

# 論文 落橋防止ケーブル用短アンカー一定着部の終局挙動に関する研究

荒木 茂\*1・森下 健一\*2・松田 仁\*3

**要旨:** 落橋防止装置をコンクリート部材に取り付ける際、鋼製ブラケットをアンカーボルトによって定着することが多いが、配筋状況によっては鉄筋と干渉する場合がある。そこで定着部の鉄筋と干渉しにくい短アンカーボルト鋼製ブラケットと低偏心ケーブル体を考案し、その終局挙動を実験的に確認した。実験方法はコンクリート供試体に短アンカー鋼制定着部を施工し、静的載荷により実施した。その結果、定着部の破壊形態はコンクリートのコーン状せん断破壊となり、実験結果と計算結果はよい対応を示した。また、ケーブルの破断荷重に対して十分な定着耐力を持つことを確認した。

**キーワード:** 落橋防止, コーン状破壊, アンカーボルト, 耐震, フラットケーブル

## 1. はじめに

PC ケーブルを用いた落橋防止装置をコンクリート部材に取り付ける際、鋼製ブラケットをアンカーボルトによって定着する事が多い。しかしアンカーボルト削孔を行う場合、多段配筋など配筋状況によっては鉄筋と干渉する問題があり、鋼製ブラケットの設置箇所が限定される、または設置できない問題がある。特に既設橋梁に新たに落橋防止装置を設置する場合には、より制約の多いなかでアンカーボルトを打ち込まなければならない、鋼製ブラケットの設置箇所はさらに限定される。また既設橋梁の場合は詳細な配筋状況が不明な場合も多く、RC レーダー等を用いた非破壊検査によって鉄筋探査を実施し、配筋状況を確認して鋼製ブラケット設置箇所を選定するなどの対策が実施されている。しかし RC レーダー等で調査できる深さは、引張力を受けるアンカーボルトの有効付着長としてよく採用されている 15D (D:アンカーボルト径) に対して十分でなく、2 段目の配筋などに干渉する恐れがあることから、鋼製ブラケットの取り付けが困難となる場合は少なくない。以上のような背景を踏まえ、従来適用が困難であった配筋状況の橋梁に対して適用可能な PC ケーブルを用いた落橋防止装置 (以下フラットケーブル) の検討を行うこととした。本研究ではフラットケーブル用鋼製ブラケットの終局挙動を確認するため、コンクリート供試体を作製し、載荷実験を実施した結果について述べる。

## 2. フラットケーブル概要

図-1 に従来の落橋防止装置の定着部とケーブル断面、図-2 にフラットケーブルの定着部とケーブル断面、図-3 に従来の落橋防止装置の使用概要図(PC ケーブル)、

図-4 にフラットケーブルの使用概要図を示す。フラットケーブルのケーブル部は、従来は同心円状に配置していた PC ケーブルを横方向に平行配置した構成とした。鋼製ブラケットは PC ケーブル定着位置を極力コンクリート躯体に近い位置とした。このような構成とすることによって、アンカーにかかる抜け出し力が低減でき、埋め込み長を 15D から 7D と短くすることができる。これにより、RC レーダーによる鉄筋探査によって設置箇所

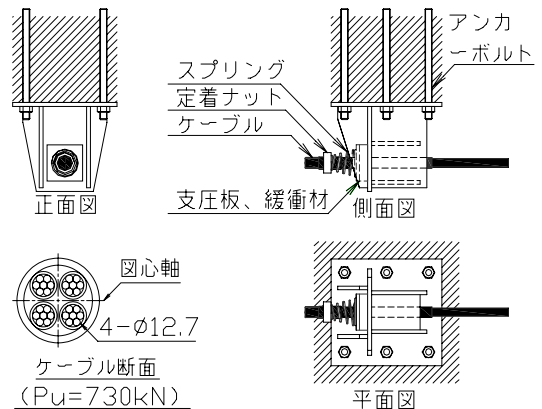


図-1 従来の落橋防止装置の定着部とケーブル断面

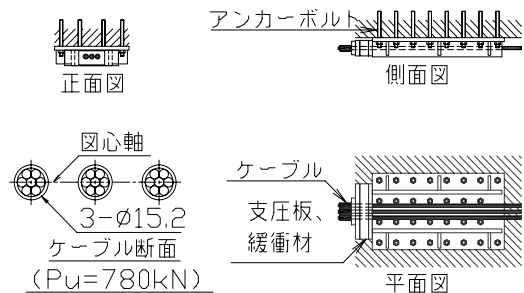


図-2 フラットケーブルの定着部とケーブル断面

\*1 神鋼鋼線工業 (株) 開発本部 開発部 工修 (正会員)

\*2 神鋼鋼線工業 (株) 技術部 エンジニアリング技術室 (非会員)

\*3 神鋼鋼線工業 (株) 開発本部 開発部 工修 (非会員)

を選定する事が可能となるのに加えて、鉄筋と干渉しにくくなり、適用範囲が広がる。さらに定着部が小さく抑えられることから、既存の定着部では図-3 に示すようにアンカーボルトに引き抜き力がかかりやすい配置で取り付けていたケーブルを、図-4 に示すように比較的アンカーボルトにかかる引き抜き力を抑えた配置で取り付けることが可能となっている。

### 3. 供試体概要及び実験方法

#### 3.1 供試体形状

PC 鋼より線φ15.2を2本配置するフラットケーブル用鋼製ブラケットを用いて载荷試験を実施した。図-5 に供試体配筋状況と主鉄筋ひずみ測定位置、図-6 に鋼製ブラケットと载荷方法の概要、表-1 にコンクリートの配合、写真-1 に試験状況を示す。鋼製ブラケットをコンクリート躯体上面に2体配置し、支圧板を介して油圧ジャッキにより载荷した。供試体下面は2点支持とし、片側を固定、もう一方をローラー支点とした。配筋は試験体が十分な曲げ耐荷力を有するように設計した。また供試体幅は、縁端のせん断破壊が生じないように設定した。コンクリートは呼び強度を27N/mm<sup>2</sup>とした。

#### 3.2 ブラケットの施工

アンカーボルトはM20(S45C 材)を用い、有効定着長は7Dとした。コンクリート打設後5日後にハンマードリルにより160mm 削孔し、カプセル型のケミカルアンカーを打った。その後、アンカー位置に合わせて鋼製ブラケットを作成し、コンクリート躯体にナットで固定した。

#### 3.3 载荷方法

鋼製ブラケット間に鋼製の载荷板を配置し、その間にセンターホール型のロードセル、油圧ジャッキを配置して载荷を実施した。载荷点の中心はコンクリート躯体から60mmの位置とし、载荷板、ロードセル、油圧ジャッキにはパイプを通し、芯がずれないようにした。油圧ジャッキは350kNのものを4個使用し、すべて均等な荷重を与えるため、1台のポンプから並列に配線した。载荷方法は荷重制御により静的単調载荷とした。

#### 3.4 測定項目

測定項目は主鉄筋ひずみ、鋼製ブラケット間変位、鋼製ブラケットの浮き上がり変位、コンクリート変位、载荷荷重とした。主鉄筋ひずみについては図-5 に示すように、载荷方向の分布と载荷直角方向の分布を調べた。ひび割れ損傷は50kN ごとに調べた。

### 4. 実験結果

#### 4.1 破壊形態とひび割れ進展状況

図-7 にひび割れ損傷図(1050kN 時)、図-8 にひび割れ損傷図(最終損傷状況)、写真-2 にブラケット近傍

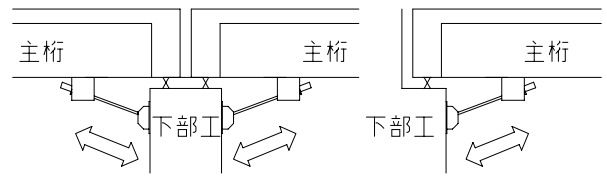


図-3 従来の落橋防止装置の使用概要図(PC ケーブル)

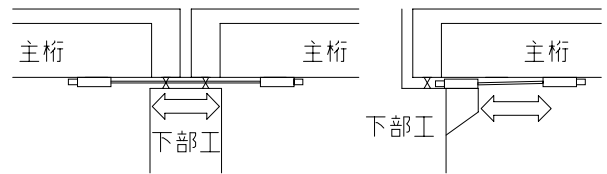


図-4 フラットケーブルの使用概要図

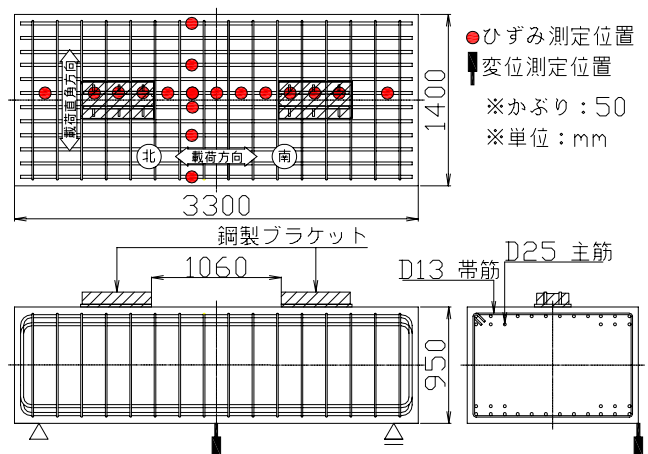


図-5 供試体配筋状況と主鉄筋ひずみ測定位置

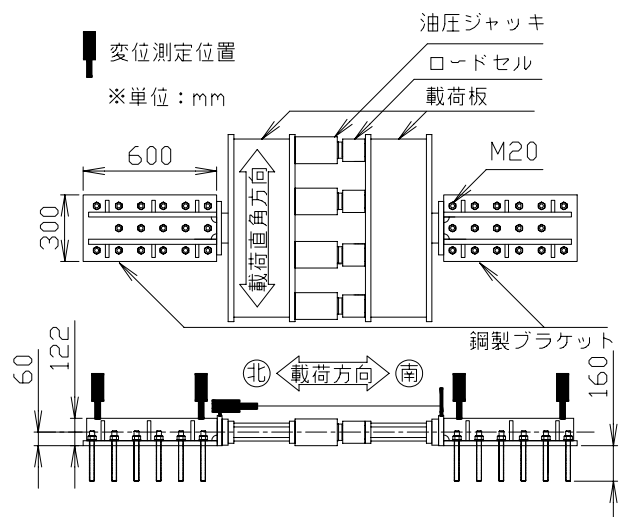


図-6 鋼製ブラケットと载荷方法の概要

表-1 コンクリートの配合

スランブ cm	W/C %	空気量 %	s/a %	単位量 kg/m <sup>3</sup>			
				W	C	S	G
8	49	4.5	42.8	178	363	736	1021

の最終損傷状況、図-9 に載荷荷重とブラケット間変位の関係を示す。図-9 のケーブル  $P_y$ 、 $P_u$  は想定したフラットケーブル（PC 鋼より線  $\phi 15.2$  を 2 本配置）の降伏荷重  $P_y$  と破断荷重  $P_u$  を示している。

載荷荷重 800kN までの範囲では、載荷荷重とブラケット間変位の関係はほぼ直線的であり、損傷状況は 600kN で載荷点に近いアンカーボルトから軽微なひび割れが発生するに留まっていた。最大ひび割れ幅は 0.05mm 以下であった。その後載荷を続けると、荷重と変位関係の傾きに変化が生じた。それに伴い、載荷位置に近いアンカーボルト付近に発生したひび割れが橋載荷直角方向へ徐々に進展し始め、載荷荷重が 950kN に達した時点で側面に達した。950kN 以降はアンカーボルト付近から発生したひび割れのひび割れ幅が徐々に開き始め、最大ひび割れ幅が 0.4mm 程度まで開口した後、最大荷重 1093kN に達した。しかし全体的にみると最大荷重時のひび割れ損傷状況は、図-7 に示すように軽微であった。

最大荷重 1093kN に達した後、荷重が低下し始めると、鋼製ブラケットが載荷側から顕著にめくれ上がり始めた。最大荷重時にアンカーボルトが引き抜き力を受け、付近のコンクリートがコーン状にせん断破壊して急激に損傷が進展したと考えられる。南北で比較すると、写真-2 に示すように、先行して南側ブラケットが損傷し、その後北側も同様の損傷が確認された。

ひび割れ損傷に着目すると、最大荷重以降に急激に進展した。進展状況は鋼製ブラケットがめくれ上がるにつれてアンカーボルト周辺のコンクリートから伝播して広がり、特に鋼製ブラケットから離れた位置のひび割れは、変形が進むに従ってコンクリートのごく表層がめくれて進展したと考えられる。

コンクリート供試体の鉛直方向の変位は最大 0.62mm に留まり、コンクリート供試体は若干の曲げ変形を受けているとは考えられるがその変形量は軽微であり、ほとんど曲げ損傷はないと考えられる。

以上より破壊形態をまとめると、800kN までの損傷は軽微に抑えられるが、その後アンカーボルト付近のコンクリートがコーン状せん断破壊し、鋼製ブラケットがめくれ上がり、それに伴い最大荷重後はコンクリート表層が剥離してひび割れが広がり、終局に達した。

#### 4.2 鋼製ブラケットの浮き上がり変位

図-10 に鋼製ブラケットの浮き上がり変位を示す。変位の値は上向きを正として表記した。内側の挙動に着目すると、載荷荷重 800kN の範囲まではほぼ直線関係が確認され、その後は傾きが変化している。最大荷重 1093kN に達してから変位はさらに増加し、荷重は低下した。この傾向はほぼ載荷荷重と鋼製ブラケット間変位の関係と同様の傾向であり、鋼製ブラケット間変位の増加割合



写真-1 試験状況

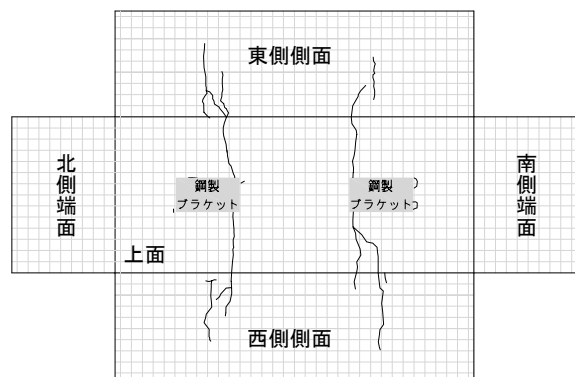


図-7 ひび割れ損傷図 (1050kN 時)

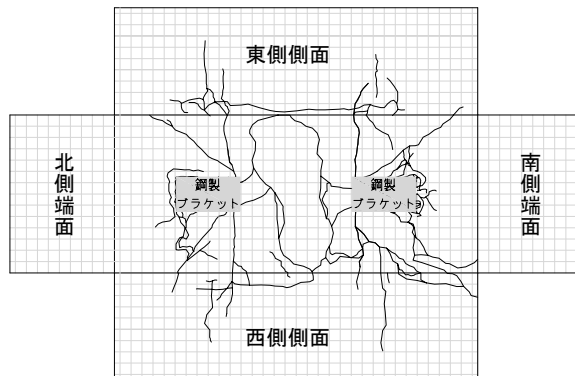


図-8 ひび割れ損傷図 (最終損傷状況)



写真-2 ブラケット近傍の最終損傷状況

が大きくなった主要因は、鋼製ブラケットが内側からめくれあがることに起因したと考えられる。

外側の挙動に着目すると、800kN までの変位は若干正方向に増加したが、その後荷重が低下しはじめるとコンクリート躯体を圧縮する挙動を示して変位は減少した。北と南に着目すると、値に差は見られたがほぼ同様な傾向を示している。

以上より鋼製ブラケットは最大荷重より徐々に内側からめくれ上がるような挙動を示すことから、内側のアンカーボルトは引き抜き力を受けたと考えられる。外側に関しては鋼製ブラケットによりコンクリートが圧縮されるような挙動を示すことがわかった。このようにめくれ挙がるような挙動を示す理由は、荷重作用点がコンクリート躯体に対して若干上面にあり、モーメントが発生するためと考えられる。フラットケーブルの場合、従来の落橋防止装置に比べて荷重作用点がコンクリート躯体に近いので、このような曲げモーメントは低く抑えられていると考えられる。

#### 4.3 ひずみの進展状況

図-11 に主鉄筋ひずみの分布（荷重方向）、図-12 に主鉄筋ひずみの分布（荷重直角方向）を示す。なお、凡例の数値は荷重荷重を示す。図-11 に着目すると、中央からの位置で-500mm 及び 500mm 付近のひずみ量が卓越している。特にこの傾向は荷重の低い時には小さく、600kN 程度から荷重が増加するほどに顕著となっている。この位置には荷重点に近いアンカーボルトがあり、荷重荷重 600kN から軽微なひび割れが発生し始め、その後徐々に進展した。荷重区間においては同様の荷重状態と考えられることから、この位置でひずみが卓越した理由は、コンクリートが負担していた引張力がひび割れ進展に伴い鉄筋に移行したためではないかと考えられる。

コンクリート躯体の曲げ損傷について考えると、主鉄筋ひずみは最大 900 $\mu$  程度であり、鉄筋降伏には到っておらず、ひび割れなど軽微な損傷と考えられる。

図-12 に着目すると、荷重直角方向の主鉄筋ひずみ分布は、640kN まではほぼ同等のひずみ量であるが、それ以降は急激に中央部が卓越している事がわかる。荷重荷重とブラケット間変位の関係を合わせて考えると、800kN 以降から中央部のひずみが卓越した理由は、鋼製ブラケット直下の主鉄筋がアンカーボルトの抜け出しによる荷重を、近辺のコンクリートを介して負担したためと考えられる。

#### 4.4 ブラケット除去後の損傷状況

写真-3 に試験後に鋼製ブラケットを取り外した後の、鋼製ブラケット部分のコンクリート損傷を示す。アンカーボルトの荷重側反対にはコンクリートの圧壊によると考えられるひび割れが発生している。荷重によりアン

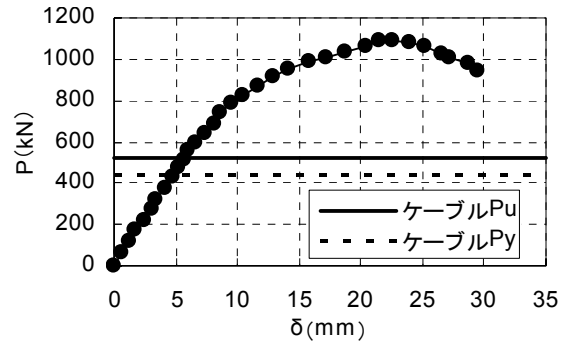


図-9 荷重荷重とブラケット間変位の関係

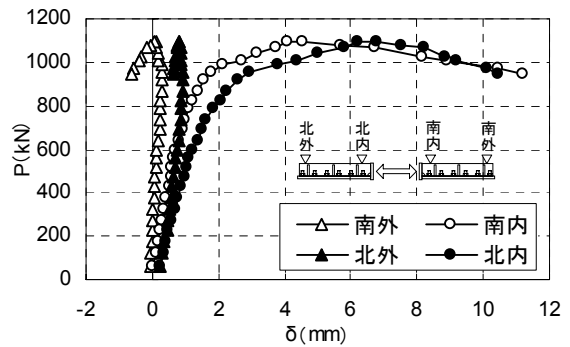


図-10 鋼製ブラケットの浮き上がり変位

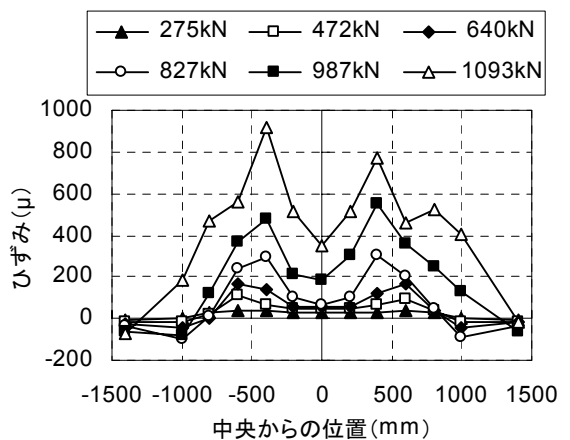


図-11 主鉄筋ひずみの分布（荷重方向）

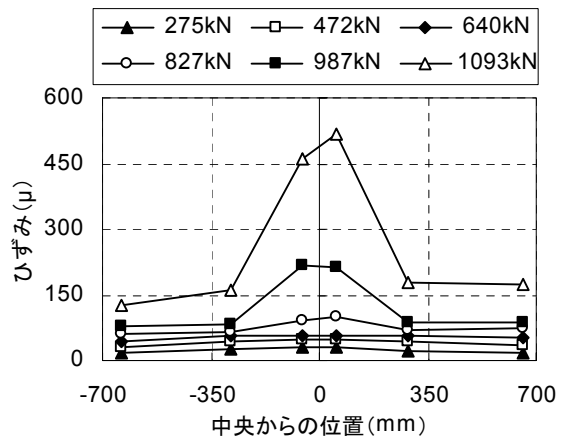


図-12 主鉄筋ひずみの分布（荷重直角方向）

カーボルトには大きなせん断力が作用し、載荷側と反対のコンクリートに圧縮力が作用したと考えられる。このような損傷はすべてのアンカーボルトに対して生じていた。はじめはアンカーボルトの施工位置と鋼製ブラケットの微小なずれの影響から不均一に荷重が作用していたと予想されるが、載荷荷重の増加に伴って若干アンカーボルトがせん断変形することによってすべてのアンカーボルトに荷重が作用したと考えられる。

#### 4.5 破壊面の状況

試験後に載荷によってめくれれたコンクリートをはがして除去し、破壊界面の調査を実施した。写真-4 にアンカーボルト部のコンクリート破壊面、図-13 にコンクリートの剥離面積及び深さを示す。写真-4 は先にめくれ上がった南側のアンカーボルトとコンクリート部分である。図-13 の等高線は深さ 10mm 間隔で結んで図示しており、色が濃いほど深い部分を表している。

図-13 のコンクリートの剥離破壊面積に着目すると、広範囲に剥離が進展している。ひび割れ損傷の進展と合わせて考えると、最大荷重時にひび割れ損傷は広範囲に広がっておらず、最大荷重後に荷重が低下してから鋼製ブラケットがめくれ上がるのに付随して進展している。よって最大荷重時の破壊面は図-13 に示される剥離破壊面ほど広範囲にわたっているとは考えにくく、最大荷重後に荷重が低下し始めてから破壊面が伝播したものと考えられる。剥離深さに着目すると鋼製ブラケットから離れるに従い浅くなっている。アンカーボルト付近のコンクリートがコーン状にせん断破壊して最大荷重時に達した後に、コンクリートの表層が付随してはがれたため、広範囲に浅く剥離が進展していると考えられる。

以上より最大荷重時に抵抗したコーン状せん断破壊面に関しては実験結果から正確に推定は出来ないが、写真-4 に着目するとアンカー付近の破壊面は45度方向に進展していることから、引張力を受けるアンカーボルトから45度の破壊角度でせん断破壊したのではないかと推測される。

#### 4.6 耐力

先行して破壊した南側鋼製ブラケットに対して、各耐力を算出して実験値と比較を行った。表-2 に耐力計算結果と実験結果を示す。表-2 のうち、中立軸位置が計算結果に関係する①, ②, ③について2パターン(以下 cal.1, cal.2 と表記)の中立軸で照査を行った。cal.1 には設計時の照査<sup>1)</sup>を想定して、簡易的にアンカーボルト群の中立軸を用いた。cal.2 はコンクリートの圧縮力とアンカーボルト引張力の釣合いより中立軸を求めた。cal.2 で中立軸を求める場合、コンクリートは線形挙動すると仮定した。計算した結果、1093kN (実験の最大荷重) 作用時のコンクリート応力度計算値は、線形範囲内(圧縮強度

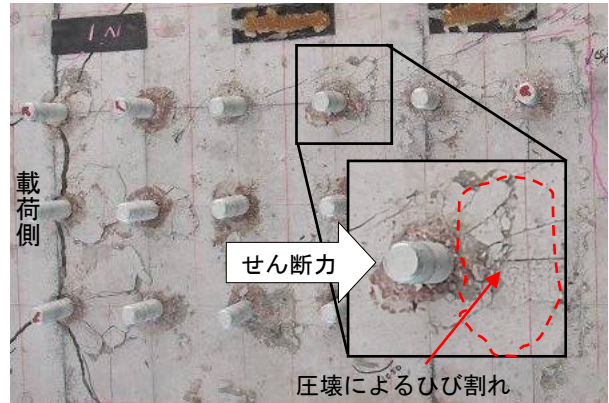


写真-3 鋼製ブラケット部分のコンクリート損傷

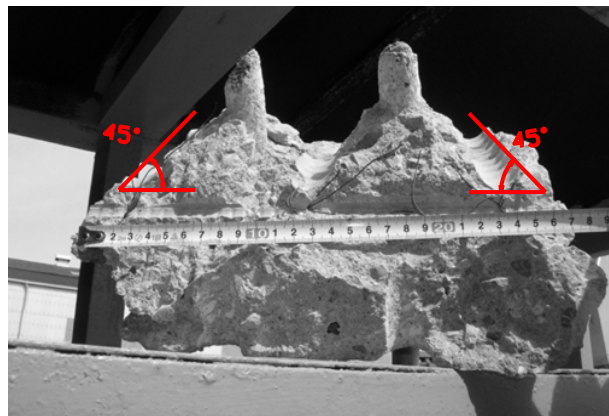


写真-4 アンカーボルト部のコンクリート破壊面

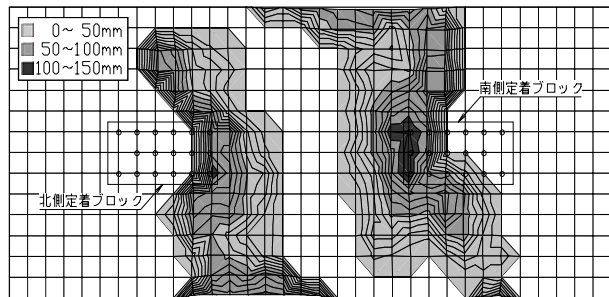


図-13 コンクリートの剥離破壊面積及び深さ

表-2 耐力の計算結果と実験結果

破壊形態		耐力(kN)	
		cal.1	cal.2
計算値	①アンカーボルトの破断	3767	4856
	②アンカーボルトの抜け出し	4642	5983
	③コンクリートのコーン状せん断破壊	878	1238
	④アンカーボルトのせん断破壊	1369	
	⑤コンクリート躯体の降伏	3190	
	⑥PC ケーブルの破断	522	
実験での最大荷重		1093	

の1/3以内)となったことから、本実験においてこの仮定は妥当と考えられる。表-2の①アンカーボルトの破断や②アンカーボルトの抜け出しは、中立軸から最も離れている引張側アンカーボルトに破断荷重(140kN)や抜け出し荷重(172kN)が作用する際の載荷荷重を算出した。③コンクリートのコーン状せん断破壊耐力は、破壊面を想定して有効水平投影面積  $A_c$  を求め、式(1)を用いて算出した。式(1)は接着系アンカーを用いた場合の群体でのコーン状せん断破壊引張耐力の算出式である。

$$P = 0.23\sqrt{f'_c} \cdot A_c \quad (1)$$

図-14にコーン状せん断破壊面のイメージ図を示す。コーン状せん断破壊面は群体として引張側アンカーボルト埋め込み端から45度方向に発生すると考えたが、載荷側アンカーボルトを境にひび割れが発生したことから、中立軸を境に圧縮側は抵抗しないと考えられることから、ひび割れ面より載荷側と中立軸より圧縮側は有効水平投影面積から省いた。④アンカーボルトのせん断破壊はアンカーボルト数にせん断破壊荷重を乗じて求めた。その他参考として、⑤ケーブルの破断耐力(PC鋼より線φ15.2を2本配置の破断荷重)と⑥コンクリート躯体の降伏耐力(主鉄筋降伏荷重)を示した。コンクリート強度は実験値  $31\text{N/mm}^2$  を用いた。

耐力計算結果から破壊形態はコーン状せん断破壊と予想され、実験での破壊形態とよい対応を示した。また、実験での破壊荷重は1093kNであり、ケーブルの破断荷重522kNに対して十分な耐力を有している。特に800kNまでは軽微なひび割れ損傷に留まり、定着具として十分な性能が確認できた。コーン状せん断破壊耐力と実験値の比較であるが、実験値はcal.1で算出した耐力に対して大きかったが、cal.2で算出した耐力より若干小さい結果となった。実験値がcal.2での耐力より小さかったことについて、コーン状せん断破壊耐力の算出式が単純な鉛直方向の引張力を想定しているのに対して、実験は鉛直方向の引張力だけではなく、水平方向の荷重が作用することが影響した可能性がある。しかし試験体数が1体であり、ばらつきの影響もあると考えると、ある程度の評価は出来ていると考えられる。また、実際の設計ではcal.1での算出と同様にアンカーボルトの中立軸で照査しており、安全側であると考えられる。

## 5. まとめ

- (1) 載荷荷重 800kN まではほとんど損傷は確認されず、その後徐々に鋼製ブラケットがめくれ上がるような挙動を示した。また、最大荷重までの損傷状況は、軽微なひび割れの発生に留まった。
- (2) 引張側アンカーボルトがコーン状せん断破壊を起こ

して最大荷重に達した。その後損傷が顕著に進展し、鋼製ブラケットがめくれ上がり、周囲のコンクリートを剥離させながら終局に達した。

- (3) アンカーボルト部の破壊面から、コーン状せん断破壊の破壊角度は45度方向と推測される。
- (4) コンクリートの圧縮力とアンカーボルトの引張力の釣合いから中立軸を求めてコーン状せん断耐力を算出した結果、概ね実験値を評価できた。
- (5) アンカーボルト群の中立軸を元にした簡易的な計算において、コーン状せん断耐力を算出すると安全側の評価となった。
- (6) ケーブル破断荷重522kNに対して破壊荷重は1093kNであり、十分な耐力を有していることが確認された。

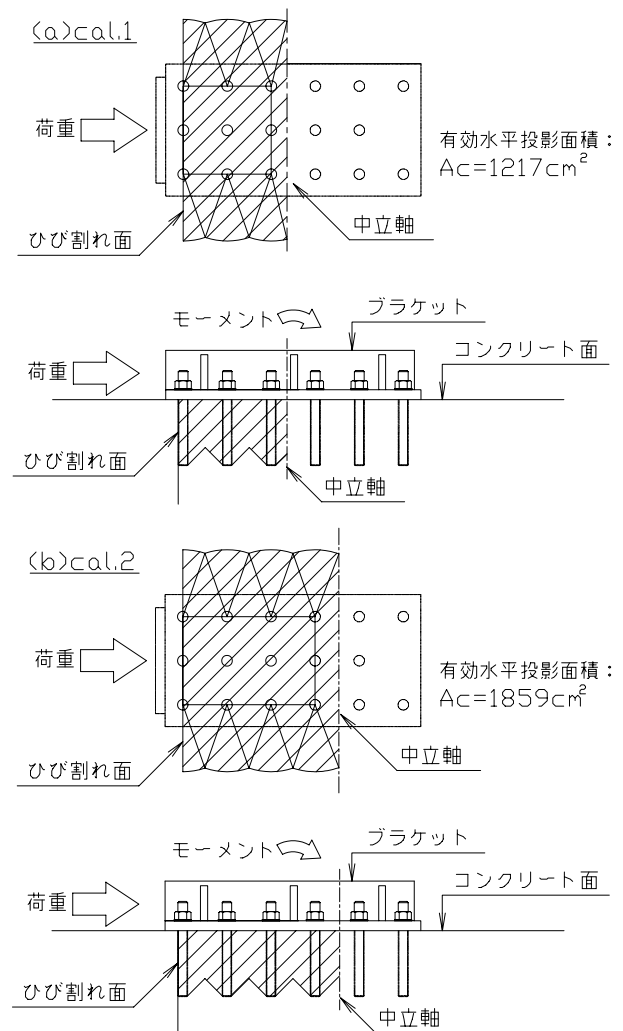


図-14 コーン状せん断破壊面のイメージ図

## 参考文献

- 1) ㈱日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，pp.2-130，1997.3
- 2) 岡田 恒男ほか：あと施工アンカー設計と施工，(株)技術書院，pp.74-75，1990.6