

論文 機械式鉄筋継手の性能が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響

大野 拓也*¹・Nguyen Dac Phuong*²・睦好 宏史*³・牧 剛史*⁴

要旨：機械式鉄筋継手において、鉄筋の挿入長さが十分でない場合、母材破断とならず、その性能は著しく劣る場合がある。また実設計では、継手位置を軸方向にある距離をずらすことを原則としている。本研究は、機械式継手の鉄筋挿入長さを変えることによって作為的に不良継手を作製して、継手位置をずらす距離を変化させた RC 梁を作製し、静的曲げ載荷試験を行った。その結果、継手単体試験から得られた継手の剛性や強度の違いは、部材全体の挙動にあまり影響を及ぼさないことが明らかとなった。また、ひび割れが継手部に集中しないことを考え、現行の示方書に規定されている継手位置をずらす距離について検討を行った。

キーワード：機械式継手, 同一断面, ひびわれ幅, ひび割れ間隔

1. はじめに

近年、RC 構造物の鉄筋継手に機械式鉄筋継手を用いる場合が多くなっている。しかし、継手はコンクリート部材において弱点となる場合がある。そのため、土木学会の「鉄筋の定着・継手指針(2007)」¹⁾、コンクリート標準示方書²⁾では、安全性を考慮して、隣り合う鉄筋継手を相互にずらす(以下、継手間隔という)ことや、応力の集中する位置(塑性ヒンジ領域)を避けることを推奨している。継手の位置や使用方法に関しては、日本では、継手性能判定を行い、強度、剛性、伸び能力、すべり量、疲労強度によって SA 級、A 級、B 級、C 級に分類し、さらに検査、施工の信頼度により I 種、II 種、III 種に分類されている。

鉄筋継手の規定に関しては、我が国の土木、建築分野および外国において大きく異なる。その例として継手間隔がある。建築においては、400mm 以上かつ継手長に 40mm を加えた長さ以上と規定されているのに対し、土木においては、 $25d+1(d: 鉄筋径, 1: 継手長さ)$ 以上離すこととなっている。従って、太径鉄筋を用いた場合には、継手間隔を 1m 以上離すことになる。このような違いの理由として、土木構造物における変動荷重の影響など、土木と建築で要求される性能が異なるということが挙げられる。また、機械式継手の性能と継手間隔が RC 部材に及ぼす影響は十分に明らかにされていないことが挙げられる。土木、建築構造物ともに、継手間隔が小さいほど、また継手位置を同一断面に配置できれば、施工の合理化が図れることが既に知られている。

本研究の目的は、機械式継手の鉄筋挿入長さを変えることによって作為的に不良継手を製作して、継手間隔距離を変化させた RC 梁を作製し静的曲げ載荷試験を行い、

継手性能、および継手間隔が RC 部材の耐力や変形状状、ひび割れ性状に及ぼす影響を明らかにすることである。

2. 継手単体の静的引張試験

2.1 概要

RC 梁の曲げ試験に使用する機械式継手の性能を明らかにするため、D19-SD345 鉄筋を用いた継手単体の引張試験を行った。現在使用されている継手の多くは A 級以上の十分な性能を有しているため、本研究では、ねじ節鉄筋継手の挿入長さ、エポキシ系樹脂の注入の有無をパラメータとして不良継手を作為的に製作し、継手の性能を変化させた。挿入長さは、ねじ節が 4 山以上カプラーに入っていれば、十分な応力伝達が可能であるため、挿入長さを 16mm(2 山)、24mm(3 山)、48mm(6 山)、D19 鉄筋について、おのおの 3 本ずつ継手単体の引張試験を行った。引張試験に用いたねじ節鉄筋継手の寸法を図-1 に示す。なお、ロックナットは、鉄筋と継手を固定するために用いた。

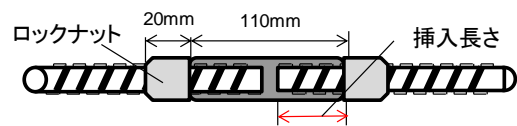


図-1 ねじ節鉄筋継手の寸法

2.2 試験結果

試験結果を表-1 に、継手単体の応力-ひずみ曲線を図-2、図-3 に示す。図-3 は図-2 に示す弾性部分を拡大して示したものである。継手部のひずみは図-1 において、継手を跨ぐ長さ(180mm)の変位を変位計で求め、

(1) *1 埼玉大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 (正会員)
 (2) *2 埼玉大学大学院 理工学研究科 博士後期課程 (正会員)
 (3) *3 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門教授 工学博士 (正会員)
 (4) *4 埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門准教授 博士 (工学) (正会員)

検長距離で除して求めた平均ひずみである。

挿入長さが2山の継手は、母材鉄筋降伏以前に鉄筋の抜け出しによって破壊した。挿入長さが3山の継手は、母材鉄筋降伏後、ひずみ硬化域に達してから、鉄筋の抜け出しによって破壊したが、6山の継手は母材鉄筋の破断による破壊となった。抜け出し破壊を生じた場合は、ねじ山がすべて潰れていたことから、挿入長さが強度、変形に大きな影響を及ぼしている。また、エポキシ樹脂を注入していない試験体はすべて、低い荷重段階から抜け出しが発生し、降伏ひずみが大きくなることが認められたのに対し、注入したものは挿入長さが小さくとも初期の抜け出しは抑えられ、剛性は母材鉄筋とほぼ同等であった。伸び能力(終局ひずみを降伏ひずみで除した値)は、降伏ひずみが挿入長さに大きく影響するため、違いが見られた。以上の結果より、挿入長さは強度、伸び能力に大きく影響し、樹脂の注入の有無は、継手の剛性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

表-1 試験結果

試験体	引張強度 [N/mm ²]	初期弾性係数 [GPa]	降伏ひずみ ϵ_y	終局ひずみ ϵ_u	伸び能力 ϵ_u/ϵ_y
M6-EPO	556	204	0.0025	0.071	28
M6	553	108	0.0057	0.069	12
M3-EPO	479	136	0.0040	0.030	8
M3	486	84	0.0070	0.031	4
M2-EPO	380	111	—	0.0012	0
M2	313	39	—	0.0015	0
鉄筋母材	556	194	0.0021	0.160	77

注)EPO : エポキシ樹脂注入

MO : 挿入長さのねじ山数

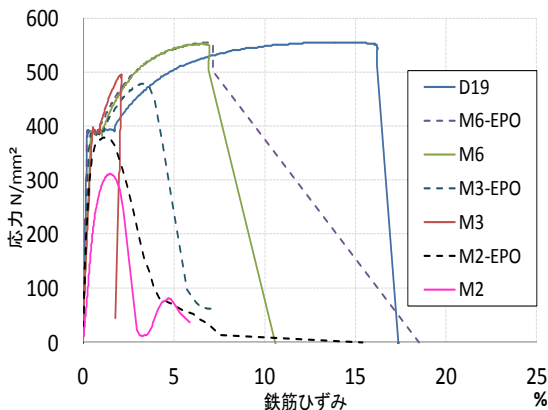


図-2 応力-ひずみ関係

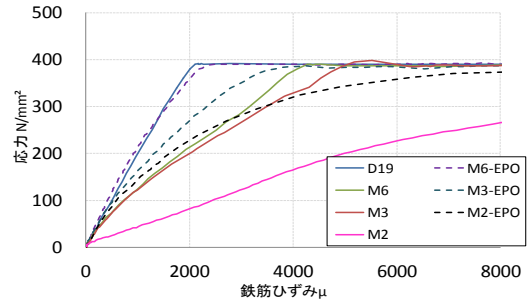


図-3 応力-ひずみ関係(初期剛性)

3. ねじ鉄筋継手を設けた RC 梁の曲げ載荷試験

3.1 概要

継手単体の引張試験によって得られた結果をもとに RC 梁に用いる継手の実験要因も同様に、鉄筋の挿入長さ、エポキシ樹脂の有無とすることで、継手部の剛性と伸び能力を変化させた。継手間隔は、同一断面に設置した $0d$, $25d+1$, $12.5d+1$ (d : 鉄筋径, 1 : 継手長さ) ずらした3種類とした。また継手のない試験体も作製した。断面は $300 \times 300 \text{mm}$ とし、軸方向鉄筋 D19 を4本、せん断補強筋には D10 をせん断スパン内にのみ 100mm 間隔で設置した。なお、同一試験体に配置した4本の継手はすべてを同じ性能とした。試験体の形状寸法および配筋状態を図-4に、実験要因を表-2に、コンクリートの圧縮強度を表-3に示す。

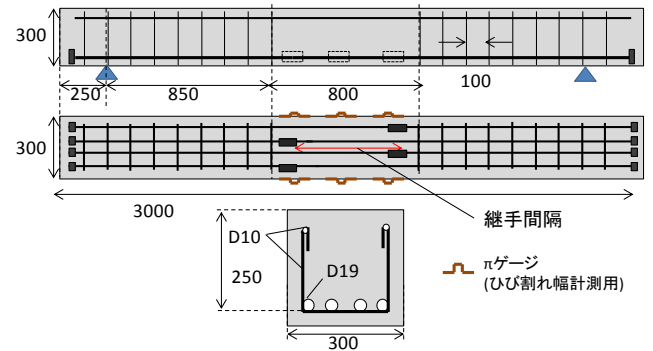


図-4 試験体の形状寸法と配筋位置

表-2 実験要因

試験体名	ねじ鉄筋継手の挿入長さ	継手間隔	エポキシ樹脂
No splice	継手なし	—	—
M6-0d-EPO	48mm(6山)	0mm	有り
M6-0d	48mm(6山)	0mm	無し
M3-25d	24mm(3山)	625mm	無し
M3-12.5d	24mm(3山)	388mm	無し
M3-0d	24mm(3山)	0mm	無し
M2-25d	16mm(2山)	625mm	無し
M2-12.5d	16mm(2山)	388mm	無し
M2-0d	16mm(2山)	0mm	無し

表-3 コンクリートの圧縮強度

試験体	f_c' [N/mm ²]	試験体	f_c' [N/mm ²]
No splice	36.2	M3-0d	34.6
M6-0d-EPO	31.5	M2-25d	37.0
M6-0d	33.8	M2-12.5d	37.9
M3-25d	34.3	M2-0d	38.3
M3-12.5d	36.8	-	-

3.2 荷重方法と計測

荷重方法は、主鉄筋応力度が鉄筋母材の規格降伏点の50%、70%、95%となる荷重を上限として、それぞれ30回静的に繰り返した。95%の30サイクル目終了後は、変位制御で破壊まで荷重を行った。計測項目は、荷重、たわみ(スパン中央)、鉄筋・継手部のひずみ、ひび割れ幅等である。ひび割れ幅の計測は、 π ゲージをRC梁両側の主鉄筋位置(下端から5cm)に両側面3か所ずつ取り付けることによって行った。1つの π ゲージ上に2本以上のひび割れが入らないよう、検長がひび割れ間隔未満の100mmの π ゲージを使用した。6つの π ゲージのうち3つは継手部付近のひび割れを計測し、3つは継手部から離れた位置のひび割れを計測した。なお、計測した位置はすべて曲げスパン内とした。荷重状況、荷重方法をそれぞれ図-5、図-6に示す。

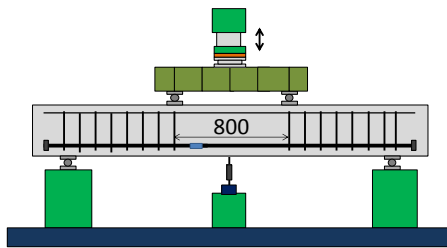


図-5 荷重状況

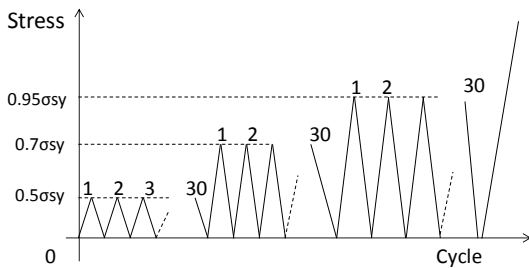


図-6 荷重方法

4. 試験結果

4.1 荷重-変位関係

静的曲げ荷重試験によって得られた荷重-変位曲線の包絡線のうち、継手を同一断面に配置したものを図-7に、継手間隔を変えたものを図-8に示す。また9体すべての試験結果を表-4に示す。なお表中の計算値とは、

コンクリート標準示方書により求めたものである。

同一断面に継手を設置した試験体の中でも、十分な挿入長さを確保した6山の試験体はすべて、継手なしと同等の挙動を示し、鉄筋降伏後、コンクリートが圧壊する曲げ引張破壊となった。これより、これまで言われているとおり、本来継手が持つべき強度、伸び能力を有していれば継手を同一断面に設置しても、継手がないものと同等である。また、継手単体の引張試験から得られた挿入長さによる剛性の違いは、主筋が降伏する前では、RC梁の剛性にほとんど影響を及ぼさないことが分かった。これは、継手長さ(150mm)が梁全体(3000mm)に比べ小さいことから継手の性能が、梁全体に及ぼす影響は小さいものと考えられるからである。しかし、継手単体の性能が継手部のひび割れ幅に影響を及ぼす可能性があることから、ひび割れ幅については次節で考察を行う。一方、3山同一断面の試験体(M3-0d)は最大耐力に達して間もなく、ひび割れが継手部に集中し、4本中2本の鉄筋が継手部から抜け出し、耐力が約半分程度にまで低減する結果となった。その後は耐力を維持するものの残りの鉄筋も抜け出し終局に至った。

一方、継手間隔のある長さ確保することで、靱性能の向上が見られた。12.5d+(M3-12.5d, M2-12.5d)と25d+(M3-25d, M2-25d)離れた場合には、多少の違いが見られるがほぼ同様の傾向を示した。最大耐力に達した後には鉄筋が1本抜け出すのが、継手を同一断面に配置していないため、耐力の低下を抑えることができ、最大耐力の約80%を維持することができた。この維持できる残存耐力は残りの主筋本数に依存するが、継手間隔のある長さ確保することで同時に同一断面の2本以上が抜け出すことを避けることが可能であると考えられる。

以上のことから、継手単体が十分な強度、伸び能力を有している場合においては、RC部材の力学的性状に及ぼす影響は少なく同一断面に配置することが可能である。また、継手をずらして配置する場合は、鉄筋抜け出した後もある程度の耐力を維持できることが認められた。

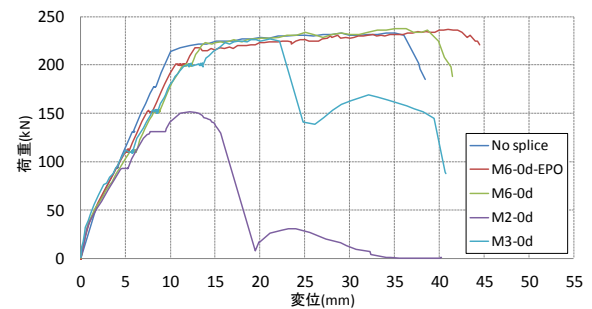


図-7 荷重-変位曲線(同一断面)

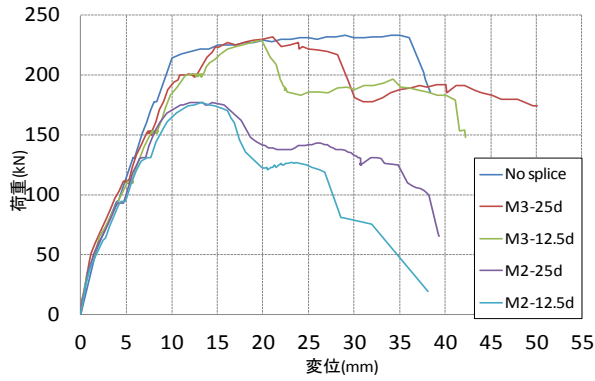


図-8 荷重-変位曲線(継手間隔)

表-4 試験結果

試験体名	降伏荷重 [kN]	降伏変位 [mm]	最大耐力	
			実験値 [kN]	計算値との比
No splice	214	10.5	233	1.01
M6-0d-EPO	218	12.8	237	1.03
M6-0d	223	13.9	238	1.03
M3-25d	224	14.8	232	1.01
M3-12.5d	213	14.7	229	0.99
M3-0d	223	16.1	227	0.99
M2-25d	—	—	177	0.77
M2-12.5d	—	—	177	0.77
M2-0d	—	—	152	0.66

4.2 RC 部材のたわみ性状と残留変位

継手単体の性能が、RC 部材全体の變形性状、即ちたわみ量や残留変位に与える影響を検討した。図-9 に示すように、各荷重段階の1サイクル目のたわみ、及び繰り返しによって生ずるたわみの増加量について、SA 級に相当する6山エポキシ樹脂有りの継手を用いたRC梁(M6-0d-EPO)に対する各試験体の比を示したものを表-5 に示す。なお、2山鉄筋を挿入したものについては、主鉄筋降伏以前に破壊に達したため、3山以上鉄筋を挿入した試験体において比較を行う。

表-5 より同一断面に継手を配置するとたわみの増加は、低い荷重段階で生じ、それとは対照的に継手をずらすことでたわみの増加を抑えることができる。継手間隔の大きさによる違いは多少あるものの、 δ_5 までで比較した場合、概ね同等のたわみ性状と言える。主筋応力が降伏強度の95%の荷重後には、挿入長さが3山のものも継手間隔に関係なく、たわみが急激に増加している。図-10 は10サイクル毎の残留変位を示しており、ステップ1, 2, 3, 4 はそれぞれ、主筋応力が降伏強度の50%の荷重の1, 10, 20, 30 サイクル目の残留変位を示す。図-10 は以上述べた現象をより明確に示している。すな

わち、主筋応力が降伏強度の95%の荷重後には、M3 シリーズは継手間隔に関係なく、急激に増加していることが明らかとなった。

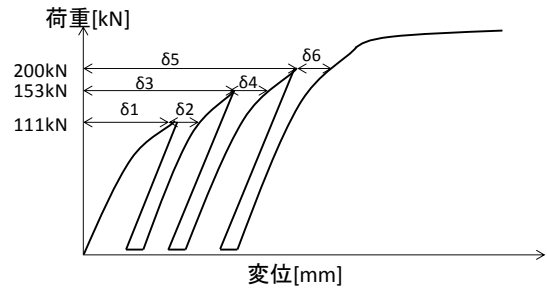


図-9 荷重段階

表-5 たわみ性状

試験体名	δ_1/δ'_1	δ_2/δ'_2	δ_3/δ'_3	δ_4/δ'_4	δ_5/δ'_5	δ_6/δ'_6
M6-0d	1.09	1.63	1.10	1.12	1.08	0.89
M3-25d	0.94	1.58	0.97	1.14	1.03	1.89
M3-12.5d	1.03	1.33	1.03	1.28	1.09	2.05
M3-0d	1.01	1.93	1.08	0.93	1.08	2.37

δ'_i : M6-0d-EPO の変位(mm)

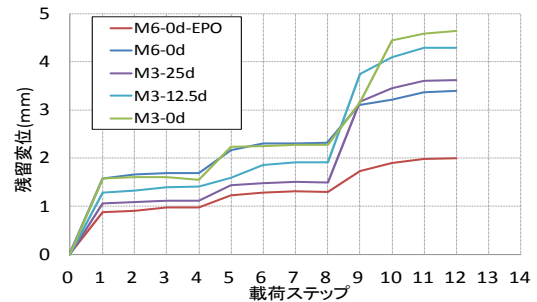


図-10 残留変位

4.3 同一断面に継手を設けたRC梁のひび割れ幅

前節において、継手単体の剛性がRC部材の静的耐力や曲げ剛性にあまり影響を及ぼさないことが確認されたが、継手単体の剛性が低いことで継手部付近にひび割れが集中する可能性がある。さらに継手は母材鉄筋に比べ、直径が1.6~2.0倍と大きいので、かぶり小さくなることは避けられない。ひび割れが内部鉄筋の腐食を引き起こし、RC部材の耐久性を低下させることがないように継手部のひび割れ幅について検討した。

継手部のひび割れ幅と継手部以外のひび割れ幅をそれぞれ図-11と図-12に示す。継手部のひび割れ幅とは、継手の端部に発生するひび割れのことである。ひび割れ幅は、それぞれ3つのゲージの平均を使用した。継手部のひび割れは、継手性能が高いほど小さくなっているのに対し、継手部以外のひび割れ幅は、多少の差はあるものの、継手の性能や間隔には大きく依存しないことがわかった。この理由は明確ではないが、継手部のひび割

れ幅は鉄筋の抜け出しによる開口変位として継手性能に依存するが、他のひび割れ幅はその位置の鉄筋ひずみに依存することからこのような結果になったと思われる。

継手部のひび割れ幅は、どの試験体においても継手部以外のひび割れ幅よりも明らかに大きくなる。特にM3-0dの継手部のひび割れ幅は、主筋応力度が降伏強度の50%(曲げモーメント=48kN*m)の荷重を繰り返した時、一時的に大きくなるが、95%(曲げモーメント=82kN*m)に達した時、抜け出しによる急激なひび割れ幅の増加が見られる。また、荷重-変位関係でも示したが、挿入長さ3山の試験体(M3-0d)において、最大耐力に達した後に抜け出しによる耐力の低下が生じたことから、継手性能が低い場合、RC梁の性状に影響を及ぼすのは、主筋応力度が降伏強度の95%に達した時と、梁が最大耐力に達した時であることが明らかとなった。このため、低い応力下での使用に関しては、継手が母材と同等の強度を有している場合には、挿入長さに関係なく、RC部材の性状にほとんど影響しないことがわかった。

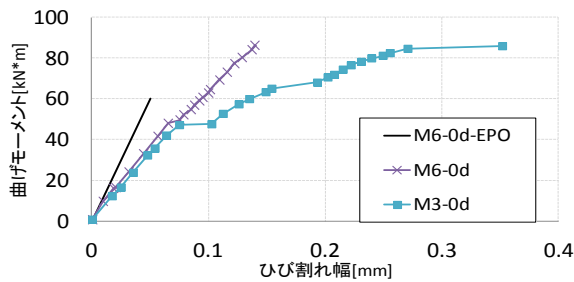


図-11 継手部のひび割れ幅

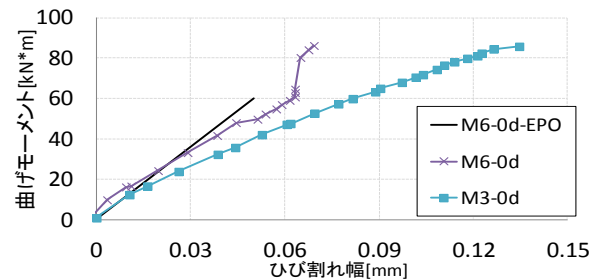


図-12 継手部以外のひび割れ幅

4.4 継手間隔の異なるRC梁のひび割れ幅

前節と同様に、3山挿入したRC梁(M3-25d, M3-12.5d)について、継手部のひび割れ幅と継手部以外のひび割れ幅をそれぞれ図-13と図-14に示す。ここでの継手部以外のひび割れ幅は、梁中央のひび割れ幅を示す。

継手部のひび割れ幅は、たわみ量や残留変位と同様に、継手間隔を大きくすることで小さくなる傾向があり、同じ継手性能であっても継手間隔を大きくすることでより安全側にすることが可能である。

一方で、梁中央のひび割れ幅を比較すると、継手部のひび割れとは対照的に継手間隔を広く取った場合の方が

大きく出る傾向にある。これは図-15に示すひび割れ状況より説明できる。図に示すひび割れ状況は、50%の繰り返し時のものである。すなわち、ひび割れはコンクリートかぶり小さい継手部に生じやすく、本ケースにおいても継手端部にひび割れが発生している。ひび割れの位置を比較すると、25d+I 離れた試験体は継手間にひび割れが複数本生じるのに対し、12.5d+I 離れた試験体は1本と少ない。このため、12.5d+I の場合、ひび割れ本数と開口変位が継手部に集中しやすく、その結果早い段階で鉄筋の抜け出しが生じたと推測できる。梁中央の主鉄筋に貼ったひずみゲージの値を比較しても、25d+I の試験体は、抜け出し以前に主筋が降伏しているのに対し、12.5d+I の試験体の主筋は、抜け出し時に降伏していなかった。これらのことから、継手間隔が短くなることで、継手間にひび割れが生じにくくなり、結果、継手部のひび割れが卓越し、耐力の低下が起きたと考えられる。

示方書において、継手間隔を25d+I以上離すように規定している理由は、すべての継手が抜け出した場合でも、定着効果によってある程度の耐力を維持できるというものである。しかし、使用状態において継手が抜け出すことは考えにくい。したがって使用状態で継手間隔を定量的に評価するためには、他の要因で継手間隔を評価する必要がある。

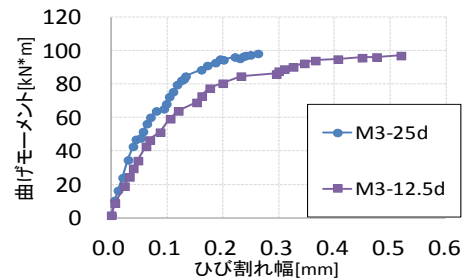


図-13 継手部のひび割れ幅

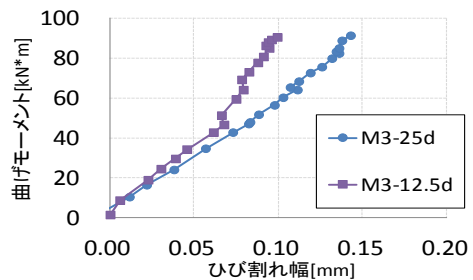


図-14 継手部以外(梁中央)のひび割れ幅

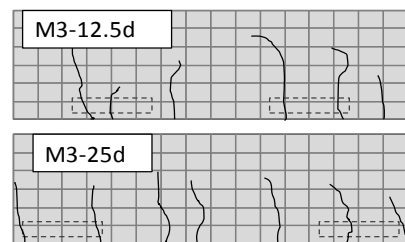


図-15 ひび割れ状況

4.5 ひび割れ間隔を考慮した継手間隔の検討

前節において、継手間隔が小さい時、継手間にひび割れが生じにくくなり、結果、継手部にひび割れが集中する傾向が確認された。しかがって、継手部にひび割れが集中することを防ぐためには、継手間に複数本ひび割れが発生することが望ましいと考えられる。このことから、継手部のひび割れが集中しないためには、継手間隔を少なくともひび割れ間隔の2倍以上離すことが必要であると考えられる。ここでは、既往のひび割れ間隔算定式を用いて、引張鉄筋比をパラメータとすることによってひび割れ間隔を評価することとした。ひび割れ間隔算定式には、角田の式(1)³⁾を用いることとした。

$$l = \frac{5.4c}{1.45} \left(1 + 0.18 \frac{e_s}{c} \right) \quad (1)$$

ここに

l: 平均ひび割れ間隔[mm]

c: コンクリートかぶり[mm]

e_s: 鉄筋の純間隔[mm]

この式において、実験に用いた梁と同じ 300mm×300mm、有効高さが250mm、下コンクリートかぶりと同横かぶりは一定値の40mmとし、引張鉄筋比を0.8%、1.2%、1.5%、1.9%、2.3%と変化させた。図-16は引張鉄筋比と(1)式を用いて計算したひび割れ間隔の2倍の長さを計算したものである。

本実験ケースではD19を4本用いており、鉄筋比1.5%である。この時の平均ひび割れ間隔は(1)の式で182mmと計算される。一方、継手を用いない梁の平均ひび割れ間隔の実測値は178mmであったことからほぼ一致していることが確かめられた。このことから角田の式は、本実験ケースに適用できると言える。

継手部にひび割れが集中しないために、継手間隔をひび割れ間隔の2倍以上の距離を確保した場合、本試験体において、継手間隔は364mm以上必要であることとなる。この値は鉄筋径の19.3倍に相当する。したがって、本実験ケースにおいては、鉄筋径の約20倍の距離を離すことによって、継手部に集中して生じるひび割れを抑制することができると考えられる。図-16により、鉄筋比が1.2%以上ある場合は、継手間隔を示方書で定められている25d+l(d:鉄筋径, l:継手長さ)の長さより小さくすることが可能であると言える。

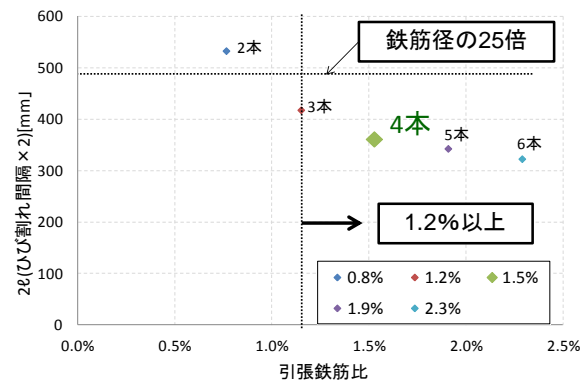


図-16 継手間隔

5. 結論

継手単体性能がRC部材に及ぼす影響を明らかにするために、ねじ筋鉄筋継手の挿入長さ、注入するエポキシ樹脂の有無によって継手性能を変化させた継手を用いて、RC梁の静的曲げ載荷試験を行った。また、継手間隔による影響も確認した。

本研究の範囲内より得られた知見を以下に記す。

(1) 継手を同一断面に配置しても、本来継手が持つべき強度、伸び能力を有していれば、継手がないものと同等であることが明らかとなった。

(2) 継手性能が低い場合、RC部材に及ぼす範囲は、低い荷重段階ではほとんど影響を及ぼさないが、ひび割れ幅や残留変位、たわみ性状は主筋応力が鉄筋の規格降伏強度の95%を迎えた地点から急激に増加する傾向にあることが明らかとなった。

(3) 継手間隔は、ひび割れが継手部に集中しないという観点からひび割れ間隔の2倍以上の距離を確保する必要がある。本実験ケースにおいては、鉄筋比が1.2%以上あれば、継手間隔を従来規定されている長さより小さくすることが可能であると考えられる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤研究(B) 代表 陸好宏史)により行なったものである。実験を行うに当たって、東京鉄鋼(株)よりご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会, コンクリートライブラリー128, 鉄筋定着・継手指針, 2007年
- 2) 土木学会, コンクリート標準示方書, 設計編, 土木学会, 2007
- 3) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol8, No.9, Sept, pp.1~10 1970.9.