

# 落橋防止構造の取付部を想定したアンカーボルトの群効果 と縁端距離の影響の実験的検討

廣江 亜紀子<sup>1</sup>・菅原 達也<sup>2</sup>・中尾 尚史<sup>3</sup>・大住 道生<sup>4</sup>

- <sup>1</sup>正会員 修（工） 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員  
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
- <sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員  
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
- <sup>3</sup>正会員 博（工） 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員  
（現 国立舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 講師）  
（〒625-8511 京都府舞鶴市字白屋234番地）
- <sup>4</sup>正会員 博（工） 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員  
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

## 1. はじめに

地震による上部構造の変位を制限するために、橋座部や橋台等の前面に落橋防止構造や横変位拘束構造を設ける場合がある。これらの部材は、作用する水平力に対して弾性域に留まるようにすることが現行の道路橋示方書Ⅴ編<sup>1)</sup>には規定されているが、その具体的な照査方法は定められていない。

橋台前面等に取り付ける落橋防止構造は引張力が卓越する構造であり、取付部に複数本のアンカーボルトを用いる場合が多いが、群効果を見込む具体的方法は定められておらず、また縁端距離の影響を考慮する方法も示されていない。そのため、複数本のアンカーボルトによる群効果や縁端距離の影響を考慮した上で、弾性域に留まるとみなせる耐力の評価式が必要となる。しかし、既往の研究は埋込長の短い小径のアンカーボルトによる検証<sup>2,3)</sup>が多く、実際の落橋防止構造の取り付けに合致した条件での実験例が少ない。

筆者らはあと施工でRCブロックに取り付けたD32の異形棒鋼1本について、埋込長さ10Dおよび15D、縁端距離を埋込長以上とした場合の引き抜き試験を実施し、異形棒鋼が破断した後にRCブロック内部の異形棒鋼のひずみが0になったことから、破断後もRCブロック内部の異形棒鋼が弾性挙動をすることを確認した<sup>4)</sup>。本研究では、複数本のアンカーボルトの引き抜き試験により群効果や縁端距離の影響

について検討を行い、実際の落橋防止構造の取り付けを想定したアンカーボルトの照査方法を提案する。

## 2. 試験概要

### (1) 試験ケース

実施した引き抜き試験の試験ケースを表-1に示す。試験には一般に落橋防止構造の取り付けに使用されるD32の異形棒鋼を用いた。また、異形棒鋼間の距離は道路橋示方書Ⅲ編<sup>5)</sup>を参考に、異形棒鋼の直径の3倍、埋込長は実際の設計で用いられることの多い異形棒鋼の直径の15倍<sup>6)</sup>とした。縁端距離は橋台等の最外縁鉄筋より内側に設置することを想定して200mmとした。既往の実験<sup>4)</sup>ではSD345・D32の異形棒鋼を用いた結果、異形棒鋼の破断により終局を迎えた。群効果や縁端距離が問題となりやすいのは付着破壊やコーン破壊であると考え、本試験ではSD490・D32を用いた。

表-1 引き抜き試験の試験ケース

	鋼材 記号	鉄筋 径	本数	異形棒鋼 間の距離	埋込 長	縁端 距離
Case-1	SD490	D32	1本	-	15D	200mm
Case-2	SD490	D32	3本	96mm (3D)	15D	200mm
Case-3	SD490	D32	4本	96mm (3D)	15D	200mm

## (2) 供試体

Case-1は、図-1に示す幅2300mm、奥行1500mm、高さ550mmのRCブロック（設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>、材齢27日の圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>）に異形棒鋼を設置した供試体を使用した。RCブロックは橋台前面等を模した配筋を施している（図-1右側）。φ40mmの削孔を行い、孔内に異形棒鋼を設置してエポキシ樹脂で定着した。

Case-2と3は、図-2に示す幅1400mm、奥行900mm、高さ850mmのRCブロック（設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>、材齢27日の圧縮強度30N/mm<sup>2</sup>）に異形棒鋼を設置した供試体を使用した。φ40mmの削孔を行い、孔内に異形棒鋼を設置してエポキシ樹脂で定着した。

異形棒鋼には、図-3のようにあらかじめひずみゲージを設置した。Case-1では、異形棒鋼は埋込長以深のコンクリートとの付着を切ったうえで下端をRCブロックの底部と一致させ、下端の変位を変位計により計測できるようにした。

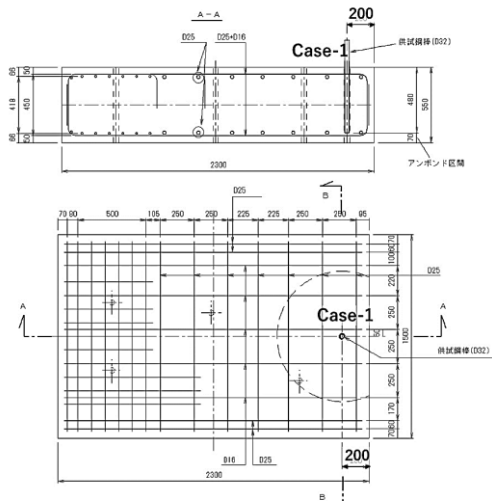


図-1 引き抜き試験供試体 (Case-1)

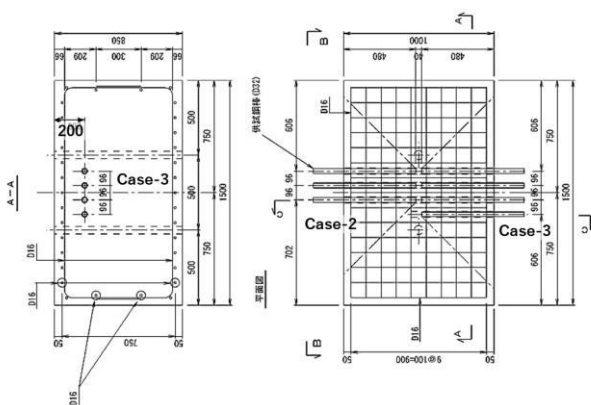


図-2 引き抜き試験供試体 (Case-2, 3)

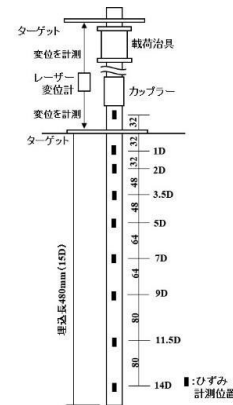
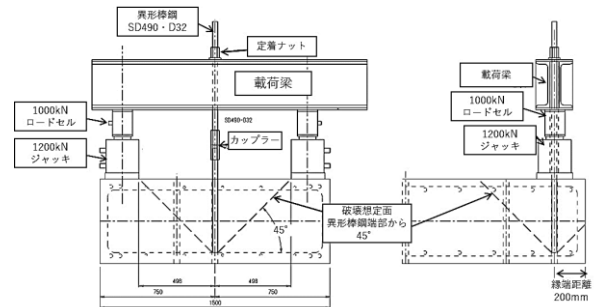


図-3 ひずみおよび変位の計測位置

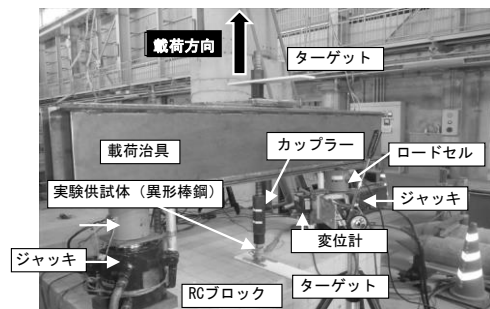
## (3) 試験装置

試験装置を図-4および図-5に示す。ジャッキにより異形棒鋼を引き抜く構造とした。カップラーを用いて異形棒鋼を継いで、载荷治具に取り付け、ジャッキ2台の荷重が均等になるように調整しながら载荷を行う。Case-2とCase-3は異形棒鋼の本数が異なるのみで、試験装置としては同一のものを使用する。

異形棒鋼頂部およびRCブロックとの境界位置には、変位計測のターゲットを設置し、载荷試験中のそれぞれの点の変位を計測できるようにした（図-3）。あと施工アンカーは、埋込長の下端から45°の角度をもって引き抜きによるコーン破壊が発生するとされていることから<sup>7)</sup>、試験装置の治具には、それぞれの埋込長に応じたコーン破壊の影響範囲外と考えられる位置に設置した。

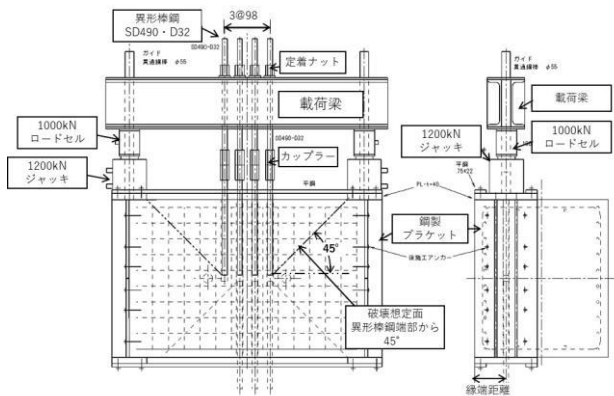


(a) 全体図

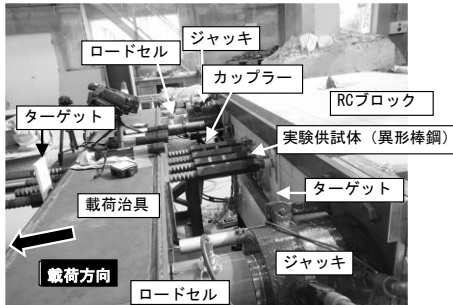


(b) 写真

図-4 試験装置 (Case-1)



(a) 全体図



(b) 写真

図-5 試験装置 (Case-3)

### (3) 載荷方法

載荷はジャッキによる鉛直方向の一方向載荷とし、異形棒鋼の破断またはコーン破壊、付着破壊に至るまで載荷することを目標とした。ただし、Case-2については、Case-3の試験に支障がないよう、ひび割れが発生したことを確認した後、破壊に至る前に載荷を停止することとした。また、ジャッキのストローク限界に達した場合、または明確に破壊に至らずとも荷重の低下が確認できた場合はそこで載荷を停止することとした。載荷中にRCブロック表面にひび割れが発生したときには、載荷を一時停止し、ひび割れ状況の確認を行った。

## 3. 試験結果

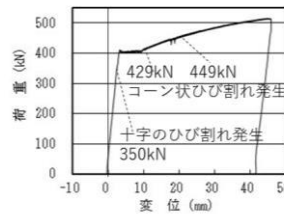
### (1) 荷重と変位の関係

試験結果を表-2に、荷重と変位の関係を図-6~8に示す。

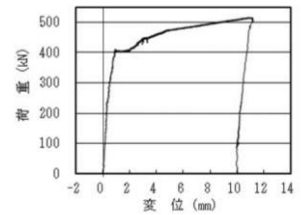
表-2 異形棒鋼の引き抜き試験結果

ケース	最大荷重 (kN)	最大変位 (mm) 異形棒鋼頂部	最大変位 (mm) RCブロック界面位置	最大変位 (mm) 異形棒鋼底部	破壊形状
Case-1	516	45.8	11.2	0.43	ストローク限界
Case-2	913	4.02	1.32	-	載荷停止
Case-3	1298	11.0	7.78	-	荷重低下による載荷停止

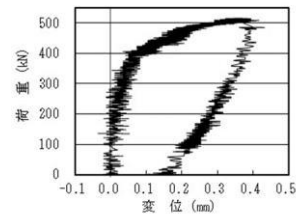
図-7(b), 8(b)において初期の変位がマイナスの値を示しているところがあるが、ターゲットを片持ち式に保持して1点で変位を計測していたために、鋼棒の初期の傾きによって数値がマイナスの値になったものと考えられる。また、図-7(a), 8(a)について、変位1mm程度までは、Case-1と比べて荷重に対する異形棒鋼頂部の変位が伸びる傾向を示しているが、これは複数本の異形棒鋼をカップラーで接続しているため、カップラーのかみ合わせの影響が顕著に出たものと考えられる。カップラーの影響を除外すれば、最初のひび割れ（以下、初期ひび割れ）が確認される段階は荷重と変位が比例関係にあると考えられる。



(a) 異形棒鋼頂部

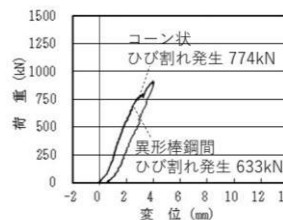


(b) RCブロック境界位置 (載荷開始時)

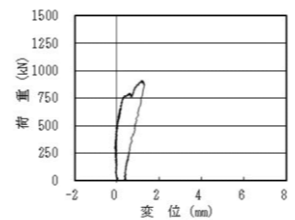


(c) 異形棒鋼下端

図-6 荷重と各位置での変位との関係 (Case-1)

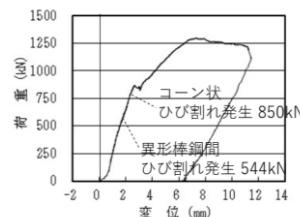


(a) 異形棒鋼頂部

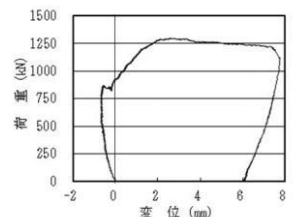


(b) RCブロック境界位置 (載荷開始時)

図-7 荷重と各位置での変位との関係 (Case-2)



(a) 異形棒鋼頂部



(b) RCブロック境界位置 (載荷開始時)

図-8 荷重と各位置での変位との関係 (Case-3)

Case-1においては400kNに達してしばらく一定の荷重で推移した後、荷重が大きくなり、ストローク限界を迎えたために載荷を終了した。本試験に使用したSD490の鉄筋の材料試験結果は、降伏強度 $522\text{kN/mm}^2$ であり、D32の公称断面積にて算出した降伏耐力は415kNとなる。Case-1の試験結果における降伏点の荷重は約410kNであり、降伏耐力と凡そ一致した。

Case-2はひび割れが発生した後、Case-3の耐荷機構に影響を及ぼす範囲にひび割れが及ばないと考えられる範囲で載荷を止め、その後除荷している。除荷後の残留変位はわずかであった。

Case-3は最大荷重に達した後、荷重が低下したため、載荷を終了した。除荷後は異形棒鋼頂部で6mm程度の残留変位が確認された。Case-3の試験では異形棒鋼4本に同時に載荷していることから、降伏耐力を4倍すると1660kNとなるが、最大荷重はそれより小さく、荷重低下の原因は異形棒鋼の降伏ではないと考えられる。

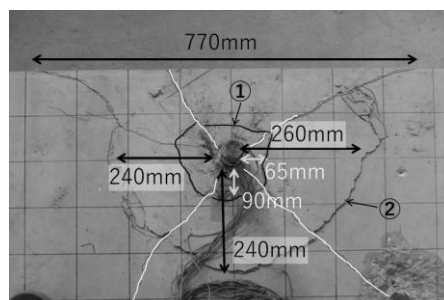
## (2) ひび割れ発生状況

引き抜き試験におけるひび割れ発生を試験時に撮影した動画で確認し、試験開始からひび割れ発生までの時間をもとに、動的計測をした実測値からひび割れ発生荷重を推定した。これを実測値として図-6～8の図中に記載している。

Case-1では、荷重が350kNのときに供試体上面に異形棒鋼を中心として十字にひび割れが発生し、縁端距離が短い側の側面では十字のひび割れの一本が側面に達した部分からひび割れが進展した(写真-1の白線部)。その後、荷重429kNでコンクリート表面に異形棒鋼を中心とした小規模な半径65～95mmの円形のひび割れ(写真-1の①)が発生し、449kNのときに更にその外側の異形棒鋼から240～260mmの位置にひび割れ(写真-1の②)が生じた。文献4)では異形棒鋼を中心として放射状にひび割れたのに対し、このひび割れは縁端距離が200mmの側で、ひび割れによる剥離範囲が広がった。写真-2, 3に示すように、ひび割れはコーン状であり、最深部の深さは小規模な円形のひび割れ①は38mm、その外側の大規模なひび割れ②は101mmであった。

Case-2では異形棒鋼設置側面には異形棒鋼をつなぐようなひび割れが633kNのときに発生した後、異形棒鋼を中心とした放射状のひび割れが発生した(写真-4)。供試体の上面には、700kNで供試体中央付近にひび割れが1本発生した後、埋込んだ異形

棒鋼の端部位置(以下、埋込長端部)に、774kNで埋め込まれた異形棒鋼の端部をつなぐようにひび割れが発生し、それがコーン状のひび割れを形成した(写真-5)。



※白線は最初に発生した十字のひび割れ  
写真-1 コンクリート表面のひび割れ (Case-1)



写真-2 供試体上面の小規模なコーン状ひび割れ①を はつりとった状態 (Case-1)

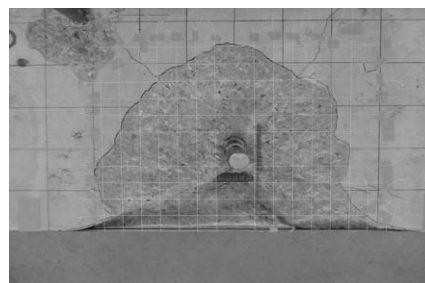


写真-3 供試体上面の大規模なコーン状ひび割れ②を はつりとった状態 (Case-1)

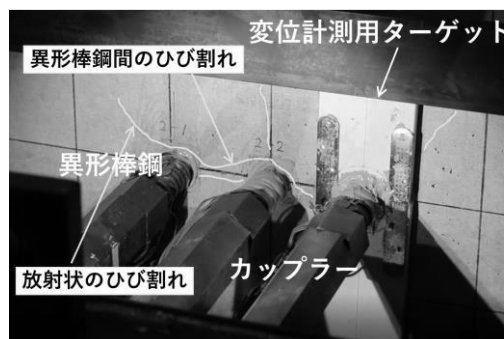


写真-4 Case-2 異形棒鋼間のひび割れと 異形棒鋼を中心とした放射状のひび割れ (載荷終了時点)

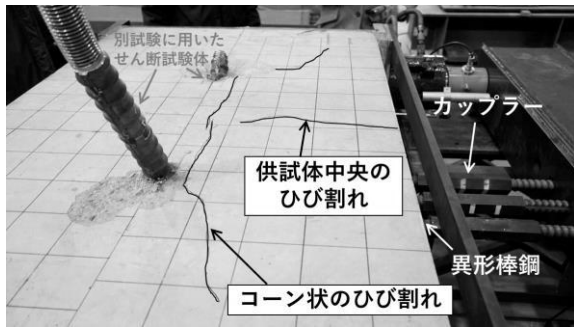


写真-5 Case-2 供試体上面のコーン状のひび割れ (載荷終了時点)

Case-3もCase-2に類似したひび割れの進展を見せた。異形棒鋼設置側面には異形棒鋼をつなぐようなひび割れが544kNで発生した後、異形棒鋼を中心とした放射状のひび割れが発生した(写真-6)。供試体の上面では、860kNで供試体上面の中央付近にひび割れが1本発生した。その後、埋込長端部に、埋め込まれた異形棒鋼の端部をつなぐようにひび割れとそこから斜めに伸びるひび割れが発生し、コーン状のひび割れを形成していることを確認した(写真-7)が、このとき荷重は供試体上面中央付近のひび割れ発生時よりわずかに荷重が低下しており、850kN程度であった。載荷が進むにつれ、コーン状のひび割れの内側に複数のひび割れが発生し、ひび割れの幅が広がっていった(写真-8)。



写真-6 Case-3 異形棒鋼間のひび割れと異形棒鋼を中心とした放射状のひび割れ (荷重 850kN時点)



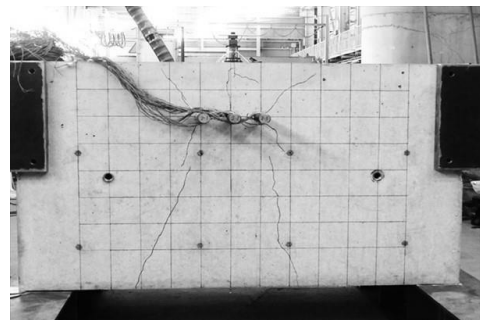
写真-7 Case-3 供試体上面のコーン状のひび割れ (荷重 850kN時点)



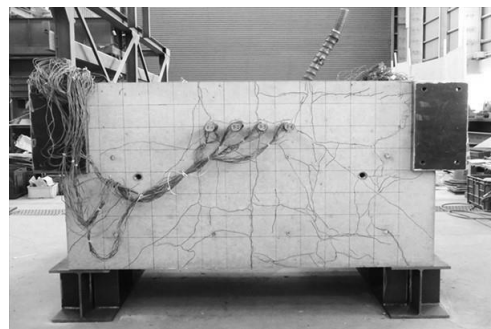
写真-8 Case-3 供試体上面のコーン状のひび割れ (載荷終了時点)

試験終了時のCase-2, 3を全体の状況を写真-9に示す。なお、Case-2, 3供試体上面中央の太径の鉄筋は既往研究<sup>4)</sup>のせん断試験の試験体であり、本引き抜き試験とは関係がない。

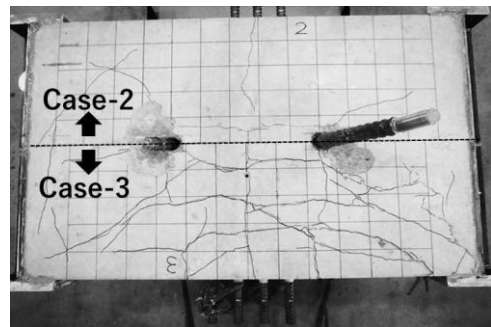
Case-2と3では、Case-1のような異形棒鋼設置側面における異形棒鋼を中心した円形のひび割れは確認できなかった。



(a) Case-2 異形棒鋼設置側面



(b) Case-3 異形棒鋼設置側面

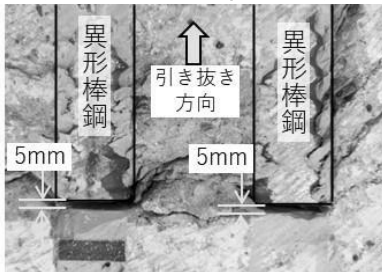


(c) Case-2, 3 供試体上面  
写真-9 Case-2, 3のひび割れ状況 (載荷終了時点)

実験後に供試体を切断して内部の試験体を確認したところ、写真-10(a)のように、埋込長端部を中心に、コーン状にひび割れが進展していたことが確認できた。写真-10(b)より、異形棒鋼の埋込長端部には5mmほどの隙間が確認でき、付着切れと異形棒鋼の抜け出しが発生していたことが推察される。



(a) Case-3 コーン状のひび割れ



(b) Case-3 埋込長端部の状況

写真-10 供試体切断による内部ひび割れの確認

#### 4. 各文献による耐力との比較

コーン破壊に対する耐力，付着破壊に対する耐力について，道路橋示方書Ⅲ編<sup>5)</sup>の照査式（以下，道示式）と土木学会によるコンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針（案）<sup>7)</sup>による算定式（以下，土木学会式）のそれぞれから求めた耐力と，試験において初期ひび割れが発生した荷重，試験での最大荷重を表-3に示す。道示式，土木学会式による耐力の算出にあたっては，コンクリートの圧縮強度に材齢27日の強度（30N/mm<sup>2</sup>）を用いた。

表-3 各種耐力の比較

ケース	破壊形式	道示式 (算出値) kN	土木 学会式 (算出値) kN	初期 ひび割れ 発生荷重 (実測値) kN	最大荷重 (実測値) kN
Case-1	コーン破壊	29	407	350	516
	付着破壊	125	336		
Case-2	コーン破壊	83	506	633	913
	付着破壊	376	1009		
Case-3	コーン破壊	110	556	544	1298
	付着破壊	502	1346		

道示式におけるコーン破壊の特性値はコンクリートの表面からアンカーボルト径の2倍の深さを起点としたひび割れが発生し，表面のコンクリートが可逆性を有する限界の状態に至ることを想定して設定された値であり，付着破壊の特性値はコーン状の破壊が生じた後に付着破壊が発生することを想定して設定されている。そのため，付着破壊の照査式では，コーン状の破壊（2D）分を差し引いた有効埋込長を用いることとされている（図-9）。ただし，道示式は先付けアンカーを対象とした式であるが，ここでは接着剤を用いてあと施工をした異形棒鋼に対して道示式を準用している。

一方，土木学会式では，アンカーボルトの下端から45°の角度をもって引き抜きによるコーン破壊が発生することを想定して式が作られている（図-10）。土木学会式は適用範囲がD25までであるため，表-3には同式を外挿した計算結果を示している。

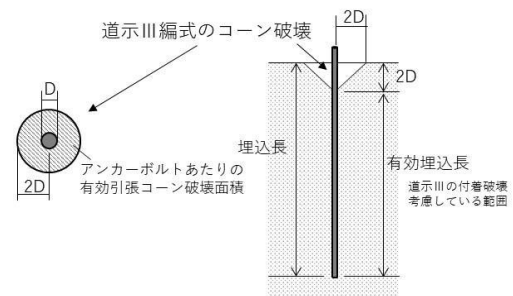


図-9 道示式によるコーン破壊、付着破壊の考え方

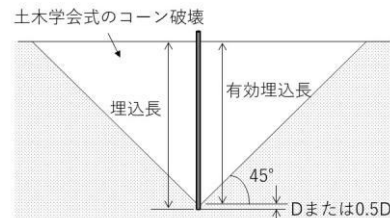


図-10 土木学会式によるコーン破壊の考え方<sup>7)</sup>

文献4)では異形棒鋼の周囲に円形のひび割れが発生していたが，実測したひび割れ発生荷重は道示式による算出値を大きく超過していた。それらの実験と縁端距離が異なる本実験のCase-1では，初期のひび割れが円形ではなかったという違いがあったが，道示式の想定に類似するひび割れが発生した。初期ひび割れ発生荷重については，道示式の算出値を大きく超過した。

Case-2と3は，道示式で想定されるようなコンクリート表面の円形のひび割れは発生せず，初期ひび割れ発生荷重は道示式の算出値を大きく超過した。ひび割れの形状は土木学会式で想定するコーン破壊に近いものであった。

本実験の結果では、初期ひび割れが発生した段階で、Case-1～3にすべてにおいて、土木学会式のコーン破壊または付着破壊耐力の算出値を超過することが確認できた。

## 5. 試験における異形棒鋼のひずみ分布の変化

Case-1の異形棒鋼のひずみ分布を図-11に示す。図-11において1Dと3.5Dの位置のひずみゲージは円形のひび割れ発生時点、5D～9Dの位置のひずみゲージは最大荷重に達した時点で計測不能になっていたため、図示していない。2D位置のひずみは20000 $\mu$ を超える値であったため、図外となっているが、表面近くで局所的に大きなひずみが発生したことが文献4)で確認された傾向と一致した。一方、文献4)では14Dの位置ではひずみはわずかであった。しかし、Case-1では初期ひび割れ発生から大規模なひび割れが発生するまでは14Dの位置のひずみがわずかであったが、最大荷重のときは14Dの位置でひずみの増加が確認された。

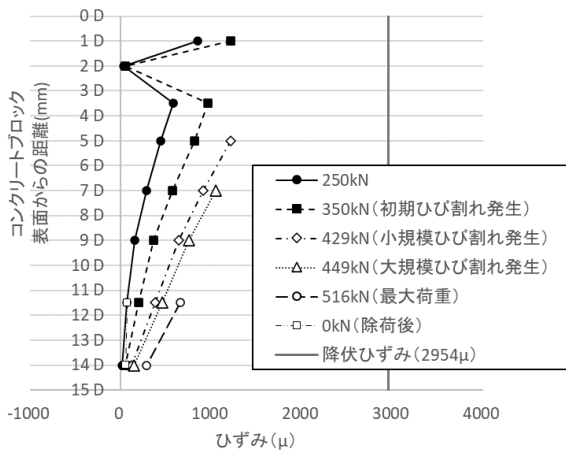


図-11 深さ方向のひずみ分布 (Case-1)

Case-2の3本のうち中央の異形棒鋼のひずみ分布の変化を図-12に、Case-3のうち写真-9(b)の右から2本目の異形棒鋼のひずみ変化を図-13に示す。図-13において9Dの位置のひずみゲージは最大荷重点、14Dの位置のひずみゲージは除荷時点で計測不能になっていたため、図示していない。Case-2, 3ともに、降伏ひずみを超えるようなひずみは発生しておらず、表面近くで局所的に大きなひずみが発生することはなかった。初期ひび割れ発生時点では14Dの位置でのひずみはわずかであったが、埋込長端部のひび割れ発生時点で、14Dの位置でひずみの増加が確認された。

これらのことから、縁端距離200mmの位置に設置

した場合、埋込長と同程度の縁端距離を確保して異形棒鋼1本を引き抜く場合とは異なる挙動が現れることが確認された。ひび割れの形状とあわせて考えれば、異形棒鋼1本を縁端距離200mmの位置に設置したCase-1の場合、図-7のようなコンクリート表面がコーン状に破壊するモードとなるものの、RCブロックの深部でもひずみが確認されたことから、図-8のような埋込長端部からのコーン破壊の傾向も示したといえる。さらに、異形棒鋼複数本を縁端距離200mmの位置に設置した場合には、コンクリート表面がコーン状に破壊するモードは見られず、埋込長端部からコーン破壊が発生するモードに変わることがひずみの変化からも明らかとなった。

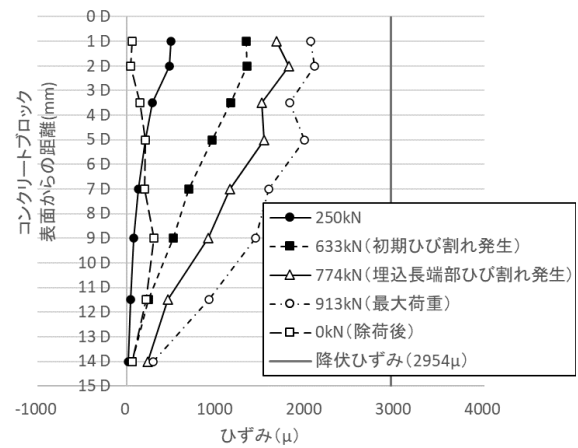


図-12 深さ方向のひずみ分布 (Case-2, 中央の異形棒鋼)

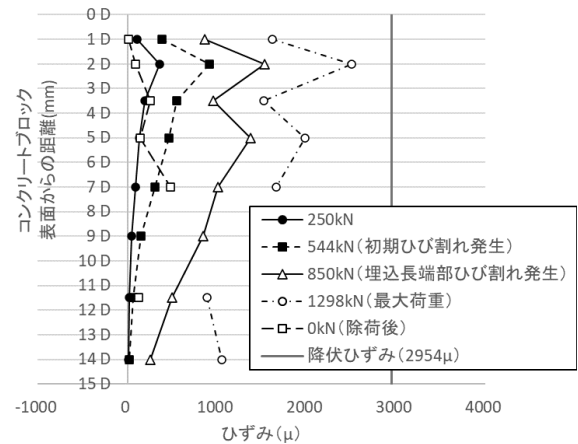


図-13 深さ方向のひずみ分布 (Case-3, 写真-9(b)右から2本目の異形棒鋼)

## 5. まとめ

本研究では、D32・SD490の異形棒鋼を対象に、埋込長15D、縁端距離200mmとした場合について、異形棒鋼1本の場合1ケースと複数本の場合2ケース(3本または4本、異形棒鋼間の距離は3D)、合計3

ケースの引き抜き試験を行った。この試験により、以下のことが明らかとなった。

- 1) 試験の結果、カップラーによる接合の影響を除外すれば、初期ひび割れが確認される段階は荷重と変位が比例関係にあると考えられる。コーン状のひび割れ発生後に荷重を停止したCase-2で確認された残留変位はわずかであった。
- 2) 引き抜き試験結果と道示式による算出値では、耐力の値に差異があること、複数本の異形棒鋼の引き抜き試験で発生したひび割れは、道示式で想定しているひび割れと異なることを確認した。道示式が先付けアンカーの検討に基づいた式であるのに対し、本検討ではあと施工アンカーを対象としたことから、付着方法の違いにより破壊モードの違いが現れたと考えられる。
- 3) 複数本の異形棒鋼の引き抜き試験で発生したひび割れは、土木学会式が想定している埋込長端部から発生するコーン破壊と形状が類似していた。本実験で確認された初期ひび割れ発生荷重は、D25までを対象としている土木学会式を外挿して算出したコーン破壊耐力または付着破壊耐力の算出値よりも大きかった。
- 4) 異形棒鋼の引き抜き試験により、縁端距離を200mmとした場合、異形棒鋼1本の場合でも複数本の場合でも、初期ひび割れの段階では埋込長端部付近でのひずみはわずかであったが、荷重が進行するとひずみが増加することが確認された。ひび割れ形状やひずみから、異形棒鋼1本かつ縁端距離200mmの場合に、コンクリート表面のコーン状の破壊と埋込長の端部からの破

壊の両方の傾向を示し、複数本の異形棒鋼を縁端距離200mmの位置に設置した場合は、コンクリート表面のコーン状の破壊から埋込長端部からのコーン破壊に完全に移行したと考えられる。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2017.
- 2) 三倉寛明，田所敏弥，岡本大，笠裕一郎：耐荷機構に基づくあと施工アンカーの引抜耐力に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp. 505-510，2015.
- 3) 三倉寛明，田所敏弥，岡本大，笠裕一郎：あと施工アンカーの引抜耐力におよぼすへりあき寸法とアンカー間隔の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp. 463-468，2017.
- 4) 廣江垂紀子，中尾尚史，大住道生：落橋防止構造および横変位拘束構造の取付部の付着性能に関する実験的検討，第24回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.27-32，2021
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編）・同解説，丸善出版，2017.
- 6) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第二集橋梁保全編，2019
- 7) 土木学会コンクリート委員会あと施工アンカー小委員会編：コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー141号，2014