赤線で図-15に示す。この図から、変位の増加に伴い水平ひび割れが進展し、変位1.0mm時点では腐食によるひび割れ長さの2倍程度まで進展してい

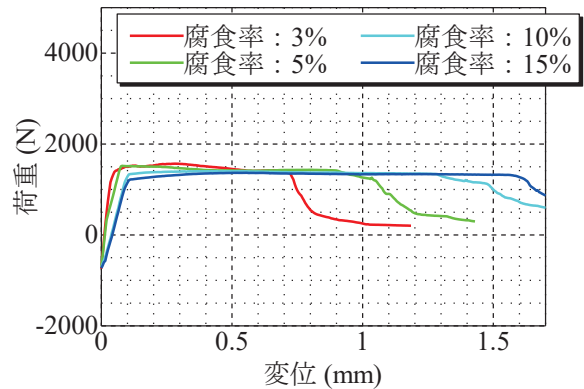


図-10 かぶり 15mm の荷重-変位関係

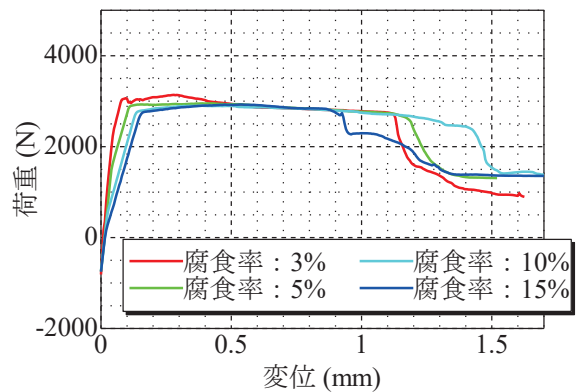


図-11 かぶり 30mm の荷重-変位関係

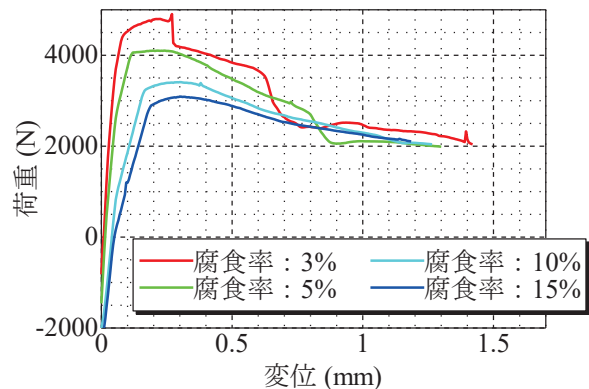


図-12 かぶり 45mm の荷重-変位関係

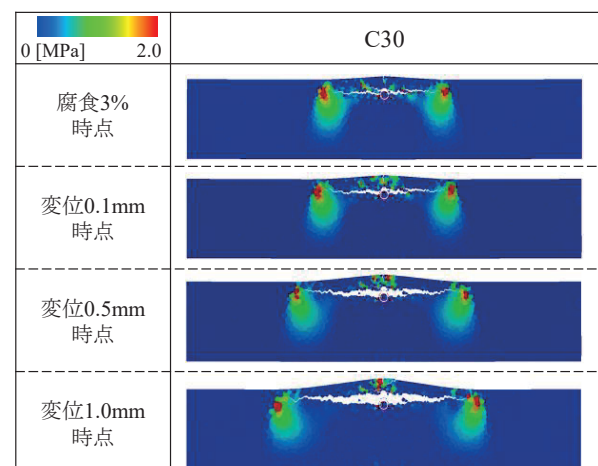


図-13 載荷時の鉛直方向引張応力分布

ることが分かる。すなわち、腐食によるひび割れが短い場合でも、かぶり面に変位が生じた場合、大きな領域で剥落が生じ、剥落リスクが大きくなることを示唆している。

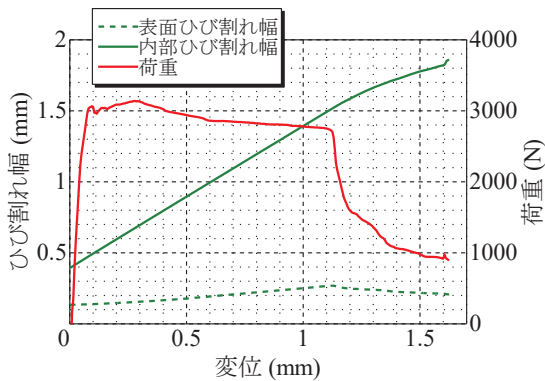


図-14 荷重による変位に対する表面、内部ひび割れ、荷重の関係

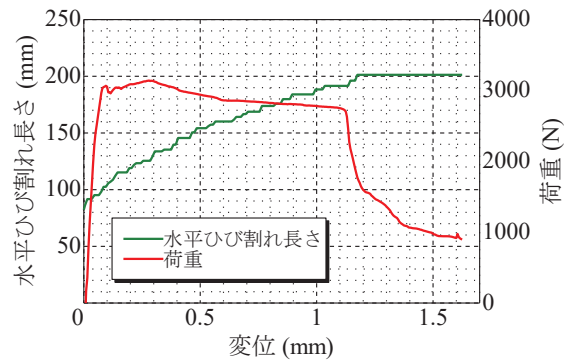


図-15 荷重による変位に対する水平ひび割れ長さ、荷重の関係

#### 4. 結論

二次元的なひび割れ進展を対象とした本研究によって得られた結論を以下に示す。

- 1) 剛体バネモデルを用いた腐食解析と剥離解析を統合させることにより、剥離挙動を再現可能な解析手法の構築を行った。
- 2) 構築した解析手法を用いて異なるかぶりを有する供試体を対象に腐食解析および剥離解析を行った。その結果、対象としたモデルでは0.1~0.2mmの小さな変位で剥離強度に至り、かぶりがいほど剥離強度は大きくなる傾向が確認された。かぶり15mmと30mmの場合では、3%以上の腐食が生じた場合、剥離強度に大きな差は見られなかった。
- 3) 剥離強度に達したのち、変位量が増加すると水平ひび割れ長さや内部ひび割れの幅は増加するが、内部応力状態は腐食量や変位量によらず同様であった。このことから、変位量の増加によって内部ひび割れの浮きの程度が異なっても、荷重によって剥離にいたる可能性は同等であるが、剥落の可能性のある領域は変位量によって変化することが示唆された。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(B)，課題番号18H01510）により行った。ここに記して謝意を表する。

#### 5. 参考文献

- 1) 堤知明，松島学，村上祐治，関博：腐食ひび割れの発生機構に関する研究，土木学会論文集，Vol.30，No.532，pp.159-166，1996
- 2) 河村圭亮・Tran Khoa Kim・中村光・国枝稔：鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.32，No.1，pp.1007-1012，2010
- 3) 藤井智大，大下英吉：腐食ひび割れが誘発したかぶりコンクリートの剥離・剥落に対する安全裕度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1033-1038，2017
- 4) Qiao D., Nakamura, H., Yamamoto Y., and Miura, T.: Geometric Parameters Relating Corrosion Penetration to Surface Crack Width, Proc. JCI, Vol.38, No.1, pp.1143-1148, 2016
- 5) Khoa, K. T., Nakamura, H., Kawamura, K., Kunieda, M.: Analysis of Crack Propagation Due to Rebar Corrosion Using RBSPM, Cement and Concrete Composites, Vol.33, pp.906-917, 2011