

落橋防止構造等の取付部に用いるアンカーボルトの抵抗特性に関する実験的検討

廣江亜紀子・菅原達也・中尾尚史・大住道生

1. はじめに

落橋防止構造は、上部構造と下部構造または上部構造同士をケーブル等で接続するなどして、橋の上部構造が下部構造から容易には落下しないようにするための構造である。道路橋の性能には、耐荷性能、耐久性能の他に、橋の使用目的との適合性の観点から必要な性能があり¹⁾、落橋防止構造はこれを満足するための構造である。落橋防止構造は取付部を含めて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²⁾に規定されている。弾性域に留めるのは、落橋防止構造全体として作用力に抵抗するだけでなく、変形が大きくなるようにするためであるが、取付部の具体的な照査方法は定められていない。過去の地震においても鉄筋コンクリート（以下「RC」という。）橋台の前面に取り付けられた落橋防止構造の取付部のアンカーボルトが引き抜ける被害が生じている（写真-1）。



写真-1 縁端付近に取り付けられた落橋防止構造の取付部の損傷（アンカーの引き抜け）³⁾

そこで、RC橋台の前面等に取り付ける落橋防止構造の取付部に用いるあと施工のアンカーボルトに対する照査方法を提案するため、RCブロックに埋め込んだアンカーボルトの引抜き実験を行った⁴⁾⁵⁾。

2. 落橋防止構造の取付部に想定される破壊

RC橋台の前面等に落橋防止構造をあと施工のアンカーボルトで取り付ける場合に想定される破壊モードを表-1に示す。取付部全体としての破壊

表-1 想定される破壊モード

アンカーボルトの破断	アンカーボルトに引張力が作用したときに、アンカーボルト自体の耐力を超過して破断
コーン破壊	アンカーボルトに引張力が作用したときに、母材であるコンクリートが円錐状（コーン状）に破壊
付着破壊	アンカーボルトに引張力が作用したときに、母材であるコンクリートと接着剤の界面または接着剤とアンカーボルトの界面で破壊

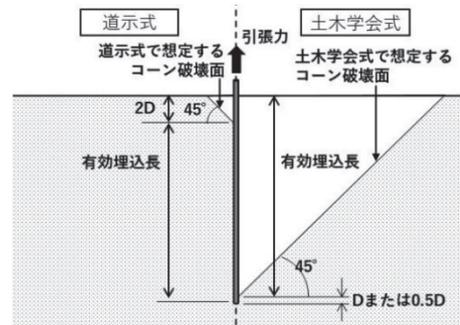


図-1 文献6)・7)のコーン破壊の考え方（左：道示式、右：土木学会式）

は、これらの破壊モードのうち最初に発生したもので決まると考えられる。道路橋示方書III編⁶⁾（以下「道示III」という。）において直径25mm～51mmの先付けのアンカーボルトを対象とした評価式が、土木学会の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）⁷⁾では直径25mmまでのあと施工アンカーを対象とした評価式がそれぞれ提案されている（以下、それぞれの文献によるコーン破壊・付着破壊の評価式を道示式、土木学会式と称する）。これらの文献においてコーン破壊の形状はそれぞれ異なる想定がされており、道示式ではコンクリート表面が深さ2D（D：アンカーボルトの直径）のコーン状に破壊することを、土木学会式では埋め込んだアンカーボルトの先端（以下「埋込長端部」という。）からコーン状に破壊が発生することを指す（図-1）。

3. 実験概要

3.1 実験計画の検討

表-1の各破壊モードに対して、落橋防止構造の取付部がどのような状態であれば作用力に対して弾性域に留まると言えるかを確認することが必要

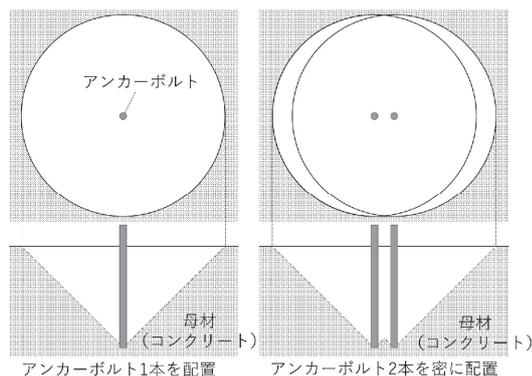


図-2 コーン破壊の抵抗範囲の違い

となる。

また、落橋防止構造の取付部には、複数本のアンカーボルトが密に配置されることが多いが、そのような場合は、隣り合うアンカーボルト同士で抵抗範囲が重複することによる耐力の低減（群効果）を考慮する必要がある。例えば、図-2のように2本のアンカーボルトを接近させて配置した場合、隣り合うアンカーボルト同士で抵抗範囲が重複するため、土木学会式で想定するような埋込長端部からのコーン破壊に抵抗する母材コンクリートの範囲は1本のとくと2本のときの差がわずかになると考えられる。そのため、アンカーボルトを2本配置したとしても2倍のコーン破壊に対する抵抗力を見込むことはできない。アンカーボルトを密に配置した場合は群効果が与える影響を、コーン破壊の形状と合わせて検討する必要がある。

これらを踏まえて、あと施工のアンカーボルトを対象に、群効果の影響を確認するためにアンカーボルトの本数をパラメータとし、引き抜き方向に荷重したときの破壊モードの確認と作用力に対して弾性域と考えられる状態の検討を行うこととした。

3.2 実験ケース

引抜き実験の実験ケースを表-2に示す。実験の前提条件として、実際の落橋防止構造の設計で用いられる直径32mm（D32と表記）の異形棒鋼を、アンカーボルトとしてRCブロックに埋込長15D⁸⁾で取付けるものとした。また、縁端距離は土木学会式の想定するコーン破壊の抵抗範囲を確保した縁端距離15D（480mm）以上と、RC構造の抵抗機構を考慮して橋台等の最外縁鉄筋より内側に設置することを想定した200mmの2ケースとした。異形棒鋼を複数本配置するときの間隔は道示Ⅲを参考に異形棒鋼の直径の3倍（異形棒鋼中心間の

表-2 引抜き実験の実験ケース

	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	SD345	D32	1本	-	15D	480mm
Case-2	SD490	D32	1本	-	15D	200mm
Case-3	SD490	D32	3本	96mm (3D)	15D	200mm
Case-4	SD490	D32	4本	96mm (3D)	15D	200mm

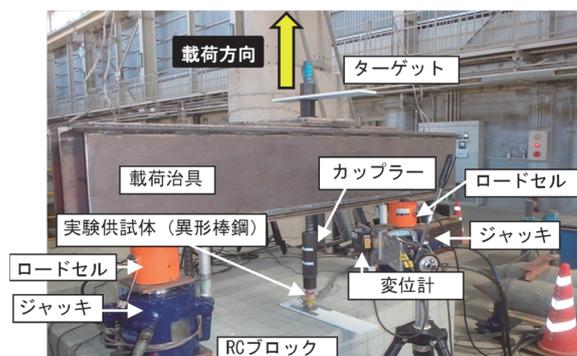


写真-2 引抜き実験装置（Case-2）

距離96mm）とした。詳細は後述するが、SD345を用いたCase-1では異形棒鋼の破断により終局を迎えた。しかし、実施工において想定される密な配置で生じる群効果や縁端距離の影響を受けやすい付着破壊やコーン破壊について、抵抗特性を確認する必要があるため、Case-2～4ではSD490を用いることとした。

RCブロックの設計基準強度は24N/mm²とし、材齢27日の圧縮強度は30N/mm²であった。RCブロックの配筋はRC橋台を想定して行った。

異形棒鋼の設置は文献7)を参考に、RCブロックにφ40mmの削孔を行い、十分に孔内を清掃した後、孔内に異形棒鋼を設置してエポキシ樹脂で定着した。

3.3 荷重方法

実験装置は、ジャッキを使って異形棒鋼を引き抜く構造である。Case-1は異形棒鋼をジャッキ1台で、Case-2～4はカップラーを用いてRCブロックに固定した異形棒鋼を荷重治具と接続してジャッキ2台の荷重が均等になるように調整しながら、一方向に漸増荷重を行った。例としてCase-2に対する実験装置を写真-2に示す。異形棒鋼の頂部にターゲットを設置し、実験中のその点の変位を計測した。

4. 実験結果

4.1 ひび割れ形状

引抜き実験の結果、Case-1は異形棒鋼の破断、Case-2はジャッキのストローク限界、Case-4は荷重の低下を確認し、荷重を終了した。Case-3

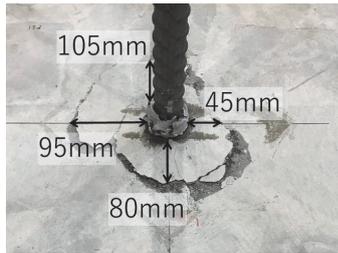
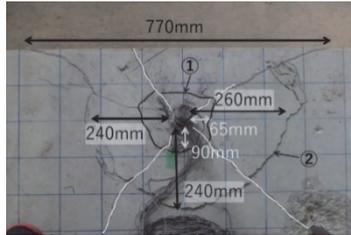


写真-3 コンクリート表面のひび割れ (Case-1)



※白線は最初に発生した十字のひび割れ
写真-4 コンクリート表面のひび割れ (Case-2)

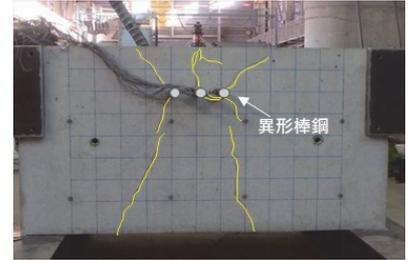


写真-5 コンクリート表面のひび割れ (Case-3側面)



写真-6 コンクリート表面のひび割れ (Case-4側面)

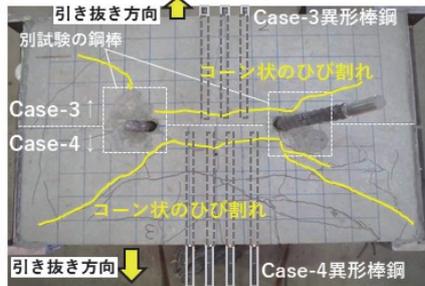


写真-7 コンクリート表面のひび割れ (Case-3,4(写真-5,6を上から撮影))

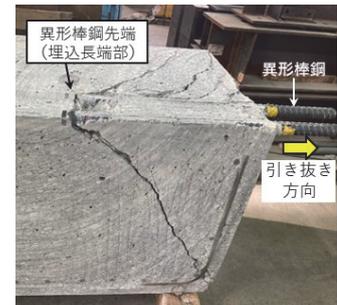


写真-8 供試体切断で確認した内部ひび割れ (Case-4)

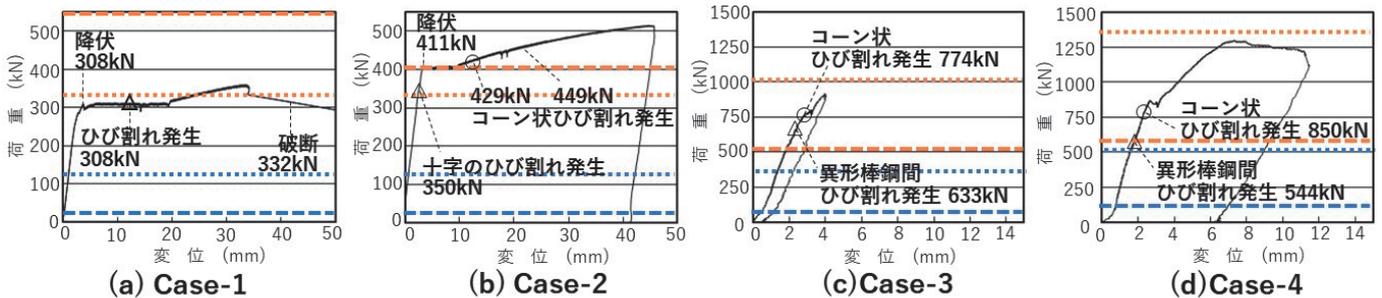


図-3 荷重-変位関係

は、ひび割れ発生後にひび割れの増加を確認した後、破壊に至る前に荷重を停止して除荷した。

実験後のひび割れ状況を写真-3～7に示す。Case-1は写真-3のように、異形棒鋼を中心とした円形のひび割れが発生した。Case-2は異形棒鋼を中心に十字にひび割れが発生(写真-4の白線部)したが、その後、コンクリート表面に異形棒鋼を中心とした小規模な円形のひび割れ(写真-4の①)が発生し、更に荷重を続けるとその外側にもひび割れ(写真-4の②)が生じた。Case-1,2ともに実験後にはつったところ、異形棒鋼を中心としてコンクリート表面がコーン状にひび割れていることが確認された。

一方、Case-3,4では異形棒鋼を中心とした円形のひび割れは確認されず(写真-5,6)、異形棒鋼の埋込長端部付近においてコーン状のひび割れが発生した(写真-7の黄色線部)。さらに、実験後Case-3,4の供試体を切断して内部を確認した

ところ、写真-8のように、埋込長端部を中心にコーン状のひび割れが進展していたことが確認できた。

4.2 荷重-変位関係

荷重と異形棒鋼頂部における変位の関係とひび割れ発生タイミングを図-3に示す。図-3には参考として道示式、土木学会式により材料実測値を用いて算出したコーン破壊耐力と附着破壊耐力も併せて図示している。なお、道示式と土木学会式の適用条件は本実験と一致しないが、ここではそのまま準用した。

Case-1はひび割れ発生の前、Case-2は初期ひび割れが発生した後に荷重が一定になったが、そのときの荷重が材料試験結果から導いた異形棒鋼の降伏耐力(SD345は306kN、SD490は415kN)とよく一致した。埋込長端部からのコーン破壊や附着破壊の兆候が見られなかったことから、異形棒鋼が降伏したものと考えられ、それまでは取付

部全体として弾性域であったと考えられる。降伏時の荷重は道示式によるコーン破壊、付着破壊の耐力の推定値を大きく上回った。

Case-3と4は、異形棒鋼をカップラーで接続しているため、載荷初期の荷重-変位関係はカップラーのかみ合わせにより挙動が安定していないが、その影響を除外すれば、荷重変位関係はコーン状のひび割れが発生するまでは比例関係にあると推察される。Case-3で除荷後の残留変位はわずかであったことと合わせ、コーン状のひび割れ発生までは取付部全体として弾性域と考えられる。コーン状ひび割れ発生時点の荷重は、道示式、土木学会式による推定値を上回り、土木学会式により近い結果となった。

道示式は先付けアンカーを対象としていること、コンクリート表面のコーン破壊を想定しており、Case-1と2のひび割れと形状は類似するがCase-3と4で確認されたひび割れ形状とは異なることが、推定値と実験値が大きく乖離した原因と考えられる。一方、Case-3と4のひび割れ形状は土木学会式で想定するコーン破壊の形状と同様であったため、コーン破壊についての実験値と推定値が道示式と比べれば近い値となったと考えられる。

5. まとめ

本実験の結果から、異形棒鋼が1本の場合のひび割れの形状は道示式の想定するコーン破壊の形状と類似したが、複数本の場合は埋込長端部からのコーン破壊のモードを示した。

また、異形棒鋼が複数本の場合、コーン状のひび割れ発生までは荷重と変位が比例関係にあり、残留変位もわずかであったことから、取付部全体

として弾性域と考えられる。なお、異形棒鋼が複数本するときコーン状のひび割れ発生荷重は道示式、土木学会式による推定値を上回り、土木学会式により近い結果となった。

ただし、上記の結果がすべての落橋防止構造の取付部に適用できるわけではなく、本実験とは異なる条件の場合は、弾性域と考えられる範囲や破壊モードが異なる可能性がある。今後は本実験で得られた知見をもとに落橋防止構造の取付部に用いるあと施工のアンカーボルトに対する照査方法を検討していく。

参考文献

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編、2017.
- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、2017.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告、国総研資料814号、2014
- 廣江亜紀子、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
- 廣江亜紀子、菅原達也、中尾尚史、大住道生：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、第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集、pp.149~156、2022
- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ編、コンクリート橋・コンクリート部材編、2017.
- 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的设计・施工指針(案)、コンクリートライブラリー141号、2014
- 東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)：設計要領第二集橋梁保全編、2019

廣江亜紀子



土木研究所 橋梁構造研究グループ 主任研究員
HIROE Akiko

菅原達也



土木研究所 橋梁構造研究グループ 交流研究員
SUGAWARA Tatsuya

中尾尚史



研究当時 土木研究所 橋梁構造研究グループ専門研究員、現 国立舞鶴工業高等学校建設システム工学科 講師、博士(工学)
Dr. NAKAO Hisashi

大住道生



土木研究所 橋梁構造研究グループ 上席研究員、博士(工学)
Dr. OHSUMI Michio