

論文 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

古屋 卓稔^{*1}・笠 裕一郎^{*1}・田所 敏弥^{*2}・岡本 大^{*2}

要旨：落橋防止装置に用いられるあと施工アンカーの耐荷機構の検討を目的として、模型試験体による載荷試験を実施した。載荷試験では、埋込み長とあと施工アンカーの本数をパラメータとして、破壊性状やひび割れ状況、引抜き力について検討を行った。その結果、最大荷重時に下段のあと施工アンカーが作用の回転中心となり、上段のあと施工アンカー先端を起点としたコーン破壊が発生した。また、落橋防止装置用のあと施工アンカーの設計では、構造細目によるあと施工アンカーの追加により安全側となるものの、コーン破壊の場合、あと施工アンカー1本あたりの引抜き耐力算定値が過大に評価される場合があることが確認された。

キーワード：あと施工アンカー、落橋防止装置、引抜き耐力、コーン破壊

1. はじめに

あと施工アンカーは、既設コンクリート構造物に対して新たな部材を取付けることが可能となる方法である。そのため、補強や補修、増設、付属物の取付けなどに利用され、非常に需要も多い。一方、あと施工アンカーは、施工の位置や向き、施工精度のばらつき、材料の多種多様さなどにより、耐力への影響が懸念される工法である。

なお、一般的に、あと施工アンカーは引抜きに対して用いられることが多い。あと施工アンカーの引抜き耐力や耐荷機構については、これまで多くの実験や研究が行われており¹⁾、各機関によって指針等が刊行^{2),3),4)}されている。しかし、これらの指針等では、あと施工アンカー単体の耐力は示されているものの、あと施工アンカーによって取付けられた部材の構造体としての挙動や耐荷機構に関する実験や研究は少ない。

図-1 に示す落橋防止装置は、桁座の拡幅によって桁の落橋を防止するものであり、図-2 に示すとおり、あと施工アンカーによって取付けられている。落橋防止装置の取付けに際しては、支承の破壊を前提とし、橋脚や橋台の地震時変形などを考慮して設計される。そのため、落橋防止装置は地震時に移動した桁などを支持可能な耐力を保有することが求められる。

本研究では、鉄道の耐震補強^{5),6)}として利用される落橋防止装置を対象に、実際の部材を模した試験体を用いた載荷試験を実施し、落橋防止装置が荷重を受けた際のあと施工アンカーの破壊形態や耐荷機構について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 検討内容

検討は、既往の研究⁷⁾にアンカー本数等の条件を変更

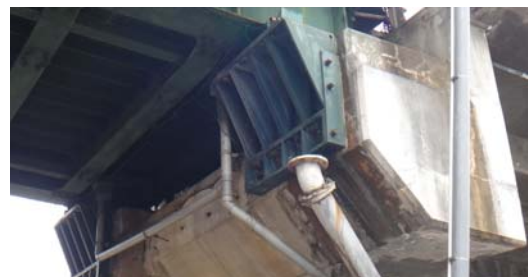


図-1 落橋防止装置の取付け例

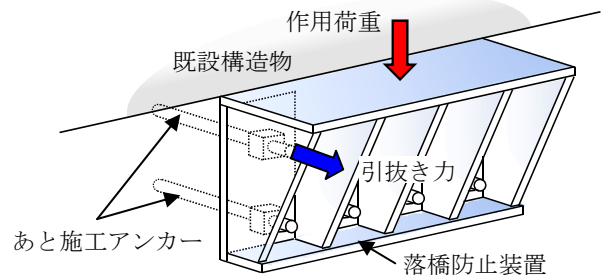


図-2 落橋防止装置とあと施工アンカー

表-1 試験体パラメータ

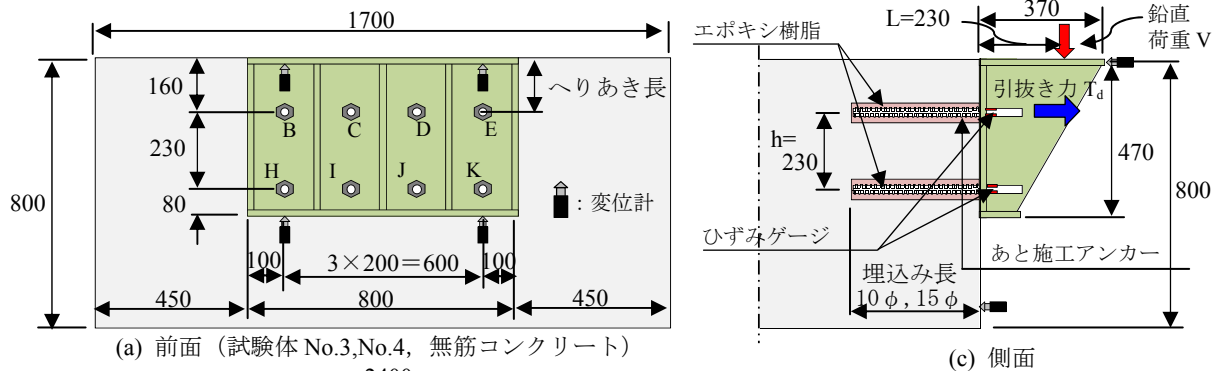
No.	アンカー埋込み長	あと施工アンカー本数	使用アンカー
1	10φ (10×24=240mm)	上段：6本	M24(φ23を加工)
2	15φ (15×24=360mm)	下段：6本	
3 ⁷⁾	10φ (10×25=250mm)	上段：4本	D25
4 ⁷⁾	15φ (15×25=375mm)	下段：4本	

※試験体3, 4は既往の研究⁷⁾と同じ試験体No.とした

した試験を追加して実施した。表-1に、試験体のパラメータを示す。また、図-3に、試験体寸法および計測位置を示す。既往の研究ではNo.3とNo.4の試験体で載荷試験を行っており、追加したNo.1とNo.2の試験体と合わせて、あと施工アンカーの埋込み長と本数をパラメータとして検討を行った。載荷試験では表-2に示す項目を計測し、ひび割れや変位、あと施工アンカーのひず

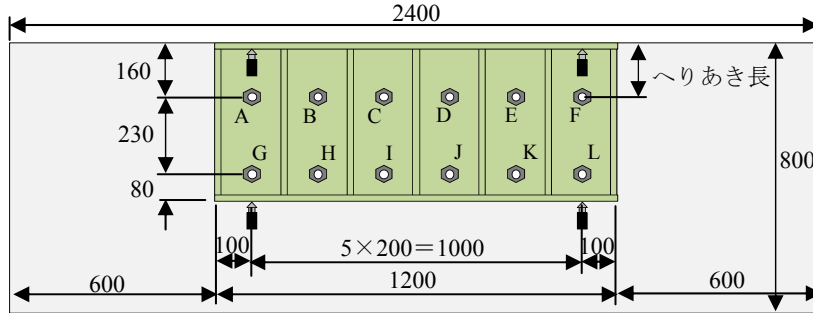
*1 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

*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 博(工) (正会員)



(a) 前面 (試験体 No.3, No.4, 無筋コンクリート)

(c) 側面



(b) 前面 (試験体 No.1, No.2, 鉄筋コンクリート)



(d) ひずみゲージ取り付け

表-2 測定項目

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
鉄筋ひずみ	コンクリート試験体水平変位 あと施工アンカーひずみ
	ひび割れ・損傷状況

表-3 試験体配筋 (SD345, 試験体 No.1, No.2)

	形状	鉄筋径	本数
上側鉄筋	□	D10	前面側11本, 側面側5本
下側鉄筋	□	D25	前面側11本, 側面側5本
帯筋	□	D16	2本

表-4 材料試験結果

(a) あと施工アンカー

部材	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
PC鋼棒 (M24)	1164	1261	12
高強度鉄筋 (D25)	978	1059	-

(b) 鉄筋, SD345

鉄筋径	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D10	366	552
D16	401	563
D25	387	561

(c) コンクリート

圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
28.0	28.1

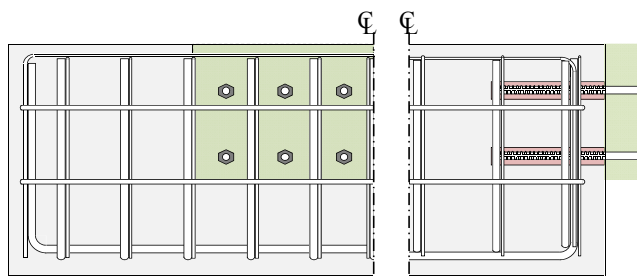


図-4 試験体配筋図 (SD345, 試験体 No.1, No.2)



図-5 落橋防止装置の取付けおよび荷重状況

みを測定した。

なお、既往の研究では、あと施工アンカーとして高強度の D25 鉄筋を使用していたが、追加した試験体では全ネジ加工した PC 鋼棒 (M24) を用いた。また、あと施工アンカーを埋込むコンクリート試験体として、No.3 と No.4 の試験体を無筋コンクリートとしていたが、本検討で追加した No.1 と No.2 の試験体では鉄筋コンクリートとした。

以下では、本検討で追加した試験体及び材料の諸元について示す。

2.2 試験体概要

(1) 母材コンクリート

あと施工アンカーを埋込む母材コンクリートは、既設橋脚の天端部配筋を参考とした 2400×1300×800mm の鉄筋コンクリート試験体を製作した。コンクリート試験体の形状と配筋、材料について図-3, 4 および表-3, 4 に示す。また、図-3 に示すとおり、コンクリート部材に落橋防止装置を取付け、荷重試験を行った。

(2) 落橋防止装置

落橋防止装置は、鉄道構造物の落橋防止装置の設計で用いられる支承部の耐震補強設計の手引き⁶⁾を参考に製作した。図-3 に落橋防止装置の寸法を示す。コンクリート試験体には、200mm 間隔で配置したあと施工アンカーにより落橋防止装置を取付けた。

また、落橋防止装置は 19mm の鋼材 (SS400) をすみ肉溶接によって接合し製作した。そして、あと施工アンカーを挿入する $\phi=40\text{mm}$ の孔をあけた。落橋防止装置の取付けおよび荷重状況を図-5 に示す。

(3) あと施工アンカー

あと施工アンカーは、図-3 に示す位置に取付けた。また、上段のあと施工アンカーを A~F、下段のあと施工アンカーを G~L として、以下ではアンカー箇所を示すものとする。

本研究では、あと施工アンカーとして表-4 に示す M24 の PC 鋼棒を使用した。高強度鋼材を使用したのは、鋼材の降伏ではなく母材コンクリートの破壊形態を検証するためである。あと施工アンカーの施工は、コンクリート試験体に $\phi=28\text{mm}$ のハンマードリル削孔を行い、エポキシ樹脂 (引張強度 $75.7\text{N}/\text{mm}^2$) を注入した。なお、コンクリート試験体には、あと施工アンカーを埋込む位置にあらかじめ $\phi=26\text{mm}$ ガイド管を設置することで削孔精度を向上させた。さらに、水平器を用いてあと施工アンカーを取付けることで精度の向上にも努めており、あと施工アンカーにできるだけ均等な引抜き作用が発生するようにした。荷重試験では、図-3 (c), (d) に示すあと施工アンカー埋込み部の外側にひずみゲージを設置し、各あと施工アンカーに作用する引抜き力を測定した。

3. 試験結果

3.1 荷重-変位関係

図-6 に、No.1 の荷重-変位関係を示す。ここで、横軸は変位、縦軸は荷重である。図-6 には、図-3 に示すように、水平方向と鉛直方向の上面、下面での変位の結果を示した。試験結果より、荷重荷重が 681kN に達した時に荷重低下する結果となった。

また、鉛直変位の結果において、変位が 1mm から 7mm の間で荷重が増加しない結果となった。これは、あと施工アンカー $\phi=24\text{mm}$ に対して、落橋防止装置に $\phi=40\text{mm}$ の孔をあけたことから、荷重に伴い隙間分の変位が鉛直方向に発生したためと考えられる。その際の落橋防止装置の変形写真を図-7 (a) に示す。図-7 (a) より、落橋防止装置本体が沈下していることがわかる。なお、これは図-6 の P 点に示した荷重時の写真である。

図-7 (b) に、荷重低下時 (図-6 Q 点) のひび割れ状況を示す。なお、ひび割れは荷重低下と同時に生じており、あと施工アンカーの埋込み先端部 ($\phi 10 \times 2.4\text{mm} = 240\text{mm}$) 付近を起点に発生した。また、ひび割れ位置は、あと施工アンカーの先端と概ね一致した。これらの結果より、あと施工アンカーの群効果によってあと施工アンカー個々のひび割れが連続して発生することで、先端部からのコーン破壊が発生したと考えられる。

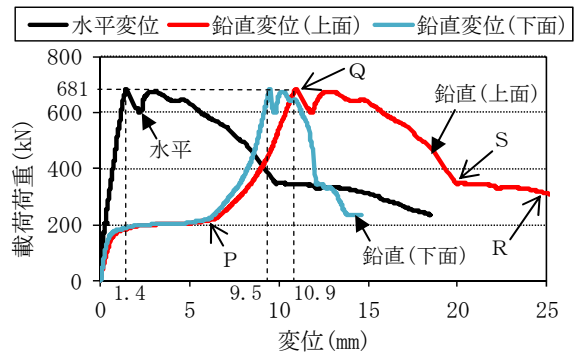
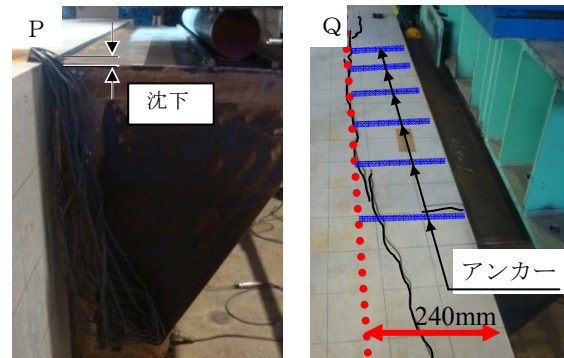


図-6 No.1 の荷重-変位関係



(a) 落橋防止装置の沈下 (b) ひび割れ状況

図-7 荷重試験の途中経過 (図-6 P 点, Q 点)

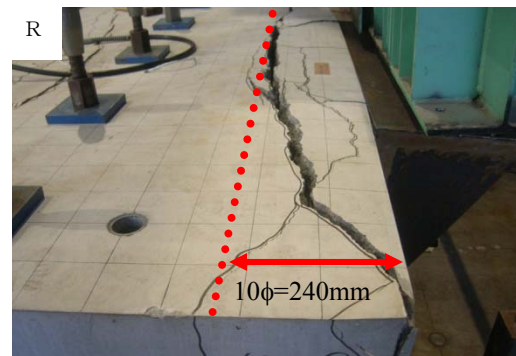


図-8 荷重試験終了時のひび割れ状況 (図-6 R 点)

図-8 に、荷重試験終了時のひび割れ状況を示す。No.1 の試験体では荷重低下後も荷重を継続しており、図-7、図-8 より、ひび割れ幅が大きくなる結果となった。また、このひび割れが大きくなることで、図-6 の上面の鉛直変位および水平変位が大きくなったと考えられる。

図-9 に、No.3 の荷重-変位関係を示す。試験結果より、No.1 と比較して荷重低下後に脆性的に破壊する結果となった。これは、No.3 のコンクリート試験体に無筋コンクリートを使用したためと考えられる。また、図-9 では図-6 で見られた鉛直変位のすべりが見られなかった。これは、No.3 の落橋防止装置の取付け時に、あと施工アンカーと落橋防止装置が接していたためと考えられる。

図-10 に、全ケースでの荷重-変位関係結果を示す。ここで、横軸は上面の鉛直変位とした。埋込み長の比較

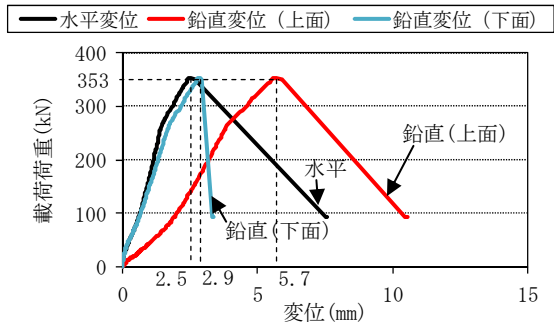


図-9 No.3の荷重-変位関係

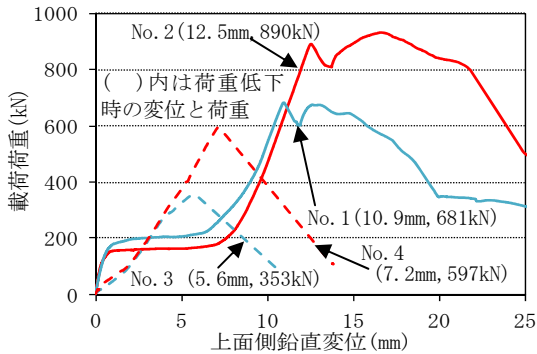


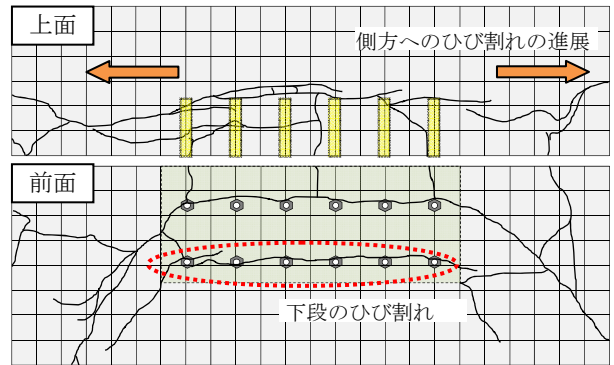
図-10 荷重-変位関係 (全ケース, 上面鉛直変位)

より, No.3とNo.4では1.7倍, No.1とNo.2では1.3倍の耐力増加となっており, 埋込み長を長くすることで耐力が増加する傾向となった。また, あと施工アンカー本数の比較では, No.3とNo.1で1.9倍, No.4とNo.2で1.5倍の耐力増加となった。あと施工アンカー本数がNo.3とNo.1の試験体で1.5倍の本数であることから, 耐力の増加についてあと施工アンカー本数と同等以上の影響を受ける傾向となった。

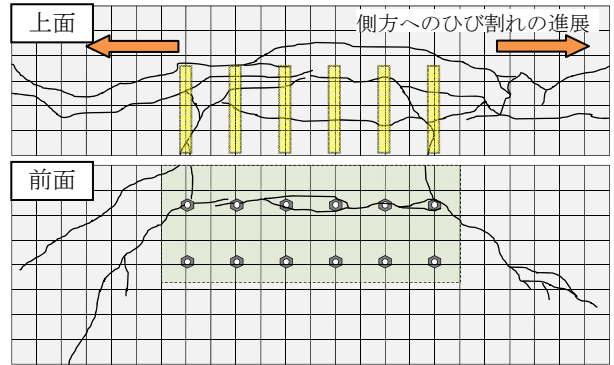
3.2 ひび割れ状況

図-11にNo.1とNo.2の2ケースのひび割れ図を示す。No.1の試験体では荷重低下後も荷重を継続した。そのため, 上段のあと施工アンカーだけではなく下段のあと施工アンカーにも引抜きが作用したと考えられ, 図-11(a)前面図に示すように, 下段にもアンカー間にひび割れが発生する結果となった。また, これは図-6のS点以降の荷重による結果と考えられる。一方, No.2の試験体では, 荷重が十分に低下した25mm変位で荷重を終了とした。その結果, 下段のあと施工アンカーに引抜きが作用せず, 下段のアンカー間にはひび割れが発生しなかった。

また, 図-11の上面図からわかるように, No.1と同様に, No.2においてもあと施工アンカー先端 ($\phi 15 \times 2.4\text{mm} = 360\text{mm}$) 付近からひび割れが発生する結果となった。これはNo.3とNo.4も同様であり, 上面のひび割れがコンクリート試験体の側方に向かって進展する結果となった⁷⁾。なお, No.3とNo.4の無筋コンクリート試験体と比較すると, No.1とNo.2では, 母材が鉄筋コンクリートであるため, ひび割れが分散する結果となった。

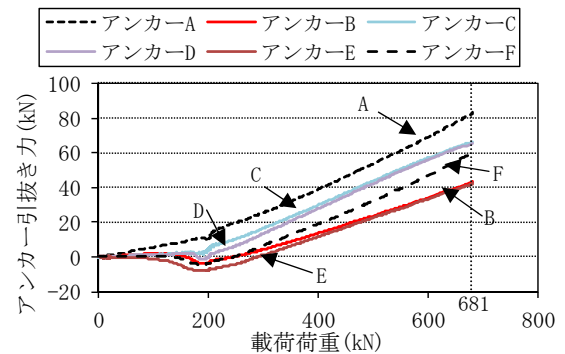


(a) No.1 (埋込み長 10φ)

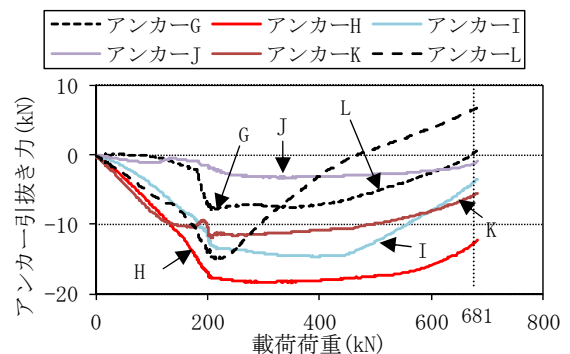


(b) No.2 (埋込み長 15φ)

図-11 載荷試験後のひび割れ状況 (10cm 格子)



(a) 上段アンカー



(b) 下段アンカー

図-12 アンカーに作用する引抜き力結果 (No.1)

3.3 あと施工アンカーに作用する引抜き力

図-12に, No.1での上段および下段のあと施工アンカーに作用した引抜き力の結果を示す。ここで, 横軸は載荷荷重, 縦軸は各あと施工アンカーに作用した引抜き

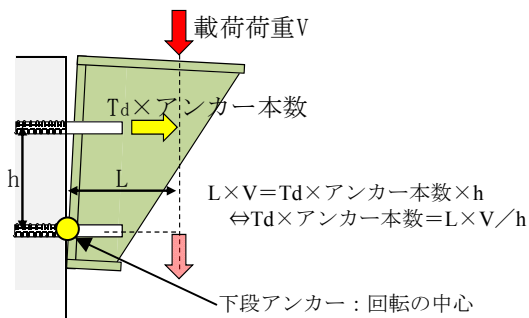


図-13 引抜き力と載荷荷重の関係

力である。なお、引抜き力は測定した引抜きひずみをあと施工アンカーの有効断面積を用いて荷重に変換したものである。図には、載荷試験における最大荷重時までを示した。

図-12 (a)より、上段のあと施工アンカーに作用した引抜き力は100kN以下となった。No.1の試験体で使用したあと施工アンカーの降伏荷重が440kNであるため、あと施工アンカーは降伏していないといえる。また、埋込み長が長い試験体であるNo.2においても140kN程度の引抜き力しか発生しなかった。このことから、実施工で用いられているSD490などの鉄筋を用いた場合でも、本試験と同様の結果になる可能性がある。

図-12 (b)より、Lのアンカーを除いた下段のあと施工アンカーに引抜き力が発生しないことが確認できた。また、Lのアンカーに対しても上段と比較して小さな引抜き力となる結果となった。すなわち、下段のアンカーが引抜き力および載荷荷重の回転中心になっていると考えられる。以上より、落橋防止装置の設計に用いるあと施工アンカーの引抜き力は、図-13および式(1)に示す関係性になると考えられる。

$$T_d \times n = V \cdot L / h \quad (1)$$

ここで、V：載荷荷重(N)、L：落橋防止装置接地面からの載荷距離(mm)、h：あと施工アンカーの上段と下段間の距離(mm)、 T_d ：あと施工アンカー1本に作用する引抜き力(N)、n：アンカー本数である。

また、図-14に、全ケースでの上段のあと施工アンカーに作用した引抜き力分布を示した。ここで、横軸は落橋防止装置の幅を示しており、縦軸は引抜き力を示した。なお、図-14の結果は各載荷試験での最大荷重点のものである。図-14より、No.1およびNo.2で均等に荷重が作用する結果が得られた。一方、No.3ではCのアンカーに引抜き力が集中し、No.4ではEのアンカー側に引抜き力が偏る結果が得られた。これらの試験体では、ガイド管などを使用しておらず、アンカーの取付け精度により、不均等な引抜き力の作用分布になったと考えられる。

また、各試験体での上段の引抜き力の平均値は、No.1で60.1kN、No.2で131.8kN、No.3で87.6kN、No.4で

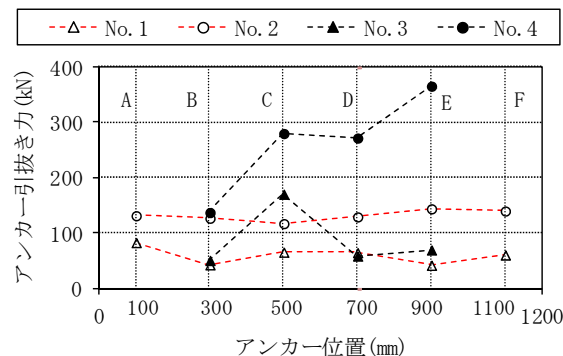


図-14 アンカー位置ごとの引抜き力

264.0kNであった。平均値の比較より、図-10の最大荷重点までの荷重と同様に、埋込み長が長くなることで、あと施工アンカーに作用する引抜き力が増加する結果となった。

4. 引抜き耐力の設計に関する検討

鉄道構造物で用いられている、樹脂系充填材を用いる場合のあと施工アンカー1本当たりの引抜き耐力の算定式を式(2)、(3)に示す⁶⁾。式(2)の T_{ud1} はコンクリート側の破壊により決まる場合の耐力算定式であり、アンカー径、削孔径、埋込み長およびコンクリート強度の影響を考慮した式となっている。一方、式(3)の T_{ud2} はあと施工アンカーの降伏により決まる場合の耐力算定式である。あと施工アンカーの引抜き耐力としては、これらの2式のうち、小さい方を引抜き耐力 T_{ud} として用いる。

$$T_{ud1} = \{1.6 \cdot \pi \cdot \phi \cdot (D + 5.5 \cdot \phi) \cdot f'_{cd}{}^{1/3} \cdot \alpha + 1.1 \cdot \pi \cdot D \cdot (L - 4 \cdot \phi) \cdot f'_{cd}{}^{2/3}\} / \gamma_b \quad (2)$$

$$T_{ud2} = f_{syd} \cdot A_{s2} / \gamma_b \quad (3)$$

ここで、 ϕ ：アンカー径(mm)、D：削孔径(mm)、 f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²)、L：アンカーの埋込み長(mm)、 f_{syd} ：アンカーの設計引抜き降伏強度(N/mm²)、 α ：有効水平投影面積の低減係数、 A_{s2} ：ネジ部有効断面積(mm²)、 γ_b ：部材係数(T_{ud1} では1.5、 T_{ud2} では1.0)である。

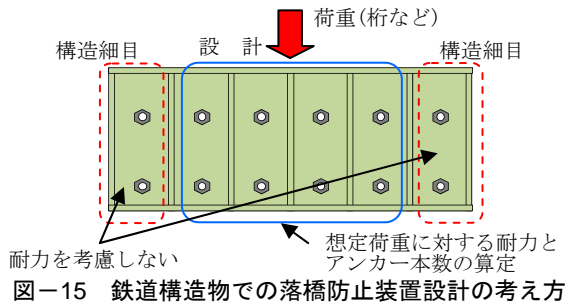
表-5に、全ケースにおける耐力算定結果を示す。表-5では、式(2)、(3)の1本当たりの引抜き耐力算定値と、各試験体で用いたあと施工アンカー本数を乗じた合計耐力算定値を示した。なお、本検討では高強度の鉄筋およびPC鋼棒を用いたことから、 T_{ud1} が T_{ud2} と比較して小さくなっている。そのため、母材コンクリートの破壊により決まる耐力算定値 T_{ud1} があと施工アンカーの引抜き耐力算定値 T_{ud} となった。また、図-3 (c)より、 $L=h$ となることから、式(1)が $T_d \times n = V$ となるため、載荷荷重を引抜き力として見なすことができる。以上より、表-5に示す合計耐力算定値と載荷試験での最大荷重の比較を行った。

表-5 耐力算定結果

NO.	耐力算定式(1) T_{ud1}		耐力算定式(2) T_{ud2}		載荷試験値
	1本 当り	合計 本数 耐力値	1本 当り	合計 本数 耐力値	
1	103.6	6 621.6	484.0	6 2904.0	681.0
2	161.7	6 970.2	484.0	6 2904.0	890.0
3	97.6	4 390.4	374.0	4 1496.0	353.0
4	158.7	4 634.8	374.0	4 1496.0	597.0

表-6 構造細目を考慮した耐力算定結果

NO.	耐力算定式(1) $T_{ud1}=T_{ud}$			載荷試験値	載荷試験値/合計 耐力値
	1本 当り	合計 本数 耐力値	合計 本数 耐力値		
1	103.6	4 414.4	681.0	1.64	
2	161.7	4 646.8	890.0	1.38	
3	97.6	2 195.2	353.0	1.81	
4	158.7	2 317.4	597.0	1.88	



比較の結果、No.1以外で載荷試験値が耐力算定値を下回る結果となった。つまり、式(2)に示された鉄道構造物用のあと施工アンカーの耐力算定式では、耐力を過大に評価する可能性があるといえる。これは、式(2)にコンクリート試験体端部とあと施工アンカーの距離（以下、へりあき長という）の影響が考慮されていないためと考えられる。へりあき長については、図-3に示すように、全ての試験体で6φ以上（6×D25=150mm<160mm）を確保した。しかしながら、既往の研究¹⁾より、へりあき長を6φとした場合に、十分なへりあき長を有した試験と比較して1~3割程度引抜き耐力が低下した結果が得られている。すなわち、へりあき長による耐力の低減効果を考慮していないため、式(2)の耐力算定値が過大な結果になっていると考えられる。

なお、鉄道構造物用の落橋防止装置の設計では、支承部の耐震補強設計の手引き⁹⁾により、十分な安全度を確保するための措置がとられている。具体的には、図-15に示すように、計算上必要なあと施工アンカー本数に対し、構造細目としてあと施工アンカーを両端に追加するよう定めている。これは、あと施工アンカーに作用する引抜き力を均等化する目的で追加されている。すなわち、本試験体であれば、設計載荷荷重は式(1)より、 $T_{ud1} \times (n-2)$ となる。したがって、載荷試験における載荷荷重が耐力算定値 T_{ud} を下回っていたNo.2では、 $155.0 \times 4 = 620.0 \text{ kN}$ が耐力算定値になる。設計における構造細目を考慮した場合の全ての計算結果を表-6に示す。

表-6より、設計上考慮しない落橋防止装置両端のあと施工アンカーを無視する場合、載荷試験値が、全ての耐力算定値を上回る結果となり、安全側の評価となることを確認した。今後は、へりあき長の影響を適切に評価することで、落橋防止装置の設計の合理化を図る必要があると考えられる。

5. まとめ

落橋防止装置に用いるあと施工アンカーの耐力を検討するため、模型試験体による載荷試験を実施した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- (1) 実構造物に近い諸元では、上側アンカー先端を起点としたコーン破壊が発生する可能性があり、あと施工アンカーの埋込み長を長くすることで耐力が増加することを確認した。
- (2) 下段のアンカーに作用する引抜き力が小さく、載荷に伴う引抜き力を上段アンカーが負担していること、最大荷重時は下段アンカーが作用の回転中心となっていることがわかった。
- (3) 試験値が鉄道用のあと施工アンカーの引抜き耐力算定値を下回る結果となった。ただし、現行の設計法では、両端のアンカーを考慮していないため、所定の安全度は確保しているものと考えられる。今後はへりあき長の影響を評価することで、落橋防止装置設計の合理化を図ることが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 笠 裕一郎, 田所 敏弥, 岡本 大, 古屋 卓稔: 耐荷機構に基づくあと施工アンカーの引抜き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, 2015.7
- 2) 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
- 3) 公益財団法人 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), 2014
- 4) 一般社団法人 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), 2014
- 5) (財) 海洋架橋・橋梁調査会: 既設橋梁の耐震補強工法事例集, 2005.4
- 6) 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
- 7) 古屋 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, pp.937-942, 2015.7