論文　鋼製落橋防止装置に利用されるあと施工アンカーの耐力に関する一考察

古屋　卓稔[*1]・笠　裕一郎[*1]・田所　敏弥[*2]・岡本　大[*3]

要旨：鋼製落橋防止装置は地震時の支承部損傷による落橋を防ぐために用いられており，本研究では，鋼製落橋防止装置の載荷試験を行い，鋼製落橋防止装置を固定しているあと施工アンカーへの影響について検討を行った。具体的には，あと施工アンカーの耐力算定式の確認や破壊性状の確認，定着長の影響，あと施工アンカーの力の分担について検討した。試験結果より，既設構造物を想定したコンクリートにコーン破壊が発生することを確認した。また，あと施工アンカーの力の分担が不均等なため，実験値が設計値に達しないケースがあることを確認した。

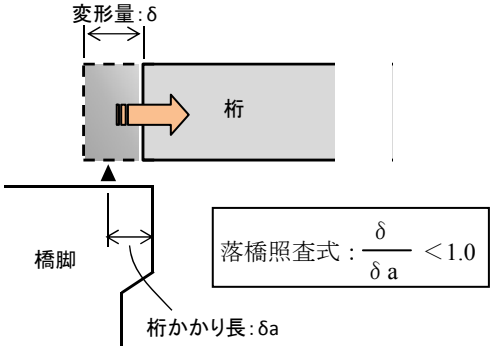
キーワード：鋼製落橋防止装置，あと施工アンカー，引張耐力，コーン破壊

1. はじめに

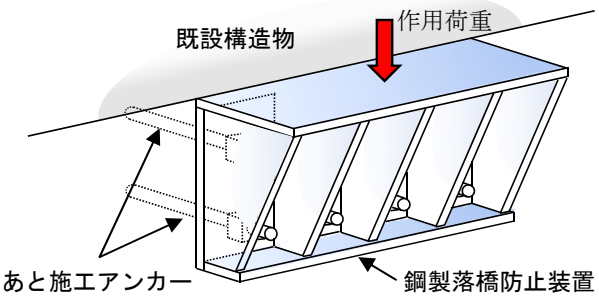
近年頻発する大規模地震を踏まえ，RC ラーメン高架橋や RC 橋脚をはじめとした既設構造物では，崩落を防止する目的で耐震補強が実施されている。その多くが主要な部材となる柱への鋼板等の巻き立て補強であり，せん断破壊の防止やじん性能の向上が行われる。しかしながら，巻き立て補強は部材性能を向上させるものの，地震時の応答を低減させるものではない。さらに，既設構造物の設計年度によって想定している地震動の大きさも異なるため，設計当初に比べて大きな応答が発生すると考えられる。そのため，構造物の地震時変形に伴う桁の落橋防止対策が別途必要となる。

また，桁を支える支承部には，落橋防止を目的とした鋼製ストッパーが配置される。ただし，既設構造物において，地震時における支承部の既設ストッパーの照査が満足せず，かつ応答計算により得られた変形量δが桁かかり長 δa より大きい場合（**図－1** 参照），落橋防止装置が設置される。その際，落橋防止装置はあと施工アンカーにより定着され，落橋防止装置の設計と合わせてあと施工アンカーの耐力照査が必要となる。

なお，鉄道構造物では，落橋防止装置の設計およびあと施工アンカーの照査について，あと施工アンカー工法設計施工の手引き [1)]と支承部の耐震補強設計の手引き [2)]が用いられる。これらの手引きでは，必要となる定着長やあと施工アンカー本数等の考え方が示されているが，照査式に関してはアンカー1 本あたりの引抜耐力が検討されているのみである。そのため，既設構造物天端とあと施工アンカー間の距離（以下，へりあき）や，群効果にといった，落橋防止装置に影響を与える項目について十分な検討がされていない。また，落橋防止装置に対する試験もほとんどないため，落橋防止装置に使用されるあと施工アンカーの耐力検討が必要であるといえる。



図－1　桁かかり長と変形量



図－2　鋼製落橋防止装置

以上を踏まえ，本研究では落橋防止装置の定着に利用されるあと施工アンカーに着目した試験を行った。なお，落橋防止装置は**図－2** に示す鋼製落橋防止装置を想定した。また，鉄筋の破断による破壊モードを防止するため，あと施工アンカーには高強度鉄筋を使用した。

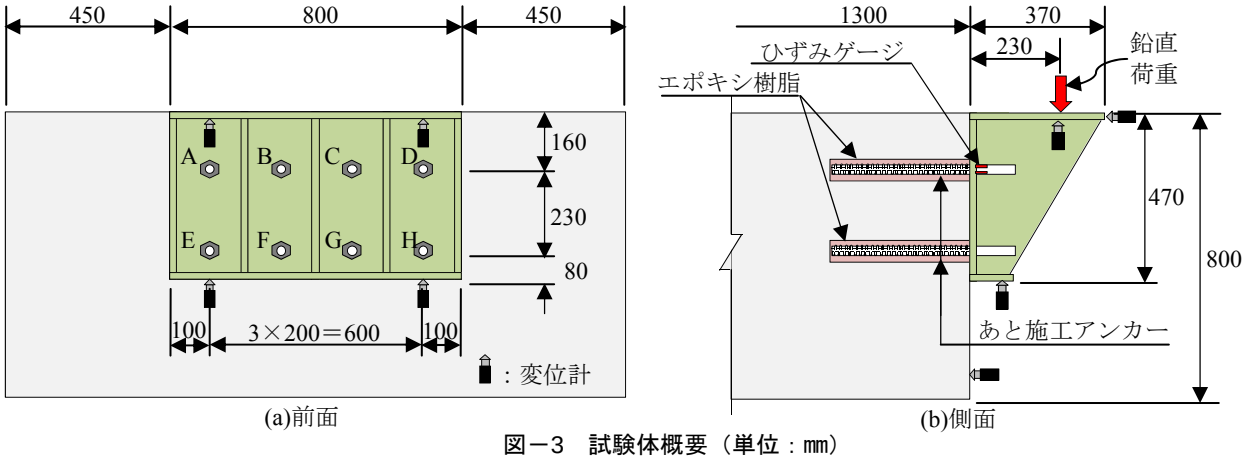
2. 試験概要

2.1 試験体概要

(1) コンクリート部材

コンクリート部材は，既設橋脚の天端部を想定した

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造　研究員　修(工)　(正会員)
*2 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造　主任研究員　博(工)　(正会員)
*3 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造　室長　博(工)　(正会員)



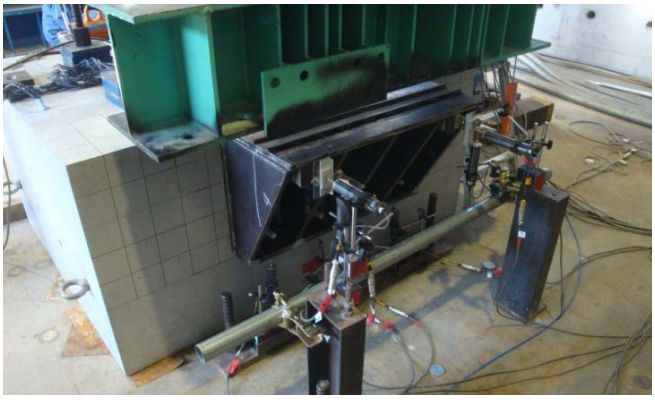
図－3　試験体概要（単位：mm）

表－1　計測項目

測定項目	位置
荷重	鉛直荷重
変位	装置上面変位
	装置下面変位
	装置水平変位
	コンクリート試験体水平変位
鉄筋ひずみ	先施工アンカー定着部ひずみ
	あと施工アンカーひずみ
ひび割れ・損傷状況	

表－2　検討ケース

ケースNo.	定着長	あと施工/先施工
1	10φ=250mm	先施工アンカー
2	5φ=125mm	あと施工アンカー
3	10φ=250mm	あと施工アンカー
4	15φ=375mm	あと施工アンカー



図－4　試験体設置状況

1700×1300mm×800mm の試験体を 2 体作成した（**図－3**, **図－4** 参照）。また，コンクリート試験体の 2 面に落橋防止装置を設置し，載荷試験を行った。載荷試験では，あと施工アンカーに曲げモーメントとせん断力が作用するように設定した。

コンクリート強度は，設計基準強度を 24N/mm^2（実圧縮強度 21N/mm^2）に設定した。なお，当該試験では，あと施工アンカーの引張耐力に着目した試験を行うことを目的としたため，コンクリート試験体は無筋とした。

(2) 鋼製落橋防止装置

支承部の耐震補強設計の手引き [2)]の事例を参考に落橋防止装置を製作した。落橋防止装置の寸法を**図－3** に示す。なお，同手引きでは，あと施工アンカーとして D32 を標準としており，当該試験で使用するあと施工アンカーを D25 としたため，落橋防止装置も 25/32=0.78 スケールとした。また，それに伴い 19mm の鋼板を用いた。

落橋防止装置は SM400 の鋼材を使用し，すみ肉溶接によって接合した。また，あと施工アンカー用の φ45mm の穴を 8 個開けている。試験では，**図－3** および**表－1** に示す落橋防止装置の変位や鉄筋ひずみを測定した。

(3) あと施工アンカー

あと施工アンカーは高強度鉄筋（降伏強度 978N/mm^2，引張強度 1059N/mm^2，降伏ひずみ 4770μ）を使用し，鉄筋径を D25 とした。また，エポキシ樹脂（引張強度 75.7MPa）を用いて定着した。

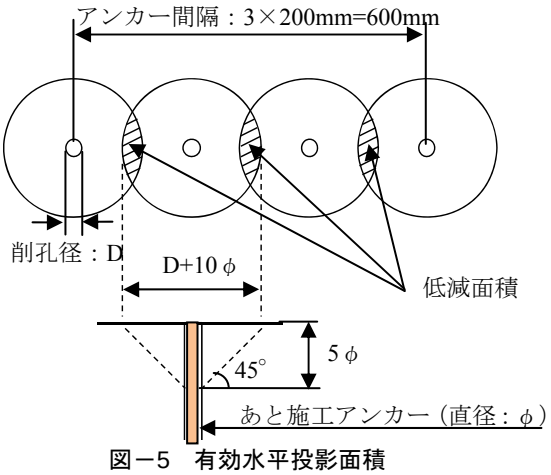
試験は，**表－2** に示すアンカー径 φ の 5 倍，10 倍，15 倍の定着長を有した 3 ケースと，先施工アンカー（アンカー径 φ の 10 倍）の 1 ケースの計 4 ケースで検討を行った。あと施工アンカーには，定着部外側にひずみゲージを設置し，落橋防止装置に利用されるあと施工アンカーの力の伝達について確認を行った。また，先施工アンカーの試験では，コンクリート内のアンカー鉄筋に作用するひずみの測定を行った。

なお，アンカー鉄筋の配置に対し，以下では**図－3** に示す A～H で箇所を表すものとする。

2.2 あと施工アンカーの引張耐力

鉄道構造物における落橋防止装置のあと施工アンカーの引張耐力は，支承部の耐震補強設計の手引き [2)]により，モルタルアンカーを基本とした定式化がされている。そこで，当該試験と比較のため，あと施工アンカー工法設計施工の手引き [1)]を参考に，樹脂系アンカー用の係数に変換した。変換した式を下記に示す。なお，設計では，下記の式(1)，(2)のうち，小さい方を引張耐力として用いている。

$$T_{ud1} = \{7.5 \cdot \pi \cdot \phi \cdot (D + 5.5 \cdot \phi) \cdot f'^{\,1/3}_{cd} \cdot \alpha + 2.4 \cdot \pi \cdot D \cdot (L - 4 \cdot \phi) \cdot f'^{\,2/3}_{cd}\} / \gamma_b \quad (1)$$



図－5　有効水平投影面積

表－3　引張耐力算定結果（単位：kN）

ケース	耐力式(1)	耐力式(2)
No.2(5φ)	146.0	1495.0
No.3(10φ)	390.4	1495.0
No.4(15φ)	634.8	1495.0

$$T_{ud2} = f_{syd} \cdot A_{s2}/\gamma_b \qquad (2)$$

ここで，φ：アンカー径，D：削孔径，f'_{cd}：コンクリートの設計圧縮強度，L：アンカーの埋め込み長，f_{syd}：アンカーの設計引張降伏強度，α：有効水平投影面積の低減係数，A_{s2}：ネジ部有効断面積，γ_b：部材係数（T_{ud1}では 1.5，T_{ud2}では 1.0）である。なお，当該式は引張力を受ける上段部のアンカーのみに適用される。

図－5 に，有効水平投影面積の低減係数αについて示す。この低減係数は，アンカーの群効果を考慮する際に必要であり，**図－5** に示すように，アンカー1 本あたりの有効投影面積が重複する場合，重なった面積を低減した有効面積を用いて耐力算定が行われる。

表－3 に，ケース No.2～4 でのあと施工アンカー4 本の耐力算定結果を示す。式(2)はアンカーの引張降伏強度に比例するため，高強度鉄筋を用いた当該試験では式(1)と比較して大きくなっている。

また，アンカーに作用する引張力 T_d は下記の式(3)によって求めている。

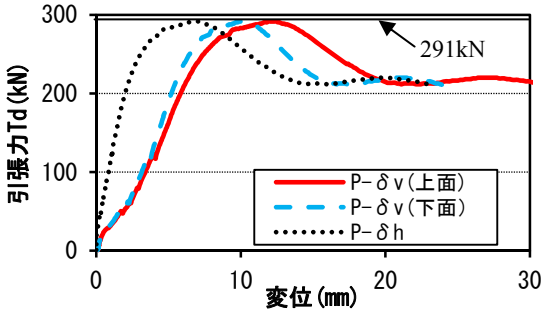
$$T_d = V \cdot L/h \qquad (3)$$

ここで，V：設計鉛直力，L：鋼製落橋防止装置接地面からの載荷距離(L=230mm)，h：あと施工アンカーの上段部と下段部距離(h=230mm)である。なお，載荷距離 L は地震時の変形量δと桁掛かり長δaの差分より与えられており（**図－1** 参照），載荷距離 L と桁の支承サイズを考慮して鋼製落橋防止装置の形状を決定している。

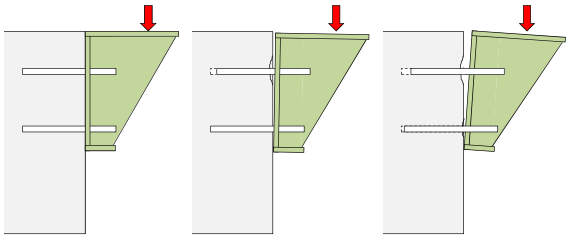
3. 先施工アンカー試験結果

3.1 破壊形態考察

図－6 に，先施工アンカーを用いた落橋防止装置への載荷試験結果（ケース No.1）を示す。ここで，横軸は水平および鉛直方向の変位，縦軸は載荷鉛直荷重に式(3)を用いて算出したアンカーに作用する引張力 T_d である。

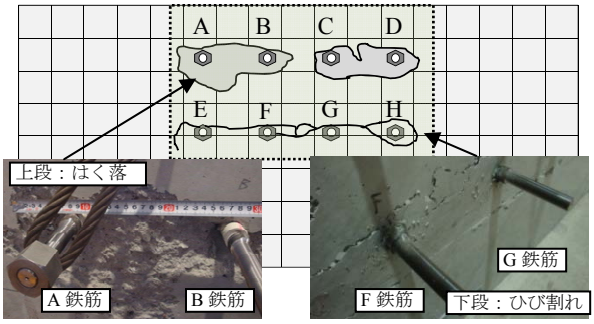


図－6　荷重-変位曲線（ケース No.1）



(ⅰ)破壊前　(ⅱ)破壊時　(ⅲ)破壊後

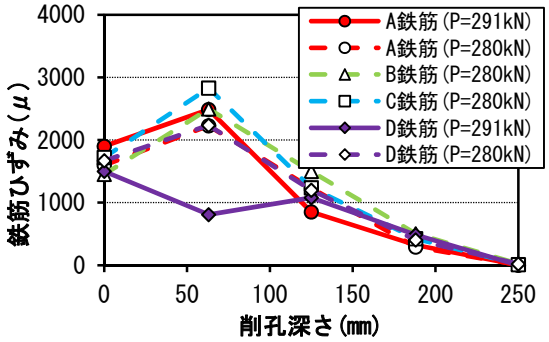
図－7　落橋防止装置の破壊モード（ケース No.1）



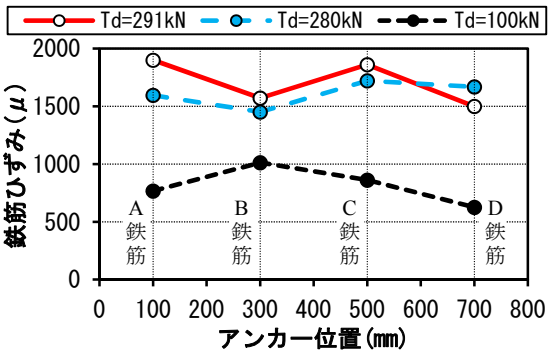
図－8　落橋防止装置取り外し後の破壊状況

試験結果より，鋼製落橋防止装置上面の鉛直変位が 12.2mm の時，引張力が T_d=291kN で最大となる結果となった。また，最大引張力時の落橋防止装置下面の鉛直変位は 10.1mm，水平変位は 6.9mm であり，破壊前では落橋防止装置が離れる方向への変形が小さいことを確認できた。なお，最大引張耐力到達以降も載荷を行っており，コンクリートのひび割れが発生せず，落橋防止工下端部を支点とした変形が発生した（**図－7** 参照）。これは，**図－6** より，最大引張耐力到達以降で上面の変位に比べて下面の変位が小さいこと，水平変位が大きいことからも確認できる。

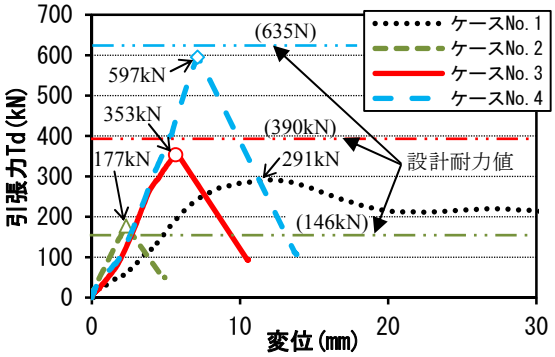
また，コンクリートには，**図－8** に示す上段部アンカーのはく落と下段部のひび割れが発生した。コンクリートのはく落は，最深で 20mm 程度であり，引抜きによるコーン破壊ではなく付着破壊が発生したと考えられる。特に，先施工アンカーを使用する場合，定着長を 20φ 以上とすることを基本としており [3]，あと施工アンカーとの比較を目的として 10φ としたことによる付着力不足



図－9　先施工アンカーひずみ分布



図－10　先施工アンカーに作用する力の分布



図－11　あと施工アンカーの荷重－変位曲線

図－12　あと施工アンカー試験での破壊状況
（ケース No. 3）

が考えられる。また，先施工アンカーの試験では，アンカーにひずみゲージをテープで接着させており，付着への影響が生じた可能性も考えられる。

3.2 アンカー鉄筋のひずみ分布結果

図－9 に，先施工アンカーの鉄筋ひずみ状況を示す。ここで，横軸は落橋防止装置とコンクリート接地面（以下，縁端）からの削孔深さ，縦軸はアンカー鉄筋のひずみである。なお，**図－9** では，**図－8** の荷重－変位曲線において変曲点となる引張力 T_d=280kN と最大引張力時の結果を示した。ただし，測定できていなかった場合は割愛した。

図－9 より，引張力 T_d=280kN において，上段部外側のアンカー鉄筋（A, D）と上段部内側のアンカー鉄筋（B, C）でそれぞれ類似する傾向が得られた。また，ひずみ分布の特徴として，縁端から 70mm 付近で卓越していることが確認できる。これはアンカー鉄筋に対してせん断力が作用しているためであり，鋼棒ストッパーの水平載荷試験でも同様の結果が得られている [4)]。なお，鋼棒ストッパーの水平載荷試験では，縁端から 3φ の位置で大きな応力が発生する。そのため，当該試験では D25×3=75mm 位置で最大応力が発生していると考えられる。

また，最大引張力時において，D 鉄筋の鉄筋ひずみが縁端から 3φ 付近で減少していることが確認できる。その際，全アンカー鉄筋の中で最初にひずみが減少しており，引張力 T_d=280kN 直後での減少であった。これより，D 鉄筋の付着破壊が最初に発生したことがいえる。

図－10 に，縁端での上側アンカー（A～D）のひずみの分布結果を示す。ここで，横軸は先施工アンカーの配置位置であり，0mm と 800mm は落橋防止装置端である。また，縦軸は測定したひずみの結果である。**図－10** より，先施工アンカーに対して，概ね均等にひずみが発生していることが確認できる。なお，D 鉄筋は先行して付着破壊が発生したため，最大引張力時において，T_d=280kN に比べてひずみが減少していることが確認できる。

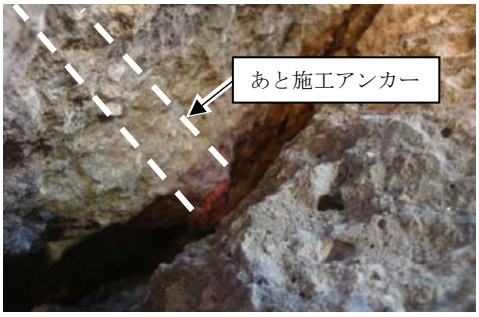
4. あと施工アンカー試験結果

4.1 荷重－変位曲線

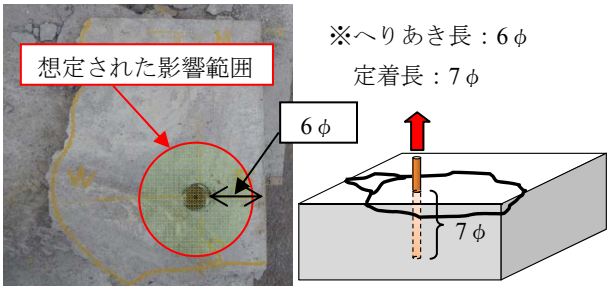
図－11 に，あと施工アンカーを用いた落橋防止装置の載荷試験による荷重－変位曲線を示す。ここで，横軸は落橋防止装置の水平変位，縦軸はあと施工アンカーに作用する引張力である。図中には，あと施工アンカーの定着長 5φ，10φ，15φ の全結果（ケース No.2～4）と，3 章での先施工アンカーの結果（ケース No.1）も示した。また，図中の二点鎖線は設計耐力値を示している。

図－11 より，あと施工アンカーの載荷試験では，先施工であるケース No.1 に比べて脆性的な破壊が発生する結果となった。これは，コンクリート部材が脆性的な破壊をしたためである（**図－12** 参照）。

また，**図－13** に示すように，全ての試験体ともに破壊の発生位置がアンカーの先端であったことから，本試験はコーン破壊によるものであると考えられる。この傾向は定着長に係らず，あと施工アンカーの全てのケースで



図－13　ひび割れ部拡大図（ケース No. 3）



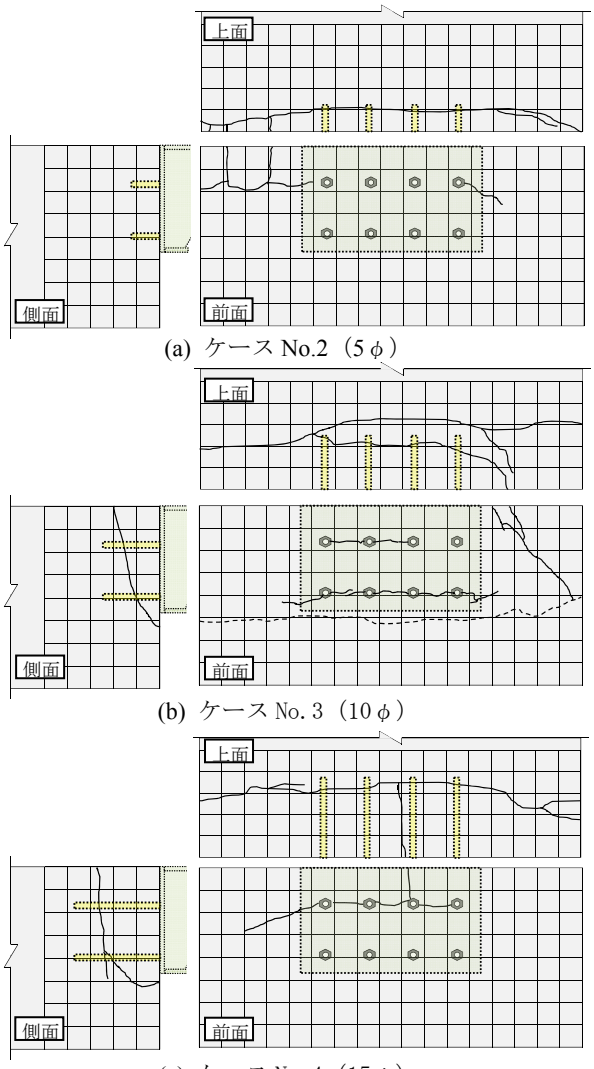
図－14　あと施工アンカー要素試験（へりあき長 6φ）

見られた。その際，あと施工アンカーの破壊時荷重は，上部アンカー鉄筋最深部からの 45°分布による影響面積に比例している。

また，式(1)により求めた算定値から，ケース No.2 では 1.21 倍，ケース No.3 では 0.91 倍，ケース No.4 では 0.95 倍となる結果となり，荷重レベルが大きくなるケースにおいて，あと施工アンカー耐力式を下回る結果となった。ただし，実際の既設構造物では当該試験とは異なり配筋がなされているため，コンクリート部材での脆性的な破壊は抑えられるものと考えられる。しかしながら，現在の落橋防止装置の設計では既設部の照査が行われていないことから，既設鉄筋の影響を定量的に評価する必要がある。

さらに，コンクリート天端からあと施工アンカー上段部間のへりあきについて，あと施工アンカー工法設計施工の手引き [1]では 5φ 以上を確保していれば縁端からの影響がないことが示されている。そのため，当該試験でも 6φ 程度のへりあきを確保していたが，別途行ったあと施工アンカーの要素試験（**図－14** 参照）では，6φ を確保していても破壊面が縁端部まで達する結果となった。なお，要素試験ではコンクリート強度およびアンカー径，アンカー強度，接着剤の条件を落橋防止装置の載荷試験と同一条件として実施した。

また，あと施工アンカーの影響範囲が定着長と同等であるという考えも示されており [5]，へりあき長も当該試験に影響を与えていたことが考えられる。ただし，へりあき長を大きくした場合，落橋防止装置自体が大きくなる可能性もあるため，へりあきの設定には十分注意が必要である。



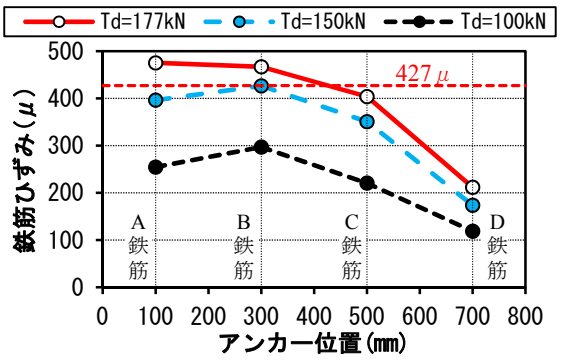
図－15　あと施工アンカー試験でのひび割れ状況

4.2 コンクリートのひび割れ状況

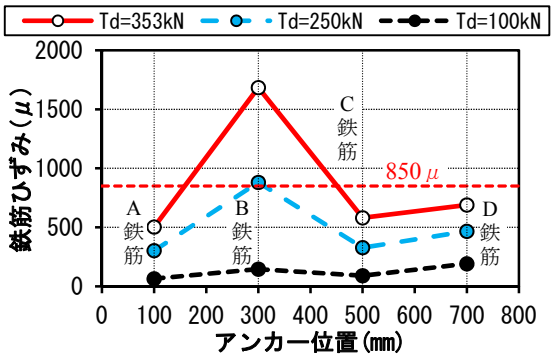
図－15 に，ケース No.2～4 のひび割れ状況を示す。ここで，図中の格子は 10cm 間隔である。また，ケース No.3 については，コンクリートの破壊後も荷重を載荷しており，**図－15(b)**に示す破線は，破壊後の載荷により卓越が視認できたひび割れを示している。

図－15 より，あと施工アンカー上段部間にひび割れが発生していることが確認できる。一方，下段部間のひび割れはケース No.3 のみのため，破壊後の載荷によって発生したと考えられる。このことから，破壊時は上段部のあと施工アンカーに起因して発生するものの，その後の載荷がある場合は，ケース No.1 と同様に落橋防止装置下端を支点とした変形も発生すると考えられる。

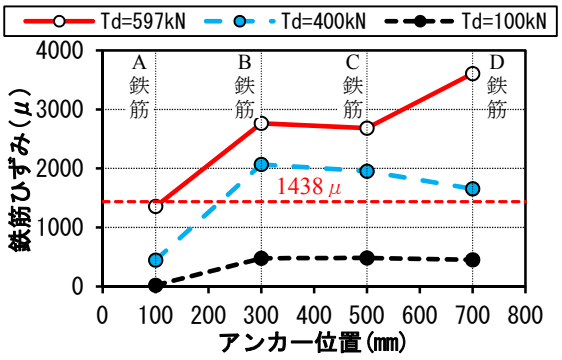
また，**図－15** より，上面部の 5φ，10φ，15φ の位置にひび割れが発生し，水平にひび割れが進展していることが確認できる。さらに，ケース No.3 および No.4 では側面部のひび割れが発生し，ケース No.2 において上段部に水平なひび割れが縁端まで発生していることが確認で



(a)ケース No.2



(b)ケース No.3



(c)ケース No.4

図－16　あと施工アンカーに作用する力の分布

きる。これより，定着長が大きくなることで荷重レベルが大きくなる場合，落橋防止装置下端部を含めた破壊が発生することが想定される。

4.3 あと施工アンカーの力の伝達

図－16 に，あと施工アンカーに設置したひずみの分布結果を示す。ここで，横軸は上段部あと施工アンカーの配置間隔，縦軸は測定したひずみの結果である。また，図中には，各ケースの最大引張力より逆算したあと施工アンカー1 本に作用する平均的なひずみを示した。

図－16 より，先施工アンカーの結果である**図－10** に比べて不均等なひずみが発生していることが確認できる。これはあと施工アンカーの施工精度に起因するものであり，既設構造物への削孔やあと施工アンカー設置時の角度に差異があるためである。そのため，支承部の耐震補強設計の手引き [2)]では，アンカーへの作用が不均等となることを想定して式(1)の γ_b=1.5 を設定している。

しかしながら，今回の試験では γ_b=1.5 を考慮したものの，ケース No.3 および No.4 の結果において想定した耐力に対して，最大で 1 割程度不足する結果となった。ただし，同手引きでは，支承より算定された鋼製落橋防止装置の幅に加え，両側にもう一か所ずつあと施工アンカーを設置することを推奨している（あと施工アンカー本数 8 本→12 本）。これより，追加アンカーを考慮することで，設計値に対して破壊時の荷重は大きくなると考えられる。

以上より，支承部の耐震補強設計の手引き [2)]に依ることで，鋼製落橋防止装置の設計が安全側となると考えられる。今後，アンカーの必要本数を定量的に定めるためには，既設構造物の鉄筋やへりあき，アンカー間隔などの影響を検討することで耐力式を再評価することが必要となる。

5. まとめ

鋼製落橋防止装置に利用されるあと施工アンカーの耐力について，あと施工アンカーの定着長をパラメータとした試験を実施した。以下に，本試験で得られた知見を示す。

(1) あと施工アンカーを用いた鋼製落橋防止装置への載荷試験より，定着長を長くすることでアンカーの耐力が向上することを確認した。また，コーン破壊が発生する可能性があることを確認した。

(2) 先施工アンカーであればアンカー鉄筋に作用する力は均等となるものの，あと施工アンカーでは不均等な作用が発生した。

(3) あと施工アンカーの耐力式に比べて実験値が最大で 1 割程度小さくなる結果が得られた。ただし，現行の設計では構造細目として設計値以上のアンカーを追加しており，安全側の構造設計となっている。今後は耐力式に考慮されていない項目を再評価し，アンカー本数を定量的に定めることが必要となる。

参考文献

1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：あと施工アンカー工法設計施工の手引き，1987

2) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：支承部の耐震補強設計の手引き，1996

3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説－コンクリート構造物－，丸善, 2004

4) 石橋忠良，吉野伸一：鋼棒ストッパーの設計，構造物設計資料，No.73，pp.15～17，1983.3

5) 社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー設計指針（案）・同解説，2005