

浚渫用船舶が接触したダム堤体の安全性照査

Safety verification of concrete for gravity dam hit by dredger

北海道電力㈱水力部
北海道電力㈱土木部
北電総合設計㈱環境部
室蘭工業大学

○正 員
正 員
非会員
フェロー

村田 浩一 (Koichi Murata)
横辻 幸 (Osamu Yokotsuji)
樋口 総一郎 (Soichiro Higuchi)
岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

平成18年8月18～19日、沙流川水系沙流川の河口からおよそ70km上流に位置する北海道電力㈱岩知志ダム（昭和33年供用開始）において、ダム地点雨量としては既往最大となる399mmの記録的豪雨が観測された。この時、岩知志ダムは調整池内に堆積した土砂の浚渫工事を実施中であり、工事で使用する浚渫用船舶を湖岸に係留していたが、豪雨に伴う河川流入量の増加によって浚渫用船舶が流出し、ダム堤体および洪水吐ゲートに接触する災害が発生した。

本報は、岩知志ダム供用再開に向けて実施した「ダム堤体に関する現地調査結果」および「ダム堤体内に発生した応力を推定するための三次元弾塑性衝撃応答解析結果」について取りまとめたものである。

なお、洪水吐ゲートに関する調査・検討に関しては、別報¹⁾を参照されたい。

2. 浚渫用船舶接触の概要

浚渫に使用していた船舶は、浚渫用クレーンを積載していたクレーン船1艘および浚渫した土砂を湖岸まで運搬する土運搬船2艘であり、ともにユニフロート（図-1参照）を連結し、台船を構築したものである。ユニフロートおよび台船の諸元は表-1に示すとおりであり、台

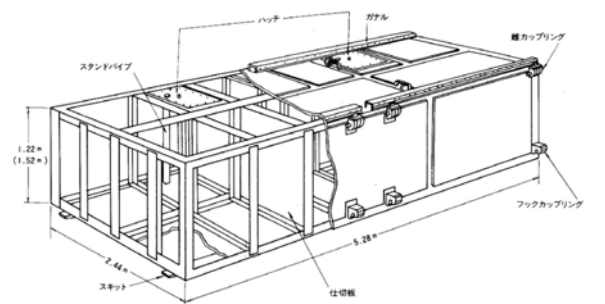


図-1 ユニフロート概要図

船重量は、クレーン船が浚渫用クレーンも含めて269.5t、土運搬船が60.0tであった。

これら浚渫用船舶のうち、クレーン船は18日22時頃に流出したことが確認されており、同時刻の流況から4.0m/sを幾分下回る速度でダム堤体に接触したものと推察される。また、クレーン船は接触時のダム前面水位より、標高193.30m付近に接触したものと想定される。

3. 現地調査

ダム堤体に関して実施した現地調査は、高精細空間測量を含む外観調査、打音調査、反発硬度測定および超音波伝播速度測定である。これらの調査のうち、外観調査についてはダム堤体全般について実施したが、これ以外の調査は船舶が接触したと考えられる部位の近傍および構造的に最大応力が発生すると考えられるピア根本部について重点的に実施した（表-2、図-2参照）。

外観調査の結果、ピア頂部に1箇所、ピア前面2箇所にコンクリート削剥深さが100mmを超える箇所があったものの、明瞭なひび割れなどダム堤体の安全上問題となるような損傷は確認されなかった（図-3参照）。なお、ピア前面の2箇所に関しては、元々凍害劣化を受けていた箇所に船舶が接触したものであり、凍害劣化深さを含めた数字を示している。

打音調査は接触部近傍およびピア根元部で集中的に実施したが、外観調査と同様にダム堤体の構造的安全性に

表-2 現地調査実施箇所

調査内容	調査箇所		
	堤体全般	接触部近傍	ピア根本部
外観調査	○	○	○
打音調査		○	○
反発硬度測定			○
超音波伝播速度測定			○

表-1 浚渫用船舶諸元

船舶名称	ユニフロート諸元（1艘当り）			台船諸元（1艘当り）			備考
	寸法（m）	重量（t）	支持浮力（t）	連結数（艘）	寸法（m）	重量（t）	
クレーン船（1艘）	L5.28×B2.44 ×D1.52	3.7	13.0	40艘 （5×8艘）	L26.920 ×B20.395	269.5	100t吊りクローラ クレーン含む
土運搬船（2艘）	L5.28×B2.44 ×D1.22	3.0	10.0	20艘 （5×4艘）	L26.920 ×B10.150	060.0	

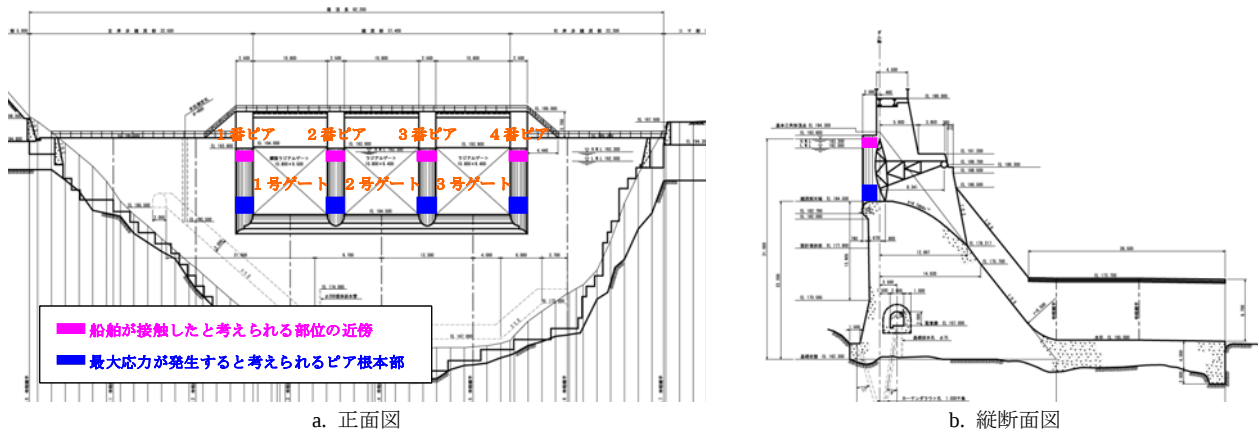


図-2 現地調査重点実施箇所

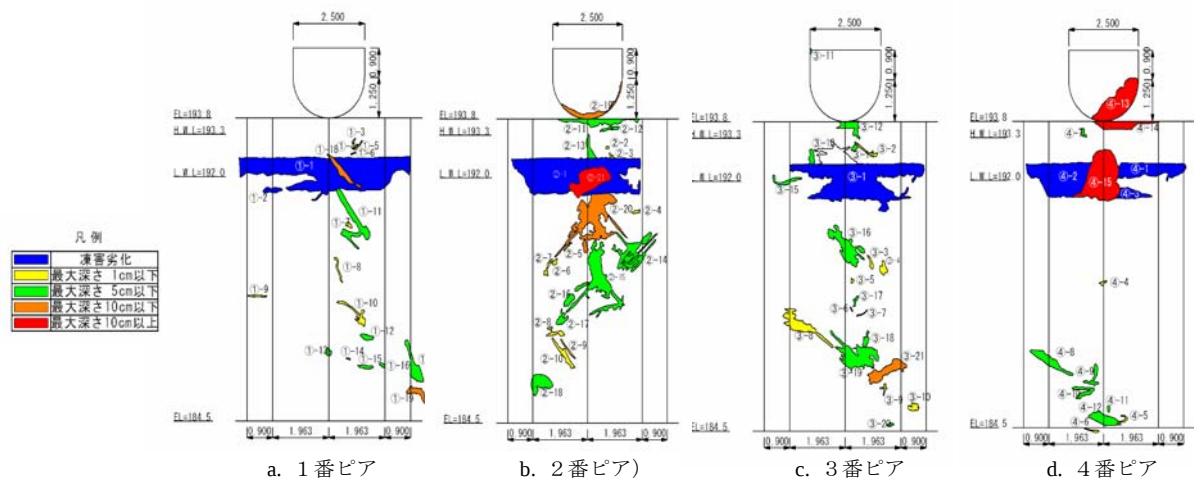


図-3 外観調査結果（高精細空間測量結果）

表-3 反発硬度および超音波伝播速度測定結果

ピア番号	反発硬度測定		超音波伝播速度測定	
	建設時強度 (N/mm ²)	推定強度 (N/mm ²)	伝播速度 (m/s)	判定※
1 番ピア	29	28	3,230	やや良
2 番ピア		30	3,510	やや良
3 番ピア		33	3,340	やや良
4 番ピア		30	3,630	やや良

※ ダム管理調査要領（S38.9）の判定基準による

影響を与えるような損傷は確認されなかった。

反発硬度測定および超音波伝播速度測定は、堤体コンクリートのうちピア根本部の状態を把握するために実施したものである。測定結果より、コンクリートは建設時と同程度の強度を保持しており、超音波伝播速度も「やや良」と判定される結果であったことから、品質的にも健全な状態であったことが確認できた（表-3 参照）。

4. 三次元弾塑性衝撃応答解析

4.1 解析概要

クレーン船接触によってダム堤体内に発生した応力やひび割れの発生状況を推定することを目的として、衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (ver.970) を使用し、三次

表-4 解析ケース一覧

解析ケース	衝突速度	備考
V2.5	2.5m/s	推定流速より小さいケース
V5.0	5.0m/s	推定流速より大きいケース

元弾塑性衝撃応答解析を実施した。

解析は、ダム堤体への影響が最も大きくなるクレーン船がピアに正面から衝突した状況を想定し、クレーン船流出時の調整池内の流況からクレーン船の衝突速度を変化させた2ケースについて実施した（表-4 参照）。

4.2 解析概要

本解析に用いた解析モデルは図-4 に示すとおりであり、構造および変形の対称性を考慮し、左右対称な 1/2 モデルを用いた。

ピアコンクリートは天端位置より下方 14.5m までの範囲を 8 節点固定要素でモデル化し、ピアコンクリート内部の鉄筋（主鉄筋およびフープ筋）に関しては衝突位置近傍のみ 2 節点はり要素を用いてモデル化した。また、クレーン船を構成するユニフロート（鋼板やアングル材等）のモデル化には 4 節点シェル要素を使用し、クレーン船に積載されたクレーンは、全重量が等しくなるように 8 節点固定要素を用いて矩形状に簡略化した。なお、解析モデルの総節点数は 32,184 点、総要素数は 32,288

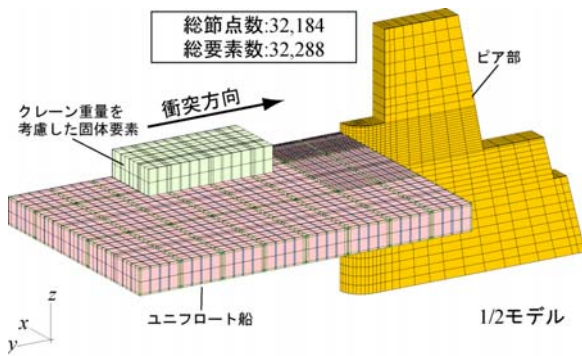


図-4 解析モデル

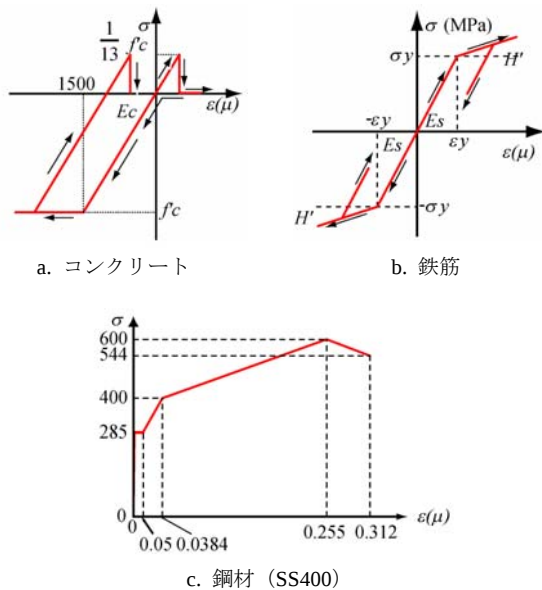


図-5 材料構成則

表-5 材料物性値

材料名	単位体積質量 (t/m ³)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
コンクリート	2.40	30.0	20.0×10 ³	0.167
鉄 筋	7.85	300	206×10 ³	0.300
鋼 板	7.85	285	206×10 ³	0.300

要素であった。

境界条件のうち 1/2 モデルの左右対称境界には、面対称を定義した。また、ピア底面部分とダムクレスト部の境界は完全固定とし、ピアとクレーン船の衝突部およびユニフロートを構成する鋼板やアングル材の間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義した。

なお、本解析では衝突位置に配置したクレーン船全体に衝突速度を入力し、クレーン船の衝突を再現した。

4.3 材料構成則

図-5 に本解析で用いた材料構成則、表-5 に材料物性値を示す。

コンクリート要素は、現地調査結果に基づき圧縮強度 f'_c を 30MPa として、引張強度 f_c を 2.3MPa ($=f'_c/13$)、と仮定した。降伏判定は、圧縮側に関しては応力が圧縮強度に達した場合 (1,500 μ ひずみ時) に降伏するバイリニア型とし、引張側は応力が引張強度に達した時点で

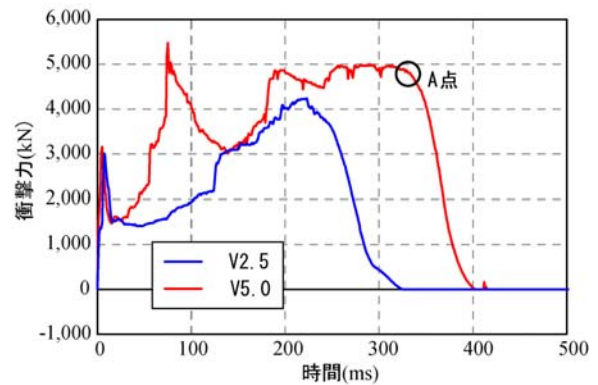


図-6 衝撃力波形

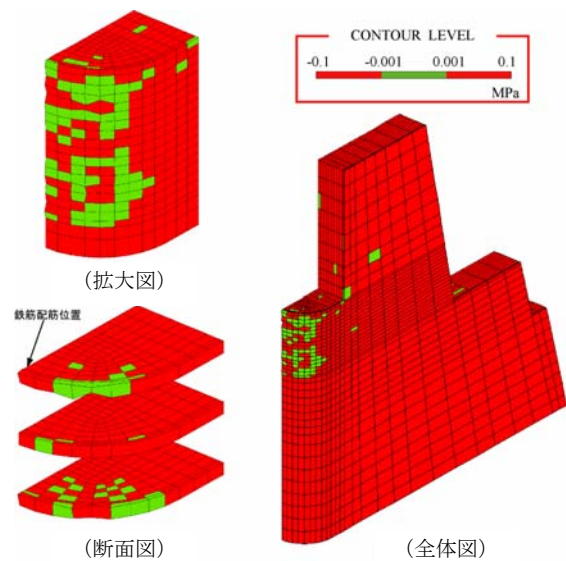


図-7 ひび割れ分布 (V5.0)

引張応力を伝達しなくなるカットオフを定義した。

鉄筋要素に関しては、弾性係数 E_s を 206,000MPa として、降伏後は引張側と圧縮側に対して等しく塑性硬化係数 $H'=E_s/100$ を仮定した。また、硬化則には移動硬化則を採用している。

鋼材 (SS400) に関しては、著者等の研究²⁾を参考に、図に示すとおり多折線に仮定した。

なお、全ての要素に対して、降伏判定には von Mises の降伏条件を採用している。

4.4 解析結果

図-6 にクレーン船衝突によってダム堤体に作用した衝撃力波形を示す。クレーン船衝突による衝撃力は衝突速度 5.0m/s の場合で約 5,000kN、2.5m/s の場合では約 4,000kN であるが、その持続時間は 5.0m/s の場合で 150ms 程度、2.5m/s の場合では 40ms 程度である。また、衝撃力の作用継続時間は衝突速度 5.0m/s の場合で 400ms 程度、2.5m/s の場合では 300ms 程度であり、衝撃力は極めて短時間に発生することがわかる。

図-7 にクレーン船衝突によって発生するピアコンクリートのひび割れ分布状況を示す。図中、緑色で示す領域は応力零近傍要素 (コンクリート要素の第一主応力が ± 0.001 MPa 以内) であり、これが連続する要素は降伏したものと判断できることから、これによりひび割れ分布

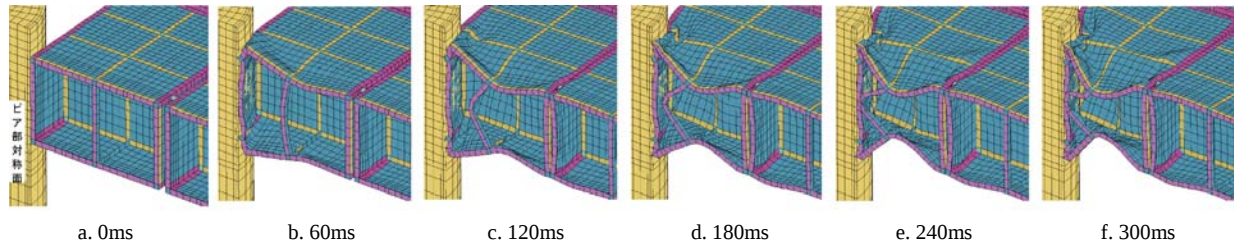


図-8 クレーンの変形状況 (V5.0)

状況を評価する。なお、図-7は図-6中のA点($t=323\text{ms}$ 時点)における応力状態を示したものである。全体図より、ひび割れはクレーン船衝突位置近傍の限られた範囲に集中して発生していることがわかる。また、衝突速度 5.0m/s の場合、ひび割れはコンクリート表面から内部鉄筋の配筋位置よりも深い領域にまで進展している(断面図参照)。一方、現地調査(外観調査および打音調査)では深部まで達するようなひび割れは確認されていないことから、「クレーン船の衝突速度は 5.0m/s を下回っていた」もしくは「クレーン船はピアに正面からは衝突していない」ものと推察される。

図-8にクレーン船衝突時のクレーン船の変形状況を時系列($t=0\text{ms}$, 60ms , 120ms , 180ms , 240ms , 300ms)に示す。図より、クレーン船衝突後、クレーン船を構成するユニフロートが座屈しながら大きく変形していく状況がわかる。これより、クレーン船衝突による衝撃エネルギーの大半は、ユニフロートを構成する鋼板、アングル材の大変形によって吸収されたものと推察される。

図-9に衝突速度 5.0m/s の場合のピア根元部上流縁各点における上下方向応力(σ_z ; クレーン船衝突による曲げ応力に相当)の応答波形を示す。図より、上流側から下流方向に進む(D点 $\Rightarrow$ A点)に連れて発生応力が減少することがわかる。また、最大応力はD点において発生するが、その値は 1.8MPa 程度であり、衝突速度を 5.0m/s とした場合でも引張強度 $f_c=2.3\text{MPa}$ には達しないことがわかった。

5. まとめ

本報で示したダム堤体の安全性照査に関わる事項は下記のとおりであり、これらより浚渫用船舶接触によるダム堤体の損傷は、接触部近傍に局所的に発生し、かつ軽微なものであったと推察される。

- (1) ダム堤体の構造的安全性に関わるような損傷は確認できず、ピア根本部のコンクリートは健全な状態であったことが確認できた。
- (2) クレーン船接触による衝撃力は、極めて短期間に作用し、応力は接触部近傍の限られた範囲内に集中的に発生する。
- (3) ピア根本部においては、前面側に瞬間的に引張応力が発生するが、その値は衝突速度を 5.0m/s とした場合でも 1.8MPa 程度であり、引張強度 2.3MPa よりも小さい。
- (4) クレーン船衝突による衝撃エネルギーは、クレーン船を構成するユニフロート自身の大変形によって吸収されたものと推察される。

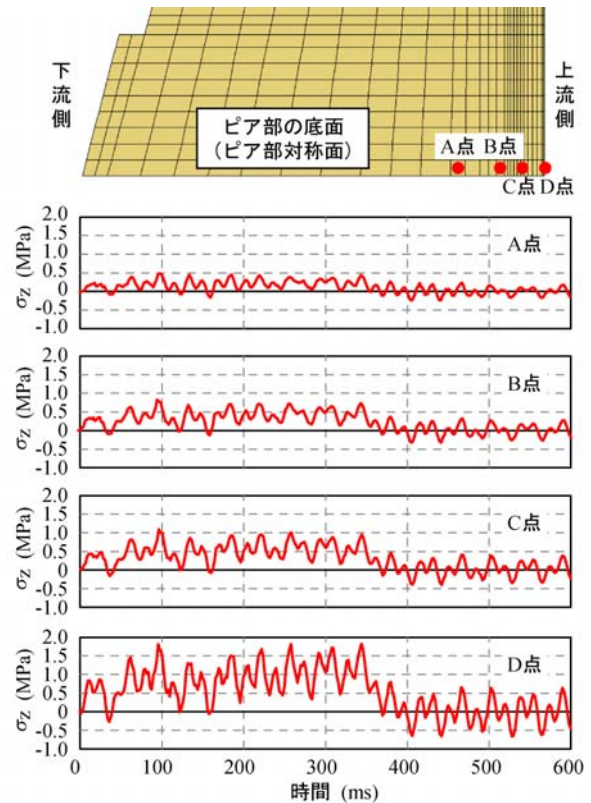


図-9 上下方向応力応答波形 (V5.0)

6. おわりに

岩知志ダムにおいては、これら現地調査結果および三次元弾塑性衝撃応答解析結果から、ダム堤体には浚渫用船舶接触による重大な損傷は無く、健全性を有しているものと判断し、平成19年3月の湛水試験を経て、4月18日より岩知志発電所の運転を再開している。

岩知志発電所の運転再開にあたって、「ダム構造・設計等検討委員会 発電検討部会 岩知志ダム技術検討部会(事務局:ダム技術センター)」を始めとする多くの方々のご協力を頂きましたことに対し、ここに感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 横辻宰, 村田浩一, 佐藤希久, 岸徳光: 浚渫用船舶が接触したダム洪水吐ゲートの湛水時計測による安全性照査, 土木学会支部論文報告集, 第64号, 2008.1.
- 2) 小室雅人, 岸徳光, 松岡健一: AFRPシートで補強した鋼材の力学的特性に関する板引張試験, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol.12, pp.431-438, 2004.11.