

論文

[2023] マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の定着破壊性状と破壊エネルギー

半田 昌博*1・大塚 浩司*2

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚部の軸方向鉄筋がマッシブなコンクリートフーチングの中に埋め込まれて定着されているような場合、その定着破壊は、かぶりが比較的小さい場合に一般に見られる割裂付着破壊ではなく、異形鉄筋の節間のコンクリートがせん断されて鉄筋が引き抜けるような破壊が多い。その際、フーチング上面に定着鉄筋の周りのコンクリートがコーン状に抜け出すことがある。このコーン状破壊は節間のせん断破壊と異なる破壊であり、条件によってはその規模がかなり大きくなることもある。したがって付着の設計施工においてこのような破壊を無視できない場合があると考えられる。

尾坂、大塚ら¹⁾は、このコーン状破壊について研究し、鉄筋の埋め込み長さがある長さより短い場合は鉄筋の最下部からコーン状破壊が生じ、埋め込み長さがそれより長くなればその途中からコーン状破壊が生じ、それより下部では節間のせん断破壊が生じることを明らかにし、そのコーン状破壊が生じる位置および破壊強度を求める式を提案している。また、複数本の鉄筋を定着する場合、鉄筋の間隔が小さいと群効果を生じ、コーンの発生する位置や定着強度が鉄筋単独の場合と非常に相違することを示している。

本研究は、上記研究と目的は同じであるが上記研究が主として終局時における定着強度と破壊形状に注目しているのに対して、内部ひびわれが発生し、さらに成長して定着破壊に至る過程に注目し、X線造影撮影法を用いてその過程を詳細に調べると共に鉄筋に与えた力と抜け出し変形の関係から破壊エネルギーを求め、破壊力学的見地から検討を加えたものである。

2. 実験の概要

2.1 実験材料

本実験では、セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は川砂、粗骨材は最大寸法15 (mm)の砕石を使用した。コンクリートは、材令7日における目標圧縮強度を30 (MPa)としたもので、その配合を表-1に示す。

使用鉄筋は、市販の横ふし異形鉄筋SD345 D16およびD25である。

造影剤は、研究室で工業用に開発したものを使用した。

2.2 実験供試体および埋め込み鉄筋の形状

本実験に使用した供試体の寸法および形状は、図-1に示すとおりである。この供試体には鉄

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 (W/C) (%)	細骨材率 S/A (%)
15	8±1	5±1	50	49

単位量 (kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	
199	398	817	5~15mm	839

*1 東北学院大学 工学研究科 土木工学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東北学院大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

筋と平行にX線造影撮影のための造影剤注入孔（直径2mm）を設けた。供試体は、表-2に示すように鉄筋本数、埋め込み長さ、鉄筋間隔を変えた11種類を用いた。また、表中に各供試体コンクリートの強度を示す。

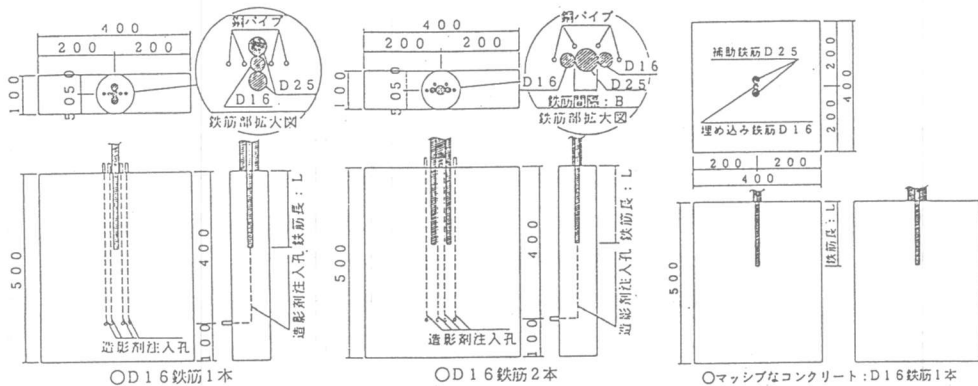


図-1 実験供試体形状寸法

2.3 実験方法

図-2に示すように引張載荷装置の上部クロスヘッド①で鉄筋を固定し載荷した。供試体はバンドで下部反力側クロスヘッド②（反力は、鉄筋中心から両側175mmの位置）に固定することにより、鉄筋に自重がかからないようにした。また、鉄筋にL型金具を取り付け、コンクリート表面（鉄筋中心から125mmの位置）との相対変位を測定した。

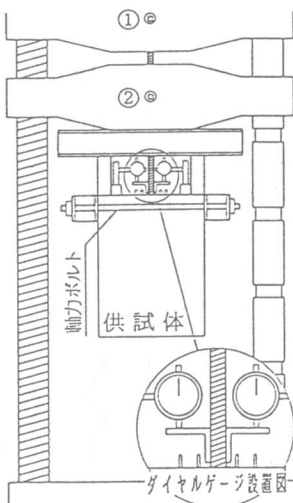


図-2 実験装置

表-2 埋め込み鉄筋の種類

供試体 No.	鉄筋本数	埋め込み長さ : L (mm)	鉄筋間隔 : B (mm)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
A-1	D16×1	100	—	37.7	3.2
A-2	D16×1	150	—	37.7	3.2
A-3	D16×1	200	—	37.7	3.2
B-1	D16×2	100	30	36.8	3.2
B-2	D16×2	150	30	37.7	3.1
B-3	D16×2	200	30	39.2	3.1
C-1	D16×2	100	60	39.7	3.1
C-2	D16×2	150	60	40.2	3.3
C-3	D16×2	200	60	41.2	3.4
D-1	D16×1	100	—	39.7	3.3
D-2	D16×1	150	—	39.7	3.3

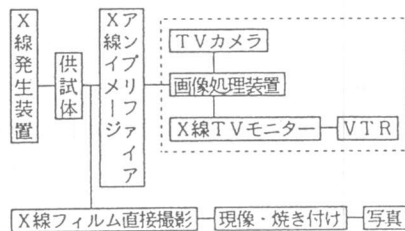


図-3 ひびわれ検出システム

X線検出システムは、図-3に示すようなものでX線発生装置からX線を放射し、X線イメージアンプリファイアで受けた画像をX線制御室のTVモニターで観察できるようになっている。この方法により供試体内のひびわれ発生状況を非破壊的に検出することができる。本研究では、このようなTVモードの検出方法だけでなく、重要と考えられる時点では、微細なひびわれをより鮮明に撮影することができるX線フィルム直接撮影も行った。

また、使用したX線装置の透過能力の限界のため、供試体の厚さを10(cm)以下にする必要がある。そこで、コンクリートの割裂をさげ、マッシュなコンクリートにおける引き抜きと同様の

状態を与えるために、供試体横断面長軸方向の両側から図-2中に示したようなボルト締め付け(59 kN)によるプレストレスを与えた。

また、実際に図-1に示されるようなマッシュなコンクリート(400×400×500 mm³)供試体を作成し、引き抜き実験を行い両供試体の測定値を比較し、上記プレストレスの大きさの妥当性を検証した。

3. 実験結果および考察

3.1 供試体形状の比較

図-4は、厚さ10 (cm)の供試体(A型)とマッシュ(厚さ40 cm)な供試体(D型)との荷重-変位曲線の測定値結果を示すものである。それぞれ埋め込み長さ10 (cm)および15 (cm)の場合である。この図に見られるように埋め込み長さ10 (cm)の場合は、最大荷重および曲線形状がほぼ一致することからプレストレスを与えた厚さ10 (cm)の供試体は、マッシュな供試体と同様の定着性状を示すものと考えられる。埋め込み長さが15 (cm)の場合は、最大荷重がやや異なるが、軟化域の傾きは、かなり似ていることから、この場合もほぼ同様と考えた。しかし、横方向プレストレス量の不足も考えられるので、この点は、さらに検討が必要と思われる。

定着破壊に至る過程を調べるために、コンクリート内部のひびわれ状況をX線造影撮影法を用いて観察した例として写真-1に3つの場合(いずれも最大荷重時)を示す。

写真-1 (a)に示されるように埋め込み鉄筋1本の場合、鉄筋の周辺に発生した内部ひびわれのいくつかは成長してコーン状破壊を形成する。写真-1 (b)における鉄筋間隔3 (cm)の場合、相互の鉄筋が影響し合うため鉄筋間に鉄筋1本の場合に比べ深部まで多数のほぼ水平で複雑に交差したひびわれを形成する。その際のコーンの頂点の位置は、鉄筋1本の場合より深い位置となる。また、写真-1 (c)における鉄筋間隔6 (cm)の場合、鉄筋間隔3 (cm)に比べ相互の鉄筋の影響が少ないため両鉄筋間を結ぶひびわれの数は少なく、コーン頂部の位置も(b)の場合より浅い。

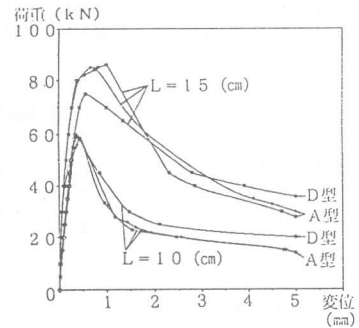
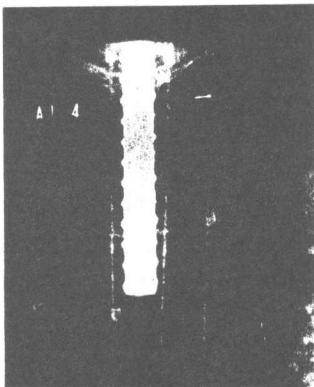
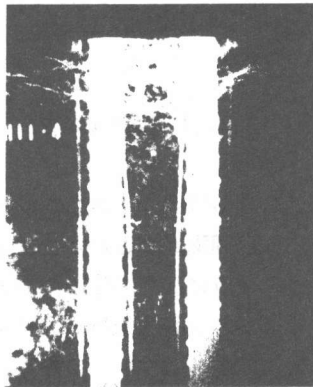


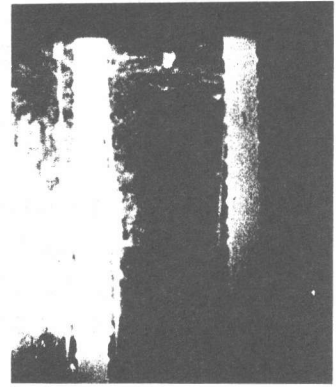
図-4 供試体形状比較



a. 鉄筋1本
(埋め込み長さ15 cm)



b. 鉄筋2本(鉄筋間隔3 cm,
埋め込み長さ20 cm)



c. 鉄筋2本(鉄筋間隔6 cm,
埋め込み長さ20 cm)

写真-1 X線造影撮影によるひびわれ展開状況

このように、比較的狭い間隔に並んで埋め込まれた複数の鉄筋の周りのひびわれ発生状況は、1本の鉄筋の場合または広い間隔に埋め込まれた複数の鉄筋の場合と比べてかなり異なっている。

3.3 荷重-変位曲線

図-5および図-6は、実験の結果得られた荷重-変位曲線である。図-5に示すように、各埋め込み深さにおいて荷重-変位曲線は、ピークをすぎて急速に軟化しするがしばらくすると軟化率がゆるくなる。埋め込み長さが長い程、最大荷重が大きくなり、また残留荷重の値も大きくなる傾向がある。しかし、変位が5(mm)となっても荷重はゼロとはならない。これは、コーンより下部の鉄筋の節間のせん断破壊が生じ、そのため引き抜き抵抗力が作用しているものと考えられる。また、埋め込み長さが長い場合は、測定終了時にも節間のせん断が生じていない領域が残っており、その部分の鉄筋の受け持つ力が残留荷重となっていると考えられる。

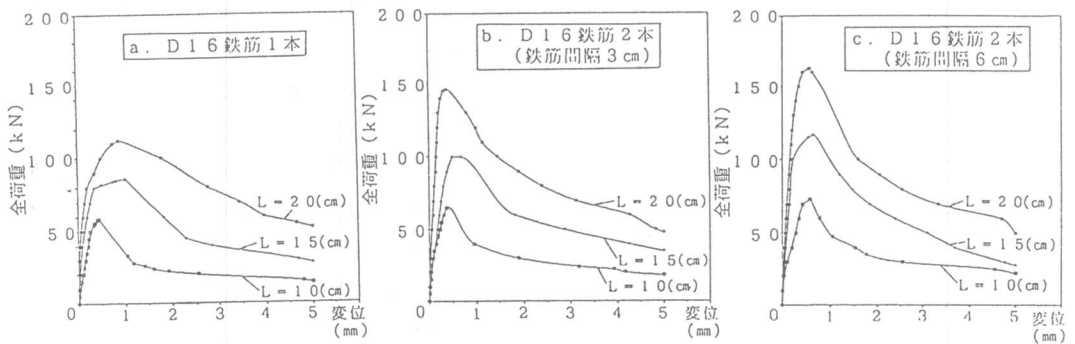


図-5 埋め込み長さの違いによる全荷重-変位曲線の変化

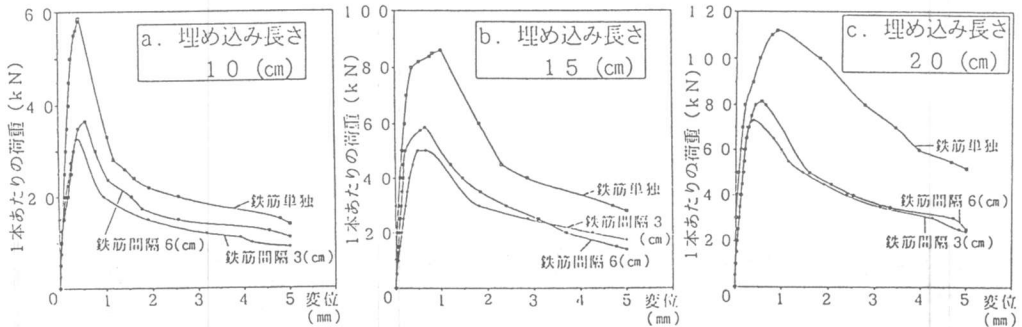


図-6 鉄筋1本あたりの荷重-変位曲線

図-6において埋め込まれた鉄筋2本の場合の1本当たりの最大荷重は、1本の場合の約50~60%となることからわかる。特に鉄筋間隔が小さい場合はその差が顕著になる。これは群効果を生じているためで、3.2で述べたように2本の鉄筋の力の重なり合う領域が生じ、鉄筋1本当たりの破壊によって生じるコンクリートの破壊領域が小さくなるためである。

3.4 破壊エネルギー

定着破壊に消費されたエネルギーは、一般に、荷重-変位曲線から求めることができる。しかし、本実験の場合、埋め込み長さが短い場合も、コーン状破壊と節間のせん断破壊とが同時に存在しているため、前述のように測定終了時点でも荷重はゼロとなっていない。このような場合の

鉄筋 1 本当たりの定着破壊に消費されたエネルギーは、荷重-変位曲線下の面積から最終地点と除荷後の残留地点までの直線下の面積を減ずれば良いと考えられる。今回は、その残留地点を決定するのに必要な十分なデータが取れなかったため、すべて最終地点から最大変位の 1/2 の点まで戻ると仮定して図-7 に示すような面積 S をエネルギーと仮定した。また、その値を表-3 に示す。

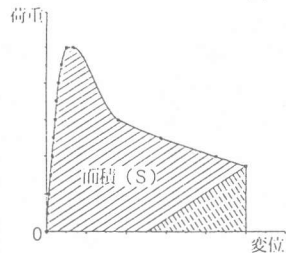


図-7 荷重-変位曲線で囲まれた面積

表-3 荷重-変位曲線から求めた面積 S

供試体 No.	荷重変位面積 (kN・cm)
A-1	10.5
A-2	21.9
A-3	34.1
B-1	12.9
B-2	24.4
B-3	36.4
C-1	15.0
C-2	27.7
C-3	39.1

求められたエネルギーが、図-8 に示すようなコーンの側面およびそれより下の鉄筋の表面 (表-4) で消費されたと考えて、式 (1) で表される破壊エネルギー GfI を計算した。その結果を表-5 に示す。また、写真-1 から分かるように、コーン内部および鉄筋周辺には非常に数多くの微細ひびわれが発生しており、破壊のためのエネルギーは図-9 に示すような領域全体で消費されたと考えることもできる。そこで求めたエネルギーが破壊領域の体積 (表-6) で消費されたと考えて、式 (2) で表される破壊エネルギー $GfII$ を計算した。その結果を表-7 に示す。また、各 Gf の値を図 10 および図 11 に示す。これより Gf は、埋め込み長さが長いものを除けば、供試体数は少ないがかなり似た値となることがわかる。また、 GfI より $GfII$ の方がややばらつきが少ない。

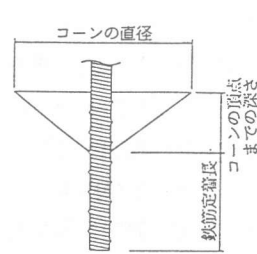


図-8 円錐部面積 (GfI)

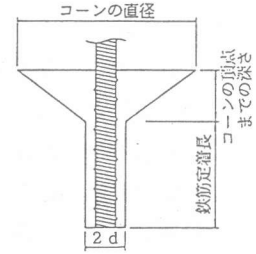


図-9 円錐部体積 ($GfII$)

このことは、定着破壊領域の面積あるいは体積が分かればコンクリートの特性値である Gf より、定着強度や変形量を求めることが可能となることを示唆していると考えられる。

$$GfI = S/A \quad \text{----- (1)}$$

GfI : 破壊エネルギー I (kN/cm)

$GfII$: 破壊エネルギー II (kN/cm²)

$$GfII = S/V \quad \text{----- (2)}$$

S : 破壊に使用されたエネルギー (kN・cm)

A : 破壊領域の表面積 (cm²)

V : 破壊領域の体積 (cm³)

表-5 破壊エネルギー

表-4 破壊領域の面積				表-5 破壊エネルギー GfI		
供試体 No.	定着鉄筋長さ (cm)	鉄筋表面積 (cm ²)	ひびわれ表面積 (cm ²)	面積総計 A (cm ²)	供試体 No.	破壊エネルギー I (kN/cm)
A-1	6.0	30.0	183.0	213.0	A-1	0.049
A-2	11.2	56.0	252.4	308.4	A-2	0.071
A-3	16.2	81.0	303.0	384.0	A-3	0.089
B-1	5.8	58.0	315.9	373.9	B-1	0.035
B-2	10.6	106.0	359.1	465.1	B-2	0.052
B-3	16.3	163.0	428.4	591.4	B-3	0.062
C-1	6.8	68.0	290.1	358.1	C-1	0.042
C-2	11.2	116.6	306.2	422.8	C-2	0.066
C-3	15.8	158.0	415.1	573.1	C-3	0.068

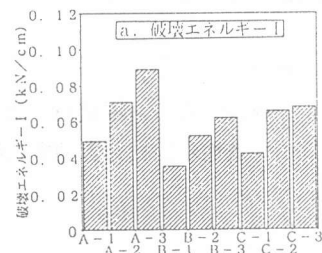


図-10 破壊エネルギー GfI

表-7 破壊エネルギー

表-6 破壊領域の体積

供試体 No.	円錐部体積 (cm ³)	鉄筋周辺体積 (cm ³)	体積総計 V (cm ³)
A-1	225.8	36.0	261.8
A-2	313.7	67.2	380.9
A-3	344.4	97.2	441.6
B-1	566.7	69.6	636.3
B-2	673.3	127.2	800.5
B-3	665.2	195.6	860.8
C-1	561.5	40.8	602.3
C-2	653.2	134.4	787.6
C-3	912.5	190.6	1103.1

G f II

供試体 No.	破壊エネルギーII (kN/cm ²)
A-1	0.040
A-2	0.057
A-3	0.077
B-1	0.020
B-2	0.030
B-3	0.042
C-1	0.025
C-2	0.035
C-3	0.035

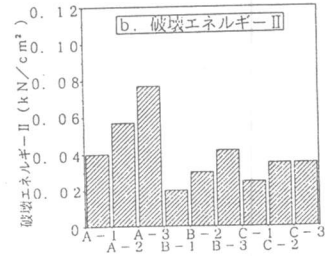


図-1 1 破壊エネルギー G f II

4. 結論

マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋が定着破壊に至る過程をX線造影撮影法を用いて調べるとともに、鉄筋に与えた力と抜け出し変形との関係から破壊エネルギーを求め、破壊力学的検討を加えた結果、実験の範囲内で次のことが言える。

(1) 定着鉄筋周辺のコンクリートの内部ひびわれ状況をX線造影撮影法を用いて観察した結果、埋め込み鉄筋1本の場合、鉄筋の周辺に発生した内部ひびわれのいくつかは成長してコーン状破壊を生じること、埋め込み鉄筋2本の場合、相互の鉄筋が影響し合うため、鉄筋間の領域では深部まで多数のほぼ水平で複雑に交差したひびわれを形成すること、コーンの頂点の位置は鉄筋1本の場合より深い位置となることなど、定着破壊の性状が明かとなった。

(2) 定着鉄筋の荷重-抜け出し変位曲線は、ピークを過ぎて急速に軟化するが、しばらくすると軟化率は緩くなり、変位が5mmになっても荷重はゼロとにならない。これは、定着破壊が、一般に、コーン状破壊とそれより深部の鉄筋の節間のせん断破壊との両者からなっており、コーン状破壊が終了しても、せん断破壊部の引き抜き抵抗が存在するからであると考えられる。

(3) 狭い間隔に並んで定着された2本の鉄筋の1本当当たりの最大荷重は、単独または広い間隔に埋め込まれた鉄筋の最大荷重の50~60%になることがある。これは群効果を生じたため、2本の鉄筋の力が重なり合う領域が生じ、定着破壊に関する鉄筋1本当当たりのコンクリート領域が小さくなるためである。

(4) 定着鉄筋の荷重-抜け出し変位曲線から定着破壊に用いられたエネルギーを求め、内部ひびわれ発生状況からそのエネルギーが消費された破壊領域を求め、両者から破壊エネルギーGfを計算した結果、埋め込み長さが特に長いものを除けば、鉄筋本数、埋め込み長さ等の違いにもかかわらず、かなり似た値となった。このことは、コンクリートの定着破壊領域の面積あるいは体積が分かれば、コンクリートの特性値であるGfより、定着強度や変形量を計算することが可能となることを示唆しているものと考えられる。

参考文献

- 1) 尾坂芳夫・大塚浩司・満木泰郎・小林茂敏：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の定着性状破壊と群効果に関する研究-土木学会論文集第420号N-13, 1990年8月