

第 27 章 既設頭首工の耐震性能照査

関連条項 [基準10、運用10-26]

頭首工を設計する場合に、構造物本体の耐震設計についてはそれぞれ、「第 13 章 固定堰の設計」、「第 14 章 可動堰の設計」において解説されているが、ここでは、既存の頭首工に対する耐震性能照査を実施する際に留意することについて解説する。

27.1 耐震性能照査の基本

頭首工の耐震設計・耐震性能照査は、類似構造物を取り扱う関連基準である、河川構造物の耐震性能照査指針・解説の令和 2 年版の内容によるものとする。

27.2 重要度区分の設定

27.2.1 施設の重要度区分

頭首工の重要度は、新設の耐震設計と同様に、重要度に応じて AA 種、A 種、B 種の 3 種類に区分する。重要度区分は、12.2.2 施設の重要度区分に準拠し決定する。

27.2.2 入力地震動

既設頭首工の耐震性能照査については、新設の頭首工に対する耐震設計と同様に、施設供用中に発生する確率が高いレベル 1 地震動、及び発生確率は低い、大きな強度をもつレベル 2 地震動を考慮する。なお、重要度区分が AA 又は A 種の施設においてレベル 2 地震動を考慮する場合は必ず、レベル 1 地震動、レベル 2 地震動の 2 段階について照査を行う。

(1) レベル 1 地震動

レベル 1 地震動の検討においては、耐震設計上の構成要素の構造物特性に応じて、地震動に対する固有周期を考慮しない場合と固有周期を考慮する場合に分けて検討する。詳細については、12.7.2 設計水平震度を参照のこと。

(2) レベル 2 地震動

レベル 2 地震動は、新設の耐震設計と同様に静的解析による場合は、12.7.2 設計水平震度にて示す地震動を、動的解析による場合は、12.7.7 動的解析にて示される地震波形などを参考に設定する。また、12.2.1(2)に示すように、頭首工建設地点付近の地震動が適切に設定できる場合には、その地震動を考慮する。

27.2.3 保持すべき耐震性能

耐震性能とは構造物に要求される耐震設計の目標とする性能であり、既設頭首工の耐震性能照査において要求する耐震性能は、新設相当の耐震性能を目標とすることを基本とし、詳細は、12.2.3 保持すべき耐震性能に示すとおりである。ただし、耐震性能照査においては、既設頭首工に固有の構造的な与条件があるため、頭首工を新設する場合の計算方法の適用外である場合、既設構造を活

用しながら補強対策を行う場合等、新設頭首工の耐震設計の考え方をそのまま適用することが難しいことがある。この場合は、個別の頭首工の構造条件と頭首工に求められる耐震性能を踏まえて適切に耐震性能照査を行う必要がある。

27.2.4 構成要素ごとの耐震性能照査

構成要素ごとの耐震性能照査は、12.2.4 構成要素ごとの耐震設計法に示すとおりとする。ただし、重要度区分が AA 又は A 種の頭首工であっても、その構成要素のうち取入口、固定堰、沈砂池、魚道、護岸については、一般に損傷による影響は低いため、レベル 1 地震動のみを検討するが、以下に示すケースについては、個別に判断する必要がある。

なお、頭首工は、水利システムの中の上流に位置し、河川から必要な農業用水などを取水する水利利用機能を有する。このため、接続する用水路や周辺堤防等の耐震性も踏まえ、俯瞰的な観点から地震後の機能維持を念頭においた耐震性能照査手法を検討することが重要である。

(1) 有堤区間の堤防横断部に位置する取入口

国土交通省では、河川堤防を含む樋門・樋管について「河川構造物の耐震性能照査指針」（国土交通省水管理・国土保全局治水課）に基づき、レベル 2 地震動に対する耐震性能照査が行われている。このことから、河川管理者との協議などを踏まえ、レベル 2 地震動に対する耐震性能照査の可否を判断する。

なお、取水口は、取水ゲートを伴うため、適切に洪水の侵入を遮断する必要があることから、ゲートの「限定された損傷に留める」を準用し、検討を行うものとする。

(2) 固定堰等

山間部に位置するような固定堰に付帯する土砂吐き等の小規模な堰柱など、被災による二次災害の危険度の小さい小規模な堰柱（可動部 10m 未満で堰柱高が堰幅に比べて十分低い場合など）については、レベル 2 地震動に対する耐震性能照査を行わなくてもよい。ただし、無筋構造物の大規模な固定堰などでレベル 2 地震動に対する耐震性能照査が必要と判断される場合には「大規模地震に対するダム of 耐震性能照査に関する資料」（国土技術政策総合研究所 2005. 3）等の文献も参考に照査を行ってもよい。

27.3 荷重

耐震性能照査に当たっては、構造物の重要度、形式、使用材料、設置場所、自然状況等に応じて、必要な荷重を考慮する。耐震性能照査に考慮すべき荷重は、12.3 荷重を参考に設定する。

27.4 荷重の組合せ

荷重の組み合わせについては、12.4 荷重の組合せに示される一般的な組み合わせを参考とするとともに、地震時の照査であることを踏まえ、通年取水施設であれば閉扉のみの照査とすることや、洪水と地震を同時に見込まないなど、実際の施設の運用方法を踏まえた組合せを検討する。

27.5 許容応力度

頭首工における材料の許容応力度及び許容応力度の割り増し係数などについては、実際に既設頭首工で使用されている材料の値を確認した上で、12.5 許容応力度に準拠し決定する。

27.6 耐震性能照査に用いる諸係数及び設定事項

頭首工の耐震性能照査では、地震動レベル、構造物の種類、振動特性、地形地質等の条件を適切に定める必要がある。これらは、既存資料を参考に定めることになるが、特に重要となる地盤条件については、ボーリング調査、標準貫入試験、弾性波探査、PS 検層などの詳細調査を実施するなどにより、現状を把握することが重要である。耐震性能照査に用いる諸係数及び設定事項には、地域別補正係数・地盤種別・固有周期・耐震設計上の地盤面があり、これらの設定については、**12.6 耐震設計に用いる諸係数及び設定事項**によるものとする。

27.7 耐震性能照査手法

27.7.1 耐震性能の損傷度とその評価

(1) 損傷度と照査項目

目標とする耐震性能を満足するためには、構造物の損傷度をどの程度にとどめておくべきかの目標を設定することが求められる。また、目標となる耐震性能を満足しているか否かを判断する照査項目とその許容値あるいは判定基準値を決めておく必要がある。既設頭首工においても、**12.7.1 耐震設計の基本**に示す損傷度及び照査項目とする。

(2) 耐震性能照査結果の評価

既設頭首工の耐震性能照査において、新設頭首工に対する耐震性能照査法を既設頭首工に対して機械的に適用すると、既設頭首工の耐震性能を満足しない場合が生じることがある。しかしながら、目標とする耐震性能をわずかでも満足しないことが施設の致命的な破壊現象に至ることはなく、一般に、施設は致命的な破壊に至るまでにある程度の余力を有し、様々な損傷段階の進展を経て全体崩壊に至る。特に、堰柱は、堰柱間のゲートやエプロンなどが相互に影響を与える施設である。このため、新設頭首工に対して適用される許容値は当然安全性の判定の基本となる値として位置付けられるが、許容値を超過するか否かを機械的に判定するのではなく、許容値の超過の程度を考慮し、その超過が堰柱の部材としてどのような損傷状態となるのかを判断することが重要である。なお、耐震性能照査結果を踏まえた耐震補強の考え方については、**27.9 耐震性能の確保のための整備水準**によるものとする。

(3) レベル1地震動に対する耐震性能照査

レベル1地震動に対する照査は、許容応力度による照査を基本としたものであり、許容値に安全率が見込まれていることを踏まえると、これを仮に多少超過したとしても、大規模地震時の耐震性能確保に関するレベル2地震動に対する照査を満足できていれば、その超過が即機能喪失や致命的な被災に結びつかないことが明らかである。したがって、耐震性能の評価は、レベル2地震動に対する耐震性能照査結果を基にした評価を行うことが望ましい。

ただし、重要度区分B種の頭首工や取水口、魚道などのレベル1地震動に対する耐震性能を保持していることを照査する施設もあることから、個々の頭首工の重要度区分や基礎構造などを整理した上で、耐震性能を照査する地震動を設定するものとする。

27.7.2 耐震性能照査手法

耐震性能照査手法は、静的照査法である「地震時保有水平耐力法」を基本とする。

ただし、既設頭首工について、施工性を重視した単純な形状寸法とは異なる複雑な構造のもの、現在の耐震設計手法や配筋手法に基づかないもの等は、構造物全体を 1 自由度系と置き換えることが困難なことがあるため、動的照査法が必要になることがある。

つまり、剛性や質量が極端に異なる部材で構成された複雑な施設の場合や施設形状が左右非対称である場合、振動単位内で地盤条件が著しく異なる場合等の理由により、必ずしも 1 次振動モードが卓越せずに高次振動モードが卓越する場合や 2 次以上の次数の固有周期が比較的大きい場合、または、2 次以降のモードの有効質量比が比較的大きい場合や主たる塑性化の生じる部位が明確ではない場合等には、構造物全体を 1 自由度系と置き換えることが困難となるため、動的照査法を用いた耐震性能の照査が必要となるからである。そのために、照査法の決定に先立ち、1 次固有周期に加え、2 次以降の固有周期や各モードのモードベクトルが得られる固有値解析を実施し、固有振動モード（固有周期）の確認を行うものとする。

また、補強対象部位が明確になる耐震補強設計に当たっては動的照査法が有効な場合が多い。

なお、耐震性能照査における解析モデルは質点系モデルを基本とし、むやみに複雑な解析モデルを適用する必要はない。既存の頭首工における構造特性を考慮した上で、有限要素モデルなどを適用する必要があると判断された場合には、関連する文献等を参考に適用してもよい。

27.7.3 ゲートの耐震性能照査

ゲートの耐震性能照査については、「河川構造物の耐震性能照査指針」（国土交通省水管理・国土保全局治水課）や「大規模地震動に対するダムの耐震性能照査に関する資料」（国土技術政策総合研究所 2005.3）等の文献を参考に照査を行ってもよい。

27.7.4 液状化の判定

砂質地盤のような地盤条件にある頭首工は、耐震性能照査を必要とする構成要素の液状化の判定を行い、その影響を適切に反映する。このため、必要に応じてボーリング調査・標準貫入試験・粒度試験等の物理試験を行って、地盤の物性値を把握した上で、液状化の判定を行うものとする。液状化の判定方法は、12.7.5 液状化の判定に準拠するものとする。

27.8 既設頭首工の物性値・設計条件等の適切な設定

27.8.1 基本方針

(1) 適切な設計条件等の設定

既設頭首工の耐震性能照査では、既存資料を整理・把握するとともに、設計基準書や参考図書の変遷などを反映した、現行基準を踏まえた適切な評価を行うことが重要である。このため、耐震性能照査に当たっては、既存資料の調査、現状把握のための現地調査を実施するとともに、現地調査により得られた施設の劣化状況は、それらの構造性能への影響を適切に評価し、耐震性能照査に反映させることが望ましい。特に、配筋状況、部材寸法及び基礎地盤の情報は、耐震検討の基礎資料となるので、既存資料と併せて十分な確認・調査が必要である。なお、現地調査方法については、『土地改良事業設計指針「耐震設計」』で示されている調査方法を参考とする。

また、新設頭首工の設計では安全側の配慮から必ずしも考慮されていない構造モデル、部材の断面定数、荷重条件等についても、既設頭首工においてその効果が確実に見込める場合には、これを考慮してよい。ただし、考慮を行う際に安全側の条件設定をすることで耐震性能を過小評価しないようにすることが重要である。特に、受働土圧、主鉄筋・帯鉄筋本数等有効なものとして考慮できる諸条件を可能な限り考慮して、耐震性能を適切に評価するものとする。

(2) セン断耐力の評価

新設する堰柱の設計においては、塑性域でのねばりを期待する設計とするため、損傷を曲げ破壊型となるように軸方向鉄筋を配置する設計を行う。一方、既設頭首工は、塑性域でのねばりに配慮した設計がなされていないものが多く、配置されている鉄筋量が相対的に少ないためにせん断破壊型の損傷形態となり、堰柱のせん断耐力が不足する傾向にある。このような状況を踏まえ、帯鉄筋やディープビーム効果などのせん断耐力に有効なものについては、設計時に考慮されていなくても、適切に考慮した上で耐震性能を評価するものとする。

27.8.2 構造細目を満たしていない帯鉄筋の評価

既設頭首工については、配置されている鉄筋量が相対的に少ない傾向にあり、特に、せん断耐力が不足する傾向にある。また、**14.3 配筋手法**で示されている配筋仕様は、平成20年3月に制定された旧基準から示されたものであり、それ以前に築造された頭首工については、構造細目を満足していないことから、新設する頭首工と同様にせん断耐力を評価すると、耐震性能を満足していない結果となる傾向にある。

このような背景を踏まえ、既設頭首工に対する耐震性能照査では、実際に配置されている帯鉄筋について、使用鉄筋・加工形状などが大きく異なるなど、構造細目を満足していなくても、必要に応じて低減を行うなどにより、せん断耐力を負担できる鉄筋として評価してよい。

ただし、本項は、既設頭首工の耐震性能照査において、構造細目を満足していない帯鉄筋を適切に評価した上で耐震性能を評価する際のものであり、新設の頭首工設計にあたっては、**14.3 配筋手法**に示す内容により所要の耐震性能を確保するものとする。

(1) 帯鉄筋の評価

14.3.2 構造細目で示されている構造細目を満たしていない場合でも、横拘束筋として少なくとも帯鉄筋を考慮してもよい。また、横拘束筋によるコンクリートの拘束効果が十分に期待できない場合は、コンクリートの応力-ひずみ曲線の算出にあたって、レベル2地震動に対するコンクリートの最大圧縮ひずみ ε_{cc} をコンクリートの終局ひずみ ε_{cu} と見なすなどの配慮が必要である。また、以下の点についても留意する必要がある。

ア 配置位置

既設頭首工の配力鉄筋は、その配置位置（主鉄筋の内側・外側）にかかわらず、帯鉄筋としてせん断耐力を負担できるものとする。

イ 鉄筋の種類

既設頭首工の配力鉄筋は、鉄筋の種類（丸鋼・異形棒鋼）にかかわらず、せん断耐力を負担できるものとする。

ウ フック形状

せん断耐力の評価にあたっては、まず、配筋図等の設計当時の資料や現地調査、施工年代に応じた技術の変遷などを総合的に評価した上でフック形状を確認し、所定の定着長が確保され

ている場合は、せん断耐力の低減を行わないものとする。定着長が確保されていない場合は、せん断耐力のうち、帯鉄筋が負担するせん断耐力を 80% に低減するものとする。せん断耐力は、式 (27.8-1) により算出する。

$$P_s' = S_c + \alpha \cdot S_s \cdots \cdots (27.8-1)$$

ここに、 P_s' ：既設頭首工の耐震性能照査におけるせん断耐力 (N)

S_c ：コンクリートが負担するせん断耐力 (N)

S_s ：帯鉄筋が負担するせん断耐力 (N)

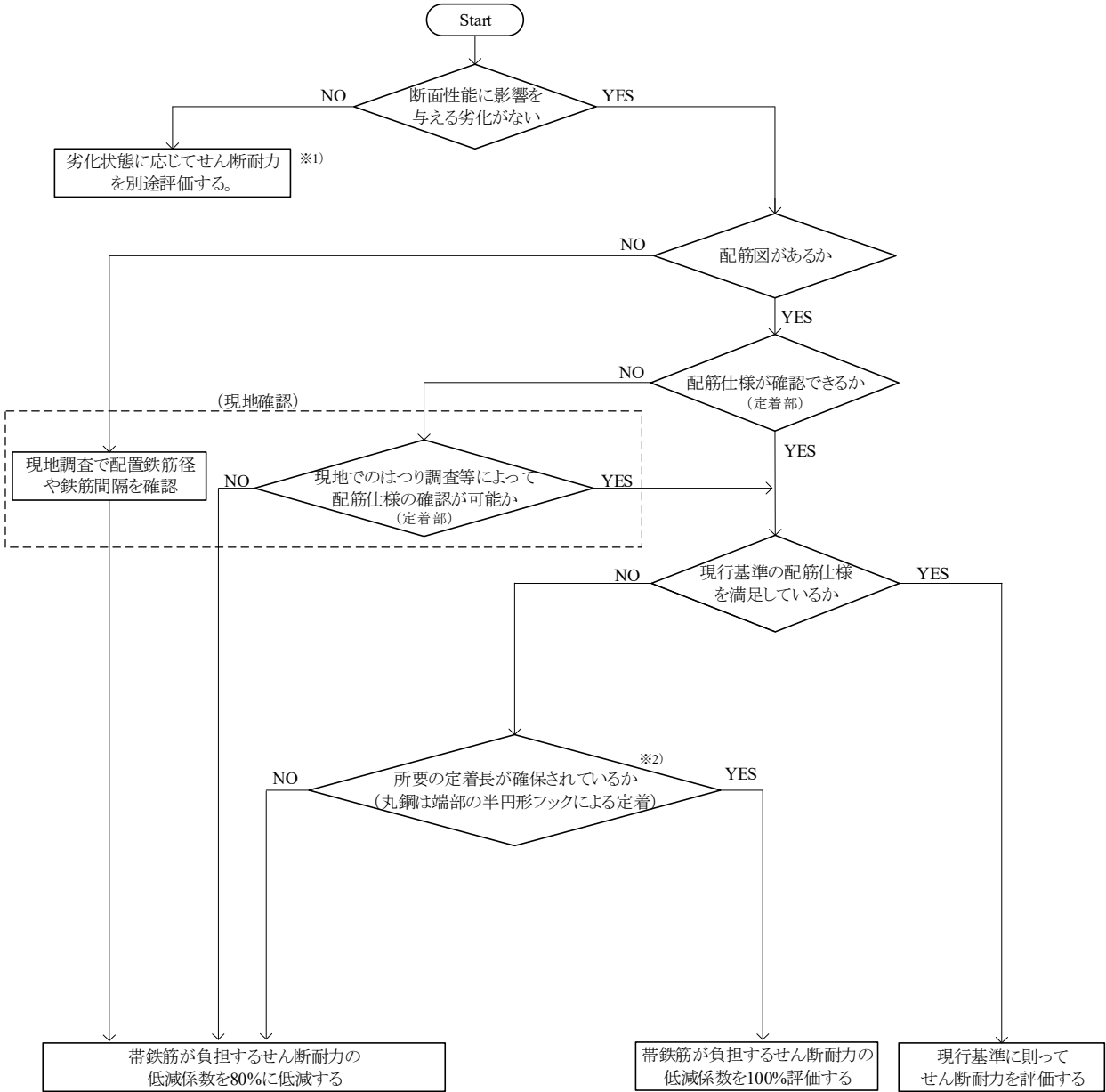
α ：帯鉄筋が負担するせん断耐力の低減係数

低減係数は、図-27.8-1 により導出され、0.8 又は 1.0 となる。

注) なお、 S_c および S_s の算出は、「14.2.2(8) 各断面の部材せん断耐力の算出」を参照。

以上の留意点を踏まえ、既設頭首工の耐震性能照査を行う際の帯鉄筋のせん断耐力評価方法に係る概略評価フローを図-27.8-1 に示す。

なお、この評価フローは、断面性能に影響を与える劣化が無い躯体を想定したものであり、アルカリシリカ反応や塩害などにより著しい機能低下が生じているものや、躯体内の材料特性、配筋等を適切に評価できないような状態にあるものについては、この評価フローには適合しないため、別途個別に検討する必要がある。



※1) アルカリシリカ反応や塩害などにより著しい劣化が生じているものについて、個別に検討する必要がある。

※2) 帯鉄筋が負担するせん断耐力の低減は、帯鉄筋の配置位置が内側、外側にかかわらず所要の定着長が確保できているかによる。

図-27. 8-1 帯鉄筋のせん断耐力評価フロー

(2) 補強後の評価

耐震補強工法として、鉄筋コンクリート巻立工法を採用した場合は、構造細目を満たしていない帯鉄筋であっても、横拘束筋として評価できるものとする。

27.8.3 ディープビーム効果を考慮したせん断耐力の算定

ディープビーム効果とは、せん断スパン比の小さい構造物では、斜めせん断ひび割れが進展したあとも荷重載荷点と支点を結ぶコンクリートが圧縮力に抵抗し、タイドアーチ的な耐荷機構が形成されることにより、水平力に抵抗できる効果をいう。一般的に、このような効果は、道路橋の壁式橋脚などの橋軸直角方向に対して大きくなる。堰柱は、流心方向に延長が長く、有効部材厚が大きく確保できるため、レベル 1 地震動に対する照査まででは、せん断応力に対して支障が生じることは少ない。一方、レベル 2 地震動に対する照査では、自重に慣性力が作用し大きなせん断力が発生することにより、著しく不合理になることがある。このことを踏まえ、せん断耐力算定にあたっては、ディープビーム効果の影響をせん断スパン比に応じて補正してもよい。ディープビーム効果を考慮したせん断耐力は、式 (27.8-2) により算出する。ただし、部材が塑性化し、繰返し載荷の影響を受ける場合には、せん断スパン比によるコンクリートの負担するせん断耐力の割増し係数を考慮してはならない。これは、降伏域において交番繰返し載荷を受けると、コンクリートに多数のひび割れが生じ、コンクリートの負担するせん断応力度が急激に低下し、厚い部材におけるアーチ効果によるせん断耐荷機構が有効に発揮されない可能性があるためである。また、せん断耐力の評価にあたっては、まず、配筋図等の設計当時の資料や現地調査、施工年代に応じた技術の変遷などを総合的に評価した上でフック形状を確認し、所定の定着長が確保されている場合は、せん断耐力の低減を行わないものとする。なお、せん断補強鉄筋のフックがないなど定着長が十分でない場合は、せん断耐力のうち、せん断補強鉄筋が負担するせん断耐力 S_{ds} は考慮しないものとする。

$$P_{ds} = S_{dc} + S_{ds}^{*1} \dots \dots \dots (27.8-2)$$

$$S_{dc} = C_{dc} \cdot C_c \cdot C_e \cdot C_{pt} \cdot \tau_c \cdot b \cdot d \dots \dots \dots (27.8-3)$$

$$S_{ds} = C_{ds} \cdot \frac{A_w \cdot \sigma_{sy} \cdot d (\sin \theta + \cos \theta)}{1.15a} \dots \dots \dots (27.8-4)$$

$$C_{ds} = \frac{1}{2.5} \cdot (a/d) \dots \dots \dots (27.8-5)$$

ここに、 P_{ds} ：ディープビーム効果を考慮したせん断耐力 (N)

S_{dc} ：ディープビーム効果を考慮したコンクリートが負担するせん断耐力 (N)

S_{ds} ：ディープビーム効果を考慮したせん断補強鉄筋が負担するせん断耐力 (N)

C_{dc} ：せん断スパン比によるコンクリートの負担するせん断耐力の割増し係数

a/d	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
C_{dc}	6.4	4.0	2.5	1.6	1.0

a ：せん断スパン (mm)

d ：フーチングの有効高 (mm) で、柱または壁前面の位置で求める

C_{ds} ：せん断スパン比による斜引張鉄筋の負担するせん断耐力の低減係数

*1：ただし、 $a/d \leq 0.5$ の場合は、せん断補強鉄筋によるせん断耐力の増加はほとんど見られないため、 S_{ds} は見込まないものとする。

注) 上記以外の記号注釈については、「14.2.2(8) 各断面の部材せん断耐力の算出」を参照。

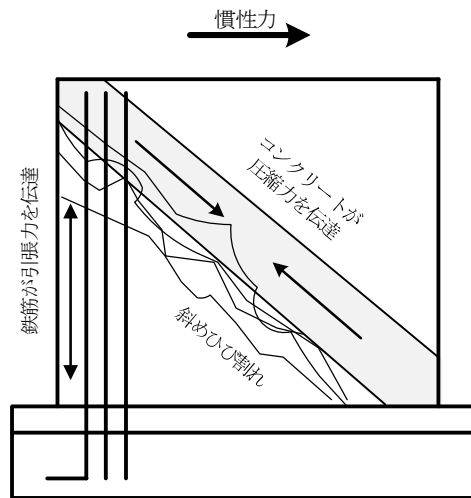


図-27.8-2 ディープビームの効果

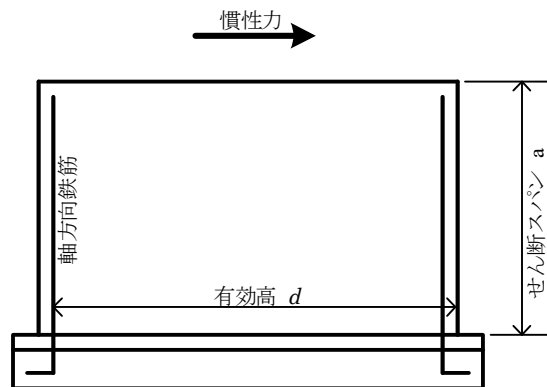


図-27.8-3 セン断スパン比の考え方

27.9 耐震性能の確保のための整備水準

27.9.1 耐震性能の確保のための基本

耐震性能照査の結果、目標とする耐震性能を有していない場合、耐震補強を行う必要があるが、既設頭首工に対する耐震補強の場合には、構造条件や施工条件を踏まえ、被災した場合における機能回復の難易度等に基づき、その目標とする耐震性能レベルを施設管理者や事業主体が個別に設定する必要がある。頭首工は、大規模一級河川に築造され、管理橋を一般供用するようなものもあれば、山間部に位置し、周辺に影響を与えるような施設が無いような立地のものもあるため、一律、同一の整備水準を求めることは合理的ではない。このため、個々の制約条件を踏まえた上で、目標とする耐震性能レベルを設定する。また、耐震補強の要否は、個々の頭首工において設定した耐震性能レベルに応じて判断するものとする。一方、基礎の補強については、頭首工全体の耐震補強方法や解析方法を検討し、基礎への影響を最小限とすることができるよう計画・設計することを基本とする。これは、過去に発生した地震に対し、頭首工においては基礎本体の被災が確認されていないこと、道路橋橋脚におけるこれまでの地震による被災状況においても、既設橋脚の基礎の中には必ずしも耐震補強が必要と判断されるものは多くないこと、基礎の補強は施工上の制約から多大なコストを要することなどによるものである。

27.9.2 耐震補強計画時の耐震性能

頭首工は、堰柱、門柱、基礎工、管理橋、ゲート、ゲート操作室等様々な要素から構成され、耐震性能においても各々の限界状態がある。例えば、ゲートの開閉操作の确实性に着目すると、被災後の運用方法を整理した上で、必要に応じて限界状態を設定することや耐震補強を不要と判断することも検討する。

ただし、既設頭首工に求められる耐震性能は、水理上又は水利用上の重要性等により異なる場合があり、また、一つの構造物の中でも、耐震性能照査の対象となる部分と対象とはならない部分があるほか、代替措置の有無に応じて耐震性能照査を行う場合の限界状態が部材により異なる場合もある。これらのことを踏まえ、レベル 2 地震動に対する耐震性能の目標設定例を表-27.9-1 に、レベル 2 地震動に対する施設の重要度区分に応じた部材の限界状態を整理した例を表-27.9-2 に示す。

表-27.9-1 レベル 2 地震動に対する耐震性能の目標例と耐震性能の観点

重要度 区分	代替措置 の有無	目標とする 耐震性能	耐震設計上 の安全性	耐震設計上 の供用性	耐震設計上の修復性	
					短期修復性	長期修復性
AA 種	無し	レベル 2 地震動による損傷が部分的・限定的なものに留まり、頭首工としての取水機能や水理機能の回復が速やかに行い得る状態が確保される	水理・水利用に関する安全性を確保する	地震後、頭首工としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急復旧で対応できる	比較的容易に恒久復旧を行うことが可能である
AA 種	有り	レベル 2 地震動により損傷が生じる部位はあるが、損傷レベルは恒久復旧が可能なレベルに収まり、応急復旧等により取水機能や水理機能の回復が速やかに行い得る状態が確保される	水理・水利用に関する安全性を確保する	地震後、頭首工としての機能を速やかに回復できる	機能回復のための修復が応急復旧で対応できる	恒久復旧を行うことは可能である
A 種	無し	レベル 2 地震動により損傷が生じ、損傷レベルは恒久的な復旧が困難なレベルに達することもあるが、取水制限や代替措置により水理機能の回復が行い得る状態が確保される				
A 種	有り	レベル 2 地震動により損傷が生じ、損傷レベルは恒久的な復旧が困難なレベルに達することもあるが、取水制限や代替措置により水理機能の回復が行い得る状態が確保される	水理・水利用に関する安全性を確保する	地震後、頭首工としての水理機能は回復できる	取水制限や代替措置により機能回復ができる	恒久復旧を容易に行うことが出来ない場合がある

注) 代替措置とは、予備ゲート・角落し等によるゲート閉鎖が可能な場合、又は、可搬式ポンプによる取水が可能な場合など、河川内のゲートが使用できない場合においても洪水時やかんがい期における対応措置を講じている施設。

表-27.9-2 代替措置の有無に応じた部材の限界状態

重要度区分	代替措置の有無	部材の限界状態	保持すべき性能
重要度 AA 種	無し	塑性化を考慮する門柱部にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形がゲートの開閉を妨げない範囲内にある。	水理性能 水利用性能
	有り	塑性化を考慮する門柱部にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復を容易に行い得る範囲内にある。	水理性能 水利用性能
重要度 A 種	無し	塑性化を考慮する門柱部にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復を容易に行い得る範囲内にある。	水理性能 水利用性能
	有り	塑性化を考慮する門柱部にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復を容易に行い得る範囲にない。	水理性能
重要度 B 種	—	—	—

注) 代替措置とは、予備ゲート・角落し等によるゲート閉鎖が可能な場合、又は、可搬式ポンプによる取水が可能な場合など、河川内のゲートが使用できない場合においても洪水時やかんがい期における対応措置を講じている施設。

また、このような部材の限界状態については、複数の構成要素からなる頭首工では、構造的特徴や復旧の容易さなどを踏まえた上で、構成要素ごとに耐震性能を整理する必要がある。特に、レベル2地震動に対する安全性を確保する堰柱、ゲート及び堰柱基礎工が重要である。また、堰柱のうち、構造特性が大きく異なる堰柱及び門柱、並びに、復旧工事を実施する際に必要となる管理橋についても耐震性能を整理する必要がある。

これらの構成要素ごとの耐震性能を整理した参考例を表-27.9-3に示す。

表-27.9-3 重要度区分に応じた構成要素毎の耐震性能（参考）

重要度 区分	代替措置 の有無	部材の限界状態	構成要素				
			堰柱(堰柱)	堰柱(門柱)	ゲート	堰柱基礎工	管理橋
AA 種	無し	塑性化を考慮する門柱部にのみ変形が生じ、その塑性変形がゲートの開閉を妨げない範囲内にある。	限定された損傷に留める	限定された損傷に留める	限定された損傷に留める	基礎の降伏点及び基礎の最大強度を超えた後、復元力の急激な低下が生じ始める点（終局限界）を超えない状態	限定された損傷に留める
	有り	塑性化を考慮する門柱部にのみ変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復を容易に行い得る範囲内にある。	致命的な損傷を防止する。	致命的な損傷を防止する。			致命的な損傷を防止する。
A 種	有り	塑性化を考慮する門柱部にのみ変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復を容易に行い得る範囲にない。		門柱の終局限界を超えない状態			
B 種	—	—	—	—	—	—	—

頭首工は、樋門や水門などの施設とは異なり、洪水時には、洪水吐き用等の本川横断方向に設置されたゲートの全開操作を行う。地震被災後の復旧までの期間（機能が回復していない段階）において、洪水が発生するおそれがあることから、被災時の代替措置として、ゲートの全開操作の可能性について想定する必要がある。例えば、被災時には既存のゲートを撤去して流下断面を確保し、かんがい期には予備ゲート又は角落しによる堰上げ、可搬式ポンプによる取水を行うなどの被災時の水理・水利用機能の確保を想定した代替計画の有無に応じた耐震性能を設定することも重要である。一方、被災時対応では、復旧工事等を行うための管理橋の機能維持が重要となるため、落橋に対する安全性の確保が重要になる。ただし、1 径間の頭首工などにおいては、管理橋を使用せずに復旧工事が可能になる施設もあるため、施設の構造や立地条件に応じた重要度区分を設定する必要がある。

目標とする耐震性能は、重要度区分 AA 種に区分される頭首工の中で代替措置機能を有していない場合は、新設相当の耐震性能とする。ただし、重要度区分 AA 種で代替措置を有している場合は、A 種相当の耐震性能とする。この場合は、式(14.2-13)の許容塑性率算出における安全係数 α を 1.5 から 1.2 に緩和する。また、A 種で代替措置機能を有している施設については、頭首工の立地条件・構造条件・水理システムにおける重要性などを考慮し、門柱部の安全係数 α は 1.2 から 1.0 の範囲とした。これは、頭首工には様々な構造形式があり、一概に規定することが困難なことによる。安全係数 α と許容変位の関係は、図-27.9-1 に示すとおりである。

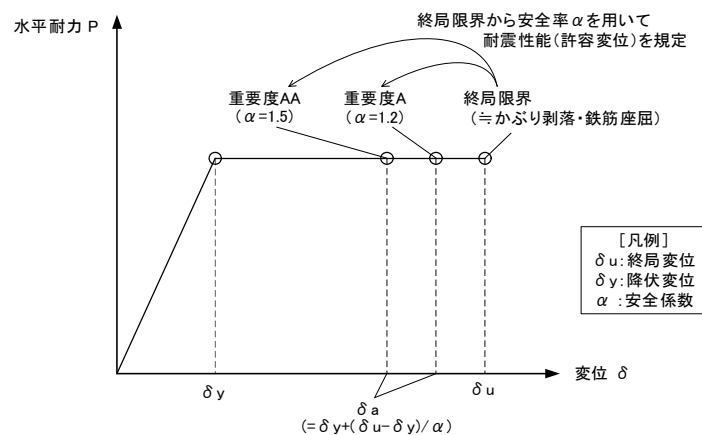


図-27.9-1 重要度区分に応じた許容変位の模式図

27.9.3 堰柱の耐震性能

堰柱のうち、下部の堰柱部は、道路橋の橋脚と同様に上載荷重が作用する構造となっているほか、ゲートの開閉機能確保のためにも重要な構成要素である。その重要性を踏まえ、堰柱部については、既設頭首工においても新設同様の耐震性能を確保することとした。一方、門柱の上部については、河川水位より上部に位置するため、管理橋の機能が維持されていれば、復旧が容易であることを考慮し、代替機能が確保されている場合は、限界状態を緩和できることとした。

27.9.4 ゲートの耐震性能

ゲートについては、地震後においても開閉操作が可能となるようにする必要があるため、新設同様の耐震性能を確保することとした。ただし、コンクリート内部に配置された戸当り金物や復旧が容易な位置にある取外し戸当りなど、各部材に応じて設計の考え方や供用条件、重要性が異なることを踏まえ、ゲートの開閉性に着目して個別に判断することとする。

27.9.5 基礎の耐震性能

既設頭首工の基礎の安全性は、『土木研究所資料 既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究 (H22.5, 土木研究所)』に準拠し、レベル2地震動に対して少なくとも頭首工基礎が終局限界に達しないことを照査するものとする。基礎の終局限界とは、降伏点及び最大強度点を越えた後、復元力の急激な低下が生じ始める限界をいう。

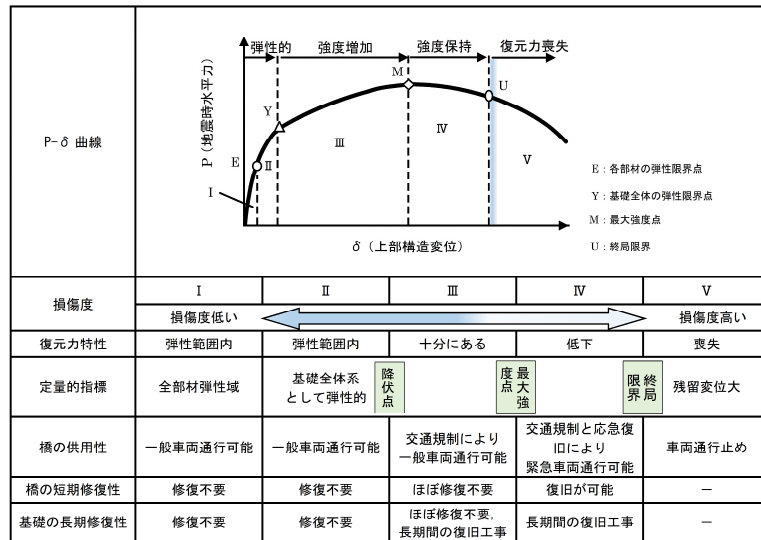


図-27.9-2 既設道路橋基礎の耐震性能水準区分のイメージ

いずれの点を基礎の限界状態とするかは、頭首工の応答変位及び残留変位並びに強度及び剛性の低下度を踏まえて、地震後の運用方法や機能回復措置内容も考慮し、選定理由を含めて個別の頭首工毎に検討する必要がある。また、塑性化を考慮する場合の許容塑性率は、表-27.9-4 を参考にし、てよいが、これらについても、施設の運用方法を考慮した上で個別に検討する必要がある。

表-27.9-4 各基礎形式における損傷度に応じた基礎の塑性率の目安（参考）

基礎形式			損傷度		
			Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
直接基礎			1	4	8
杭基礎	鋼管杭	H2 道路橋示方書より前	1	2	4
		H2 道路橋示方書	1	4	8
	場所打ち杭	S46 道路橋示方書より前	1	2	4
		S46 耐震指針	1	3	6
		S55 道路橋示方書	1	4	8
	既成コンクリート杭	H8 道路橋示方書より前	1	2	4
		H8 道路橋示方書	1	4	8
	木杭		1	—	—
	パイルベント	単列方向(鋼管杭)	1	4	8
		単列方向(鋼管杭以外)	1	$1+\frac{\sigma_u-\sigma_y}{1.8\sigma_y}\leq 4$	$1+\frac{\sigma_u-\sigma_y}{1.0\sigma_y}\leq 8$
複列方向		各杭種と同様			
ケーソン基礎及び地中連続壁基礎 ($Mc<My<Mu$)			1	$1+\frac{\sigma_u-\sigma_y}{1.8\sigma_y}$	$1+\frac{\sigma_u-\sigma_y}{1.0\sigma_y}$
鋼管矢板基礎			鋼管杭基礎に準じる		

- 注 1) 本表の塑性率は現時点での知見を踏まえ設定したものであり、現場条件等を踏まえ、現場の判断で適切に設定するものとする。
- 注 2) 部材の曲げ損傷を前提として基礎の耐荷力保持、復元力保持という観点で各損傷度に応じた塑性率の目安を示しているものであり、部材のせん断破壊等が及ぼす影響は個別に検討する必要がある。また、一列の杭頭反力が押込み支持力の上限值に達する場合については、回転挙動が卓越し、ここに示す目安を超える水平変位が生じたとしても、水平力を保持できる場合があると考えられるため、個別に許容される応答変位を踏まえて設定する必要がある。
- 注 3) 橋台のように直接土圧が作用する端部堰柱の基礎は常時偏土圧を受けるため、ここに示す塑性率よりも小さく設定する必要がある。損傷度Ⅲ、損傷度Ⅳの目安として塑性率を 4、8 に設定したものはそれぞれ 3、6 とする。なお、これよりも小さな塑性率の目安を示している古い基礎形式については個別に検討を行う必要がある。
- 注 4) 流動化に対しては、基礎での変形能で抵抗することを期待していないため、同様に、損傷度Ⅲ、損傷度Ⅳの目安として塑性率を 4、8 に設定したものはそれぞれ 2、4 とする。なお、これよりも小さな塑性率の目安を示している古い基礎形式については個別に検討を行う必要がある。

27.9.6 管理橋の耐震性能

管理橋は、被災後の復旧作業において重要な役割を果たす施設である。落橋を防止するだけでなく、地震後、橋としての機能の速やかな回復を可能とし、機能回復のための修復が応急復旧で対応できる性能を有するものとする。

27.10 耐震補強

27.10.1 基本方針

頭首工の耐震補強は、耐震性能照査の結果及び対象堰柱に対する整備水準を踏まえた上で所要の耐震性能を満足しないと判断された場合に、目標とする整備水準に対する耐震性能を満足させることを目的として行うものである。既設頭首工に対する耐震補強は、新設構造物と同等の耐震性能を確保する必要がある、この場合の供用期間は、新設構造物と同等とする。

27.10.2 耐震補強

耐震補強工法については、必要となる耐震性能、構造特性、施工条件等を考慮した上で、最適な工法を選定しなければならない。一般に、橋梁や樋門・樋管で適用事例が多く、かつ、耐震性能照査技術が整備されている既存の補強工法として、接着工法、プレストレス導入工法（外ケーブル工法）、増厚工法、巻立て工法が挙げられ、これらの工法を組み合わせで実施される場合もある。一方、近年ではこれらの工法に加え、削孔して補強鉄筋を挿入する鉄筋挿入工法などの実施例も増加している。このように、補強工法選定に当たっては、技術の進歩とともに、今後も多くの工法が提案されると予想されるので、必要に応じてそれらの工法の適用性についても検討する。

また、耐震補強については、基礎工の補強が必要となる事例もあり、このような場合は地盤改良工法や増杭工法といった対策がとられる。特に、液状化の可能性がある地盤において、補強が必要になることがあり、このような場合は、基礎地盤全体の補強対策を検討する。

なお、管理橋の補強工法については、『道路橋示方書・同解説』等の関連図書を参照されたい。

表-27. 10-1 耐震補強工法一覧表

用途	名称	工法の概要	曲げ	せん断
構造物の耐震補強	接着工法 (連続繊維シート巻立て工法)	コンクリート部材の主として引張応力作用方向面に連続繊維を一方向あるいは二方向に配置して、シート状にした補強材を既設部材と、接着、一体化させることにより主に曲げ耐力の向上を図る工法	○	
	打換え工法	耐力の低下した部材を取り壊して、必要な耐力を有する部材を再構築する工法	○	○
	増厚工法	既設コンクリートの表面にモルタル、コンクリート、若しくは鉄筋コンクリートを接着一体化することにより、部材の断面や鉄筋量を増加させて補強する工法	○	
	あと施工せん断補強工法(鉄筋挿入工法)	既設コンクリートの表面から小口径の削孔を行って、補強筋を設置することにより、部材のせん断耐力の向上を図る工法		○
	鋼板巻立て工法	コンクリート部材の主として引張応力作用面に鋼板を取り付け、曲げ耐力とせん断耐力の向上を図る工法	○	○
	上面増厚+下面鉄筋補強工法	床版上面の増厚によりフーチング下面の応力に対して有効高を確保するとともに、下面に鉄筋を挿入して曲げ耐力を増加させる工法	○	
	増杭工法	堰柱の床版に隣接する箇所増し杭を打ち、その杭を剛結する増し床版を行う工法	—	—

27. 10. 3 耐震補強工法選定上の留意点

堰柱や門柱部は、管理橋が架橋されているだけでなく左右にゲートを有しており、躯体全体を巻き立てるような工法を採用するのが難しい構造物である。特に、ゲート周辺の取り合いを考慮せずに補強工法を決定すると、施工自体が非常に難しくなるため留意が必要である。また、地盤改良や増杭といった基礎工の補強を行う場合、堰柱床版の周囲にはエプロンが配置されているため、周囲のコンクリート構造物を取り壊すなど、工事が大規模になる。このようなことを踏まえ、周辺構造物への影響を考慮した上で工法を選定する。

耐震補強を行う場合であっても、河川内構造物としての制約条件があるため、工法選定に当たっては河積阻害率などの要因も十分考慮して選定する必要がある。一方、堰柱には管理橋やゲート巻上機室等の荷重が作用していることにも留意し、管理橋反力の分散や上屋荷重の軽減などが耐震性能の向上に有効なこともあるため、耐震補強設計の際には検討する必要がある。

27.10.4 耐震補強の事例

岡島頭首工（平成 25 年施工）

所在地 岐阜県揖斐郡揖斐川町

河川名 揖斐川

取水量 21.7m³/s

堰 長 171m

堰 高 2.3m

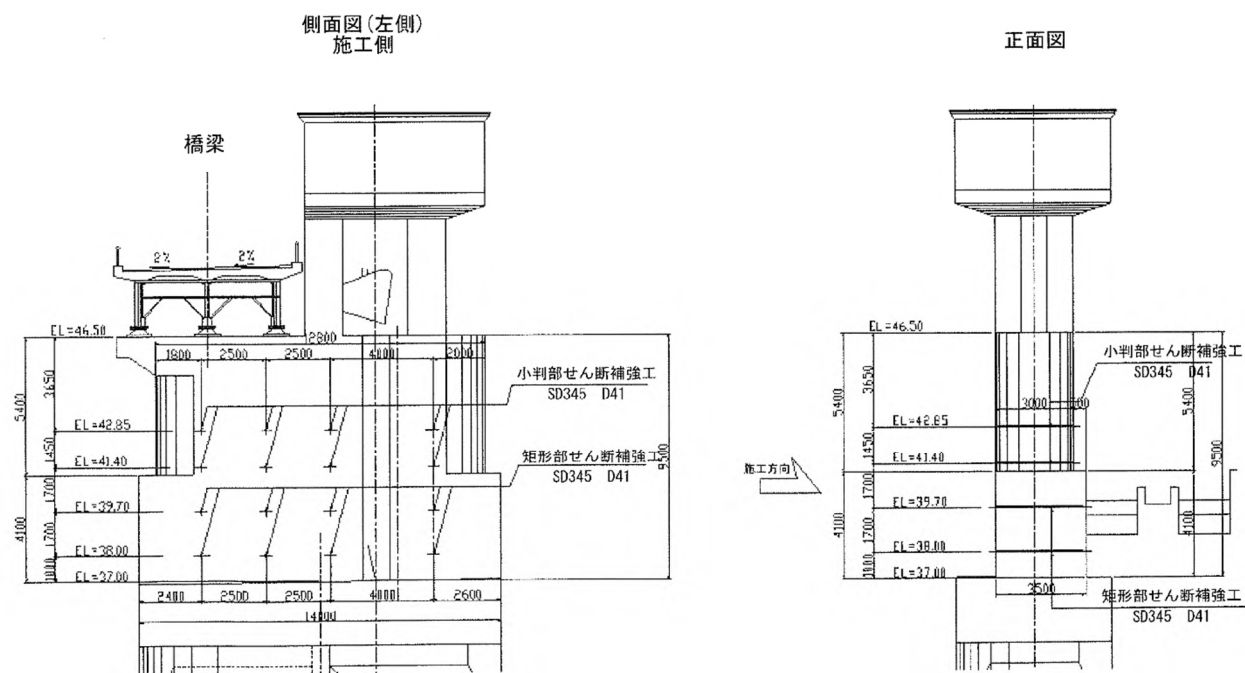


図-27.10-1 岡島頭首工第1堰柱耐震補強計画図

岡島頭首工を対象とした耐震性能照査は、振動特性を把握した上で動的解析により実施し、照査の結果、第1堰柱及び第4堰柱の堰軸方向のせん断耐力が不足する結果となった。せん断補強工法の選定に当たっては、河川管理者から河川の流下断面に対する阻害率を現況以上に増やさないよう条件がつけられたため、比較検討の結果、水理性、経済性及び施工性の面で優れる鉄筋挿入工法を採用している。

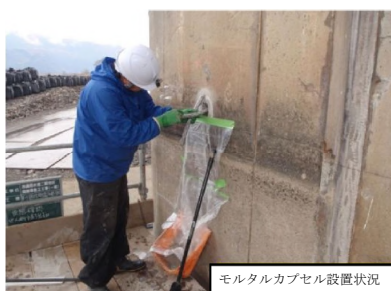


写真-27.10-1 鉄筋挿入工法施工状況