

論文 T ヘッド鉄筋の定着具形状が高応力繰返し性能に与える影響

小倉 大季^{*1}・吉武 謙二^{*2}・小川 晃^{*3}・前之園 司^{*4}

要旨：本論文では、従来の T ヘッド鉄筋に対して主鉄筋の座屈抑制性能や帯鉄筋の拘束性能を向上させることを目的として開発した楕円型 T ヘッド鉄筋の定着性能について検証した。T ヘッド鉄筋の定着具形状を変動させて高応力繰返し試験を行った結果、要求性能を満たすために必要となる定着具形状が明らかとなった。また、定着具による支圧応力に着目し、実験および解析から検証を行った結果、定着具の形状によっては支圧応力が局所化し、コンクリートに局部的な圧壊が発生する場合があることを確認した。

キーワード：T ヘッド鉄筋、機械式定着、定着具、支圧、高応力繰返し試験、3 次元剛体一ばねモデル

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、耐震設計規定の見直しに伴い、橋梁やカルバートなどの土木構造物ではせん断補強筋および中間帯鉄筋量が増加している。鉄筋の高密度化は配筋の施工性低下、コンクリート充填性の低下を招き、生産性および品質の確保が課題となる。このような背景から、図-1に示す高周波誘導加熱により端部に定着具（以下、拡径部）を形成した T ヘッド鉄筋を標準フックの代替として用いる工法を開発し¹⁾、道路カルバートや LNG タンクなどに適用することで、配筋の省力化ならびにコンクリート打設の施工性向上に寄与してきた。

本研究は、筆者らが T ヘッド鉄筋の新たなバリエーションと位置付け開発した楕円型 T ヘッド鉄筋（図-1）の定着性能評価を目的としたものである。従来型の T ヘッド鉄筋は、標準フックによる定着の代替としてせん断補強鉄筋に用いた場合、現行の各種耐震設計基準における終局限界状態まで標準フックを配筋した部材と同等の靱性を有することが確認されている。それに対して、拡径部を楕円形状とすることで終局限界状態以降における主鉄筋の座屈抑制性能や帯鉄筋の拘束性能を向上させたものが楕円型 T ヘッド鉄筋である。

定着性能の評価は、横方向鉄筋に用いる場合を想定し、「鉄筋定着・継手指針【2007年版】」²⁾（以下、指針）に準じた試験により行った。定着具により局部荷重を受けるコンクリートが呈する破壊機構としては、一般に、(1) 定着具と接するコンクリートの局部的な圧壊、(2) 定着域コンクリートのコーン状破壊、(3) 割裂破壊が挙げられるが、指針による試験方法の場合はマッシュなコンクリート中に埋め込まれた定着具を引抜く試験であり、(2) や(3)を考慮する必要はないと考えられる。既往の研究においても、割裂ひび割れやコーン状のひび割れは発生せず、定着具と接するコンクリートの局部的な圧壊の有無

が定着性能に影響を与えることが報告されている^{3),4)}。したがって、機械式定着の定着性能を検証するためには、定着具による支圧応力に着目する必要があるといえるが、既往の研究では引抜き荷重と支圧面積から平均的な支圧応力を算出するまでに留まっており、支圧応力の詳細な検討はほとんど行われていないのが現状である。また、従来型 T ヘッド鉄筋と比較して、楕円型 T ヘッド鉄筋は拡径部による支圧応力が平均的に分布せず、局所化する可能性が考えられた。

そこで本研究では、拡径部による支圧応力に着目した検証を実験および解析から行った。解析においては、拡径部による支圧応力を直接捉えることが可能な剛体一



図-1 T ヘッド鉄筋

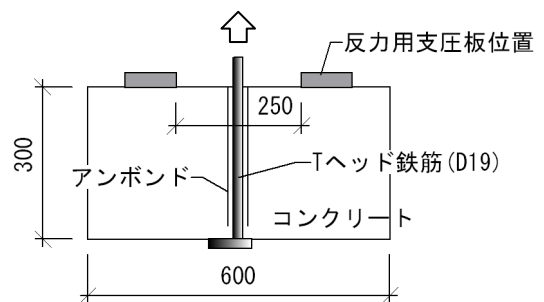


図-2 解析対象

*1 清水建設(株) 技術研究所 安全安心技術センター 工修 (正会員)

*2 清水建設(株) 技術研究所 安全安心技術センター 博士(工) (正会員)

*3 清水建設(株) 土木事業本部 設計第一部 課長

*4 第一高周波工業(株) T ヘッド事業部 製造部 部長

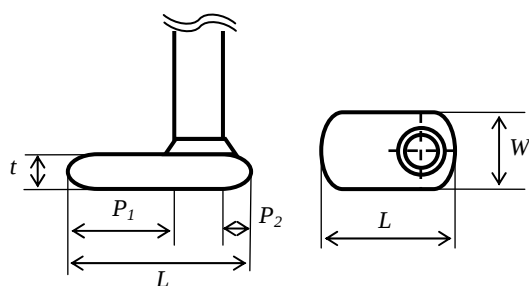


図-3 拡張部形状

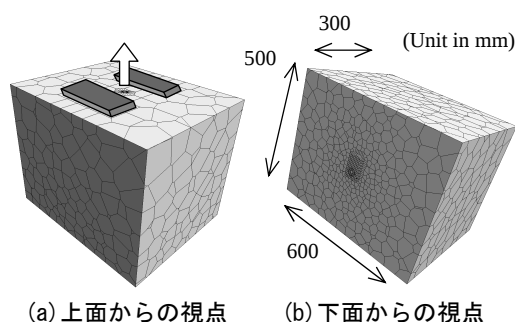


図-4 解析モデル

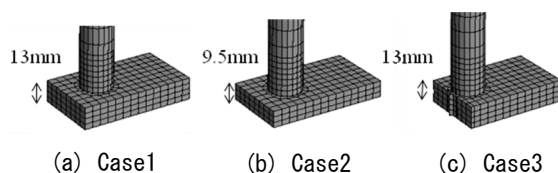


図-5 解析パラメータ

ばねモデル (RBSM) ^{5),6)}を用いて、拡張部の形状が支圧応力に及ぼす影響を検証した。実験においては、拡張部-コンクリート界面に圧力測定フィルムを挿入し、支圧応力の計測を試みた。

2. 数値解析による定着性能の概略検討

T ヘッド鉄筋の拡張部形状をパラメトリックに変動させて解析を行い、拡張部形状が支圧応力に及ぼす影響を検討した。ここでは、支圧応力の違いが顕著に表れた 3 つのケースを示す。

2.1 解析概要

本解析で対象とした試験体の概略を図-2 に示す。試験体は指針に準拠したもので、鉄筋の直線部におけるコンクリートとの付着は除去したものを想定した。使用鉄筋は D19 の楕円型 T ヘッド鉄筋である。

楕円型 T ヘッド鉄筋の拡張部形状を図-3 に、解析ケースを表-1 に示す。ここで、 P_1 は主鉄筋や帯鉄筋を十分に拘束できるだけの寸法が必要となるため、 2ϕ (以下、 ϕ : 鉄筋直径) と一定に設定し、 W についても同様に 2ϕ とした。

図-4 に解析モデルを、図-5 に各ケースの拡張部形状を示す。母材鉄筋-コンクリート界面は付着切りをし

表-1 解析ケース

解析ケース	P_2 (mm)	t (mm)
Case1	11 (0.6ϕ)	13 (0.7ϕ)
Case2	11 (0.6ϕ)	9.5 (0.5ϕ)
Case3	0	13 (0.5ϕ)

* ϕ : 鉄筋直径

表-2 材料諸元

コンクリート	弾性係数 (GPa)	25
鉄筋および拡張部	弾性係数 (GPa)	200
	降伏強度 (MPa)	390
コンクリート-拡張部界面	弾性係数 (GPa)	25

ているため、鉄筋の節はモデル化していない。境界条件は、反力用支圧板位置におけるコンクリート要素を完全固定とした。載荷は、T ヘッド鉄筋の上端要素に鉛直上向き方向の強制変位を与え、鉄筋母材が降伏強度に達したのち載荷を終了した。

表-2 に材料諸元を示す。コンクリートの材料モデルとしては、圧縮強度 24MPa を基準としたパラメータを使用することとし、弾性係数を 25GPa とした。なお、コーン状のひび割れ、割裂ひび割れが発生しないことを前提とし、解析を簡略化するためコンクリートは弾性と仮定した。鉄筋-コンクリート界面の材料モデルは、既往の知見が少ないため、コンクリートの材料モデルを基本とすることとし、拡張部-コンクリート界面 (以下、支圧面) の垂直ばねは、コンクリートと同様の弾性係数を用いた。支圧面の平行ばねは、結果が安全側となるように弾性係数を小さい値に設定し、支圧面の付着および摩擦を無視した。鉄筋母材-コンクリート界面については、平行ばねの弾性係数を小さい値に設定し、アンボンドを表現した。

2.2 解析結果

図-6(a), (b) に、母材鉄筋降伏時における拡張部による支圧応力の分布を示す。図はそれぞれ、図-6(c) に示す長辺方向、短辺方向における支圧応力の分布をプロットしたものである。横軸は、鉄筋母材の中心からの距離を鉄筋直径で正規化した値である。図示の結果より、鉄筋中心からの距離が 1.5ϕ 以上の領域は支圧にほとんど寄与していないことがわかる。Case1 と Case2 を比較すると、厚さが薄いほうが母材と拡張部の境界近傍における支圧応力が局所化する傾向にあり、 P_2 を除去した Case3 の場合は短辺方向の支圧応力が局所化し、Case1 の 1.5 倍程度の支圧応力が発生することが確認された。また、拡張部のひずみについては、全てのケースにおいて母材鉄筋が降伏強度に至るまで弾性範囲であった。

以上の結果から、拡張部の P_2 および t の両者が支圧応

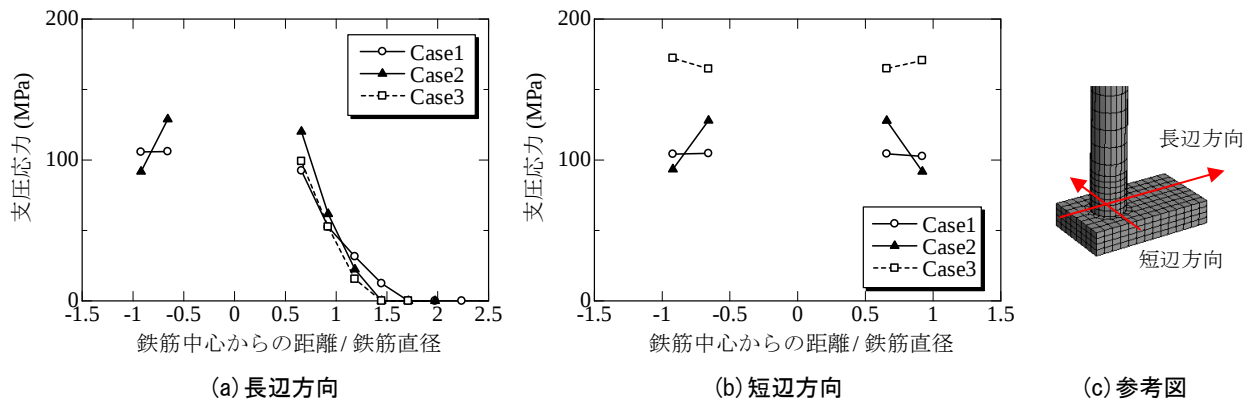


図-6 支圧応力分布（母材鉄筋降伏時）

力の分布形に影響を及ぼすことが確認されたため、実験ではこの2つのパラメータを変動させて検討することとした。

3. 実験概要

3.1 実験条件

表-3 に試験体の一覧を示す。実験要因は、鉄筋径、鉄筋端部の定着方法、および拡径部形状である。拡径部形状は、図-3 における P_2 を $0.3 \sim 1.1\phi$ の範囲で変動させるとともに、 t を2種類設定した。表-4 に各試験体に配置したTヘッド鉄筋の拡径部寸法を示す。支圧面積を同一にさせるため、 W 、 L の寸法を一定にすることを試みたが、Tヘッド鉄筋は高周波誘導加熱により鉄筋母材自体を成形加工しているため、若干のばらつきがみられた。また、 L を一定として P_2 を変動させているため、結果的に P_1 も変化することになった。

使用した鉄筋の材質はSD390であり、降伏強度はD19、D25のそれぞれにおいて458MPa、474MPaであった。コンクリートは実際に構造物に適用すると予想される設計基準強度を上回らないように24MPaを目標圧縮強度とした。実際の試験時強度は表-5 に示すとおりである。

3.2 試験体概要

試験体の形状は指針に準拠した。試験体の概略を、J19試験体、T19-0.3試験体を例として、図-7 に示す。試験体寸法は、Tヘッド鉄筋がD19の場合は $600 \times 600 \times 300\text{mm}$ 、D25の場合は $800 \times 800 \times 400\text{mm}$ とした。標準フックおよびTヘッド鉄筋は軸方向鉄筋に掛けて配置し、軸方向鉄筋径はTヘッド鉄筋がD19の場合はD22、D25の場合はD29とした。鉄筋の直線部（標準フックはフックの開始点から載荷面まで、Tヘッド鉄筋は拡径部上面から載荷面まで）は、指針に従いコンクリートとの付着を除去した。これにより、Tヘッド鉄筋の拡径部による定着性能と標準フックの曲げ加工部および余長部による定着性能を比較することとなる。付着除去方法は、鉄筋の節間を油粘土で埋め、ラップフィルムで包む方法を

表-3 試験体一覧

試験体名	鉄筋 径	定着方法	拡径部形状		圧力測定 フィルム
			P_2	t	
T19-0.3	D19	T ヘッド 鉄筋	0.3φ	0.7～ 0.8φ	あり
T19-0.5			0.5φ		
T19-0.6			0.6φ		
T19-0.7			0.7φ		
T19-0.8			0.8φ		
T19-1.0			1.0φ	あり	
T19-1.1			1.1φ		
J19		標準フック	—		
T25-0.4	D25	T ヘッド 鉄筋	0.4φ	0.7～ 0.8φ	あり
T25-0.5			0.5φ		
T25-0.7			0.7φ		
T25-0.8			0.8φ		
T25-0.9			0.9φ		あり
T25-1.0			1.0φ		
T25-A			0.5φ	0.5φ	
J25		標準フック	—		

* ϕ ：鉄筋直径

表-4 拡径部の寸法

試験体名	P_2 (mm)	t (mm)	W (mm)	L (mm)
T19-0.3	6	14	40	66
T19-0.5	9	13	42	67
T19-0.6	11	14	42	75
T19-0.7	13	14	43	73
T19-0.8	16	15	44	69
T19-1.0	19	15	43	71
T19-1.1	20	15	42	72
T25-0.4	10	18	51	84
T25-0.5	13	19	55	86
T25-0.7	18	20	54	81
T25-0.8	19	20	55	81
T25-0.9	23	18	55	84
T25-1.0	25	19	54	84
T25-A	12	13	54	92

* P_2 、 t 、 W 、 L は、図-3 と対応する

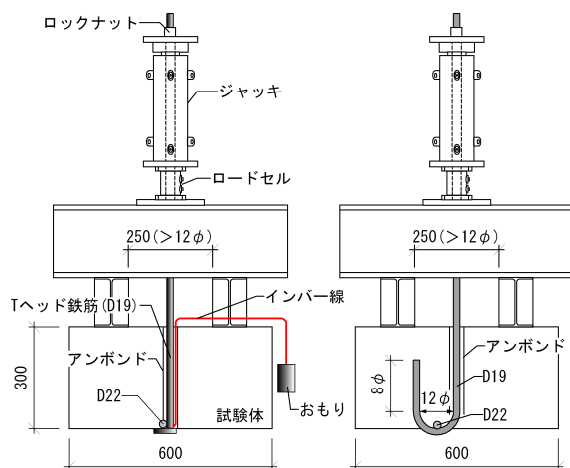


図-7 試験体の概略 (左: T19-0.3, 右: J19)

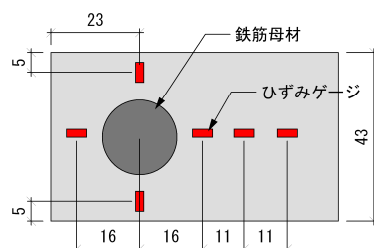


図-8 ひずみゲージ貼付位置例 (T19-0.7)

採用した。

3.3 荷重方法と計測項目

荷重装置の概要は図-7に示すとおりで、中空ジャッキにより荷重を行った。荷重は、(1) 上限を $0.95f_y$ (f_y : 鉄筋の規格降伏強度)、下限を $0.02f_y$ 以下とした応力で30回の繰返し荷重、(2) 鉄筋の規格引張強度 (560MPa) に相当する荷重程度まで荷重、という手順で行った。

計測項目は、鉄筋の拔出し量、引抜き荷重、拡張部下面のひずみ、および拡張部による支圧応力である。鉄筋の拔出し量は、インバー線を用いて計測した。測定方法は、図-7に示すようにTヘッド鉄筋の場合は拡張部の根元位置、標準フックの場合はフックの曲げ開始点に固定したインバー線を試験体上部に延ばし、先端を変位計と接続するものである。インバー線とコンクリートを付着させないためにインバー線を金属パイプに通すと同時に、インバー線端部におもりを取り付け、緩まないように緊張した。

T19-0.3, T19-0.7, T25-0.4, T25-0.9 試験体には、拡張部下面のひずみ測定のため、鉄筋ひずみゲージを貼付した (図-8)。T19-0.3, T19-1.0, T25-0.4, T25-0.9 試験体には、拡張部による支圧応力を計測する目的で、拡張部-コンクリート界面に圧力測定フィルムを挿入した。圧力測定フィルムは、圧力を受けると赤く発色し、圧力の大きさに応じて濃度に変化するため、圧力の分布、大きさを目視で確認することができる。

表-5 実験結果

試験体名	最大応力 ^{*1} (MPa)	δ_{95f_y} (mm)	δ_l (mm)	δ_{30} (mm)	$\delta_{30} - \delta_l$ (mm)	コンクリート 圧縮強度 (MPa)
T19-0.3	561	1.97	1.97	3.58	1.61	26.0
T19-0.5	560	0.18	0.18	0.37	0.19	28.9
T19-0.6	560	0.13	0.13	0.26	0.13	
T19-0.7	560	0.09	0.09	0.13	0.04	
T19-0.8	562	0.06	0.06	0.12	0.06	
T19-1.0	561	0.22	0.22	0.31	0.09	
T19-1.1	560	0.09	0.09	0.16	0.07	
J19	561	0.79	0.79	1.29	0.50	26.0
T25-0.4	609	1.45	1.45	2.36	0.91	26.0
T25-0.5	580	0.35	0.67	1.36	0.69	28.9
T25-0.7	591	0.21	0.28	0.41	0.13	
T25-0.8	601	0.19	0.23	0.38	0.15	
T25-0.9	580	0.42	0.52	0.75	0.23	
T25-1.0	602	0.16	0.19	0.30	0.11	
T25-A	561	1.02	1.02	4.34	3.32	
J25	553	0.47	0.47	1.45	0.98	26.0

*1 最大応力: 最大引抜き荷重/鉄筋の公称断面積

4. 実験概要

4.1 結果概要

表-5に実験結果の概要を、図-9に鉄筋応力-拔出し変位関係の一例を示す。鉄筋応力は、荷重荷重を鉄筋の公称断面積で除すことで算出した。ここで、 δ_{95f_y} は鉄筋応力が規格降伏強度の95% (371MPa) に達した時点の拔出し量、 δ_l 、 δ_{30} は高応力繰返し荷重時における1回および30回目の上限応力時の拔出し量とした。高応力繰返し荷重は上限応力を $0.95f_y$ として行っているため、本来は δ_{95f_y} と δ_l が等しい結果となる。 δ_{95f_y} と δ_l が異なる試験体がD25の試験体の中に5体あるが、これらはロードセルの問題により繰返し荷重時の上限応力が371MPaを超えてしまったためである (図-9)。当該試験体における δ_l 、 δ_{30} は、他の試験体と比べ高い応力レベルでの拔出し量となるが、高応力繰返し性能の評価に用いる場合は安全側の評価になると判断し、補正は行わなかった。

機械式定着が保有すべき定着性能の一つである高応力繰返し性能の評価は、指針に準じ、 δ_{30} および $\delta_{30} - \delta_l$ を標準フックと比較することによって行った。 δ_{30} はT19-0.3, T25-0.4, T25-A 試験体が、 $\delta_{30} - \delta_l$ はT19-0.3, T25-A 試験体が標準フックの拔出し量より大きい、その他の試験体については要求性能を満足していることが確認された。

図-10は拡張部寸法 P_2 と拔出し量 δ_{95f_y} の関係、図-11は P_2 と $\delta_{30} - \delta_l$ の関係を示したものである。図中の点線は、標準フックの場合の拔出し量を示したものであり、

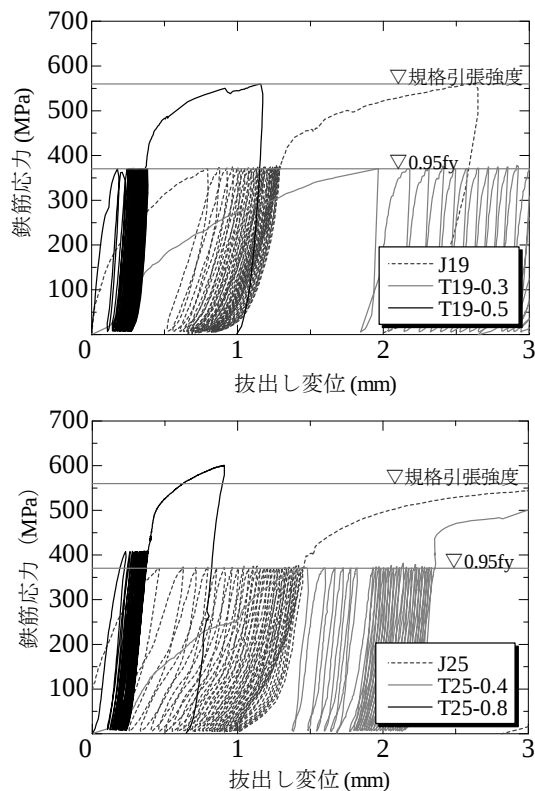


図-9 鉄筋応力-拔出し変位関係

点線より下側にプロットされている試験体は要求性能を満たしていることになる。図より P_2 が小さいほど、拔出し量 δ_{95fy} および高応力繰返し性能を表す $\delta_{30}-\delta_1$ は大きく、 P_2 が 0.5ϕ 以下の場合に拔出し量が標準フック以上であることがわかる。拡径部の厚さが薄い T25-A 試験体に着目すると、 $\delta_{30}-\delta_1$ は他の試験体と大きく異なる傾向がみられ、高応力繰返し性能が大幅に低減することが確認された。なお、圧力測定フィルムを挿入した T19-0.3, T19-1.0, T25-0.4, T25-0.9 試験体（図中、() で囲んだプロット点）は、他の試験体の傾向と比較すると拔出し量がやや大きい。これは、フィルムを挿入したことによる拡径部-コンクリート界面の付着切れが原因であると推測される。

以上の結果より、D19, D25 のいずれにおいても P_2 が 0.5ϕ 以上、拡径部の厚さが 0.7ϕ 以上であれば標準フックと同等以上の定着性能を有していることが確認された。

4.2 コンクリートの局所的な圧壊の状況

図-12(a) は、拡径部直上におけるコンクリートの局所的な圧壊の状況である。全ての試験体において、割裂ひび割れ、コーン状のひび割れは発生しなかったが、局所的な圧壊が観察された試験体があった。拡径部寸法 P_2 が小さい T25-0.4, T19-0.3 試験体において局所的な圧壊が顕著に現れており、特に赤点線内の損傷が大きかった。比較として、T25-0.7 試験体の試験後の状況を図-12(b) に示す。これは、解析でも確認されたとおり、 P_2 領域による支圧応力が卓越したことが原因であると推測され

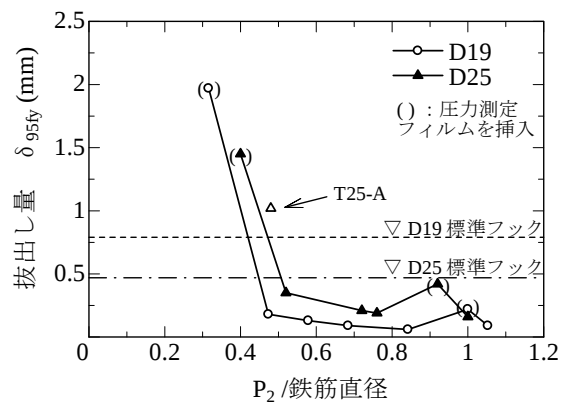


図-10 拡径部寸法と静的定着性能の関係

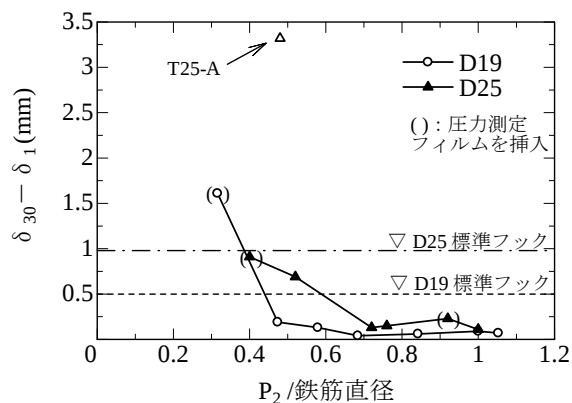
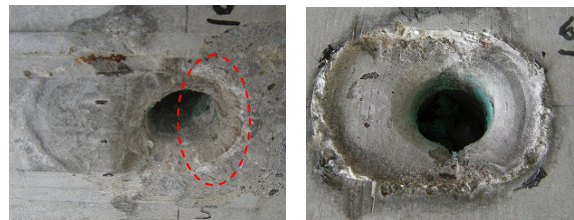


図-11 拡径部寸法と高応力繰返し性能の関係



(a) T25-0.4

(b) T25-0.7

図-12 コンクリートの局所的な圧壊

る。また、この損傷の影響により、T25-0.4, T19-0.3 試験体の拔出し量が大きくなったと考えられる。

4.3 拡径部による支圧応力

図-13 は、拡径部-コンクリート界面に挿入した圧力測定フィルムの発色状況である。フィルムは、図-13のとおり感圧範囲が $50\sim 130\text{MPa}$ のフィルムと $10\sim 50\text{MPa}$ のフィルムを、左右対称に支圧面に挿入した。本実験では拡径部-コンクリート界面のすべりによりフィルムが擦り切れてしまい、フィルムの赤色濃度を定量的に判断することは難しかったが、T25-0.4 試験体の傾向としては図中の矢印の領域において、 $100\sim 130\text{MPa}$ の範囲で支圧応力が発生していることが確認された。矢印の領域外である鉄筋中心からの距離が 1ϕ 以上の領域においては、フィルムは発色しておらず、支圧応力は 50MPa 以下であった。一方、T25-0.9 試験体は発色領域が広く、支圧応力が拡径部全体に分布している。支圧応力の大きさは

T25-0.4 試験体に比べて小さく、40～90MPa の範囲で分布しており、確認できる最大値は 90MPa 程度であった。以上の結果から、 P_2 が小さい T ヘッド鉄筋の場合、拡張部による支圧応力が平均的に分布せず、鉄筋母材近傍で局所化することが確認された。この影響により、コンクリートの局所的な圧壊が生じたと考えられる。

本実験で圧力測定フィルムを挿入した目的の一つは、コンクリートの局所的な圧壊に対する支圧強度を検証するためであったが、フィルムの擦り切れにより厳密な測定はできなかった。しかし、T25-0.9 試験体において、90MPa 程度の支圧応力が作用したにもかかわらず、局所的な圧壊が確認されなかったことを考慮すると、支圧強度は 90MPa 以上であると考えられる。

4.4 拡張部のひずみ分布

図-14 に拡張部下面のひずみ分布を示す。いずれも鉄筋応力が規格引張強度 (560MPa) に達した時点の結果である。ひずみ値は引張を正側、圧縮を負側にプロットした。図より、いずれの試験体においても鉄筋中心からの距離が 1ϕ 以内の領域で圧縮ひずみが卓越していることがわかる。ひずみは弾性範囲内の値であり、規格引張強度に相当する荷重作用下においても拡張部は降伏していないことが確認された。なお、T19-0.6 試験体を対象とした解析より求めたひずみ分布を図-14 に併記した。解析結果は実験で得られた結果とほぼ同様の傾向を示していることが確認された。

5. まとめ

本研究では、楕円型 T ヘッド鉄筋を横方向鉄筋に用いた場合の定着性能評価試験について示した。本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) 拡張部の形状が定着性能に大きな影響を及ぼすことが確認され、T ヘッド鉄筋が標準フックと同等以上の定着性能を有するためには、拡張部の寸法の一つである P_2 が 0.5ϕ 以上、拡張部の厚さが 0.7ϕ 以上必要であることが明らかとなった。
- (2) 拡張部の寸法の一つである P_2 が 0.5ϕ 以下の場合、拡張部に接するコンクリートの局所的な圧壊が観察された。
- (3) 拡張部形状が小さい T ヘッド鉄筋の場合、拡張部による支圧応力が平均的に分布せず、鉄筋母材近傍で局所化する傾向にあった。
- (4) 拡張部-コンクリート界面に圧力測定フィルムを挿入し、拡張部による支圧応力を計測した結果、90MPa の支圧応力作用下においてもコンクリートは健全であった。したがって、本実験の範囲内ではコンクリートの局所的な圧壊に対する支圧強度は 90MPa 以上であるといえる。

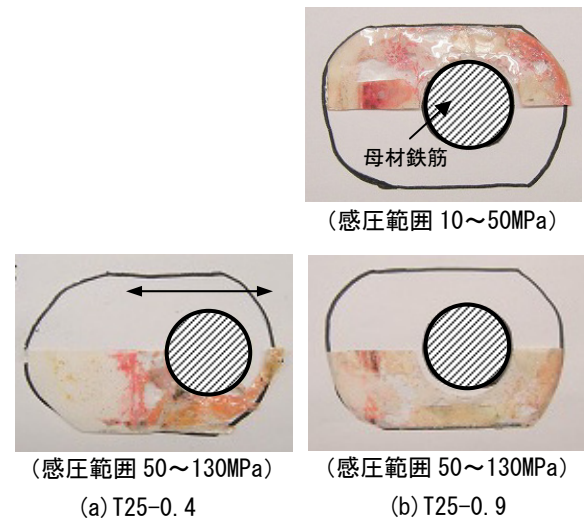


図-13 圧力測定フィルム発色状況

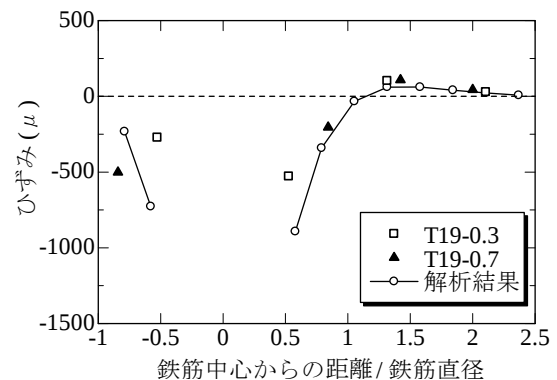


図-14 拡張部下面のひずみ分布

参考文献

- 1) 塩屋俊幸, 中澤春生, 長澤保紀, 高岸正章: T ヘッドバー工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1291-1296, 2000.6
- 2) 土木学会: 鉄筋定着・継手指針, コンクリートライブラリー128, 2007.
- 3) 木村克彦, 小川晃ほか: T ヘッド鉄筋の拡張部径および埋込長さが定着性能に及ぼす影響, 土木学会第 61 回年次学術講演会, V-574, pp.1143-1144, 2006.9
- 4) 米田大樹ほか: 鉄筋端部に雄ネジを切削加工して定着版を取り付けた機械式定着の性能評価, 土木学会第 63 回年次学術講演会, V-558, pp.1115-1116, 2008.9
- 5) 川井忠彦, 竹内則雄: 離散化極限解析プログラミング-コンピュータによる極限解析法シリーズ 2, 培風館, 1990.6
- 6) Bolander, J.E. and Berton, S.: Cohesive Zone Modeling of Fracture in Irregular Lattices, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc. of FRAMCOS-5, pp.989-994, 2004