

# あと施工アンカーの耐力評価と狭隘部に適用する設計法

角野 拓真\* 田所 敏弥\* 三倉 寛明\*\*  
 笠 裕一郎\*\*\* 古屋 卓稔#

## Evaluation of Load-carried Capacity of the Post-installed Anchor and Its Design Method for Installment in Small Region

Takuma KADONO Toshiya TADOKORO Hiroaki MIKURA  
 Yuichiro RYU Takutoshi FURUYA

The post-installed anchor has been recognized as widely a technology for civil engineering structures: e.g. reinforcements or reconstruction of concrete structures. The reliability of the post-installed anchor has decreased in recent years because of the serious accident in the road tunnel: collapse of the ceiling-boards caused by deterioration of the post-installed anchor. "Guidance for design and construction of the post-installed anchor" has been issued for the railway structures in 1987, 30 years ago. In this research, the design method for applying the post-installed anchor to concrete structures has been proposed by evaluating the basic information of mechanical performance of the post-installed anchor by conducting the experiment and the finite element method.

キーワード：あと施工アンカー，引張耐力，狭隘部，アンカー間隔，へりあき寸法

### 1. はじめに

あと施工アンカーは、コンクリート構造物等の補強や改築、付属物の取り付けなどに広く利用されている技術である。近年、道路トンネルにおいてあと施工アンカーの損傷により天井板崩落事故が発生するなど、その信頼性が社会的な問題となっている。

あと施工アンカーの引張耐力については、様々な実験や研究が行われているものの、破壊形態や耐荷機構に基づく耐力評価に関する研究事例は少ない。また、実構造物へ適用する場合、アンカー間隔やコンクリート縁端部とのへりあき寸法が小さくなる狭隘部へ適用する場合も多く、その適用条件に応じた適切な耐力評価が必要となる。本研究では、実務において使用頻度の高い接着系あと施工アンカーを基本として、載荷実験および有限要素（以下、FEM）解析により耐荷機構を明らかにし、あと施工アンカーの耐力評価と狭隘部に適用する場合の設計法の提案を行った。

### 2. 耐荷機構に基づく引張耐力算定式の検討

#### 2.1 試験概要

有機系の接着系あと施工アンカー（以降、接着系アンカー）を例に挙げると、あと施工アンカー工法設計施工の手引き<sup>1)</sup>（以降、現行手引き）では、式(1)に示す引張耐力算定式としている。この式は、第1項のコーン破壊耐力と第2項の付着破壊耐力とを累加した式であり、コンクリート上面から $4\phi$ のコーン破壊の抵抗領域と、 $4\phi$ より先端の付着破壊の抵抗領域を仮定している。一方で、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>2)</sup>では、コーン破壊耐力と付着破壊耐力のうち小さい値を引張耐力とするよう定められており、これらの統一的な考え方は示されていない。そこで、接着系アンカーの引張力に対する基本的な性能を把握するため、アンカーの定着長、母材コンクリート強度、アンカー径およびアンカー形状を実験パラメータとし載荷実験を行った。

$$P_1 = 0.53\pi(D + 5.5\phi)f_{cd}^{1/3} + 0.36\pi D(L - 4\phi)f_{cd}^{2/3} \quad (1)$$

ここに、 $P_1$ は現行手引きの引張耐力、 $\phi$ はアンカー径、 $D$ は削孔径、 $f_{cd}$ はコンクリートの圧縮強度、 $L$ は埋込み長である。

#### 2.2 試験体

本実験では、注入式エポキシ樹脂の接着系アンカーを

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室  
 \*\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室  
 (現 株式会社大林組)  
 \*\*\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室  
 (現 九州旅客鉄道株式会社)  
 # 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室  
 (現 日本交通技術株式会社)

表1 荷重実験結果一覧（引張力）

No	パラメータ	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	アンカー筋	穿孔径 (mm)	埋込み長	破壊形態 <sup>(注)</sup>	試験体数	最大荷重 (kN)		
								平均	コーン破壊 深さ (mm) 平均	
1	定着長 (基本)	28.5	D25	32	3φ	A,C	3	62.3	72.0, 2.9φ	
					5φ	A,C	3	123.9	108.0, 4.3φ	
					7φ	C	3	193.9	124.0, 5.0φ	
					10φ	E	2	304.0	—, —	
2	コンクリート強度	20.8	D25	32	3φ	C	1	46.3	51.0, 2.0φ	
					5φ	C	1	108.1	115.0, 4.6φ	
					7φ	C	1	157.6	160.0, 6.4φ	
		34.7			3φ	A	1	70.3	75.0, 3.0φ	
					5φ	C	1	125.2	120.0, 4.8φ	
					6φ	C	1	198.0	152.0, 6.1φ	
3	穿孔径	D=40	28.5	D25	40	5φ	C	2	137.1	110.0, 4.4φ
4	アンカー筋の径, 形状	31.7	D25	32	3φ	A	1	52.6	75.0, 3.0φ	
					5φ	C	1	126.9	85.0, 3.4φ	
					7φ	A	1	196.3	175.0, 7.0φ	
					D19	25	7φ	C	3	119.6
			D13	15	7φ	C	3	62.6	50.0, 3.8φ	
			M24	28	7φ	A,C	3	177.9	166.0, 6.9φ	
			M20	24	7φ	A,C	3	125.7	92.0, 4.6φ	
			M12	14	3φ	A	3	13.5	36.0, 3.0φ	
					5φ	A,C	3	31.3	49.0, 4.1φ	
					7φ	C	3	49.5	63.0, 5.3φ	
10φ	C	3			84.5	59.7, 5.0φ				

注：表1内の破壊形態の凡例は図2による。

使用し、母材コンクリートの目標強度は27 N/mm<sup>2</sup>を基本とし、20 N/mm<sup>2</sup>, 35 N/mm<sup>2</sup>についても実験を行った。アンカーは、降伏を避けるために引張強度が1,000 N/mm<sup>2</sup>以上の高強度鋼材を用いた。

### 2.3 荷重方法

図1に荷重試験装置を示す。アンカーは下向き施工とし、母材コンクリート表面に対して垂直に施工した。荷重は、センターホールジャッキにより加力を行い、ねじ加工したアンカー頂部に取り付けた治具を介して、静的に引抜き試験を実施した。アンカーから、反力基礎までの距離は、拘束の影響を受けないよう20φ以上確保した。

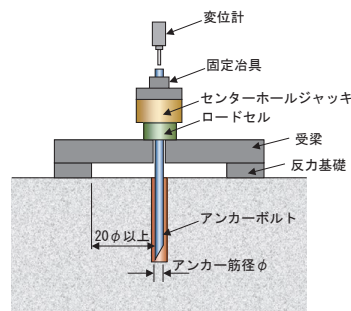


図1 荷重試験装置

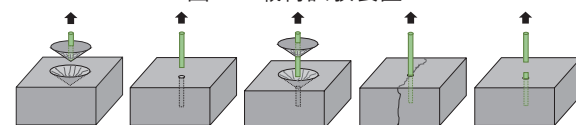


図2 破壊形態の分類

計測項目は、荷重および変位とし、荷重はロードセルで、変位はアンカー頂部に設定した変位計で計測を行った。最大荷重時の変位計の値から、最大荷重より計算したアンカー筋の伸び量を差し引いた値を抜き出し量とした。また、耐荷機構の検討を目的に、溝切り加工したアンカーにひずみゲージを貼り付け、定着部アンカーの付着応力を算定した。さらに、破壊形態を確認するため、コンクリートの破壊形状を記録した。

### 2.4 試験結果

表1に実験結果、図2に引張力に対する破壊形態の分類を示す。また、図3に、接着系アンカーを用いた引張試験 (No.1) の埋込み長ごとの最大荷重および式(1)の算定値を示す。なお、式(1)は安全率3を見込んでいるので、式(1)を3倍した値を示している。図3より式(1)は実験値を精度よく評価していることがわかる。また、埋込み長3φ~7φの実験範囲では、コーン破壊深さが

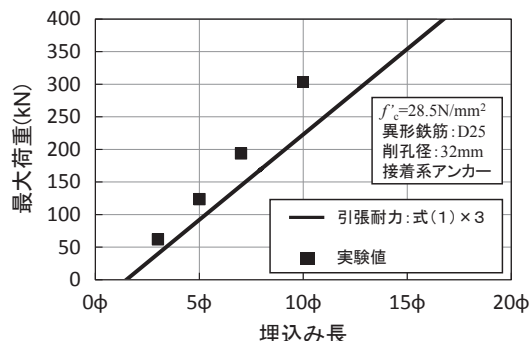


図3 実験値と引張耐力算定式の比較 (No.1)

3φ~6φであり、式(1)で想定している付着破壊への遷移領域4φと概ね一致することを確認した。図4にNo.1の埋込み長7φの場合の荷重-変位関係、図5にひずみ分布から算出した付着応力分布を示す。最大荷重157kN

時に付着応力度は約  $18\text{N/mm}^2$  に達し、その後、荷重が低下していることから、これが充填材とアンカーの付着強度に相当すると考えられる。実験におけるコーン破壊深さは  $5\phi$  程度であり、最大付着応力度が発生する位置と概ね一致した。このことから、アンカーと充填材の付着応力が付着強度に達することにより、引張耐力に達すると考えられる。付着応力度を深さ方向に積分した値が引張荷重となるが、最大荷重時にこれをコンクリート表面からコーン破壊深さまで積分した値は、コーン破壊耐力に達していることから、図6に示すように、この値がみかけ上のコーン破壊耐力に相当し、それ以深の付着応力の積分値が付着破壊耐力に相当すると考えることができる。このことから、埋込み長が同一の場合、コーン破壊深さにばらつきが生じてても、図5に示すような付着応力分布の積分値が最大荷重となるため、引張耐力に大きく影響しないと考えることができる。

また、No.2では母材コンクリート強度の影響、No.3では削孔径の影響、No.4ではアンカー形状の影響を把握するため、載荷実験を行った。いずれの場合も、式(1)により精度よく評価できることを確認した<sup>3)</sup>。

以上の結果から、 $4\phi$ を遷移領域としてコーン破壊耐力と付着破壊耐力の累加で表す式(1)は、この耐荷機構の考え方に一致しており、接着系アンカーの引張耐力の評価法として妥当であることを確認した。

### 3. 狭隘部に施工する場合の引張耐力の評価

#### 3.1 概要

あと施工アンカーを実構造物に適用する場合、隣接するアンカーの間隔やコンクリート縁端部におけるへりあき寸法を大きく確保できない場合が想定される。現行手引きでは、これらの条件による引張耐力への影響を、有効投影面積の重なりを考慮して評価する方法を示している。この方法では、実験結果<sup>4) 5)</sup>を過大に評価する場合があるため、本研究では、載荷実験および3次元FEM解析を行い、狭隘部に施工するあと施工アンカーの引張耐力の評価法について提案した。

#### 3.2 アンカー間隔が引張耐力に与える影響

##### (1) 載荷実験による検討

アンカー間隔が近接する場合の影響を明らかにするため、アンカー間隔をパラメータとして、図7に示すように2本のアンカーに同時に引張力を作用させる載荷実験を行った。表2に、載荷実験結果の一覧を示す。破壊状況は、アンカー間隔が  $2 \sim 14\phi$  では図8に示すように2つのアンカーが同時に1つのコーン破壊面を形成する破壊形態となり、アンカー間隔  $21\phi$  では片側のアンカーのみがコーン破壊または複合破壊する破壊形態となった。

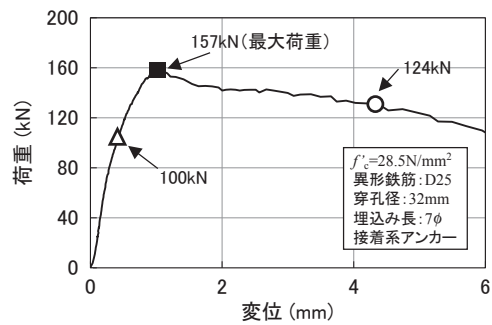


図4 荷重－変位関係 (No. 1, 埋込み長  $7\phi$ )

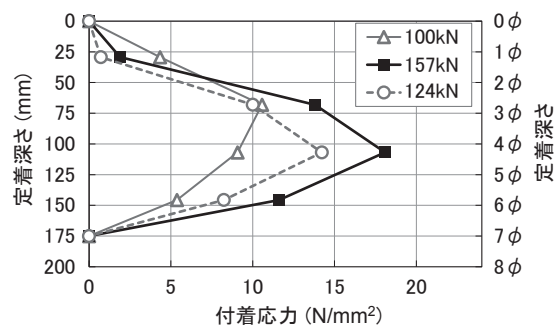


図5 付着応力分布 (No.1, 埋込み長  $7\phi$ )

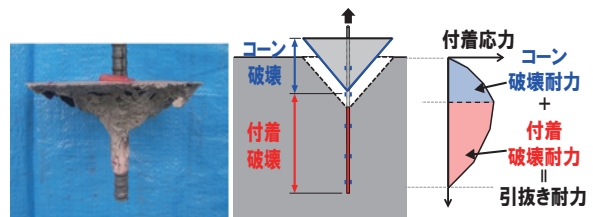


図6 コーン破壊耐力と付着破壊耐力の模式図

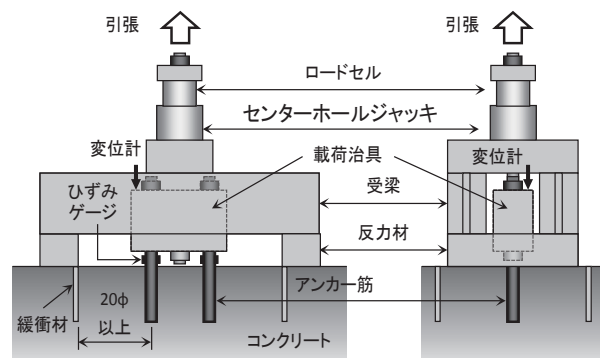


図7 載荷実験装置 (アンカー間隔)



図8 アンカー間隔が近接する場合の破壊状況

表2 載荷実験結果一覧（アンカー間隔）

No	パラメータ	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	アンカー筋	削孔径 (mm)	埋込み長	破壊形態 <sup>(注)</sup>	試験体数	最大荷重 (kN)	コーン破壊	
									深さ (mm)	
								平均	平均	
5	アンカー間隔	33.8	M12	14	7φ	A	3	75.3	84.0	7.0φ
					7φ	A	3	81.3	84.0	7.0φ
					10φ	A,D	4	111.3	119.0	9.9φ
					7φ	A	3	94.8	84.0	7.0φ
					10φ	A,C	2	139.6	117.0	9.8φ
					7φ	A	3	125.1	83.0	6.9φ
					10φ	A,C	2	179.5	106.0	8.8φ
					10φ	A,C	2	179.5	106.0	8.8φ

注：表2内の破壊形態の凡例は図2による。

このことから、アンカー間隔が14φ以下の場合、隣接するアンカーの影響を受け、2つのアンカーのコーン破壊面が同時に1つのコーン破壊面を形成するとともに、コーン破壊深さが深部方向に移行し、埋込み長とコーン破壊深さが概ね一致する破壊形態となることが分かった。

(2) 3次元 FEM 解析による検討

載荷実験を模擬した3次元 FEM 解析を行い、アンカー間隔の近接により引張耐力が低下する現象を再現した。コンクリートは、非線形を考慮し、アンカーは弾性体としたソリッド要素とし、1/2 対称モデルを用いた。また、コンクリートとアンカー界面のせん断伝達は、アンカー単体の載荷実験の荷重変位関係の実験値と解析値が一致するように設定したインターフェイス要素を用いた。図9に3次元 FEM 解析による最大荷重時の最大主ひずみ分布、図10に載荷実験および3次元 FEM 解析により得られた最大荷重とアンカー間隔の関係を示す。図10より載荷実験と解析値の最大荷重は概ね一致していることが分かる。このときの最大主ひずみ分布は、2つのアンカーが同時に1つのコーン破壊面を形成するような分布となり、図8に示す破壊状況と一致しており、載荷実験を概ね再現できていることを確認した。

(3) アンカー間隔を考慮した引張耐力の評価法

図10には、No.1の実験で実施したアンカー単体の場合の最大荷重(以下、基本荷重)とその2倍の値を示している。アンカー間隔が小さいほど基本荷重に、大きいほど基本荷重の2倍に漸近した。アンカー間隔が21φで、概ね基本荷重の2倍と等しくなった。以上の結果から、概ねアンカー間隔が20φ以下の範囲では、アンカー間隔の影響を受け引張耐力が低下することを確認した。よって、アンカー間隔が20φ以下の場合に、アンカー間隔に対して線形的に引張耐力が低下すると仮定することで現行手引きに示す有効投影面積の重なりを考慮し評価する方法よりも適切にアンカー間隔の影響を評価することができる。

3.3 へりあき寸法が引張耐力に与える影響

(1) 載荷実験による検討

コンクリート縁端とアンカー筋が近接する場合のへりあき寸法をパラメータとして載荷実験を行った。表3に、

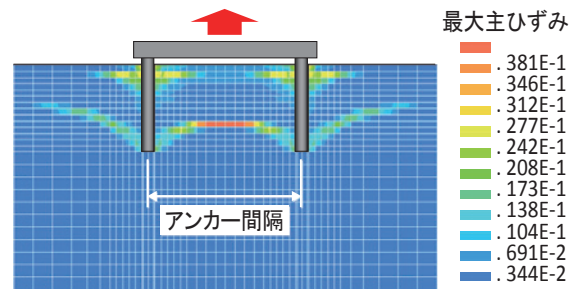


図9 最大荷重時の最大主ひずみ分布 (No.5)

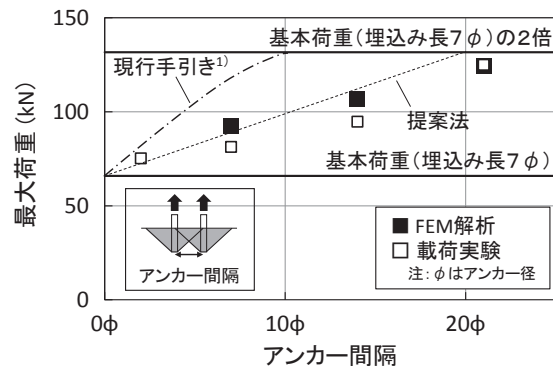


図10 最大荷重とアンカー間隔の関係

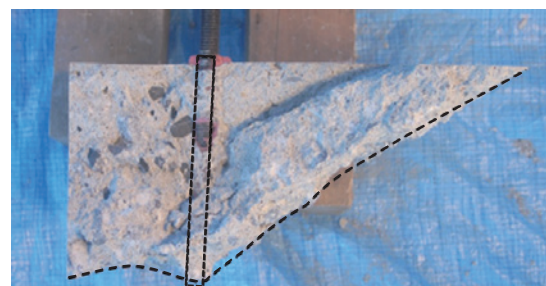


図11 へりあきの影響を受ける場合の破壊状況

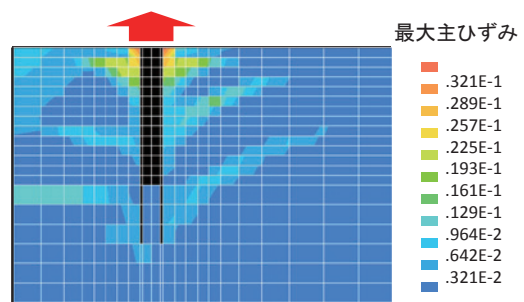


図12 最大荷重時の最大主ひずみ分布 (No.6)

表3 載荷実験結果一覧（へりあき寸法）

No	パラメータ		コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	アンカー筋	削孔径 (mm)	埋込み長	破壊形態	試験体数	最大荷重 (kN)		コーン破壊深さ (mm)	
									平均		平均	
6	へりあき寸法	3φ	33.8	M12	14	7φ	A,C	2	29.9	79.0	6.6φ	
		4φ				10φ	A,D	1	41.5	119.0	9.9φ	
		7φ				7φ	A,D	3	48.2	82.0	6.8φ	
		10φ				10φ	A,C,D	2	74.0	103.0	8.6φ	
		14φ				7φ	A,D	2	51.3	83.0	6.9φ	
		21φ				10φ	A,C,D	2	83.9	110.0	9.2φ	
						7φ	A,C,D	2	63.2	78.0	6.5φ	
						10φ	A,C,D	2	91.4	100.0	8.3φ	
						7φ	A,C	3	63.3	77.0	6.4φ	

注：表3内の破壊形態の凡例は図2による。

載荷実験結果の一覧を示す。破壊形態は、へりあき寸法が2～14φの範囲で、図11に示すようにコーン破壊面がコンクリート縁端付近に達する端部破壊となった。へりあき寸法21φでは、コンクリート縁端部の端部破壊を伴わない破壊形態となった。へりあき寸法14φ以下と21φの間で、破壊形態において端部破壊の有無に明確な違いが見られたが、表3に示すようにコーン破壊深さでは明確な傾向はなく、全体的にバラツキの大きい結果となった。

(2) 3次元 FEM 解析による検討

載荷実験を模擬した3次元 FEM 解析を行い、へりあき寸法の影響により引張耐力が低下する現象を再現した。コンクリートは、非線形を考慮し、アンカーは弾性体としたソリッド要素とし、1/2 対称モデルを用いた。図12に3次元 FEM 解析による最大荷重時の最大主ひずみ分布、図13に載荷実験および3次元 FEM 解析により得られた埋込み長7φの場合の最大荷重とへりあき寸法の関係を示す。載荷実験と解析値の最大荷重は概ね一致し、このときの3次元 FEM 解析の最大主ひずみ分布は、コーン破壊面がコンクリート縁端部に達するような分布となり、載荷実験を概ね再現できていることを確認した。

(3) へりあき寸法の影響を考慮した引張耐力の評価法

図13には、No.1の実験で実施した埋込み長7φの場合の基本荷重を示しているが、へりあき寸法が小さくなるにしたがい最大荷重は低下し、大きくなるにしたがい基本荷重に漸近した。また、へりあき寸法が14φで、概ね基本荷重と等しくなった。へりあき寸法が10φ以下の範囲では、へりあき寸法の影響を受けることを確認した。よって、検討結果および既往の文献4)よりへりあき寸法が10φ以下の場合に、へりあき寸法に対して線形的に引張耐力が低下すると仮定することで、現行手引きに示す有効投影面積の重なりを考慮し評価する方法よりも適切に、へりあき寸法による影響を評価することができる。

4. 狭隘部に適用する設計法の検証

4.1 試験概要

実施工への適用を想定し、落橋防止装置を模擬した部

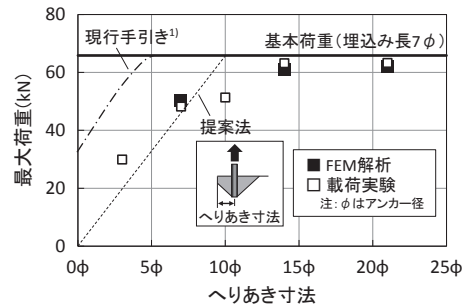


図13 最大荷重とへりあき寸法の関係

材実験を行い、提案した引張耐力の算定法の妥当性を検証した。試験体は図14に示す形状とし、アンカーの埋込み長を、それぞれ10φ、15φとした。充填材はエポキシ系とし、使用するアンカーは高強度加工したPC鋼棒（M24、降伏強度1,164N/mm<sup>2</sup>）を用いた。母材は圧縮強度28.0 N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数28.1kN/mm<sup>2</sup>のコンクリートを用いた。

4.2 試験結果

載荷荷重の最大値は、埋込み長10φで681.2kN、埋込み長15φで890.0kNとなった。破壊形態は、図15に示すように、隣接する複数のアンカーが1つのコーン破壊面を形成し、さらに破壊面はコンクリート縁端部付近に達していた。これより、本実験の接着系アンカーは、アンカー間隔およびへりあき寸法の影響を同時に受けていたと考えられる。

4.3 複数の影響を同時に受ける場合の検証

本試験の接着系アンカーは、アンカー間隔やへりあき寸法の影響を同時に受けていると想定できるため、落橋防止装置の上側アンカーの引張力について、実験値と式(1)および図10、図13を用いてアンカー間隔およびへりあき寸法の影響を考慮した算定値を比較することで検証を行うこととした。なお、落橋防止装置の上側アンカー列の最大引張力の実験値は、破壊時における落橋防止装置の回転中心を下端位置と想定し算定した。複数のアンカー間隔やへりあき寸法の影響が混在する場合の低減率は、図16に示すように、個々の影響要因による低減率

表4 荷重実験結果一覧（部材実験）

No	パラメータ		コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	アンカー一筋	削孔径 (mm)	実験値 P <sub>d</sub> (上側アンカー列最大引抜き力) (kN)	提案法		現行手引き	
							算定値 式(1)×3×低減率 (kN)	実験値 / 算定値	算定値 式(1)×3×低減率 (kN)	実験値 / 算定値
7	落橋防止装置 (埋込み長)	10φ	28.0	M24	28.0	505.4	420.9	1.20	1,028.9	0.49
		15φ				660.3	660.8	1.00	1,615.5	0.41

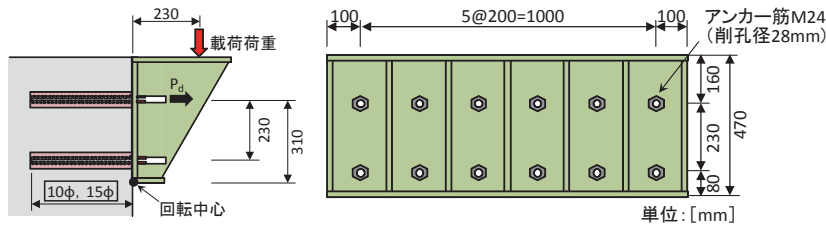


図14 落橋防止装置試験体概要

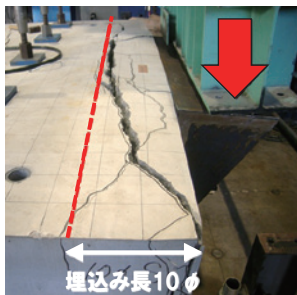
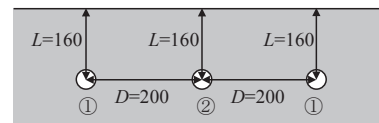


図15 破壊形態 (No.7:埋込み長10φ)



D:アンカー間隔 (mm)  
L:へりあき寸法 (mm)  
<個別要因による低減率>  
アンカー間隔:  $\alpha(D = 200\text{mm} = 8.3\phi) = 0.71$   
へりあき寸法:  $\beta(L = 160\text{mm} = 6.7\phi) = 0.67$   
<複数要因を考慮した低減率>  
アンカー①:  $\alpha(D) \times \beta(L) = 0.47$   
アンカー②:  $\alpha(D) \times \alpha(D) \times \beta(L) = 0.33$

図16 複数の影響を同時に受ける引張耐力の低減率

を求め、これを累積することで求めることとした。

表4に算定した上側アンカー列の最大引張力の実験値と、式(1)に安全率3を乗じた算定値に対し、提案法および現行手引きに示す有効投影面積の考え方をを用いる方法で求めた低減率を乗じた値を示す。実験値と算定値の比は、現行手引きの方法では0.4～0.5倍程度となったが、提案法では1.0～1.2程度となり、提案した引張耐力の算定法が実験を精度よく評価できることを確認した。以上の結果より、複数のアンカー間隔やへりあき寸法の影響を同時に受ける場合は、個々の低減率を累積することで評価できることが分かった。

## 5. まとめ

本研究では、荷重実験およびFEM解析によりあと施工アンカーの基本的性能を把握するとともに、耐力評価法および狭隘部に適用する場合の設計法の提案を行った。本稿の結論を以下に要約する。

- (1) 現行手引きに示す引張耐力算定式は、破壊形態および耐荷機構を適切に表現しており、接着系アンカーの引張耐力の評価法として妥当である。
- (2) アンカー間隔が20φ以下の場合、アンカー間隔に対して線形的に引張耐力が低下すると仮定することでアンカー間隔の影響を評価することができる。
- (3) へりあき寸法が10φ以下の場合、へりあき寸法に対して線形的に引張耐力が低下すると仮定することで

へりあき寸法の影響を評価することができる。

- (4) 複数のアンカー間隔やへりあき寸法の影響が混在する場合は、個々の影響要因による低減率を求め、これを累積することで、その影響を評価することができる。

本研究により提案した設計法を、部分安全係数を用いた限界状態設計法に基づく設計体系への移行と併せて、あと施工アンカーの設計・施工の手引き<sup>6)</sup>として現行手引きの改訂版を取りまとめた。

## 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) 公益社団法人土木学会：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
- 3) 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
- 4) 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き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
- 5) 三倉寛明，田所敏弥，岡本大，古屋卓稔：アンカー近接およびへりあきが同時に影響するあと施工アンカーの引抜き耐力の評価法，土木学会年次学術講演概要集，Vol.72，V-284，2017
- 6) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：あと施工アンカーの設計・施工の手引き，2017