

鉄筋腐食により劣化した RC 部材の 動的付着特性の解明とそのモデル化に関する研究

路馳, 玉井宏樹, 園田佳巨
九州大学大学院工学府

概要：本研究では腐食鉄筋とコンクリート間の動的付着特性モデルを構築することを最終目標とし、その基礎研究として健全鉄筋を用いた RC 供試体に対する衝撃載荷実験を行った。今回行った実験より、衝撃荷重に伴う鉄筋の歪みは、載荷端に近いほど大きくなること、衝撃荷重下での付着応力における動的効果等の知見が得られた。

1. 研究の背景と目的

日本は地震などの自然災害が多いため、安全・安心な社会を実現または維持していくためには、社会基盤施設自体の適切な管理が重要であるといえる。一方で、経年劣化による社会基盤施設の老朽化が問題となっており、道路橋などの重要構造物のみならず、自然災害に対する防護構造物に対しても経年劣化に対する維持管理対策が重要であるといえる。このような背景を踏まえて、塩害等により劣化した鉄筋コンクリート（以降、RC と称す）構造物や部材の耐荷性能に関する研究は数多く実施されているが、そのほとんどは静的荷重を想定したものであり、地震動や衝撃などの動的荷重を対象とした研究はあまり多くなく、知見不足が否めない。塩害等で鉄筋腐食によって劣化した RC 部材に対する我々の既往の研究では、静的荷重下よりも衝撃荷重下の部材の性能低下は大きく、さらに衝撃荷重下にはかぶりコンクリートのはく落危険性を高めるなどの知見を得ていることを考えると、動的荷重下の部材の耐荷性能を適切に評価していくことは非常に重要であるといえる。

そこで、本研究では、鉄筋腐食により劣化した RC 構造物の耐荷性能を数値解析により定量的に評価していく上で重要項目の一つとして位置づけられる、コンクリートと鉄筋の付着特性に着目し、腐食により付着特性が如何に変わるかを明らかにし、腐食率と載荷速度に応じた付着特性の力学モデルを提案することが目的である。なお、本研究では基礎研究として、衝撃荷重下のコンクリートと健全な鉄筋の付着挙動を明らかにするために種々の実験を行った。

2. 供試体について

2.1 概要

今回の実験で使用した供試体を写真-2.1 に示す。供試体のコンクリートブロックの寸法は D13(SD345) 鉄筋を使用した供試体で $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 195\text{mm}$ 、D19(SD345)鉄筋を使用した供試体で $250\text{mm} \times 250\text{mm} \times 285\text{mm}$ である。図-2.1 に供試体鳥瞰図、図-2.2 に供試体断面図を示す。付着長は $12D$ (D は鉄筋径)、非定着長は載荷方向から $1D$ 、反対側に $2D$ 設けている。載荷方向の鉄筋の突出長は 15mm とした。また、本実験では載荷に伴うひずみを測定するために鉄筋のリブ部に裏表 5 か所、合計 10 枚のひずみゲージを貼りつけている。なお、ひずみゲージには図-2.2 に示すよう、番号を振っている。



写真-2.1 供試体

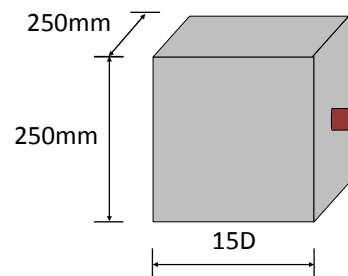


図-2.1 供試体鳥瞰図

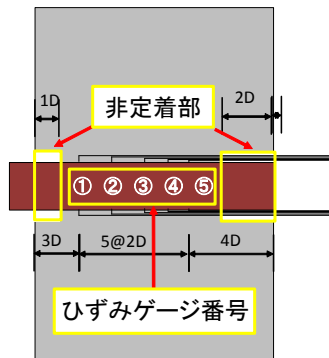


図-2.2 供試体断面図

2.2 ひずみゲージの貼り付け

今回の実験では極めて小さいひずみ量を測定する必要があったため、写真-2.2 に示す東京測器製のひずみゲージ (FLK-1-11) を使用した。破損しやすい製品のため、以下に示す手順で貼り付けを実施した。まず、鉄筋リブ部を 120 番、600 番の紙やすりで研磨したのち、表面をアセトンで洗浄し、コーティング剤が鉄筋全体に付着するのを防ぐため、リブ部以外に養生テープを貼り表面を保護した。次に、CN 接着剤を使用してひずみゲージを鉄筋に貼り付け (図-2.3)、SB テープで上からコーティングし、リード線を荷重方向とは反対側に伸ばした。(図-2.4) 荷重方向から順に、5 つのひずみゲージを貼り付けた後、さらに上からエポキシ樹脂を塗布し全体をコーティングした。(図-2.5) コーティング剤が硬化した後 (24 時間後)、養生テープを剥がし、リード線をプラスチックの袋にまとめいれて作業終了となる。(写真-2.3)

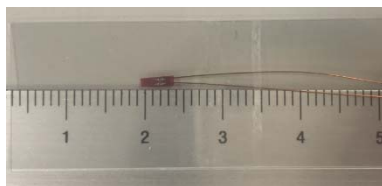


写真-2.2 ひずみゲージ(FLK-1-11)



図-2.3 ひずみゲージの貼り付け



図-2.4 SB テープによるコーティング



図-2.5 エポキシ樹脂によるコーティング



写真-2.3 完成した鉄筋

2.3 コンクリート及び鉄筋の材料強度

(1) コンクリート

コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108) および、コンクリートの静弾性係数試験方法 (JIS A 1149) に基づき¹⁾、供試体に使用したコンクリートの圧縮強度、引張強度、静弾性係数を測定した。測定結果を表-2.1 に示す。

(2) 鉄筋

供試体に使用した鉄筋 (D13,SD345)、(D19 SD345) の降伏応力、引張強度、静弾性係数を表-2.2 に示す。

表-2.1 コンクリートの材料強度

	圧縮強度 (Mpa)	引張強度 (MPa)	静弾性係 数(Gpa)
D13 供試体	49.2	2.39	35.7
D19 供試体	56.7	2.76	36.6

表-2.2 鉄筋の材料強度

	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
D13(SD345)	401	568
D19(SD345)	387	581

3 横衝撃載荷実験について

3.1 実験装置及び実験方法

(1) 実験装置

本衝撃実験では横衝撃載荷装置を使用した。この実験装置は質量 3kg、長さ 30cm の円柱状飛翔体に空気圧を用いて速度を与え、供試体に高速衝突させるものである。写真-3.1 に飛翔体、図-3.1 に本実験の概要図を示す。



写真-3.1 飛翔体

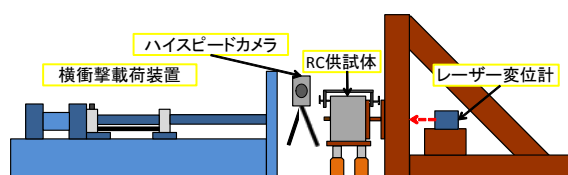


図-3.1 横衝撃載荷装置概要図

(2) 実験方法

写真-3.2 に本実験における器具の設置状況を示す。RC 供試体の鉄筋部が、飛翔体の衝突面中央と衝突するように、油圧ジャッキを 3 体用いて供試体を上昇させ、衝突による跳ね上がりを防止するために、万力を用いて供試体を反力フレームに固定した。衝突速度としては 10m/s, 15m/s, 20m/s, 25m/s を目標に空気を充填して載荷を行った。

3.2 実験ケース

横衝撃載荷実験の実験ケースを表-3.1 に示す。なお並行して D13 供試体を用いた静的載荷実験も行っている。

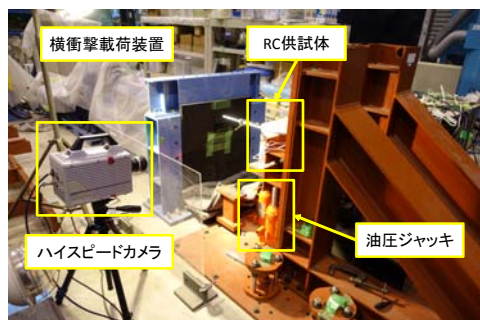


写真-3.2 実験器具設置状況

表-3.1 実験ケース

供試体名	衝突速度 (実測値 m/s)	(km/h)
D13-1-1	10.27	37.0
D13-1-2	13.81	49.7
D13-1-3	16.01	57.6
D13-1-4	17.88	64.4
D13-1-5	23.66	85.2

4 落錘式衝撃載荷実験について

4.1 実験装置及び実験方法

(1) 実験装置

本衝撃実験では、落錘式衝撃載荷装置を使用した。本実験装置は重錘を電磁石で吸着し、電源を OFF にすることで重錘を落下させるものである。試験装置にはガイドレールが備え付けら

れてあり、これにより、衝突時における重錘の偏心や移動を防止できている。

(2) 実験方法

図-3.2 に落錘式衝撃実験の概要図を、写真-3.3 に実験器具設置状況を示す。載荷条件はスパン 1000(mm) で重錘に取り付けたロードセルにより供試体中央鉄筋部への打撃を行うとともに衝撃力を測定した。なお、静的載荷実験と同様に、ロードセルと鉄筋の載荷端に安定した接触面を設けるために、長ネジ及びナットで接続した鉄板をロードセル下部に設置した。

4.2 実験ケース

落錘式衝撃実験の実験ケースを表-3.3 に示す。なお並行して D13 供試体を用いた静的載荷実験も行っている。

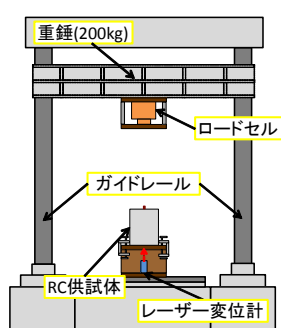


図-3.2

落錘式衝撃載荷装置
概要図



写真-3.3

実験器具設置状況

表-3.2 実験ケース

供試体名	衝突速度 (m/s)	(km/h)
D19-2-1	1	3.6
D19-2-2	1.5	5.4
D19-2-3	2	7.2
D19-2-4	2.5	9
D19-2-5	3	10.8

5 実験結果及び考察

5.1 ひずみ応答について

図-5.1 から図-5.4 に横衝撃載荷実験における載荷速度 13.81m/s, 16.01m/s, 17.88m/s, 23.66m/s の際のひずみ応答を、図-5.5 から図-5.8 に落錘式衝撃載荷実験における載荷速度 1m/s, 1.5m/s, 2m/s, 3m/s の際のひずみ応答を示す。また、各実験において最大速度で載荷した後の供試体を写真-5.1, 2 に示す。

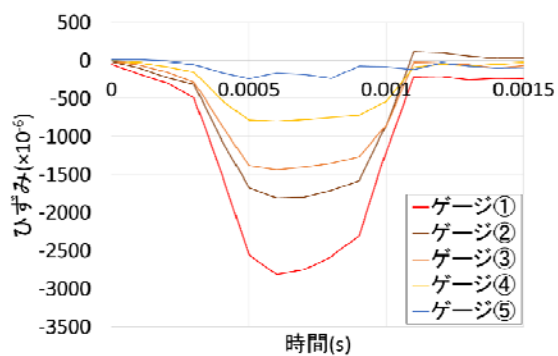


図-5.1 D13-1-2 (13.81m/s)

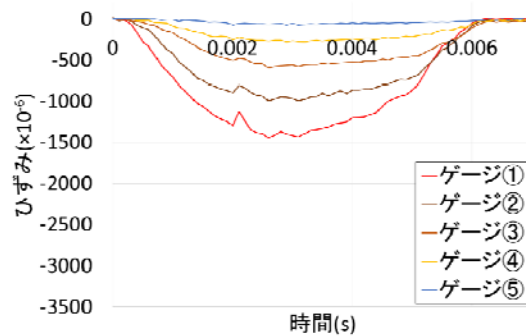


図-5.5 D19-2-1 (1m/s)

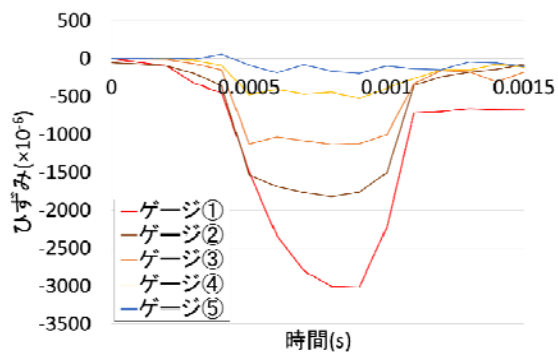


図-5.2 D13-1-3 (16.01m/s)

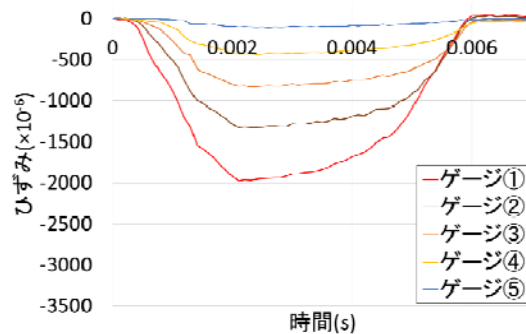


図-5.6 D19-2-2 (1.5m/s)

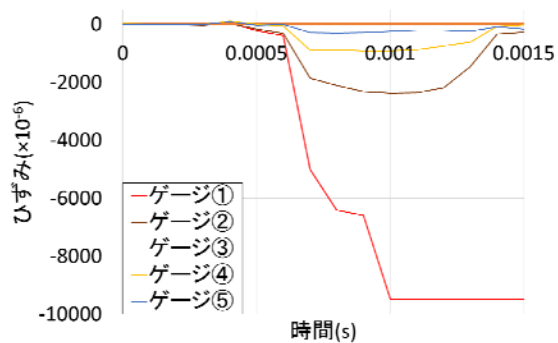


図-5.3 D13-1-4 (17.88m/s)

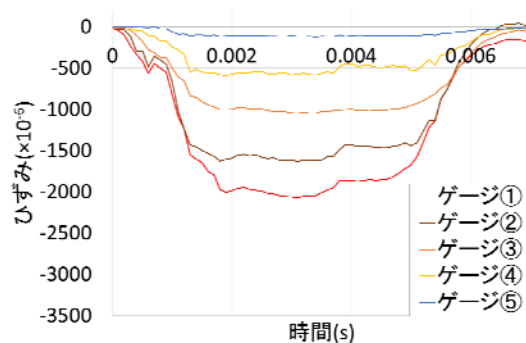


図-5.7 D19-2-3 (2m/s)

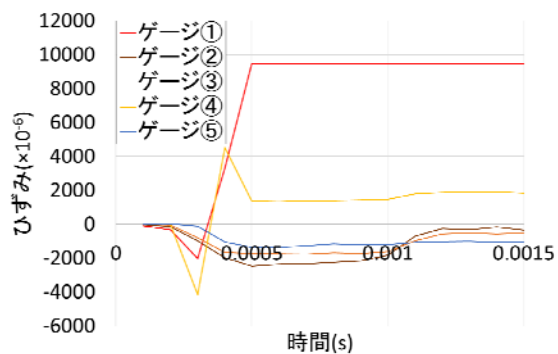


図-5.4 D13-1-5 (23.66m/s)

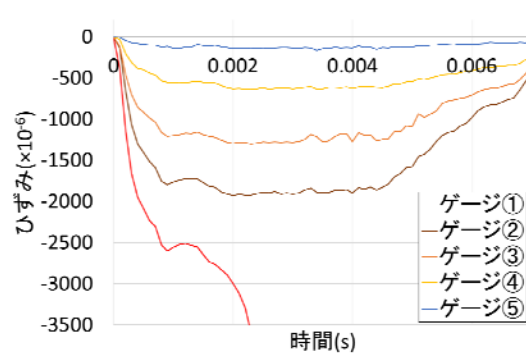


図-5.8 D19-2-5 (3m/s)



写真-5.1 D13-1-5 (23.66m/s)



写真-5.2 D19-2-5 (3m/s)

図-5.1 から図-5.8 より、両載荷実験において載荷端に近いゲージほど最大ひずみの値が大きくなり、衝突速度が大きくなるほど鉄筋のひずみが大きくなる事が確認できる。また、速度の増加に伴ってひずみ応答の傾きが大きくなっている事から、衝突速度の増加によって鉄筋の平均ひずみ速度も大きくなっていると言える。また、横衝撃載荷実験では載荷速度が 13.81m/s より大きい実験ケースにおいて、鉄筋に残留ひずみが生じていることから、載荷端近傍の鉄筋は塑性化していると推察でき、写真-5.1 において供試体鉄筋が中央から大きく傾いていることから、鉄筋の塑性化に伴い供試体には偏心荷重が生じたと考えられる。落錘式衝撃実験においても、載荷速度が 2m/s を超えると鉄筋の残留ひずみが確認できたが、写真-5.2 に示した実験後の供試体において、鉄筋の位置は載荷前とほとんど変化せず、落錘衝撃載荷実験の方が鉄筋の衝撃押し抜き試験の方法としては適していたことが考えられる。

5.2 鉄筋軸方向のひずみ分布について

載荷速度によってひずみ分布が異なる事を示すため、載荷端に最も近いゲージ①のひずみが同等の値になる時のひずみ分布を図-5.9,10 に示す。

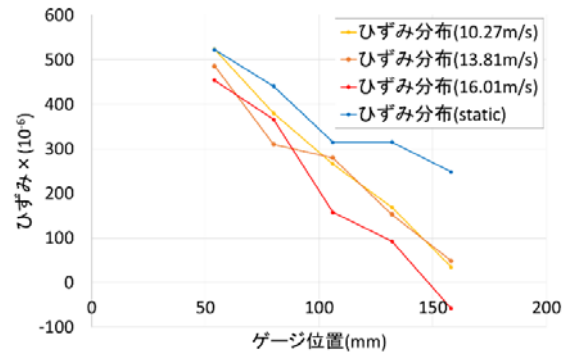


図-5.9 D13 ひずみ分布(ゲージ①≒500μ)

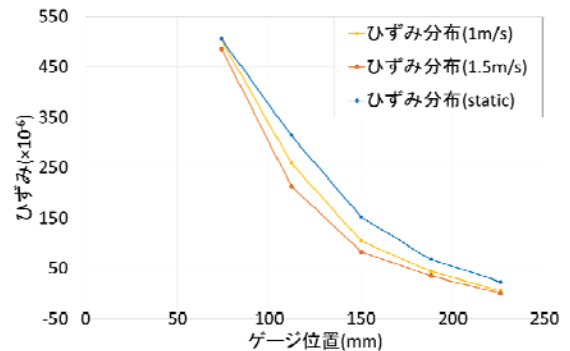


図-5.10 D19 ひずみ分布(ゲージ①≒500μ)

2 図より、静的荷重下のひずみの方が衝撃荷重下に比べて大きくなることが確認でき、定性的ではあるが両供試体共に、衝突速度が低速になるほどひずみ分布が静的荷重下の分布に近づくことが確認できる。このことから、低速での衝突ほど鉄筋内部の応力が自由端まで伝播していることが推察できる。

5.3 付着応力-すべり関係について

今回の実験結果を基に、衝撃荷重下における鉄筋のコンクリート間の付着応力-すべり関係について検討する。鉄筋に沿った各位置における局所付着応力は、その点におけるひずみ分布の傾きから、(式-5.1)を用いて算出でき、鉄筋に沿った各位置におけるすべりは、自由端からその位置までのひずみ分布曲線の積分値で求められるため、(式-5.2)を用いて求められる。²⁾

$$\tau = \frac{ED}{4} \times \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (\text{式-5.1})$$

E : ヤング率

D : 鉄筋直径

$\frac{d\varepsilon}{dx}$: ひずみ分布の各位置での傾き

$$S = \int \varepsilon dx \quad (\text{式-5.2})$$

図-5.11 に上記2式を用いて求めた落錘式衝撃実験における付着応力-すべり関係を、図-5.12 に静的荷重下における付着応力に対する、衝撃荷重下における付着応力の割合を示す。

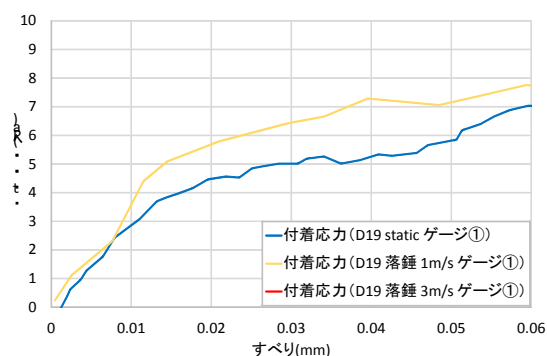


図-5.11 付着応力-すべり関係 (D19 落錘)

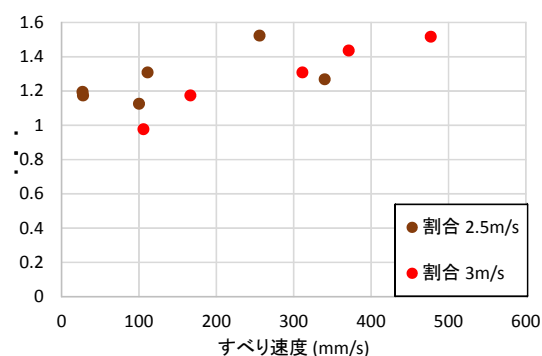


図-5.12 静的荷重下の付着応力に対するすべり速度毎の衝撃荷重下における付着応力割合

図-5.11 より、衝突速度の増加に伴って付着応力曲線が、付着応力の軸方向へ大きくなっていることが確認でき、図-5.12 から静的載荷時の付着応力に対する衝撃荷重下の付着応力のすべり速度毎の割合を見ると、概ね衝突荷重下における倍率は1倍を超えていることから、本実験において付着応力に対する動的効果の影響が確認できる。また、各点の分布は近似的ではあるが概ね縦軸1を始点としてすべり速度の増加に伴い右肩上がりに線形性を持って広がっていることから、すべり速度の増加に伴い、鉄筋とコンクリート間の付着力が増加する事が言え、衝撃荷重下における付着応力は、静的荷重下における付着応力をすべり速度を変数とした関数で倍することによって算出できることが予測可能であるといえる。

6 結論

本研究で得られた成果を以下に挙げる。

1) 両載荷実験において載荷端に近いゲージほど最大ひずみの値が大きくなり、衝突速度が大きくなるほど鉄筋のひずみが大きくなる事が確

認でき、速度の増加に伴ってひずみ応答の傾きが大きくなっていることから、衝突速度の増加によって鉄筋の平均ひずみ速度も大きくなっていると言える。また、偏心荷重の影響を考慮すると鉄筋の衝撃押し抜き試験としては落錘式衝撃載荷実験の方が適していることが明らかになった。

2) 実験結果より算出した付着応力-すべり関係から、衝突速度の増加に伴い付着応力曲線が鉄筋の軸方向へ大きくなっていることが確認でき、静的荷重下における付着応力との割合より、本実験において付着応力への動的効果を確認できた。さらに、衝撃荷重下における付着応力は、静的荷重下における付着応力をすべり速度を変数とした関数で倍することによって算出できることが予測可能できた。

3) 本実験から得られたデータは極めて分散しており、鉄筋とコンクリート間の動的付着特性を導くのは厳しく、当初の目標であった解析モデルの作成には至らなかった。今後の実験では本研究を踏まえ、偏心荷重の影響を低減させた、より再現性の高い実験方法を構築するとともに、動的付着解析モデルの作成を検討する。

謝辞

本実験は当研究室の原紘一朗さん、印逸凡さんの協力の下行いました。ここに深く感謝いたします。

また、本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協会による平成29年度「建設技術研究助成」による助成金交付により遂行したものである。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [標準編] JIS 規格書，2013
- 2) 石本陽一，島弘：鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係に及ぼす載荷速度の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.2, 1993