

論文 円柱ジベルと鉄筋アンカーを併用した縁端拡幅工法の実験的研究

三加 崇*1・有川 直貴*2・篠崎 裕生*1・浅井 洋*3

要旨：地震による落橋を防ぐため、橋脚や橋台の桁掛かり長を拡幅する工法として、コンクリートの増し打ちや鋼製のブラケットを用いた縁端拡幅工法が用いられる。著者らは、アンカーの施工性や経済性を勘案し、円柱ジベルと鉄筋アンカーを併用した鋼製ブラケットの固定方法を開発した。本稿では円柱ジベルを用いる工法は、従来の鉄筋アンカーと比較して設計荷重時のずれ変位を小さく抑えることができることを明らかにした。また、本工法のアンカー耐力の算定では、円柱ジベル内に配置した鉄筋アンカーのせん断抵抗力は考慮しないことが妥当と考えられた。

キーワード：縁端拡幅, 円柱ジベル, 鉄筋アンカー, ブラケット

1. はじめに

地震による落橋を防止するため、桁掛かり部分を拡幅して縁端拡幅工法が採用されている。拡幅部には、桁の重量を保持する必要があるため、コンクリートの増し打ちや鋼製のブラケットをアンカーによって固定する方法が用いられており、アンカーには鉄筋（以下、鉄筋アンカー）や PC 鋼棒が用いられている。アンカー量は、図-1 に示すように、鋼製ブラケットに作用する曲げモーメントとせん断力に抵抗するように設計される。せん断力に対しては、鉄筋アンカーに作用するせん断力から必要総断面積が設定され、曲げモーメントに対しては、既設構造物と鋼製ブラケットの間で平面保持が成り立つものとして、鉄筋アンカーに作用する引張力から配置位置および断面積が設定される。したがって、鉄筋アンカー量がせん断力によって決定される場合には、曲げモーメントに対して余裕を有する場合がある。鋼製ブラケットは、工場製作されるが、鉄筋アンカーが既設橋脚の表面から深い位置で鉄筋などと干渉し、計画位置と実際の設置位置とに相違が生じることを想定して、一般的には鉄筋アンカー位置が決定した後に加工される。そのため、鉄筋アンカー位置を精度よく測量する作業とその後のブラケット製作加工に時間を要することが課題である。

著者らは、アンカー設置のための削孔および干渉による影響を低減できる方法として、鋼管にモルタルを充填したジベル（円柱ジベル¹⁾と鉄筋アンカーを併用した鋼製ブラケットの固定方法を提案する。本工法のアンカーは、図-2 に示すように鋼管内に鉄筋アンカーを配置し、鋼管との間をモルタルで充填したものである。鋼管は、非破壊検査で探査可能な既設橋脚最表面の鉄筋より数十ミリ程度深い位置まで埋め込み、鋼製ブラケットに

設けた孔に貫通している。鋼管表面には凹凸を設けていないので、せん断力には抵抗するが、引抜力には抵抗しない。鉄筋アンカーは、引抜力に対して十分抵抗し得る定着長を確保し、アンカー用固定治具を介してブラケットに定着されている。このような配置にすることにより、既設橋脚の鉄筋をかわして配置される鋼管は計画通りの位置に配置でき、深部まで削孔する鉄筋アンカーは、鋼管内径の範囲の施工誤差が許されるのが特徴である。また、曲げモーメントに抵抗し得る鉄筋アンカーとせん断力に抵抗する鋼管ジベルを配置する構造になっている。本論文では、せん断力に対して円柱ジベル量が、引抜力

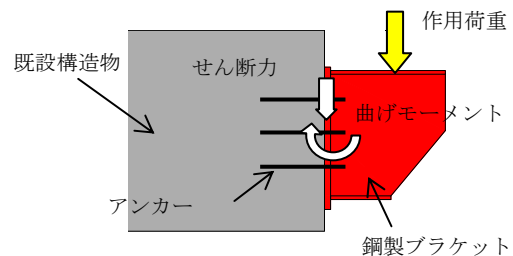


図-1 アンカーに作用する力

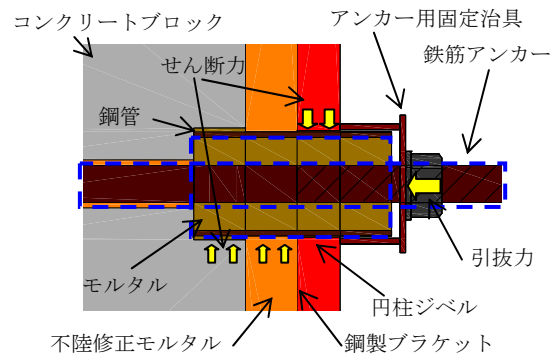


図-2 円柱ジベルを用いたアンカー構造

*1 三井住友建設（株）技術研究開発本部 工修（正会員）

*2 三井住友建設（株）技術研究開発本部（正会員）

*3 三井住友建設（株）技術研究開発本部 博(工)（正会員）

に対して鉄筋アンカー量が算定できることを明らかにする。さらに、曲げモーメントによる引抜力に対して鋼管内に配置した鉄筋アンカーもせん断力に対して抵抗し得るかを検証するため従来の鉄筋アンカーと比較して実験をおこなった。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体は、従来の鉄筋アンカーを用いた case1 および円柱ジベルと鉄筋アンカーを併用した case2 の 2 種類である。T 型橋脚の一部を模擬したコンクリートブロックを図-3 に示す。寸法は幅 1500mm、長さ 1750mm、高さ 1200mm であり、D32(SD295)鉄筋を 9 段、D16(SD295)のせん断補強筋を配置している。実験時のコンクリート圧縮強度は 29.6N/mm^2 である。鋼製ブラケットは、実大ブラケットの一部を切りだしたモデルであり、その形状を図-4 に示す。寸法は幅 500mm、長さ 500mm、高さ 850mm でアンカーの破壊耐力を評価するため十分な耐力を有する鋼板厚で設計した。試験体形状を図-5 に示し、鉄筋アンカーと円柱ジベルを表-1 に示す。case1 の鉄筋アンカーは D29 (SD345)で、3 段 2 列の 6 箇所に配置した。削孔径を $\phi 37\text{mm}$ 、削孔長 925mm とし、無機系注入式アンカー(材齢 11 日圧縮強度 61.8N/mm^2)を充填して D29 鉄筋アンカー(定着長 900mm)を挿入して定着した。鉄筋アンカーの定着長は、コンクリートブロックと鋼製ブラケットの接合面でのアンカー挙動を確認するために、鉄筋アンカーの降伏荷重に対して 2 倍の耐力を有する定着長とした。case2 のアンカーは、直径 60.5mm、厚さ 4.9mm の鋼管(STK400)に無収縮モルタルを充填した円柱ジベルと D22(SD345)の鉄筋アンカーであり、2 段 2 列の 4 箇所に配置した。円柱ジベルの削孔径を $\phi 65\text{mm}$ 、削孔長 70mm とし、鉄筋アンカーの削孔径を $\phi 28\text{mm}$ 、削孔長 625mm とした。無機系注入式アンカーを充填して D22 鉄筋アンカー(定着長 600mm)を挿入して定着した。鋼管を所定の位置に挿入し、写真-1 に示すように鋼管内部および外部を無収縮モルタルで充填して円柱ジベルを形成した。鋼製ブラケットの固定では、実橋の不陸調整モルタル厚を 30mm 想定して鋼製ブラケットを仮受けし、間詰めモルタル充填後に case1 では鉄筋アンカー端部に設けたネジ加工部でナット定着し、case2 ではアンカー用固定治具を介して鉄筋アンカーをナット定着した。定着時の鉄筋アンカーに与えた引張力は case1、case2 とともに 1 本当たり約 10kN である。

2.2 アンカーの設計

アンカーの計算結果を表-2、材料試験結果を表-3 に示す。試験体ブラケットは、設計荷重を 400kN とし

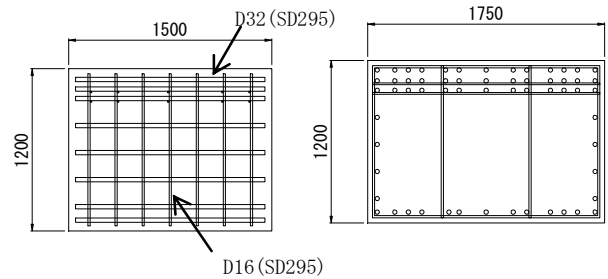


図-3 コンクリートブロック

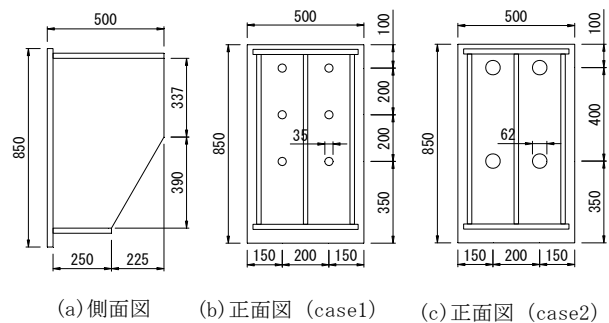


図-4 鋼製ブラケット

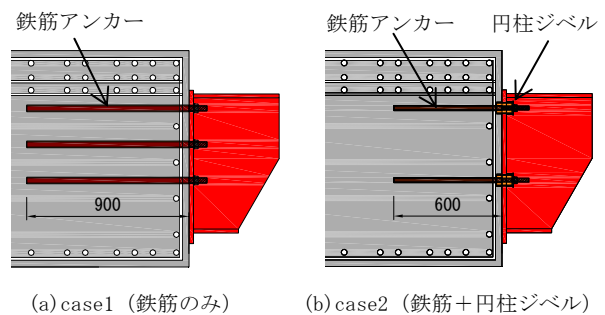


図-5 試験体形状

表-1 アンカー種類

アンカー種類	case1	case2
鉄筋	材質	SD345
	径	D29(M27)
円柱ジベル	材質	STK400
	径	$\phi 60.5\text{mm}-4.9\text{mm}$

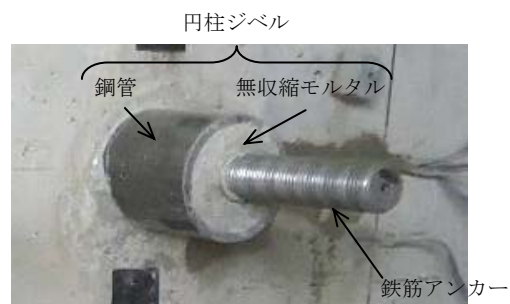


写真-1 アンカー(case2 : 鉄筋アンカー+円柱ジベル)

てアンカーの設計を行った。鉄筋アンカーの許容引張応力度は道路橋示方書²⁾の鉄筋の許容引張応力度とし、許容せん断応力度は、許容引張応力度 $\sqrt{3}$ で除した値とした。case1 では鉄筋アンカーに作用するせん断力を鉄筋アンカー断面積で除した値をせん断応力度とし、許容せ

表-2 アンカー計算結果

試験体	種類	径	材質	本数 (本)	上部から の距離 (mm)	引張 応力度 (N/mm ²)	許容引張 応力度 (N/mm ²)	総断面積 (mm ²)	せん断 応力度 (N/mm ²)	許容せん断 応力度 (N/mm ²)	許容 せん断力 (kN)	降伏荷重			せん断 耐力 (kN)
												曲げ (kN)	せん断 (kN)		
case1	鉄筋	D29	SD345	2	100	73	200	3854	104	115	445	1802	827	1294	
				2	300	46									
				2	500	19									
case2	鉄筋	D22	SD345	2	100	160	200	1548	/	115	179	409	847	342	496
				2	500	55							1161	1707	
	鋼管	φ60.5-4.9	STK400	4	/	/	/	3424	/	46	158	/	557	949	
	モルタル	φ50.7	50N/mm ²	4	/	/	/	6527	/	11	72	/	262	262	

ん断応力度以下となるように設計した。曲げモーメントに対しては、コンクリートブロックと鋼製ブラケットの接合界面で平面保持が成立すると仮定して、コンクリートブロックに作用する圧縮力と鉄筋アンカーの引張力の釣り合いから、鉄筋アンカーに作用する引張応力度を算出しが許容引張応力度以下となるように設計した。アンカー量はせん断力で決まっており、引抜きに対しては余裕がある設計となっている。鉄筋アンカーの曲げモーメントによる降伏荷重は、最上段の鉄筋アンカーに作用する引張応力度が引張降伏強度に達するときの載荷荷重である。せん断力による降伏荷重は、全鉄筋アンカーにせん断力が作用するものとし、作用するせん断応力度が鉄筋アンカーの引張降伏強度を $\sqrt{3}$ で除した値に達するときの載荷荷重である。鉄筋アンカーのせん断耐力は、引張強度を $\sqrt{3}$ で除した値に達するときの載荷荷重である。

case2 のせん断力に対するアンカー量は、円柱ジベル内の鉄筋アンカーもせん断力に対して抵抗し得るものとして式(1)で算出した。

$$V \leq V_a = V_{ca} + V_{ra} \quad (1)$$

ここに、 V ：設計せん断力(kN)、 V_a ：アンカーの許容せん断力(kN)、 V_{ca} ：円柱ジベルの許容せん断力(kN)、 V_{ra} ：鉄筋アンカーの許容せん断力(kN)

円柱ジベルのせん断耐力 V_c は式(2)で算出される³⁾。第1項はモルタルによるせん断耐力であり、第2項は鋼管によるせん断耐力である。

$$V_c = 9.0A_c \sqrt{f_c} + A_{st} f_{stu} / \sqrt{3} \quad (2)$$

ここに、 A_c ：モルタルの断面積(mm²)、 A_{st} ：鋼管の断面積(mm²)、 f_c ：モルタルの圧縮強度(N/mm²)、 f_{stu} ：鋼管の引張強度(N/mm²)

鉄筋アンカーの許容せん断力は、鉄筋アンカーの許容せん断応力度と総断面積の積とした。円柱ジベルの許容せん断力は、式(2)で得られたせん断耐力の1/3とした⁴⁾。

表-3 材料試験結果

構造諸元				材料試験結果			
試験体	種類	径	材質	降伏 強度 (N/mm ²)	引張 強度 (N/mm ²)	弾性 係数 (kN/mm ²)	圧縮 強度 (N/mm ²)
case1	鉄筋	D29	SD345	372	581	197	/
	鉄筋	D22	SD345	382	554	197	/
case2	鋼管	φ60.5-4.9	STK400	282	480	/	/
	モルタル	φ50.7	50N/mm ²	/	/	28	89

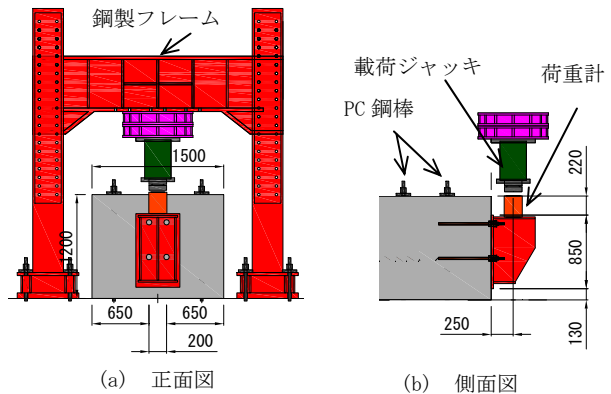


図-6 載荷装置

曲げモーメントに対して円柱ジベルは引張力を受け持たないものとして鉄筋アンカーの引張応力度が許容引張応力度以下となるように設計した。曲げモーメントによる降伏荷重は、case1と同様に最上段の鉄筋アンカーが引張応力度に達する際の載荷荷重である。せん断力による降伏荷重は4箇所円柱ジベルに均等に荷重が作用するものとして式(2)の f_{stu} に鋼管の降伏強度を用いて算出した。せん断耐力は、式(2)で算出した円柱ジベルのせん断耐力に鉄筋アンカーのせん断耐力を加算した値である。

2.3 載荷方法

載荷装置を図-6に示す。載荷には3000kN油圧ジャッキを用い、コンクリートブロック面から250mm離れた鋼製ブラケット上面を載荷した。コンクリートブロックはφ32mmのPC鋼棒4本(500kN/本)で反力床に緊結されている。載荷は設計荷重に達した後、一度除荷して残留ずれ変位量を確認し、次に破壊に至まで載荷した。case1では残留ずれ変位が大きかったため、再度設計荷重の載荷と除荷を繰り返し、残留ずれ変位の増加の有無を確認した。載荷実験では、載荷荷重、コンクリートブロックと鋼製ブラケット間のずれ変位、目開き変位、鉄

筋アンカー、鋼管ひずみ、コンクリートおよび鋼製ブラケットひずみを測定した。

3. 試験結果

3.1 ずれ変位

設計荷重領域のコンクリートブロックと鋼製ブラケットの鉛直方向ずれ変位を図-7に示す。case2の設計荷重時ずれ変位(0.5mm)はcase1の変位(2.7mm)に比べて大幅に小さい。case2の円柱ジベル径がcase1の鉄筋アンカー径に比べて大きいと考えられる。すなわち、鉄筋アンカーでは、鉄筋アンカーにずれ変位にともなう大きな変形が生じることでせん断力に抵抗するのに対して、円柱ジベルは剛性が大きく、わずかな変形で同等の抵抗力が得られるためと考えられる。また、除荷した際の残留ずれ変位はcase2で小さく、case1では繰り返しによって残留ずれ変位が増加する傾向が認められる。

破壊に至るまでのコンクリートブロックと鋼製ブラケットの鉛直方向のずれ変位を図-8に示す。case1は600kN程度でずれ変位の増加割合が大きくなり、1807kNで鉄筋アンカーの1本が破断して荷重が低下した。鉄筋アンカーは、間詰めモルタルと鋼製ブラケットとの界面に沿って破断しており、せん断力による破断と判断された。破壊荷重はせん断耐力計算値の1.4倍と実験値が大きい。case2は約700kNを超えるとずれ変位が増加し、約1200kNを超えるとcase1よりずれ変位が大きくなる。載荷荷重が1500kNに達すると鉄筋アンカーの引抜けとかぶりコンクリートの破壊が観察され荷重が低下した。破壊荷重は設計荷重の3.8倍であった。試験後、円柱ジベルを観察すると鋼製ブラケットの支圧による変形した形跡が認められた。その傾向は、上段のアンカーの方が著しく、コンクリートブロックから抜け出る傾向も認められた。鉄筋アンカーは破断することなく円柱ジベルの変形にともないくのS字型に折れ曲がる傾向が認められた。

3.2 目開き変位

600kNまでのコンクリートブロックとブラケットの目開き変位と載荷荷重の関係を図-9に示す。鉛直ずれ変位とは異なり、目開き変位はcase2の方が大きく、設計荷重時の目開き変位は、case1が0.4mmに対してcase2が0.8mmと2倍大きい。これは、曲げモーメントに対して最も抵抗する最上段の鉄筋アンカー断面積がcase2(D22)はcase1(D29)の60%であることに起因していると考えられる。破壊までのコンクリートブロックとブラケットの目開き変位と載荷荷重の関係を図-10に示す。載荷荷重が700kNを超えると目開き変位の増加量が大きくなる。このときの荷重は鉛直方向のずれ変位の増加量が大きくなる荷重と一致している。目開き変位は

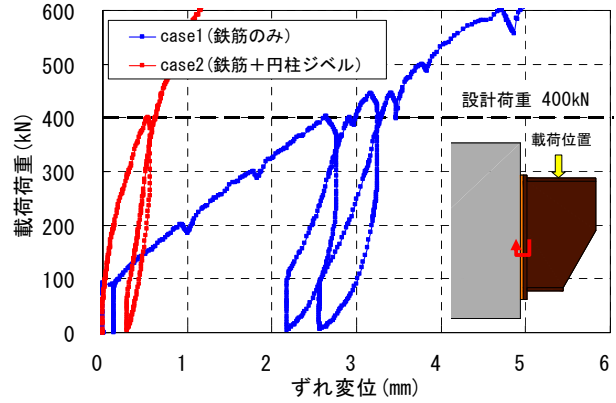
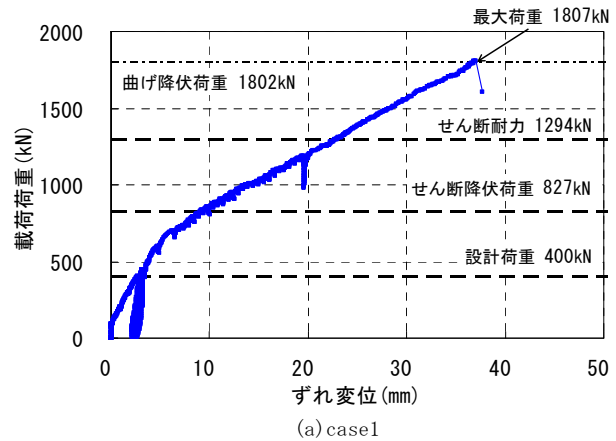
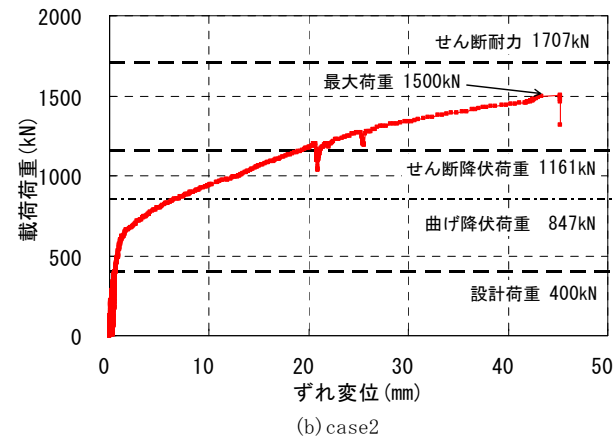


図-7 載荷荷重とずれ変位 (600kNまで)



(a) case1



(b) case2

図-8 載荷荷重とずれ変位

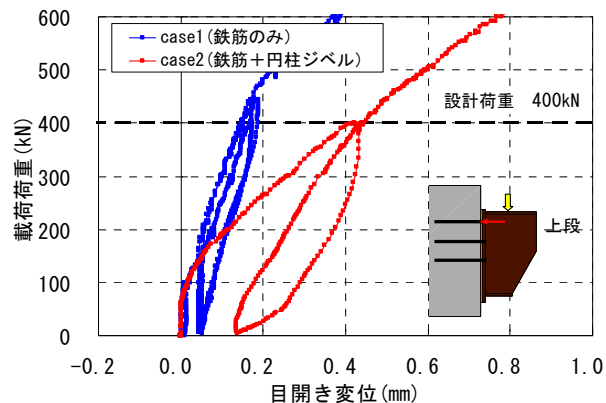


図-9 載荷荷重と目開き変位 (600kNまで)

上段ほど大きく、曲げモーメントによる鋼製ブラケットの回転によることがわかる。すなわち、目開き変位を小さく抑えるためには、曲げモーメントに対して最も抵抗する最上段の鉄筋アンカー断面積を大きくすることが効果的である。

3.3 鉄筋ひずみ

載荷荷重と鉄筋アンカーひずみの関係を図-11 に示す。鉄筋アンカーひずみは、コンクリートブロックと鋼製ブラケットとの間の間詰めモルタルに位置する部分の上縁側(載荷側)に取り付けたひずみゲージの測定値である。鉄筋には引張ひずみが生じている。case1 の設計荷重時ひずみは 270μ (引張応力換算 53N/mm^2)であり、設計値(73N/mm^2)より若干小さい値であった。鉄筋の降伏ひずみは 1943μ であり、載荷荷重と鉄筋ひずみの関係の折れ点と概ね一致する。曲げモーメントから算出した鉄筋の引張力が降伏荷重に達する載荷荷重は 1802kN であり、せん断力により降伏する載荷荷重は 827kN である。鉄筋アンカーが降伏したひずみは、いずれの載荷荷重よりも小さく、引張力とせん断力の両者が組み合わされて作用することを考慮する必要があると考えられた。そこで、式(3)により、鉄筋アンカーが降伏する載荷荷重を算出した。

$$\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{sy}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{\tau_{sy}}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

ここに、 σ_s : 鉄筋アンカーの引張応力度(N/mm^2)、 σ_{sy} : 鉄筋アンカーの引張降伏応力度(N/mm^2)、 τ_s : 鉄筋アンカーのせん断応力度(N/mm^2)、 τ_{sy} : 鉄筋アンカーのせん断降伏応力度(N/mm^2)

case1 の鉄筋アンカーに作用する応力度が式(3)を満たす載荷荷重は 708kN であり、図-11 (a)および図-8 (a)において曲線の傾きが大きくなる変曲点の載荷荷重とほぼ一致する。したがって、鉄筋アンカーは曲げモーメントとせん断力の複合作用によって降伏したと考えられる。

case2 は、鉄筋ひずみが降伏ひずみ(1891μ)に達する載荷荷重は、曲げモーメントによる引張力で鉄筋アンカーが降伏する計算値(847kN)とほぼ同程度であり、式(3)における鉄筋アンカーのせん断応力度の影響はほとんどないと考えられる。図-8 (b)のずれ変位の変曲点は、鉄筋アンカーの降伏荷重より小さな荷重で生じており、ずれ変位の増加点では鉄筋は降伏していない。これより、ずれ変位の増加は、鋼管の変形によるものと推測された。

3.4 鋼管ひずみ

載荷荷重と鋼管ひずみの関係を図-12 に示す。円柱ジベルは鋼管周囲に凹凸を設けていないため引抜力に対しては、ほとんど抵抗しない構造である。鋼管のひずみ

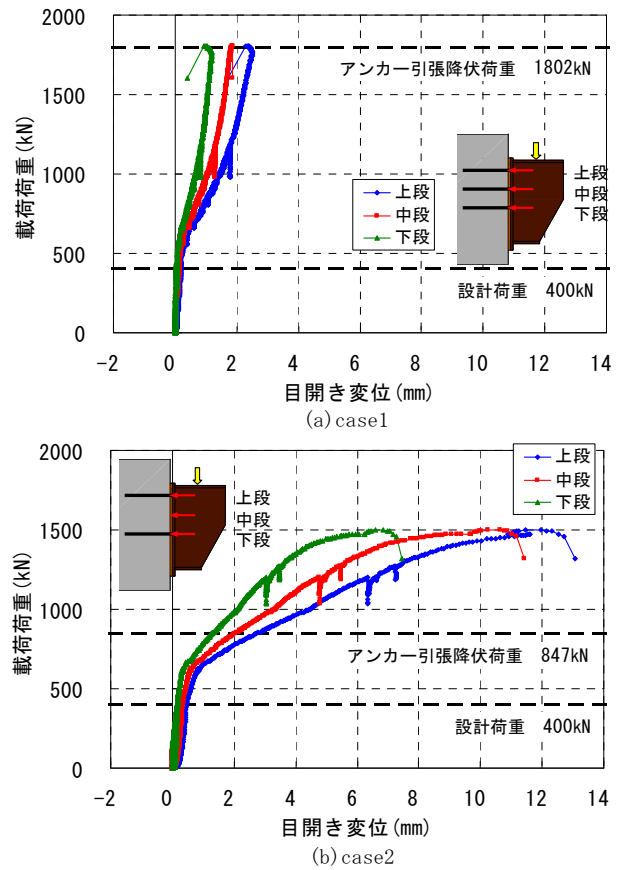


図-10 載荷荷重と目開き変位

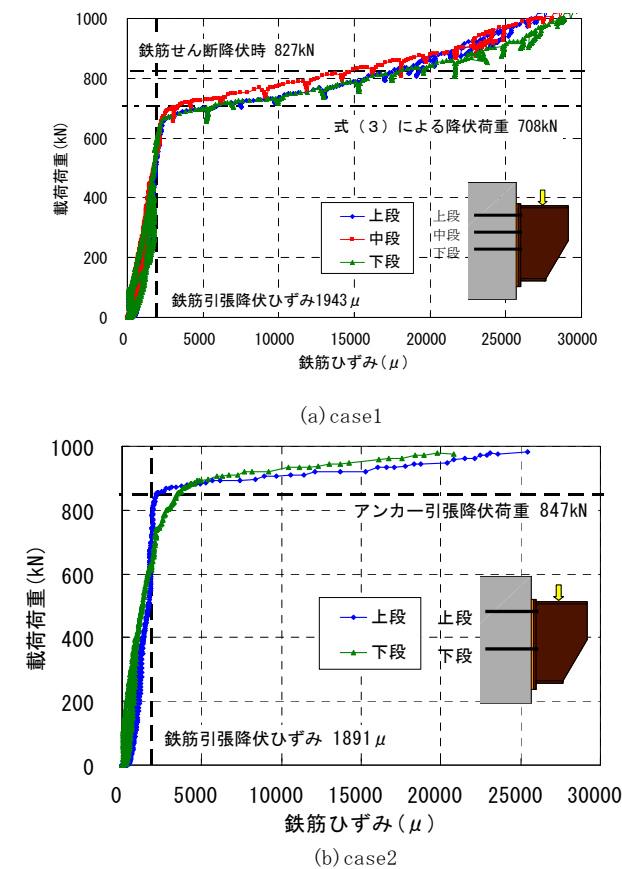


図-11 載荷荷重と鉄筋ひずみ

ゲージは、コンクリートブロックと間詰めモルタルの界面に取り付けている。設計荷重時の発生している鋼管ひずみは 419μ (応力換算 83.8N/mm^2) であり、鋼材の降伏強度(規格値 245N/mm^2) の約 $1/2.9$ 倍である。設計荷重作用後に除荷した際の残留ひずみは小さく、円柱ジベルは概ね弾性挙動を示している。載荷荷重 600kN を超えると鋼管の一部(上段-1)のひずみが降伏ひずみ 1410μ に達し、 650kN では大幅に増加している。載荷荷重が鋼管の降伏荷重計算値と同等程度であり、せん断力に対する抵抗力は円柱ジベルのみが抵抗するものとして算出できると考えられる。図-8(b)に示す case2 の載荷荷重とずれ変位の関係よれば、鋼管が降伏する載荷荷重とずれ変位が増大し始める載荷荷重とが一致しており、ずれ変位の増加は鋼管の降伏によるものと推察される。載荷荷重が増加すると、鋼管ひずみも増加するが、上面ひずみが圧縮であったり引張であったり個々の円柱アンカーによって異なった挙動を示す。試験後に円柱ジベルを観察したところ、図-13 に示すように鋼管および鉄筋は大きく S 字形に変形しており、ジベルの変形形状とひずみ測定位置の関係がわずかでも異なると測定ひずみに大きな影響を与えるものと考えられる。そのため、図-12 では、一部が引張ひずみが発生しているのに対して、残りは圧縮ひずみが発生する挙動となっている。なお、鋼管の亀裂は認められなかった。

せん断力に対して円柱アンカーのみが抵抗するものとして case2 のせん断耐力を算出すると 1211kN となり、実験結果と概ね一致する。これより、円柱ジベル内に配置した鉄筋アンカーは、曲げモーメントに対する引張力に対して設計すれば良く、円柱ジベルはせん断力に対して設計すればよいことが明らかになった。したがって、せん断力に対してアンカーを設計する際には、円柱ジベル内の鉄筋アンカー断面積は考慮せず、式(1)は式(4)で算出するのが妥当である。

$$V \leq V_a = V_{ca} = \left(9.0A_c \sqrt[3]{f_c} + A_{st} f_{stu} / \sqrt{3} \right) / 3 \quad (4)$$

本試験体の例では、case2 の円柱ジベル(アンカー用固定治具を含む)および鉄筋アンカーの総鋼材量は、case1 の 51% に低減できる。

4. 結論

本実験による以下の知見が得られた。

- (1) 設計荷重時の鋼製ブラケットの鉛直ずれ変位は、従来の鉄筋アンカーに比べ、円柱ジベルと鉄筋アンカーを併用することで小さくなる。
- (2) 円柱ジベルと鉄筋アンカーの併用により鉄筋アンカーの径を従来の鉄筋アンカー径より小さく設定できる

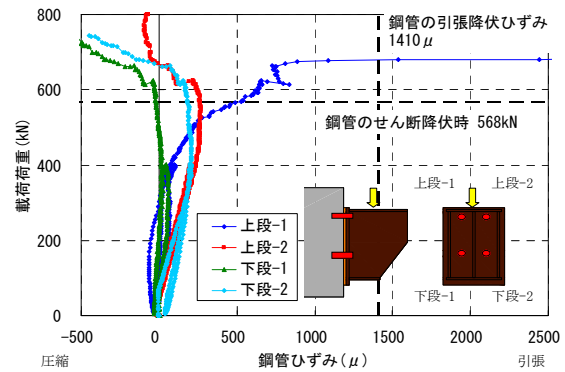


図-12 載荷荷重と鋼管ひずみ

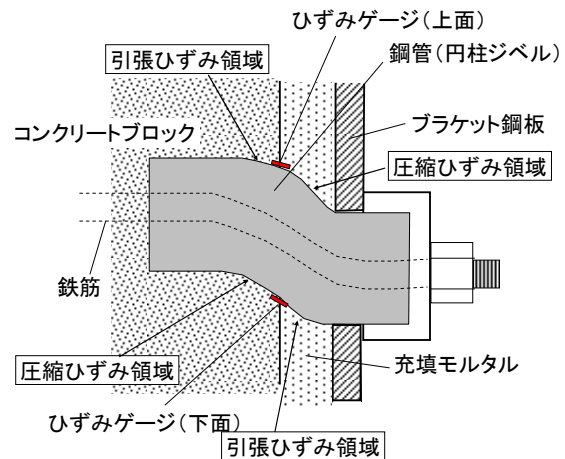


図-13 円柱ジベルの変形

が、コンクリートブロックと鋼製ブラケット間の目開き変位を大きくする恐れがある。

(3) 円柱ジベルと鉄筋アンカーを併用した場合には、引張力に対しては鉄筋アンカー、せん断力に対しては円柱ジベルが抵抗するとして設計できる。

(4) 円柱ジベルと鉄筋アンカーを併用したアンカーの設計方法で、破壊荷重は設計荷重の 3 倍以上の耐力が確認された。

参考文献

- 1) 有川直貴, 篠崎裕生, 三加崇, 浅井洋: 円柱ジベルによるコンクリートの接合に関する研究, 三井住友建設技術開発センター報告 第10号, pp.33-35, 2012
- 2) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 2012
- 3) 浅井洋, 篠崎裕生, 三加崇, 竹之井勇: 鋼管充填モルタルジベルのせん断耐力に関する実験的研究, 第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp.351-356, 2011
- 4) 浅井洋, 有川直貴, 篠崎裕生, 三加崇: 円柱ジベルによるコンクリートの接合に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.505-510, 2012