

論文 コンクリート破壊エネルギー $G_F$ 算出方法に関する研究高谷 哲<sup>\*1</sup>・荒木 弘祐<sup>\*2</sup>・服部 篤史<sup>\*3</sup>・宮川 豊章<sup>\*4</sup>

要旨：コンクリートの破壊エネルギーである  $G_F$  の算出方法は CEB や土木学会などでも規定されているが、その精度向上には課題を残している。 $G_F$  は単位面積当たりのひび割れを進展させるために必要なエネルギーであると考えられる。そこで、ひび割れ進展エネルギーをひび割れ面積で除すことにより  $G_F$  を算出する手法を検討した。また、鉄筋腐食によるコンクリート内部ひび割れの進展を予測する手法への  $G_F$  の応用を試みた。その結果、ひび割れ進展エネルギーをひび割れ面積で除すことにより  $G_F$  を算出できること、 $G_F$  を用いて鉄筋腐食ひび割れの予測ができる可能性があることが明らかになった。

キーワード： $G_F$ 、鉄筋腐食、膨張圧、エネルギー

## 1. はじめに

コンクリート中に塩化物イオンが浸透したり、中性化によりコンクリートの pH が低下したりすると内部の鉄筋が腐食する。内部鉄筋の腐食初期における腐食速度や劣化予測に対しては多くの研究が進められ、メカニズムも明らかになりつつあるが、加速期～劣化期にかけてのメカニズムは未だ不明確な部分が多い。鉄筋腐食によるひび割れの発生は劣化進行の加速や美観・景観の点で問題となるだけでなく、ひび割れが進展し、かぶりコンクリートが剥落すると第三者被害が生じる恐れもある。したがって、ひび割れの発生・進展の予測の精度向上を図る必要がある。そこで本研究では、鉄筋腐食により生じる膨張圧がかぶりコンクリートへのひび割れを引き起こし、剥落を生じさせるまでのメカニズムをモデル化した実験を行い、ひび割れ面積およびひび割れ進展エネルギーを求めることにより、コンクリートの破壊特性の一つであるコンクリート破壊エネルギー $G_F$ を算出する手法の開発・提案を行うことを目的として実験を行った。また、 $G_F$ を用いてひび割れ進展を予測する

手法や鉄筋腐食膨張圧により内部に発生する応力を求める手法について検討した。

## 2. 既往の研究

筆者らは供試体に挿入した弾性体を人工的に膨張させることにより鉄筋腐食を模擬する実験を行い、鉄筋腐食により発生する腐食膨張圧と模擬鉄筋の膨張した半径と元半径の差（以下、半径変化量）の相関性を報告している<sup>3), 4), 5)</sup>。この実験では、図-1のように、 $\phi 26\text{mm}$ 、長さ300mmの円柱空洞を有した150×150×400(mm)のコンクリート角柱の内部に $\phi 26\text{mm}$ 、長さ200mmの弾性体を挿入した供試体を作製し、かぶりを変化させて実験を行った。弾性体は摩擦

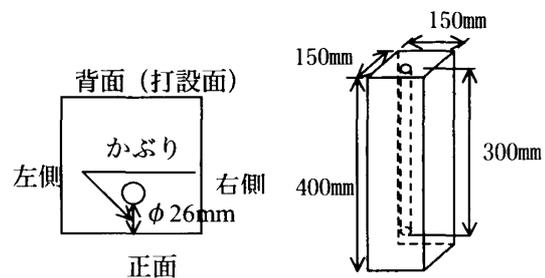


図-1 供試体寸法

\*1 京都大学 大学院工学研究科 (正会員)

\*2 西日本旅客鉄道 施設部 (正会員)

\*3 京都大学 大学院工学研究科 助教授 (正会員)

\*4 京都大学 大学院工学研究科 教授 (正会員)

を軽減するために、表面に十分な油を塗布し、あらかじめ供試体に設けていた円柱空洞内に挿入した。弾性体を完全に挿入した後、実験を開始し、実験では、図-2のような方法で弾性体に鉛直変位を加え、この変位と鉛直荷重を測定した。得られた鉛直変位と鉛直荷重の関係の代表例を図-3に示す。この鉛直変位と鉛直荷重は、下記の式<sup>4)</sup>を用いて、円柱空洞内壁に作用する圧力  $p_i$  (以下、内圧) と半径変化量  $dr$  に変換することができる。

$$p_i = \frac{\nu E}{\nu - 1} \left( \frac{dL}{L} - \frac{P}{Er_1^2 \pi} \right) \quad (1)$$

$$dr = \frac{\nu \cdot dL \cdot r_1}{L} \quad (2)$$

ただし、 $P$ : 鉛直荷重 (kN),  $dL$ : 鉛直変位,  $E$ : 弾性体のヤング係数 ( $N/mm^2$ ),  $\nu$ : 弾性体のポアソン比,  $L$ : 弾性体元長 (mm),  $r_1$ : 弾性体元半径 (mm) とする。

実験結果から、かぶりが大きくなるにつれて、線形の関係で最大内圧が大きくなることや、最大内圧を発生させる半径変化量がかぶりに因らず一定であること、また厚肉円筒理論<sup>6)</sup>と低減係数を用いて最大内圧を推定することが可能であることが明らかとなった。

### 3. エネルギー算出理論

図-3に示す鉛直変位と鉛直荷重の関係から、系全体に与えられたエネルギー ( $U$ :  $kN \cdot mm$ ) は面積積分で表され、下記の式で計算できる。

$$U = \sum_j \frac{(dL_{j+1} - dL_j)(P_j + P_{j+1})}{2} \quad (3)$$

系全体に与えられたエネルギーは弾性体に蓄積されたエネルギー ( $U_E$ ) と、コンクリートに蓄積されるエネルギー ( $U_C$ ) に分割されると考えられる。 $U_E$  と  $U_C$  は式 (1), (2) を用いて、下記の式で表される。

$$U_E = \sum_j \frac{E}{2L} \cdot \Delta A_{1j} \cdot \Delta dL_j^2 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

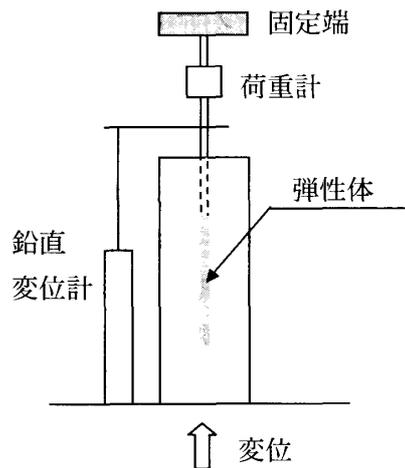


図-2 実験方法

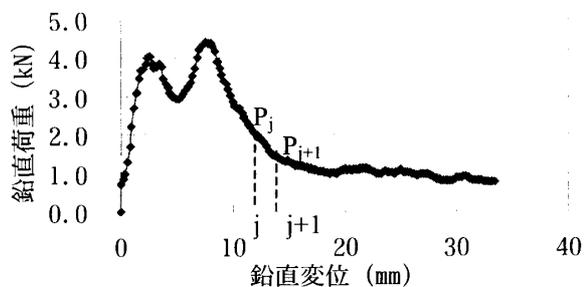


図-3 鉛直変位-鉛直荷重関係

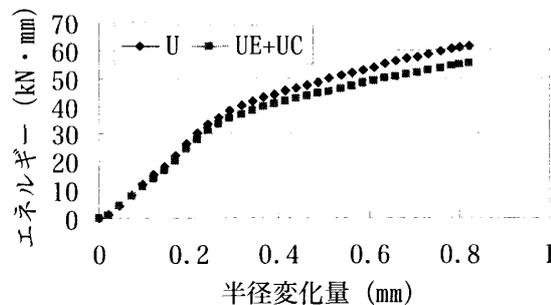


図-4 エネルギー算出結果

$$U_C = \sum_j \frac{1}{2} (p_{ij} + p_{ij+1}) \cdot \Delta dr_j \cdot u_j \quad (5)$$

$$\Delta A_{1j} = A_{1j+1} - A_{1j} \quad (6)$$

$$A_{1j} = \pi \cdot (r_1 + dr_j)^2 \quad (7)$$

$$\Delta dL_j = dL_{j+1} - dL_j \quad (8)$$

$$\Delta dr_j = dr_{j+1} - dr_j \quad (9)$$

$$u_j = 2\pi(r_i + dr_j)(L - dL_j) \quad (10)$$

ただし、 $A_{ij}$ : 弾性体断面積 ( $\text{mm}^2$ )、 $u_j$ : 弾性体周面積 ( $\text{mm}^2$ ) とする。

図-3に示される実験結果を上記の算出手法で整理したものを図-4に示す。図-4を見ると、半径変化量が小さな領域では、系全体に与えられたエネルギーと弾性体およびコンクリートに蓄積されるエネルギーの和が一致していることがわかるが、半径変化量が大きくなると、この二つが乖離している。ここで、 $U$  と  $U_E + U_C$  の差を  $U_S$  とする。図-1, 2で示した実験では、最終的に供試体は表面にひび割れを生じて破壊することから、この  $U_S$  の主たる部分はコンクリートのひび割れにより消費・消散されるエネルギーであると推測される。

CEB では単位面積あたりのひび割れ進展に必要なエネルギーを  $G_F$  と規定している<sup>1)</sup>。本論における  $U_S$  は  $G_F$  と相関があると考えられ、 $U_S$  をひび割れ面積で除すことにより  $G_F$  を求めることができる可能性がある。このことから、図-1の実験供試体を再度作製し、同様の実験方法により、エネルギーの関係図とひび割れ面積を得て本論における  $G_F$  を算出し、土木学会や CEB により規定されている方法によって求めた  $G_F$  との比較を行うことにした。

## 4. 実験概要

### 4.1 载荷方法

作製した供試体寸法は上述と同様(図-1)とした。筆者らの実験では、ひび割れ発生パターンや、鉛直荷重・鉛直変位の関係がかぶり30mmの場合に最も結果のばらつきが小さかったことから、本研究ではかぶりを30mmに統一した。また、円柱空洞直径はD19の公称直径(19.1mm)を模擬し20mmとした。実験は前回と同様の方法で行い、弾性体の膨張は鉛直変位で制御し、その速度は0.20mm/20secとした。測

定項目は鉛直荷重と鉛直変位とした。鉛直荷重が最大となった時点で円柱空洞からコンクリート表面にひび割れが貫通することから、载荷は最大荷重が得られた時点で終了した。なお、本実験で作製したコンクリートの力学特性は、圧縮強度:  $38.5\text{N/mm}^2$ 、割裂引張強度:  $3.9\text{N/mm}^2$ 、弾性係数:  $3.81 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比: 0.18であった。

### 4.2 ひび割れ面積測定方法

载荷終了後、発生したひび割れの閉塞を防ぐため、鉛直変位を保持し、染料を注入した。染料は円柱空洞上部から半径変化量により生じた間隙を通じて重力注入した。表面ひび割れからの流出により染料が十分に浸透したことを確認した後、染料注入をやめ、供試体をコンクリートカッターで横方向に50mm間隔で切断した。写真-1にスライス片の代表例を示す。スライス片の番号は図-5のように設けた。その後、各スライス片の両面のひび割れを6~7分割して直線を用いて近似し、各直線長さの合計をスライス片面のひび割れ長さとした。スライスのひび割れ面積は(両面のひび割れ長さの平均: mm) × (スライス片の厚さ: 50mm)

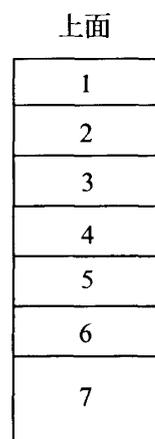
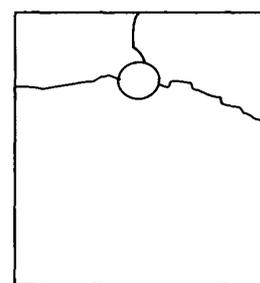


図-5 スライス片番号



写真



トレース図

写真-1 染料浸透の様子

とした。ただし、最下面のスライス片については、厚さ 50mm に切断することが困難であったため、ひび割れ深さを測定し、(ひび割れ長さ：mm) × (ひび割れ深さ：mm) をひび割れ面積 (mm<sup>2</sup>) とした。スライス片 2 と 7 では、ひび割れ深さは、スライス片側面の染料浸透長さとした。

5. 実験結果・考察

5.1 エネルギー算出結果

弾性体のヤング係数：1.39kN/mm<sup>2</sup>，ポアソン比：0.49，元長：200mm，元半径：10mm，および本実験から得られた鉛直荷重と鉛直変位を式 (1) ～式 (10) に代入し，エネルギーを算出した結果，図-6 のようになった。

5.2 ひび割れ面積算出結果

供試体を切断した後のスライス片における染料浸透を確認したところ，可視ひび割れには十分な浸透が確認され，不可視ひび割れにも染料の浸透が見られたことから，ひび割れへの染料の浸透には問題がなかったと判断し，着色部の長さをひび割れ長さとした (写真-1)。測定されたひび割れ長さ (mm) および推定したひび割れ面積 (mm<sup>2</sup>) を表-1 に示す。

5.3 G<sub>F</sub> 算出結果

(1) 本実験における G<sub>F</sub> の算出結果

算出された最大荷重時のエネルギー U，U<sub>E</sub> + U<sub>C</sub> およびひび割れ面積から G<sub>F</sub> (N/m) を算出した結果を表-2 に示す。本実験手法により得られた G<sub>F</sub> の平均：78.6，標準偏差：19.6 であった。

なお，CEB および土木学会ではそれぞれ以下の式により G<sub>F</sub> を算出しているのので，本実験結果との比較検討を行った。

(2) CEB による算出方法<sup>1)</sup>

$$G_F = G_{F0} \left\{ (f_{ck} + \Delta f) / f_{cm0} \right\}^{0.7} \quad (11)$$

ここで，f<sub>ck</sub>：設計圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)，Δf：8 N/mm<sup>2</sup>，f<sub>cm0</sub>：10 N/mm<sup>2</sup> とする。また，G<sub>F0</sub> は最大骨材寸法に依存する係数で最大骨材寸法 16mm の時 G<sub>F0</sub>：0.030 である。

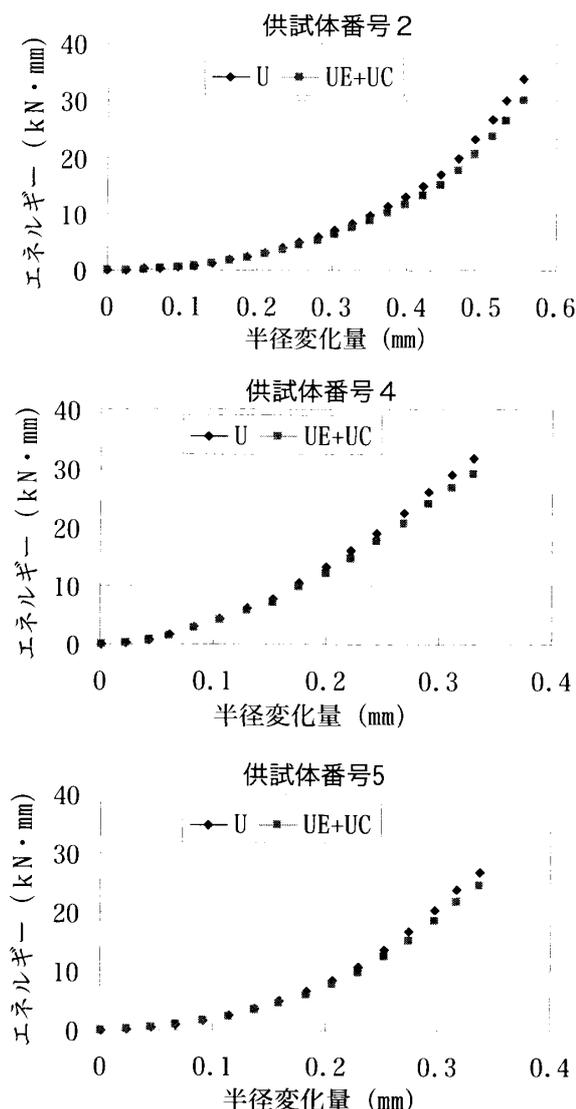


図-6 本実験におけるエネルギー算出結果

表-1 ひび割れ面積算出結果

| スライス片 | 供試体番号(ひび割れ長さ) |       |       |       |       |
|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|
|       | 1             | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 1上    | 0             | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 1下    | 0             | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 2上    | 0             | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 2下    | 182           | 163   | 120   | 138   | 147   |
| 3上    | 204           | 172   | 130   | 165   | 162   |
| 3下    | 196           | 132   | 184   | 171   | 165   |
| 4上    | 204           | 135   | 180   | 164   | 160   |
| 4下    | 210           | 141   | 198   | 149   | 180   |
| 5上    | 191           | 136   | 209   | 146   | 175   |
| 5下    | 190           | 113   | 163   | 132   | 149   |
| 6上    | 219           | 123   | 158   | 134   | 145   |
| 6下    | 119           | 103   | 140   | 127   | 139   |
| 7上    | 119           | 116   | 135   | 101   | 95    |
| 7下    | 0             | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 面積    | 45136         | 34334 | 42450 | 35372 | 38685 |

単位 長さ：mm，面積：mm<sup>2</sup>

CEBの方法により算出した結果を表-2に示す。

(3) 土木学会による算出方法<sup>2)</sup>

$$G_F = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (12)$$

ここで、 $d_{max}$  (mm) : 骨材最大寸法、 $f_{ck}$  : 設計圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) とする。

土木学会の方法により算出した結果を表-2に示す。

#### 5.4 考察

本実験における  $G_F$  算出結果と CEB および土木学会の方法により算出した  $G_F$  を比較すると、概ね整合性があると考えられる。しかし、標準偏差を考えると、精度は十分ではない。この理由として、供試体別のコンクリート強度のばらつきによる誤差と測定による誤差の影響が考えられる。測定誤差の中で最も大きいと考えられるのが、ひび割れ面積測定における誤差である。本実験手法においては、各スライス断面上下 (例えばスライス片4下とスライス片5上) のひび割れ長さは一致しなければならないが、表-1を見ると切断面上下においてひび割れ長さが一致していないものが多い。そこで、ひび割れ面積が最大となるように測定ひび割れ長さを選択したもの (例えばスライス片2下:182mmとスライス片3上:204mmの場合、3上を最長ひび割れ長さとして設定) とその逆 (最小面積) を算出し、それぞれ  $G_F$  (min) と  $G_F$  (max) として実験結果と比較することにした。表-3にその結果を示す。ひび割れ面積測定の最大・最小値よりそれぞれ求めた  $G_F$  は、平均値から求めた  $G_F$  と最大 5.5%、平均 4.1%の差があった。

算出した  $G_F$  のうち、最も平均値との差が大きい供試体 No.2 の値の平均値との差は 46% であり、この内ひび割れ面積測定による誤差が 3.5% であるとしても、他の要因による誤差が 42.5% 含まれている。図-6を見ると、供試体 No.2 の最大荷重時の半径変化量が他の供試体供試体よりも大きいことが分かる。このことから、No.2 は供試体ごとの誤差が顕著に現われたのものであり、

表-2  $G_F$  算出結果

|                  | 供試体番号 |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| U                | 30.68 | 33.15 | 33.33 | 31.72 | 26.87 |
| UE+UC            | 27.94 | 29.3  | 30    | 29.01 | 24.47 |
| US               | 2.74  | 3.95  | 3.34  | 2.71  | 2.40  |
| 面積               | 45136 | 34394 | 42450 | 35372 | 38685 |
| GF               | 60.8  | 115   | 78.5  | 76.6  | 62.1  |
| CEBの規定により算出したGF  |       |       |       |       | 77.1  |
| 土木学会の規定により算出したGF |       |       |       |       | 71.1  |

単位 U<sub>S</sub> : kN・mm, 面積 : mm<sup>2</sup>, G<sub>F</sub> : N/m

表-3 面積測定による  $G_F$  の誤差

|          | 供試体番号 |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| US       | 2.74  | 3.95  | 3.34  | 2.71  | 2.40  |
| 最大面積     | 47086 | 35394 | 43400 | 36919 | 40862 |
| 最小面積     | 43186 | 33277 | 41575 | 33747 | 36860 |
| GF (min) | 58.2  | 112   | 76.9  | 73.4  | 58.7  |
| GF (max) | 63.4  | 119   | 80.3  | 80.3  | 65.1  |
| GF       | 60.8  | 115   | 78.5  | 76.6  | 62.1  |
| 誤差       | 4.3   | 3.5   | 2.3   | 4.8   | 5.5   |

単位 U : kN・mm, 面積 : mm<sup>2</sup>, G<sub>F</sub> : N/m, 誤差 : %

その原因はコンクリートの圧縮強度や応力-ひずみ関係等の物性値によるものと推定される。供試体 No.2 を除いた残りの  $G_F$  算出結果の平均は 69.5 であった。この時の誤差は約 10% となる。CEB<sup>1)</sup> では最大 30% 程度、土木学会<sup>7)</sup> では最大約 100% の誤差があることや、ひび割れ面積測定誤差を考慮すると、よい精度で  $G_F$  を算出できていると考えられる。

本実験手法を用いた  $G_F$  算出方法の特徴は、算出された  $G_F$  から、腐食ひび割れ面積を算出できることである。本論における U<sub>S</sub> はかぶりやコンクリート強度、円柱空洞径や膨脹圧導入長さによって異なると考えられる。そこで、2章で説明している  $\phi 26$  の実験の結果からも U<sub>S</sub> を算出した。これを表-4に示す。表-4の U<sub>S</sub> をかぶりごとにグラフ化すると図-7が得られた。この図から、かぶりが U<sub>S</sub> に影響し、U<sub>S</sub> はかぶりをパラメータとして指数関数で近似できることが分かった。G<sub>F</sub> はかぶりによらないので、算出した U<sub>S</sub> を本論で得られた G<sub>F</sub> で除し、ひび割れ面積を算出したものも表-4に示す。既報では、半径変化量と内圧の関係を得ることを主眼とし、実験を行ったため、ひび割れ面積のデータが存

表-4 かぶりによる  $U_S$ 、ひび割れ面積の違い

| かぶり | 供試体番号 (US算出結果) |      |      |      | US平均 | GF (設定値) | 面積    |
|-----|----------------|------|------|------|------|----------|-------|
|     | 1              | 2    | 3    | 4    |      |          |       |
| 10  | 0.82           | 0.68 | 0.50 | 0.68 | 0.67 | 78.6     | 8534  |
| 15  | 0.88           | 0.89 | 0.65 | 0.72 | 0.79 | 78.6     | 9987  |
| 20  | 0.74           | 1.11 | 0.73 | 1.57 | 1.04 | 78.6     | 13200 |
| 25  | 1.36           | 2.32 | 0.68 | 1.56 | 1.48 | 78.6     | 18830 |
| 30  | 2.00           | 1.73 | 1.77 | 2.33 | 1.96 | 78.6     | 24905 |
| 35  | 2.75           | 3.75 | 2.13 | 2.04 | 2.67 | 78.6     | 33938 |

単位 かぶり：mm,  $U_S$ ：kN・mm,  $G_F$ ：N/m, 面積：mm<sup>2</sup>

在しないのが残念であるが、今後は、かぶりやコンクリート強度、円柱空洞径や膨張圧導入長さをパラメータとして、ひび割れ進展パターンの把握に努め、 $G_F$ を用いて腐食ひび割れの進展を推定する手法の開発に取り組む予定である。

## 6. 結論

- (1) ひび割れにより消費されるエネルギー ( $U_S$ ) をひび割れ面積で除すことにより  $G_F$  を算出することができる。
- (2) 本実験手法により得られた  $G_F$  は CEB や土木学会の規定で算出した  $G_F$  と概ね整合性があると考えられる。ひび割れ面積測定誤差から求めた本実験手法による  $G_F$  の算出誤差は4%程度であった。
- (3) 今後、かぶりやコンクリート強度ごとのひび割れ進展パターンを明確にできれば、本実験手法により得られた  $G_F$  を用いて、鉄筋腐食膨張圧により内部に発生するひび割れの進展予測を行うことができると考えられる。

## 参考文献

- 1) CEB: CEB-FIP MODEL CODE 1990, 1993, pp36-37
- 2) 土木学会 コンクリート委員会：2002 年制定コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 丸善, 第3版発行, pp.27
- 3) 高谷哲, 荒木弘祐, 服部篤史, 宮川豊章：弾

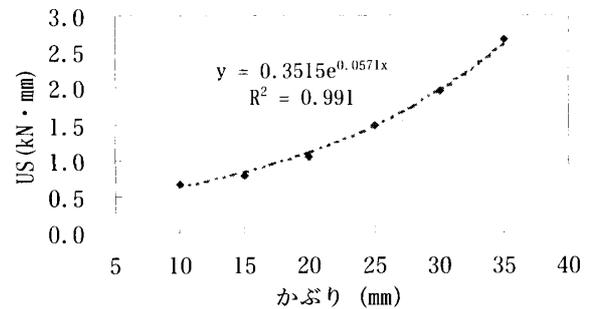


図-7 かぶりと  $U_S$  の関係

性体を用いた鉄筋腐食膨張圧モデル化の実験的検証, 土木学会年次講演会, 2004, 5-275

- 4) 荒木弘祐, 高谷哲, 服部篤史, 宮川豊章：コンクリート中の鉄筋腐食膨張圧のモデル化, 土木学会年次講演会, 2004, 5-277
- 5) 荒木弘祐, 高谷哲, 服部篤史, 宮川豊章：コンクリート中の鉄筋腐食膨張圧モデル化と実験・解析手法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 日本材料学会, 2004, pp.25-32
- 6) 清水篤磨：材料力学, 共立出版社, 1963
- 7) 土木学会：2002 年版 コンクリート標準示方書 改訂資料, pp.10