

論文 テーパー型ナットを PC 鋼棒定着体としたあと施工アンカーを用いた鋼製落橋防止工装置の耐荷挙動に関する実験的研究

藤井 保也*1・小林 薫*2・伊藤 隼人*3・今井 清史*4

要旨：橋梁の耐震補強工事として落橋防止装置を取り付ける際に、接着系あと施工アンカーが多く使用されている。接着系あと施工アンカーは、コンクリートを穿孔するため、既設構造物の鉄筋との干渉により穿孔数量の増加や、アンカー筋径・数量の変更、落橋防止装置の設計変更等により、コスト増や工期の遅れが課題となる場合がある。本報告では、落橋防止装置の取り付けの際、穿孔径を小さくするあるいは、本数を低減できる方法として、提案しているテーパー型ナットを PC 鋼棒の定着体とした高耐力あと施工アンカー工法¹⁾を落橋防止装置に適用した載荷試験を実施し、従来工法と同等以上の性能を発揮できることを確認した。

キーワード：落橋防止装置、あと施工アンカー、引張耐力、PC 鋼棒

1. はじめに

近年頻発する大地震対策として耐震補強工事が多く行われている。橋梁の耐震補強対策では、落橋防止装置が多く設置されており、取り付けのために接着系あと施工アンカー工法¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が使用されている。接着系あと施工アンカー工法は、母材となるコンクリートに穿孔を行い、カプセル方式あるいは、注入方式で、アンカー筋周辺部にモルタル・樹脂等を充填し、母材コンクリートとの一体化を行う。アンカー筋周辺に充填したモルタル等が固結することで、アンカー筋の引き抜き耐力が発揮される。

一般的に落橋防止装置で使用する接着系あと施工アンカー（以下「従来工法」）は、既設コンクリートをコアドリル等で穿孔して設置する。アンカー筋は、異形鉄筋にねじを加工したものを使用する。穿孔は、異形鉄筋径より 10 mm 程度大きな穿孔径で行い、アンカー筋の定着長は、異形鉄筋呼び径の 15 倍としているのが一般的である。落橋防止装置に関する既往の研究に関しては、あと施工アンカーとして異形鉄筋が使用されており、耐荷性能、損傷状態、あと施工アンカーの作用力の分担に着目した検討が行われている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

落橋防止装置において、所定の穿孔径・定着長を確保するためには、既存鉄筋の位置を把握する必要があり、事前に鉄筋探査機を使用した非破壊検査や、コンクリート表面の一部をはつり、目視確認が行われている。穿孔作業は、表面の鉄筋位置は概ね把握できるものの、深さ方向にある鉄筋は事前に確認ができないため、既存鉄筋に干渉した場合は、位置を変更して穿孔を行うことになる。穿孔は、所定の深さが確保できるまで繰り返し穿孔する場合もある。設計時のアンカー筋径で対応できない

場合は、アンカー筋の小径化への変更や、アンカー筋の小径化によってアンカー筋数量の追加が必要になる。アンカー筋位置が変更されることにより落橋防止装置本体の設計変更が必要となり、実際の現場では、コスト増加や工期の変更などの課題が発生する場合がある。

そこで、参考文献 8)9)10)で提案されているテーパー型ナットを PC 鋼棒定着体としたあと施工アンカー工法（以下「提案工法」）を落橋防止装置への適用を検討することにした。図-1 は、提案工法として、テーパー型ナットをアンカー筋に先端に取り付け、あと施工アンカー筋として用いた場合の耐荷機構の略図を示したものである。テーパー型ナットの外観を写真-1 に、PC 鋼棒先端にテーパー型ナットをセットした状況を写真-2 に示す。

提案工法の特徴として、異形鉄筋と比較して高強度の PC 鋼棒を用いるため、従来工法の異形鉄筋を使用した接着系あと施工アンカー工法でのアンカー筋降伏耐力で比較すると、アンカー筋径を小さくする、あるいはアンカー筋本数を減少できる可能性がある。提案工法は、アンカー筋の定着長をアンカー筋径の 20 倍としており、従来工法と同等のアンカー筋耐力とした場合、アンカー筋の細径化が可能で、定着長が短くなるため、穿孔深さの短縮が可能となる。充填材は、無収縮モルタルを使用し、引き抜き試験の結果は、PC 鋼棒 C 種 1 号の $\phi 32 \cdot \phi 17$ でアンカー筋が破断する挙動を示している。材質が SD345、径が D51・D41・D38・D35・D32 等太径の異形鉄筋を使用する場合の降伏耐力と PC 鋼棒 C 種 1 号の 0.2% 永久伸びに対する耐力および従来工法と提案工法の穿孔径比較を表-1 に示す。既設構造物の鉄筋干渉を低減する方法として、従来工法に比べてアンカー筋径お

*1 サンコーテクノ（株） エンジニアリング本部 部長（正会員）

*2 JR 東日本コンサルタンツ（株） 鋼構造設計部 部長 博士(工学)（正会員）

*3 日本コンサルタンツ（株） インド高速鉄道推進本部 係長（正会員）

*4 サンコーテクノ（株） エンジニアリング本部 顧問

表-1 異形鉄筋 SD345 と PC 鋼棒 C 種 1 号の耐力比較

異形鉄筋径	降伏耐力 (kN)	穿孔径 (mm)	PC 鋼棒径 (mm)	0.2% 永久伸びに対する応力 (kN)	穿孔径 (mm)
D51	699	61.0	φ 32	869	53.8
D41	462	53.8	φ 23	449	36.0
D38	393	48.0	φ 17	246	34.1
D35	330	45.0	φ 13	144	28.3
D32	274	45.0			
D29	222	41.3			
D25	175	35.4			

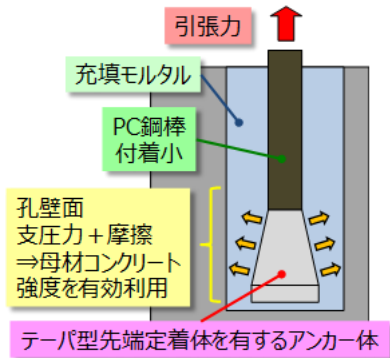


図-1 テーパー型先端定着体先端定着体を有するあと施工アンカー工法の耐荷機構の略図

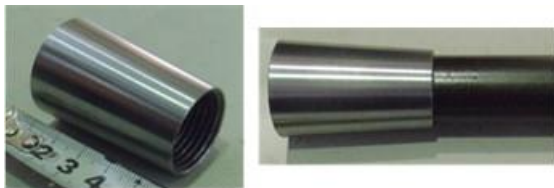


写真-1 テーパー型 写真-2 PC 鋼棒にテーパ型ナットをセットした状況

よび穿孔径を小さくし、鉄筋干渉などのリスクを低減できる施工方法として提案工法の適用を検討した。

本報告は、提案工法を用いた場合と、従来使用されている異形鉄筋による接着系あと施工アンカー工法の耐力を比較するため、鋼製落橋防止装置を製作し、それぞれ載荷試験を行い、提案工法の適用性に関する検討を行ったものである。

2. 試験概要

載荷試験は、鋼製落橋防止装置に使用するアンカー筋の種類をパラメータとして2ケース行った。試験体の種類を表-2 に示す。

表-2 試験の種類

ケース	アンカー筋の種類	アンカー筋径	アンカー筋材質	穿孔径 (mm)	定着長さ (mm)	充填材種類	充填材圧縮強度 (N/mm ²)
1	異形鉄筋	D35	SD345	φ 45	525	エポキシ樹脂	-
2	PC 鋼棒	φ23	SBPR 1080/1230	φ 36.0	460	無収縮モルタル	109.9

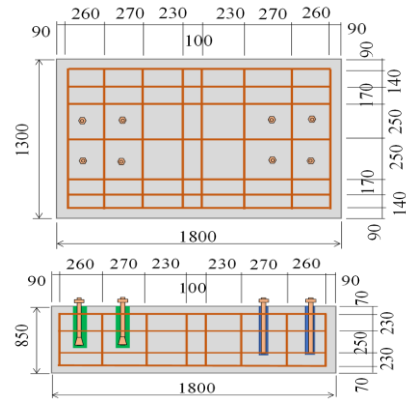


図-2 試験体配筋図

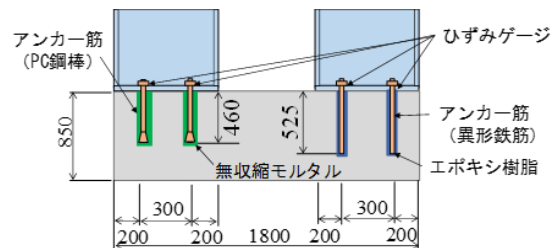


図-3 試験体側面図

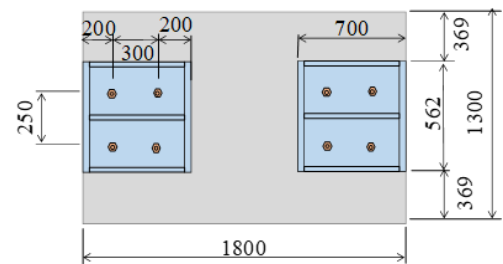


図-4 試験体概要平面図

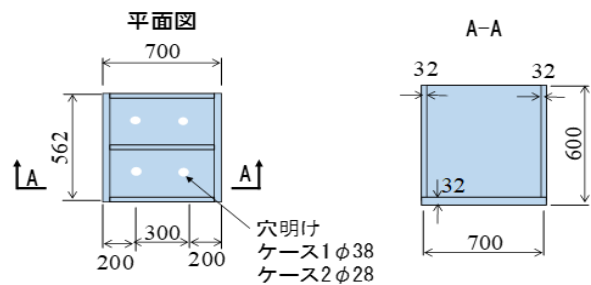


図-5 落橋防止装置概要図

2.1 試験体概要

(1) コンクリート部材

コンクリート試験体は、1800 mm × 1300 mm × 850 mm を 1 体製作した (図-2, 3, 4 参照)。コンクリート試験体 2 箇所に落橋防止装置を設置できる形状とした。コンクリー

ト試験体の設計基準強度は $24\text{N}/\text{mm}^2$ とした。試験時の圧縮強度は $31.9\text{N}/\text{mm}^2$ であった。コンクリート試験体の配筋は、スパン 25m 程度の鋼製 I 桁を受ける橋脚の配筋を参考に D25(SD345) を 250 mm 程度の間隔で格子状に配置した。

(2) 落橋防止装置

製作した落橋防止装置を図-5 に示す。落橋防止装置は、SM400A を使用して製作し、すみ肉溶接によって接合した。製作は、実現場で使用されている落橋防止装置を参考とし 32 mm の鋼板を用いた。アンカー設置部の孔径は、異形鉄筋を使用した接着系あと施工アンカー工法では $\phi 38\text{mm}$ 、提案工法では $\phi 28$ で各々4箇所孔明けした。

(3) あと施工アンカー

試験で使用したアンカー筋は、ケース 1 試験体で異形鉄筋、ケース 2 試験体で PC 鋼棒を用いた。ケース 1 のアンカー筋は、異形鉄筋 D35 (SD345) を使用した。異形鉄筋 D35 (SD345) の規格降伏耐力は、330kN である。ケース 2 のアンカー筋は、ケース 1 のアンカー筋同等となるように、PC 鋼棒 C 種 1 号 (SBPR1080/1230) の $\phi 23$ を使用した。PC 鋼棒 C 種 1 号 $\phi 23$ 土木学会規準の許容緊張荷重のプレストレス直後の値 357(kN) を参考に選定した。

写真-3 に示すケース 1 で使用したアンカー筋には、異形鉄筋にねじ加工をした後、ひずみゲージを周方向に 4 枚貼り付けるため、ねじ部を切削して $\phi 27$ の丸部を設けた。写真-4 に示すケース 2 で使用したアンカー筋は PC 鋼棒にテーパ型ナットを取り付けた。ケース 2 は、PC 鋼棒の丸鋼部にひずみゲージを取り付けた。ケース 1 および 2 のひずみゲージの位置は、コンクリート表面から 15 mm 上の位置とした。落橋防止装置の孔とアンカー筋の間にはエポキシ樹脂のパテにてシールを行った。

アンカー筋の定着長は、ケース 1 では、アンカー筋径の 15 倍 ($D35 \times 15 = 525\text{mm}$) とし、ケース 2 では、アンカー筋径の 20 倍 ($\phi 23 \times 20 = 460\text{mm}$) とした。表-2 に使用材料および充填材の種類を示す。ケース 1 のアンカー筋定着に使用した充填材は、一般的に使用されている 2 液混合型低粘度エポキシ樹脂とした。また、ケース 2 は、エポキシ樹脂と比較して、圧縮力に対して変形が少ない高強度無収縮モルタルとした。無収縮モルタルの載荷試験時の圧縮強度は、 $109.9\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

アンカー筋の設置作業は、下向きで行った。穿孔は、湿式ダイヤモンドコアにて行い、清掃したのち定着作業を行った。ケース 1 のアンカー筋定着作業は、エポキシを使用するため孔内の清掃および乾燥後に行った。ケース 2 のアンカー筋定着作業は、孔内を清掃した後、水塗布を行い孔壁を湿潤状態にしてから行った。

ケース 1 では、落橋防止装置を設置した後、最大トル



写真-3 使用したアンカー筋（ケース 1）



写真-4 使用したアンカー筋（ケース 2）

表-3 初期導入軸力結果一覧

アンカー番号	ケース1 軸力 (kN)	ケース2 軸力 (kN)
No. 1	85.3	199.6
No. 2	73.4	200.0
No. 3	53.9	224.5
No. 4	58.6	224.5

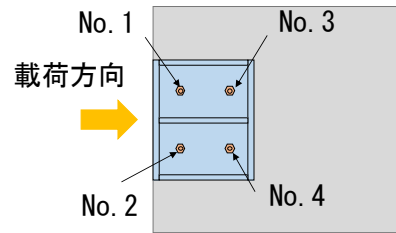


図-6 アンカー番号

ク $1000\text{N} \cdot \text{m}$ のインパクトレンチを使用してナットの締め付け作業を行った。一般的な施工を模擬したので、軸力管理は実施していない。提案工法のケース 2 では、本提案工法のメリットである高い軸力導入を可能とし、載荷初期の落橋防止装置の変位の抑制を目的として、アンカー筋 1 本当たり $199.6 \sim 224.5\text{kN}$ の軸力を導入した。軸力の導入は、センターホールジャッキを使用した。載荷直前のアンカー筋軸力の導入結果を表-3 に示す。ケース 1, 2 での軸力の値は、ひずみゲージの測定ひずみ値を緊張力に換算して求めた。なお、表-3 のアンカー番号は、図-6 に図示した。

2.2 試験方法

静的水平漸増載荷試験状況および変位測定位置を図-7 に示す。コンクリート試験体を PC 鋼棒にて反力床固定し、コンクリート表面から 350 mm 上方位置の鋼製落橋防止装置を載荷点として 3000kN ($1500\text{kN} \times 2$ 本) のアクチュエータにより水平荷重を与えた。水平荷重の載荷は、変位制御で載荷点水平変位を漸増させた。

落橋防止装置の変位測定は、水平変位を最下端に変位計を取り付けて行った。載荷点での水平変位は、載荷治具にワイヤ巻き込み型変位計を取り付け測定した。鉛直

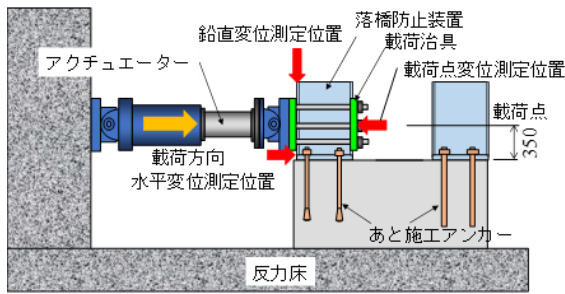


図-7 試験状況図



写真-5 試験状況

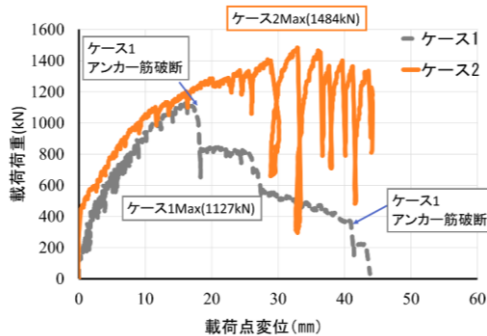


図-8 荷重と载荷点変位の関係

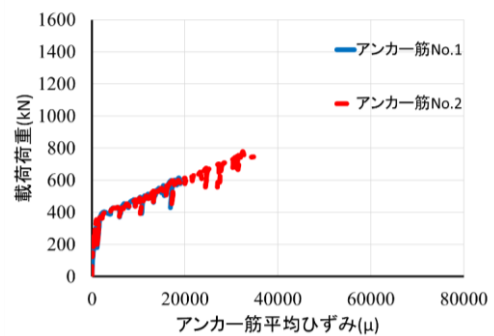


図-9 ケース1の荷重とアンカー筋平均ひずみの関係

変位は、落橋防止装置の上端に変位計を設置して行った。ケース1の载荷終了後、コンクリート試験体を反転させてケース2の試験を実施した。試験の状況を写真-5に示す。

3. 試験結果の概要

3.1 载荷荷重 - 変位曲線

図-8に、ケース1とケース2の荷重と载荷点変位の関係を示す。横軸は、落橋防止装置の载荷点の水平変位、縦軸は、落橋防止装置に作用する水平荷重である。

ケース1では、150kN程度まで水平変位がほとんど発生していなかった。これは、インパクトレンチによる締付作用軸力の影響があると考えられる。最大水平荷重は、1127kNで、最大水平荷重時の水平変位は16.5mmであった。最大水平荷重を迎えた直後、1111kNでアンカー筋No.2が破断し、748kNまで荷重が急激に低下した。その後は、ゆるやかに荷重が低下し、366kNまで低下時に、アンカー筋No.3が破断した。水平変位44mmで水平荷重がほぼゼロ近傍となったことを確認して試験を終了した。

ケース2では、400kN程度まで水平変位の発生が認められなかった。その後1100kN程度までの荷重・変位曲線の傾きは、ケース1とほぼ同様となっていた。1100kN程度でケース2がケース1より5mm程度水平変位が小さく、水平変位が抑制されていることが確認できた。その後、1324kN時の直後、1059kNまで一旦水平荷重が低下したがすぐに水平荷重は回復した。さらに、1400kN付近で659kNまで水平荷重が低下したが、すぐに水平荷重は

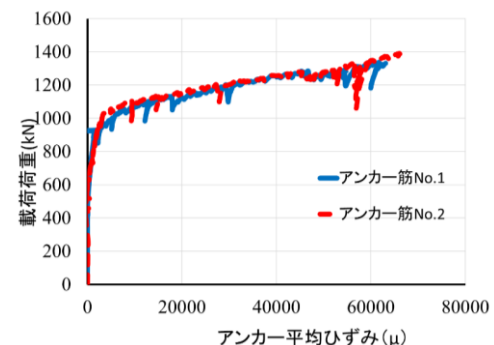


図-10 ケース2の荷重とアンカー筋平均ひずみの関係

上昇し回復した。最大水平荷重は1484kNで最大水平荷重時変位は32.8mmであった。その後も、荷重の低下・回復を繰り返しながら若干水平荷重が低下し、水平変位が大きくなった。水平変位は大きくなるが、ケース1のような荷重が急激に低下する耐荷挙動は見られなかった。荷重荷重は、最大水平荷重の10%程度低下した1334kN、変位43mmで終了した。载荷試験の終了は、PC鋼棒の破断を回避するため、安全上の観点から中止した。ケース1と比較すると、1100kNまででは、従来工法と同様の耐荷挙動を示した。

3.2 アンカー筋のひずみ発生状況

ケース1の载荷荷重とアンカー筋の平均ひずみの関係を図-9に示す。アンカー筋のひずみ測定用のひずみゲージは、アンカー筋の周方向に4か所に貼り付けており、測定ひずみの平均値として整理した。4か所のひずみゲージの平均ひずみは、アンカー筋の曲げ変形に伴うひず

み成分をキャンセルし、アンカー筋軸方向のひずみを示している。ひずみ計測は概ね 30000 μ まで測定可能であった。アンカー筋の平均ひずみは、150kN まで 200 μ と小さく、その後ひずみが大きくなっている。600kN 程度までアンカー筋 No.1 および No.2 でのひずみ挙動に大きな相違はなかった。アンカー筋の軸方向ひずみは、荷重が 360kN 時に降伏ひずみ程度となった。

ケース 2 の荷重とアンカー筋ひずみの関係を図-10 に示す。ケース 2 もアンカー筋のひずみは平均ひずみとして整理した。ケース 2 では、アンカー筋に初期軸力(199.6~224.5kN)を導入している。このため、アンカー筋導入軸力を超える引張作用力が発生した段階からアンカー筋の変形が生じる。作用荷重が 400kN 程度までは、概ね導入軸力程度の作用引張力であった。このため、作用荷重が 400kN までアンカー筋のひずみはほとんど発生していなかった。アンカー筋のひずみは、70000 μ まで計測可能であった。アンカー筋 No.1, 2 は、載荷荷重が 1400kN 程度まではほぼ同様のひずみの発生状況であった。

3.3 損傷状況

写真-6 にケース 1 のアンカー筋破断状況を示す。異形鉄筋を使用したケース 1 では、1111kN 付近で載荷側のアンカー筋 No.2 が破断した。次に、No.1 と対面するアンカー筋 No.3 が水平荷重が低下している 366kN で破断した。アンカー筋の破断した位置は、アンカー筋のねじ部加工部(ひずみゲージ取り付け用に加工した丸鋼部)であった。異形鉄筋母材より直径が小さくなったことが破断の要因としてあげられる。写真-7 にケース 1 のコンクリート試験体の損傷状況を示す。試験終了後、載荷側のコンクリート表面を観察した。コンクリート面には、若干微細なひび割れがみられるものの大きな損傷は確認できなかった。落橋防止装置を撤去し、アンカー筋施工位置のコンクリート表面を観察した。アンカー筋周辺には支圧によるコンクリートの剥離が見られたが、コンクリートには大きな損傷が見られなかった。

写真-8 にケース 2 のコンクリート試験体損傷状況を示す。コンクリート試験体側面(アンカー筋の定着側のコンクリート面)には、荷重が 1400kN 付近でひび割れの発生が確認できた。発生したひび割れ状況は、アンカー筋最深部(アンカー筋定着先端部)付近から斜め方向に 45 度程度の角度でひび割れが発生していた。これは、アンカー筋への作用引張力が、アンカー筋先端のテーパ型定着体(テーパ型ナット)が作用引張荷重の大部分を負担し、テーパ部からの支圧応力の作用により発生したと考えられる。ケース 2 で、コンクリート面に発生したひび割れは、ケース 1 より多くみられたが、載荷荷重 1400kN 以降の載荷でもひび割れ幅の増加は見られず、大きく開くことは確認できなかった。これは、コン

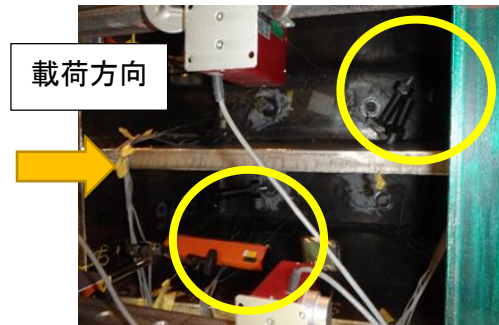
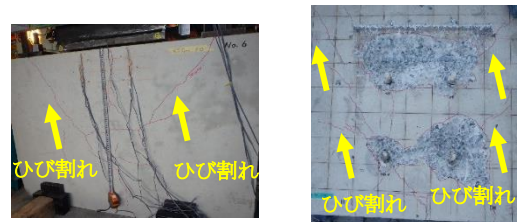


写真-6 ケース 1 試験体アンカー筋破断状況



(a) 試験体側面 (b) 落橋防止装置設置面

写真-7 ケース 1 コンクリート試験体損傷状況



(a) 試験体側面 (b) 落橋防止装置設置面

写真-8 ケース 2 コンクリート試験体損傷状況



写真-9 ケース 2 コア採取状況

クリート試験体に配置されている鉄筋が機能したためと考えられる。落橋防止装置を設置したコンクリート表面には、アンカー筋周辺に支圧によるコンクリート表面の剥離が見られた。コンクリート表面には、アンカー筋周辺に載荷方向に延びるひび割れが確認された(写真-8)。ケース 2 は、試験終了後湿式コアドリル ϕ 125にてアンカー筋 No.1 を採取した(写真-9)。テーパ型ナットの最小径部からひび割れが確認でき、参考文献 8)によるコア採取時と同様のひび割れであった。このひび割れがコンクリート試験体表面に現れたと考えられる。

4. 破壊性状と載荷初期段階の水平変位に対する初期導入軸力の影響検討

4.1 ケース 1 試験体(従来工法)

異形鉄筋を用いたケース 1 では、荷重と変位の関係が最大荷重を迎えると鉄筋の破断により大きく荷重低下し

た。せん断力と引張力がアンカー筋に作用する力学状況となっており、作用力によるアンカー筋の局部変形が複雑な状況と想定される。コンクリートの破壊より先にアンカー筋が降伏、破断に移行したため、コンクリートへの大きなひび割れは確認できなかった。

ケース1では150kN程度まで水平変位はほとんど発生していない。表-3に示すケース1でのアンカー筋軸力は、No.1とNo.2を合算すると158.7kNであり、この引張作用力となる作用水平荷重を計算すると概ね150kN程度となるため、初期作用軸力の影響により、載荷初期段階の水平変位が抑制されたものと考えられる。

4.2 ケース2試験体（提案工法）

提案工法を用いたケース2では、水平変位が28mm付近から荷重の低下・回復を繰り返した。これは、テーパ型ナットが、充填モルタル側に微小な変位が発生したと想定されるが、充填モルタルがテーパ型先端定着体からの支圧応力を保持するため、耐力が復元し水平荷重が低下前の状態まで回復するようになると考えられる。また、可逆的に回復する詳細な考察は今後の課題である。耐力の復元と可逆的なケース2の最大水平荷重は、ケース1の最大荷重の1.3倍程度であった。

ケース2では、400kN程度まで水平変位の発生が確認できなかった。表-3で示すケース2のアンカー筋軸力は、No.1とNo.2を合算すると399.6kNで、この値から作用水平荷重を計算すると概ね400kN程度となる。400kNから水平変位およびアンカー筋の軸方向ひずみの値が大きくなる挙動とほぼ一致していることが確認できた。

水平荷重と載荷点での水平変位の関係では、ケース1よりケース2の初期水平変位発生荷重が大きいことが確認できる。これはケース2のPC鋼棒に導入した初期軸力がケース1に比べて高いためである。以上から、軸力導入可能な提案工法は、初期水平変位の抑制にも有利である。

5. まとめ

テーパ型ナットをPC鋼棒定着体とした提案しているあと施工アンカー工法を落橋防止装置への適用に関して、異形鉄筋を用いた従来工法との実験的な比較検討を行った。以下に、本試験結果のまとめを示す。

- 1) 異形鉄筋の接着系あと施工アンカー工法を用いた落橋防止装置では、アンカー筋の降伏、破断により、最大荷重を迎えると急激に荷重低下した破壊挙動を示した。
- 2) 提案工法を用いた落橋防止装置は、従来工法（ケース1の場合）の様な最大水平荷重以降の水平荷重が急激に低下する耐荷挙動は見られなかった。

- 3) 提案工法を用いた落橋防止装置では、最大水平荷重近傍から、水平荷重の低下、回復を繰り返しながら、水平荷重の微増、水平変位が増加していく傾向がみられた。
- 4) 本試験における、提案工法を用いた落橋防止装置での試験では、1100kN程度までは、異形鉄筋の接着系あと施工アンカー工法と同等の耐荷挙動を示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010.11
- 2) 土木学会：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)，平成26年
- 3) 東日本旅客鉄道株式会社：あと施工アンカー設計マニュアル，2004年12月
- 4) 公益社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，平成30年1月
- 5) 古谷卓稔，笠裕一郎，田所敏弥，岡本大：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：コンクリート工学年次論文集，vol.37,No.2,2015
- 6) 笠裕一郎，岡本大，三倉寛明，田所敏弥：せん断力と引張力を受けるあと施工アンカーの耐荷力に関する検討：コンクリート工学年次論文集，Vol.38,No.2,2016
- 7) 古谷卓稔，笠裕一郎，田所敏弥，岡本大：落橋防止装置に用いられるあと施工アンカーの耐力に関する実験的検討：コンクリート工学年次論文集，vol.38,No.2,2016
- 8) 小林薫，鈴木雄大，平林雅也，伊藤隼人：テーパ型ナットをPC鋼棒定着体としたあと施工アンカー工法に関する検討：コンクリート工学年次論文集，vol.38,No.2,2016
- 9) 平林雅也，小林薫，鈴木雄大：テーパ型定着体を用いたあと施工アンカーの引抜抵抗機構：コンクリート工学年次論文集，vol.35,No.2,2013
- 10) 藤井保也，今井清史，新村哲太郎，小林薫，伊藤隼人：PC鋼棒にテーパ型ナットを取付けたあと施工アンカーにおける充填状態を変化させた引抜試験：土木学会全国大会第74回年次講演会，VI-339