

(29) 片持ち式ロックシェッドの衝撃特性と設計法に関する研究

日本サミコン (株)

同上
同上
同上

吉田 博
松葉 美晴
佐々木 正宏
○紫竹 恒弘

1. まえがき

ロックシェッドは一般に、山側路側に擁壁を敷設し、谷側路側には柱を立て、擁壁と柱の上へ桁を乗せる形式が採用されているが、道路幅員が狭く、山側斜面が急峻で路側に余裕がなく、谷側に柱を立てるための基礎工の余裕もなく、また、谷側斜面も急峻であったり、谷側の地盤が悪く基礎工の設置が困難な場合も多い。

このような道路での落石防護対策の一環として、プレキャストコンクリート桁を永久ロックアンカーにより緊張し固定した、片持ち形式の小型ロックシェッド (以後、片持ちキーパーという。) を開発した。

片持ちキーパーの構造を図-1に示す。山側斜面上にコンクリートを打設して基礎工とし、基礎の上面に縦締鋼棒用アンカーを埋め込んでおく。また、基礎工上面の山側斜面の岩盤にロックアンカー工 (VSL永久アンカー工法、定着具E5-7、ストランド数6本) を施し、アンカーテンドンを片持ちキーパーの上部工の桁内に通すとともに、上方から縦締め用鋼棒アンカーを挿入して、縦締め鋼棒を所定の力で緊張することにより、上部工と下部工の基礎を剛結する。さらに、アンカーテンドンを桁先端で緊張することにより、上部工にはプレストレスが導入され、ポストテンション部材として抵抗すると同時に、片持ちキーパーの構造全体を岩盤と一体化し、有効に落石荷重に抵抗させようとするものである。

桁の断面幅は2.5mを標準とし、桁を順次山側擁壁上に並べ、4本の桁 (10m) を片持ち桁先端部 (谷側) および山側剛結部の横ばりにあけられた孔に鋼棒を通し、これを緊張することにより、道路方向の地震力および落石時の安定化を図っている。

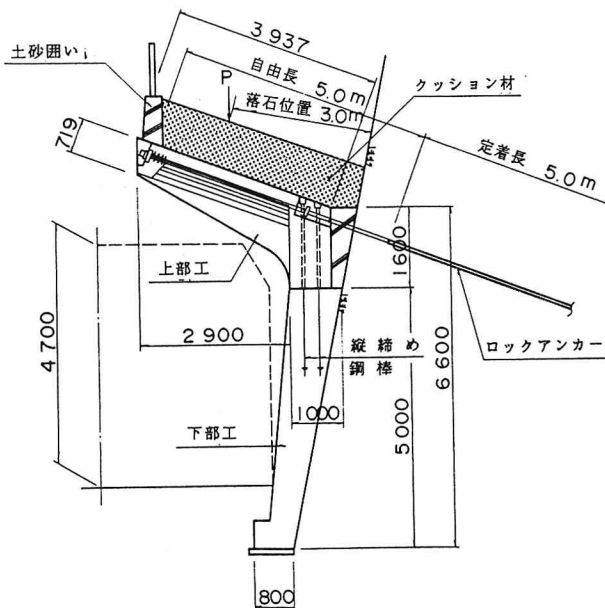


図-1 片持ちキーパー構造図

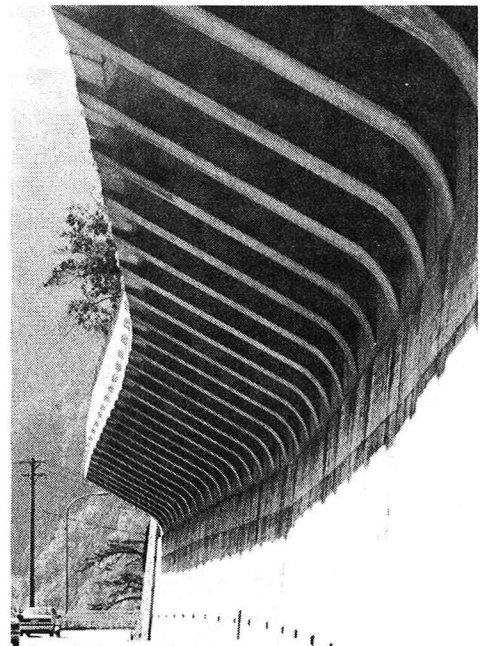


写真-1 完成した片持ちキーパー

片持ちキーパーは、力学的にも単純であり、美観的にも優れているとともに、交通を遮断することなく架設が可能であること、谷側基礎が不要であり、上部工の架設工期の短縮が可能であることなど、経済的な長所も有している。

わが国初の片持ちキーパーの施工が、平成元年10月から徳島県池田町西宇地内で開始され、平成2年2月に竣工した(写真-1)。架設地点は四国の国立公園内の観光名勝地であり、景観にマッチした構造美を形成し、地元住民からも高く評価されている。なお本工事は、建設省技術活用パイロット事業に認定された。

本報告では、本工事に先立ち行った3体の上部工(延長2.5m×3=7.5m)を用いた実物大モデルによるロックアンカーテンドンの緊張によるプレストレス導入試験、片持ち部先端近くに静的荷重を作用させる静的載荷試験、片持ちキーパー上のサンドクッション材へ重錘を落下させる衝撃試験および破壊試験について述べ、片持ちキーパーの静的および衝撃特性について検討し、設計法についての一提案を行おうとするものである。

2. 供試体

本実験で対象とした設計条件は、落石重量1.3t、落下高さ16.7mであり、落石対策便覧¹⁾より求めた衝撃力は100tfであり、想定斜面の落下経路のシミュレーション結果より、落石の落下位置を片持ちキーパーのサンドクッション上で、斜面前方3mとすることにした。

上部工のコンクリートの設計基準強度は600kgf/cm²であり、下部工のそれは210kgf/cm²である。

供試体の各部のひずみを測定するために、図-2に示す着目断面A~Hにワイヤストレインゲージを張り付け、下部工背面にはモールドゲージを埋め込んだ。また、3体の上部工供試体の内、中央桁には、縦締め鋼棒のひずみを測定するためにワイヤストレインゲージを貼り付け、アンカーテンドンの張力の変化を測定するために、アンカー頭部定着部にロードセルを取り付けた。さらに、桁先端などの変位を測定するために、電気的変位計を取り付けた。

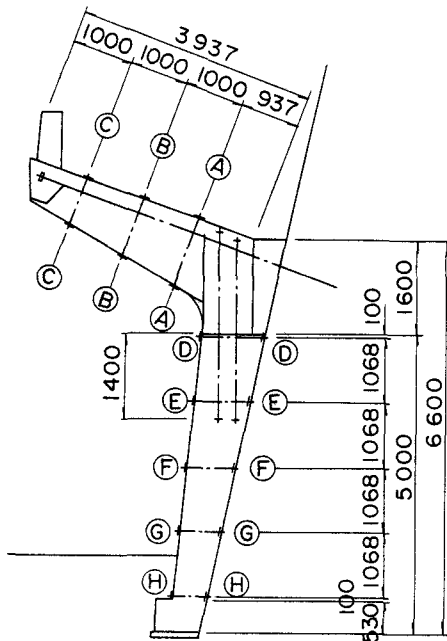


図-2 ワイヤストレインゲージ貼り付け位置

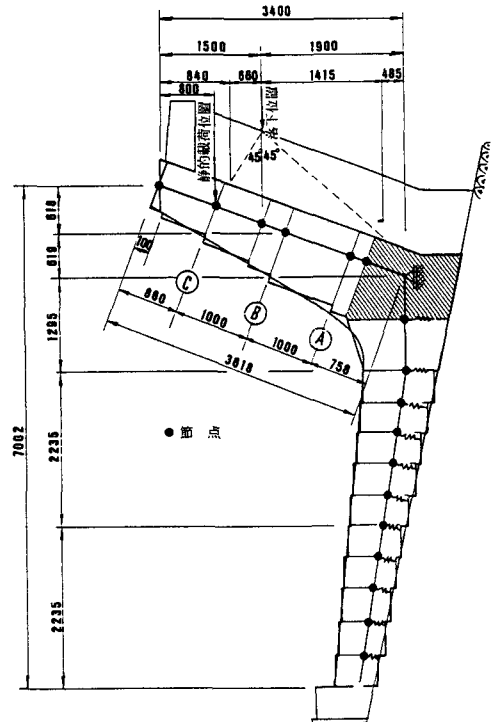


図-3 荷重載荷位置および骨組み構造モデル

3. ロックアンカーテンダンの緊張によるプレストレス導入試験

中央桁のロックアンカー (No.1) の適性試験を行った結果、満足する結果が得られた。定着時のセッrossは、初期緊張力の10~14%であり、その後、約500時間後のクリープによる緊張力の減少は1tf程度であった。

また、所定の力でロックアンカーを緊張した場合の、桁に導入されるプレストレスによるひずみ分布は計算値とよく一致したが、フランジ上面のひずみ分布より、わずかであるが、フランジ内のせん断遅れが認められた。

4. 静的試験

4.1 構造のモデル化

1セットの上部工とこれに対応する幅2.5mの下部工を取り出し、解析用にモデル化した。構造の軸線として、上部工ではロックアンカーの tendon を配置した位置を、下部工においては、断面の中心をとることにした。また、上部工の着目点 (断面A, BおよびC) および変位の測点には節点を設けることにした。図-3はモデル化した構造を示している。図中、斜線を施してある部分は剛域とし、変形しないものと仮定した。また、岩盤との接触部分は弾性的に支持されているものとし、そのばね定数を $K=100,000\text{tf/m}^2$ と仮定し、ばねは節点に集中させた。

4.2 実験方法および実験結果

片持ちキーパー単体 (上部工1体) の静的挙動を検討するために、3本の桁からなる供試体内、中央桁の先端から80cmの位置に、鉛直方向に弾性範囲内で静的荷重を作用させた (図-3)。

図-4は、荷重と桁先端部での桁下面に垂直方向の変位の関係を示している。図-5は、断面Aの上縁、フランジ下面および下縁での荷重-ひずみ関係を示している。いずれも計算値とよく一致している。なお、下部工の測定ひずみは極めて僅かであり、測定誤差範囲であった。

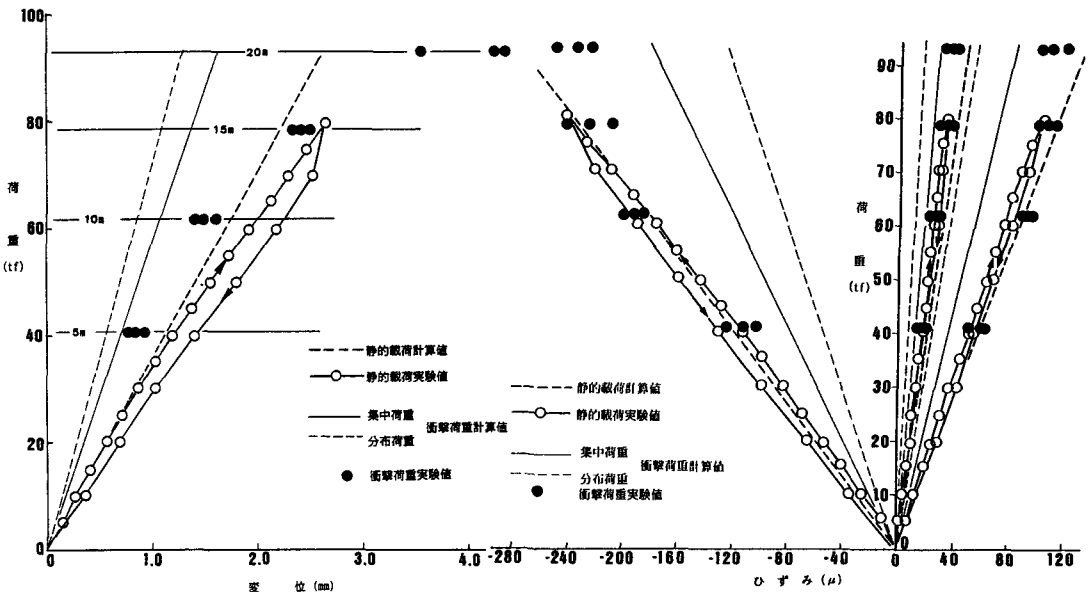


図-4 荷重-変位関係

図-5 荷重-ひずみ関係

4.3 解析モデルの検討

荷重によるアンカー張力の変化および縦締め鋼棒のひずみの変化を図-6および7に示す。これらのひずみは、作用荷重に比較して極めて小さいが、図-3に示す構造モデルでは計算することは不可能である。

そこでこの構造モデルの妥当性を検討するために、上部構造を図-8のように三角形要素に分割し、アンカーおよび縦締め鋼棒は、それらの挿入位置の両端で定着されているものとし、さらに、上部構造の背面とバラベット部岩盤、上部構造と擁壁天端には、それぞれ、接触面に垂直方向のばねが挿入されているが、接触平面内のせん断ばねは無視したモデルを導入した。三角形要素には、厚さを考慮した。

このモデルを用い、2次元平面問題として、静的載荷試験での荷重作用位置に鉛直荷重 ($P=80\text{tf}$) を作用させたときの桁先端部での変位をバラベット部岩盤および擁壁天端でのばね定数を変化させて計算した。その結果を図-9に示す。図中には、実験値および骨組解析モデルによる計算値も示されており、これらの比較より、ばね定数は無限大とした構造、すなわち、上部構造は剛結されているとみなしてよいことが理解される。

ばね定数を無限大とした場合の、アンカーによる導入プレストレス ($P_s=100\text{tf}$) および静的載荷試験での荷重作用位置に鉛直荷重 ($P=100\text{tf}$) を作用させたときの断面A、BおよびCにおける応力分布およびバラベット部岩盤、擁壁天端に作用する反力分布を図-10に示す。断面Cでの応力分布は、実験値とよく一

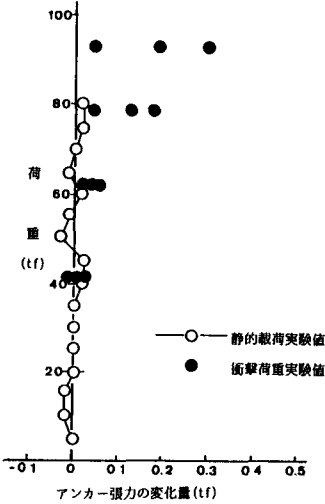


図-6 アンカー張力の変化

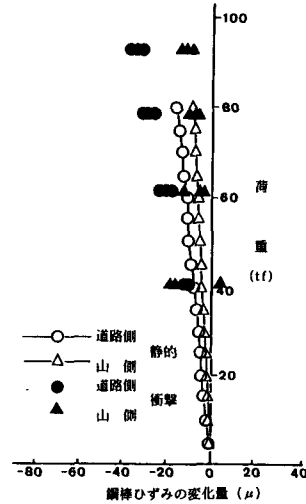


図-7 縦締め鋼材のひずみの変化

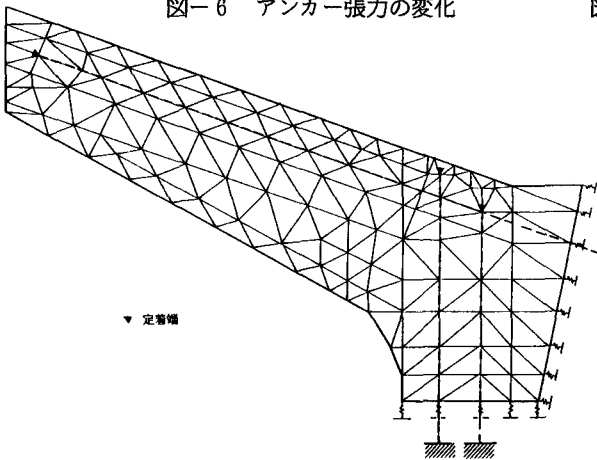


図-8 上部構造の有限要素分割

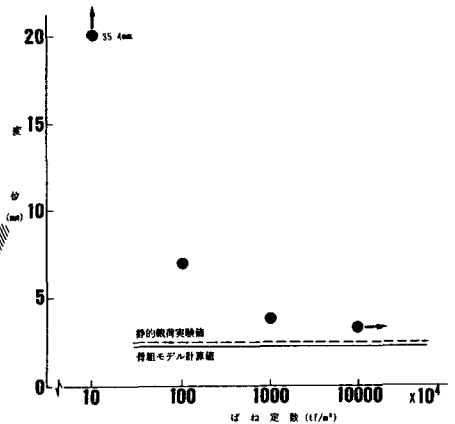


図-9 ばね定数と変位の関係

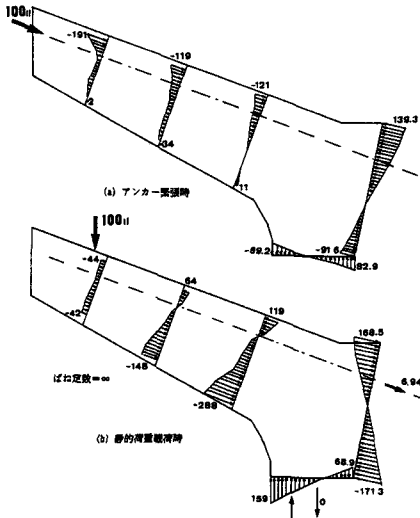


図-10 断面のひずみ分布および反力分布

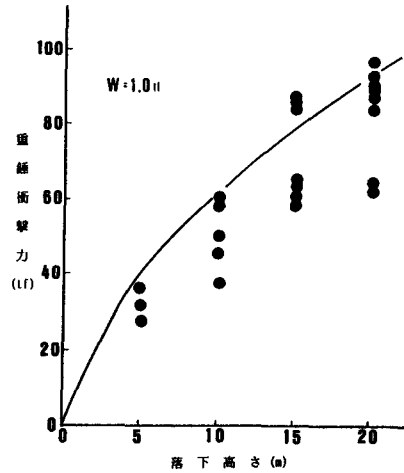


図-11 落下高さと重錘衝撃力 (衝撃試験)

致しており、また、アンカー張力の増加が少ないこと、道路側の縦締め鋼棒のひずみが圧縮であることなど、実験結果を反映した結果が得られている。

5. 衝撃試験

5.1 実験方法および実験結果

片持キーパー単体としての落石による動的挙動を検討するために、3セットの供試体の内、中央の供試体のサンドクッション材上に各種の高さから重錘を落下させ、その衝撃荷重に対する測定結果と計算値との比較を行った。重錘による衝撃力の作用位置が図-3に示されている。サンドクッションとして山砂を90cm厚に敷き、1tonの重錘を5m、10m、15mおよび20mから落下させた。重錘には加速度計を取り付け、衝撃加速度(負値)の測定を行ったが、衝撃加速度から得られる衝撃力(重錘衝撃力)と重錘の衝突によりサンドクッション中を伝播し、片持ちキーパーに作用する衝撃力は異なることから、実験データの整理に当たっては、衝撃力として落石対策便覧¹⁾に与えられる式より得られる値を用いた。落石対策便覧より得られる衝撃力は、これまでの実験値のほぼ上限値を与え、設計においては、安全側と考えられる。なお、参考のために本実験で得られた重錘衝撃力と落下高さの関係を図-11に示す。

図-4中の黒丸は、各落下高さに対応する衝撃力に対し、桁先端での桁に垂直方向の変位の最大値をプロットしたものである。衝撃荷重に対する変位が静的荷重に対する変位より小さい値を与えているのは、荷重の載荷位置の相違および静的載荷試験においては集中荷重を作用させているのに対し、落石による衝撃力は分布荷重として作用していることによる。図-4における細い破線は、落石による衝撃力が分布荷重(図-3)として作用すると考えたときの計算値であり、細い実線は集中荷重として作用するとしたときの計算値である。

図より、落石による衝撃力による変位は、荷重が小さい範囲では比較的計算値とよく一致しているが、荷重の増大とともに非線形的に増大する傾向が認められる。これは、落石の動的効果によるものとロックアンカーテンドンの伸びの影響が考えられる。図-5には、各落下高さに対応する衝撃力に対し、測定ひずみの最大値が黒丸でプロットされている。図中、細い破線および細い実線は、それぞれ、落石の衝撃力を分布荷重および集中荷重と考えた場合の計算値であり、変位の場合と同様に測定ひずみは、計算値より大きい値を示しており、落石の動的効果の影響が認められる。

衝撃試験より得られたアンカー張力の変化および鋼棒のひずみの変化が、それぞれ、図-6および図-7に黒丸でプロットされている。アンカー張力の変化は、落下高さ15m以上の場合に急激に増大しているのはロックアンカーの緊張力を上回る張力がアンカーテンドンに発生したためと考えられる。鋼棒のひずみの変

化については、衝撃試験の場合、谷側の鋼棒のひずみの変化が静的試験に比較して大きく、山側のは小さくなっている。これは、衝撃試験においては、上下部工の接合部での中立軸が谷側に移動したためと考えられる。なお、衝撃試験においても、下部工の測定ひずみは極めて僅かであり、測定誤差範囲であった。

図-12には、片持ちキーパー単体と擁壁上の剛結部および桁先端の横ばり内のPC鋼線を緊張して横締めし、土砂囲い作成後の一体化された片持ちキーパーに対し、1.0tfの重錘を高さ20mから落下させたときの中央の桁の断面Aの下縁のひずみの時間的変化が破線で示されている。

これらの図およびたわみの時間的変化より、片持ちキーパー単体の固有周期および対数減衰率は、それぞれ、24.4msecおよび0.07であり、一体化された片持ちキーパーに対するそれらは、それぞれ、32.3msecおよび0.13であった。

5.2 動的応答解析結果

片持ちキーパーを、主ばりと擁壁上の剛結部および桁先端の横ばりからなる格子構造にモデル化した。

単体の片持ちキーパーおよび一体化された片持ちキーパーに対し動的応答解析を行った。入力荷重としては、1.0tの重錘を高さ20mから落下させたときの設計衝撃力に相当する最大93.7tfを、重錘衝撃力の作用時間45msecの間sinカーブの半波長として作用させた。解析においては、サンドクッション中の衝撃力の伝播時間、約15msecの衝撃力の遅延を考慮した。解析結果は、図-12に実線で示されている。

図において、解析値が実験値より大きくなっているのは、単体の片持ちキーパーの実験ではサンドクッションが緩く、重錘衝撃力が小さかったためであり、また、一体化された片持ちキーパーでは、土砂囲いの剛性の影響が大きいためであると思われる。

6. 破壊試験

破壊試験は、3tの重錘を用い衝撃試験と同様に行った。図-13に重錘衝撃力と落下高さの関係がプロットされており、図中には落石対策便覧より得られる曲線が示されている。図より、本実験における重錘衝撃力は、落石対策便覧のものより大きめの値を与えている。

破壊試験においては、サンドクッション厚を90cmとし、3tの重錘を最大20mから3回落下させたが、目視によるクラックが発見できず、破壊に至らなかった。そこで、サンドクッション厚を50cmに減少し、高さ25mから3回落下させたところ、落下位置近くの桁断面にせん断クラックが発生し、破壊に至った。

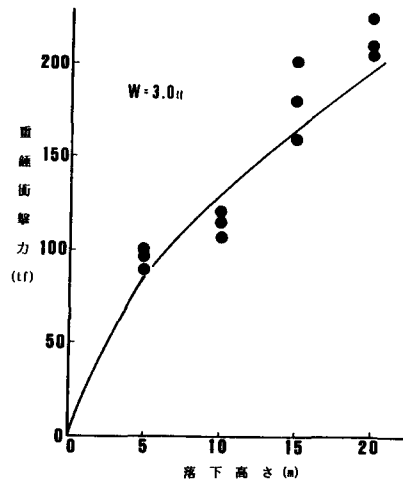
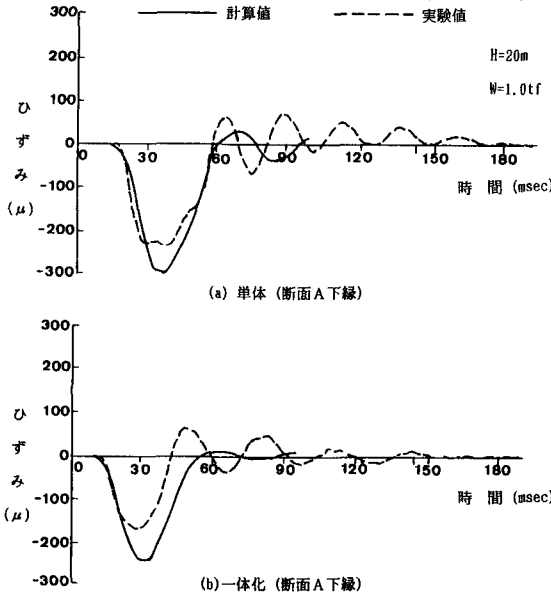


図-12 ひずみの時間的変化 図-13 落下高さと重錘衝撃力 (破壊試験)

この時の推定衝撃力は、落石対策便覧に示されるサンドクッション厚を50cmに減少させたことによる割増係数として、 $\alpha=1.32$ を用いると、 $P=239.4\text{tf}$ となった。破壊時のクラックの状況を写真-2に示す。

7. 実験結果の設計への適用

ロックアンカーの適正試験および確認試験，プレストレス導入試験，静的試験および衝撃試験結果より，片持ちキーパーの設計に際し，以下のことがいえる。

- (1)片持ちキーパーの構造は，擁壁上で擁壁および岩盤に固定されていると考え，片持ちばりとみなした応力および変形解析が可能である。
- (2)設計荷重の作用時における反力分布は，アンカー張力による反力分布と相殺され，上部構造と擁壁上面および岩盤との接触面には，大きい応力は発生しない。
- (3)上部構造の曲げモーメントが縦締め鋼棒を介して下部工に伝達されるとは考えられない。したがって，構造上特に縦締め鋼棒を必要としない。
- (4)片持ちキーパーが横締めなどにより一体化された場合，設計荷重の作用時においては，中央の桁が荷重の約65%を，両側の桁が残り約35%を分担するとした設計が可能である。
- (5)衝撃荷重によるたわみおよびひずみは，それが静的に作用したと仮定したときのたわみおよびひずみの約1.5倍となっており，設計においては動倍率として1.5を用いるのがよい。
- (6)設計荷重を越える荷重および破壊荷重時では，荷重はすべて荷重が作用している桁が負担しているとして設計しなければならない。
- (7)アンカーの緊張力に対応する荷重以上の外力が作用すると，アンカーの張力が急激に増加するとともに，上部構造の変位も急増する。

しかし，本実験および解析結果からは，適性なアンカーの緊張力，破壊荷重および破壊のモードなどを求めることができなかった。

8. あとがき

片持ちキーパーは，永久ロックアンカーを落石防護構造物に使用したわが国最初のものであり，設計に先立ち，実物大モデルによる静的載荷試験，衝撃試験および破壊試験を行い，設計の妥当性および安全性の確認を行うとともに，片持ちキーパーの設計のためのいくつかの提案を行った。

本工法は，上部工のプレキャスト化によって，現場打ち工法に比較して，支保工，型枠，配筋，コンクリート打設，養生などの工種がほとんど無く，現場工期を短縮でき，これに伴い，交通量の多い本工事箇所における交通規制期間を大幅に短縮できた。

また，最近の動向としてのプレキャスト部材の利用は，労働力の不足に伴う工期短縮にも対応している。

最後に，本実験に際し貴重な御意見および御指導を頂きました作道忠明氏，吉田勲氏および荒木和彦氏に深謝の意を表します。

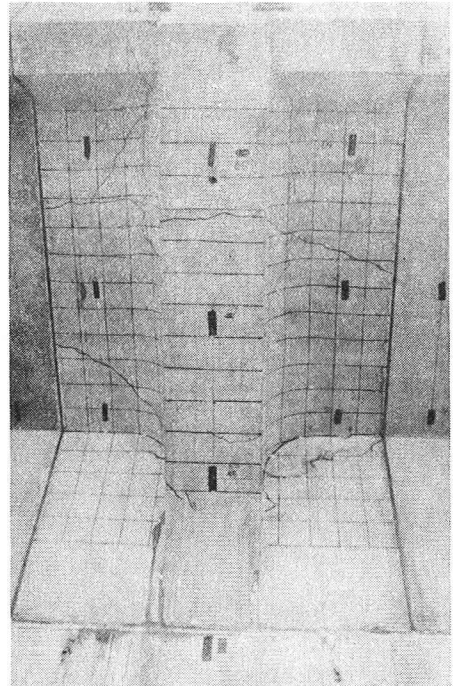


写真-2 破壊時のクラック

参考文献

- 1)日本道路協会：落石対策便覧，1983年3月。