

報告 水中不分離性コンクリートの側圧および残留応力度の評価

田路 隆茂*1・綱川 浩太*2・合田 和哉*3・甚内 郁郎*4

要旨：鋼コンクリート構造からなる半円形セル型ダム仮締切工の中詰めコンクリート打設において、実施工での計測結果に基づく水中不分離性コンクリートの側圧特性および残留応力度の評価を行った。その結果、当工事において既に報告している側圧評価実験に基づく水中不分離性コンクリートの側圧推定式の妥当性が確認された。また、高水圧下では、鋼型枠に負の残留応力度が発生することを示した。

キーワード：水中不分離性コンクリート, 側圧, 残留応力, 側圧推定式

1. はじめに

本工事は、図-1、図-2に示すような両サイドに嵌合継ぎ手を持つ13個のボックス型鋼矢板を半円筒状に建て込んだ後、その内部に水中不分離性コンクリートを打設して仮締切工（直径16.3m、厚さ65cm、平均水深50m）を建設する工事である。当初設計において、コンクリート打設時に発生する水中不分離性コンクリートの側圧により、ボックス型鋼矢板の変形および鋼コンクリート構造に対する残留応力度の評価が問題となった。そのため、施工に先立って側圧評価実験を実施し¹⁾（以下、側圧実験と記す）、コンクリートの打ち上がり速度と側圧との関係およびボックス型鋼矢板に及ぼす側圧の影響を把握するとともに、得られた知見に基づいて施工計画を立案した。本報は、実施工時の計測結果による水中不分離性コンクリートの側圧と残留応力度について側圧実験と比較して評価した結果について報告する。

2. 施工方法およびコンクリートの品質管理

2.1 施工方法と工程

ボックス型鋼矢板への水中不分離性コンクリ

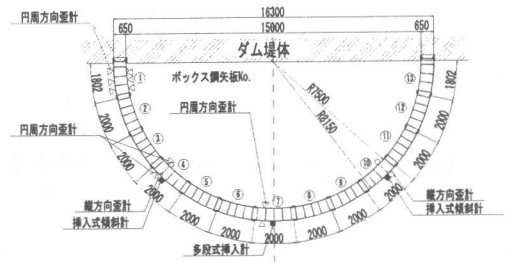


図-1 仮締切工平面図および計測設置位置

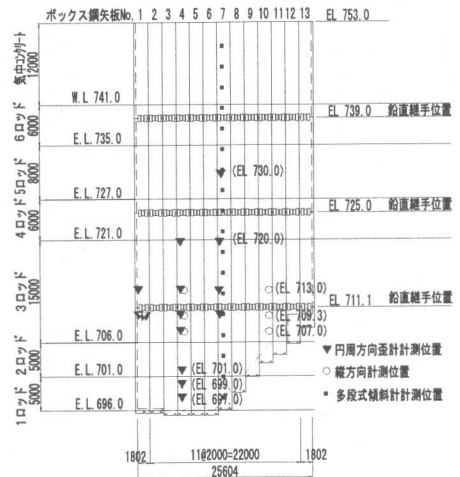


図-2 仮締切工展開図および計測設置位置

*1 東洋建設(株) 東北支店奥只見作業所 工事課長 (正会員)

*2 電源開発(株) 奥只見・大鳥増設建設所課長代理

*3 東洋建設(株) 土木設計部課長代理 博士(工学)

*4 鹿島建設(株) 北陸支店奥只見発電所増設工事事務所 所長

表-1 打設工程

打設ロッド	打設区分	月日時	打設高さ(m)	打設量(m ³)
1	水中部	9/12 9:00~19:00	E.L.696~701	40
2		9/13 8:20~21:20	E.L.701~706	55
3		9/14 8:25~	E.L.706~721	226
4		9/16 8:40~21:49		
5		9/17 8:25~23:05	E.L.727~735	116
6		9/18 8:30~21:10	E.L.735~741	112
7	気中部	9/19 9:30~19:00	E.L.741~753	100

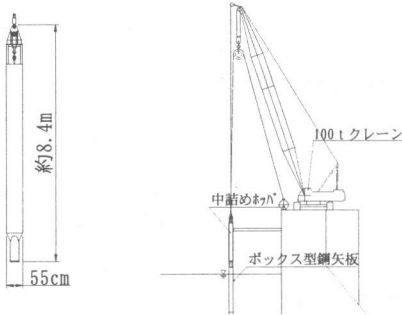


図-3 コンクリートホッパーと打設状況

ートの打設は、側圧実験の結果から、打設速度が速くなるほどコンクリート側圧が増大し、コンクリート硬化後のボックス型鋼矢板には、最大側圧発生時と同等の残留応力度が残ることが確認されている。コンクリート打設時におけるボックス型鋼矢板の応力度の検討から、打ち上げ速度を1m/h以下とし、1回の打ち上がり高さを1mに制限して均等に打設するよう計画した。コンクリート打設のロッド割は、1日の打設可能数量とサイクルから、打ち継ぎ目が仮締切の構造上問題のない位置に設定して、表-1のように水中部を6ロッドに分割した。

コンクリートの打設は、材料分離の防止と隔壁へ直接所要のスランプフローのコンクリートを打設するために、図-3に示すホッパーを使用した。また、ホッパーの筒先は打設されたコンクリートに1m程度貫入し、油圧により先端の蓋を開き、高さ約1mのコンクリートを打設した。打設後は蓋を閉じて引き上げ、ホッパー内の洗浄を行った後、隣の隔壁の打設を行った。これを繰り返し、開口部のないウェブにより分けられた13個の隔壁に順次打設した。表-1に

表-2 使用材料

種類	記号	物性値および成分
セメント	C	フライッシュセメントB種 密度 2.97g/cm ³ 、比表面積 3430cm ² /g
		奥只見産砕砂(最大径 5mm) 表乾密度 2.70g/cm ³ 、吸水率 0.76%、 実積率 67.5%、粗粒率 2.63
細骨材	S	奥只見産砕砂(粒径 20-10mm):70%混合 表乾密度 2.72g/cm ³ 、吸水率 0.75%、 実積率 57.5%、粗粒率 6.94
		奥只見産砕砂(粒径 10-5mm):30%混合 表乾密度 2.73g/cm ³ 、吸水率 0.85%、 実積率 57.9%、粗粒率 6.01
混和剤	UW	水中不分離性混和剤(セルロース系)
	SP	高性能 AE 減水剤(ホリカルボノ酸系)
	PS	耐寒・防凍剤(窒素系)

表-3 コンクリートの配合

目標 スランプ加- (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)						
				W	C	S	G	混和剤		
								UW	SP	PS
500±30	4.0以下	44.0	40.0	220	500	615	933	253	100	5.0
								Wx1.15%	Cx2.0%	Cx1.0%

示す打設実績から、仮締切全体の中詰めコンクリートを1m打設するのに要した時間は、約1.7~2.7時間であった。

なお、気中部となる7ロッド(E.L.741m~E.L.753m)の12m区間については、普通コンクリートを打設した。

また、側圧の計測は、図-1および図-2に示すように、水中不分離性コンクリートの打設区間であるE.L.696m~E.L.741mのボックス型鋼矢板No.1, No.4, No.7のフランジ中央部に、ひずみゲージを26個所、ひずみ計を19個所それぞれ設置し、フランジの円周方向応力度を計測した。なお、施工上の制約から、各計器の取り付け位置はフランジ外縁のみとした。

2.2 コンクリートの使用材料と配合

表-2に水中不分離性コンクリートの使用材料を示す。施工上、コンクリートに要求された性能は、スランプフロー500±30mmを保持時間120分程度、側圧を低減させるために凝結始発時間15時間以下、および材齢28日設計基準強度24N/mm²(配合強度31N/mm²以上)であった。これらの性能を満足するために、凝結遅延が少

ない高性能 AE 減水剤と硬化を促進させる目的で耐寒・防凍剤を使用した²⁾。試験練りにより抽出したコンクリートの配合を表-3に示す。

2.3 品質管理試験結果

表-4にコンクリートの品質管理試験項目を示す。品質管理試験の頻度は、1日2回(午前・午後に各1回)を基本とした。ただし、コンクリートの凝結時間試験については、最も打設高さが高くなる3ロッド(E.L.706~721)のみ実施した。

図-4に打設ロッド毎のスランプフローを、図-5に凝結時間試験結果をそれぞれ示す。スランプフローは、各ロッドで若干ばらつきは見られるものの、全て所要の管理基準値内であった。また、20℃の室内で実施した凝結時間は始発で11.5時間、終結で13.5時間程度であり、目標の始発時間15時間以下を十分満足した。

3. 側圧測定結果と考察

3.1 計測結果の補正

計測されたフランジ応力から、図-6に示す2次元フレーム計算における作用側圧と各計測点での応力度を用いて、以下のように側圧に換算した。

$$P_r = \alpha \cdot \sigma_m \cdot P_o / \sigma_o \quad \text{式(1)}$$

ここに、

P_r : 換算側圧 (N/mm²)

σ_m : フランジ応力の計測値 (N/mm²)

P_o : フレーム計算時の作用側圧 (N/mm²)

σ_o : フレーム計算による計測位置でのフランジ応力 (N/mm²)

α : 計器の特性および保護鋼材に対する補正係数

また、計器の特性および保護鋼材に対する補正係数 α については、以下のように求めた。本工事で用いる中詰めコンクリートは、コンクリート練混ぜ後5~7時間程度までは、液圧として作用することが側圧実験から分かっている。

表-4 コンクリートの品質管理試験項目

項目	方法
スランプフロー	JSCE-F503に準拠
空気量	JIS A 1128に準拠
圧縮強度(水中作製)	JSCE-F504に準拠
凝結時間	JIS A 6204の附属書1に準拠

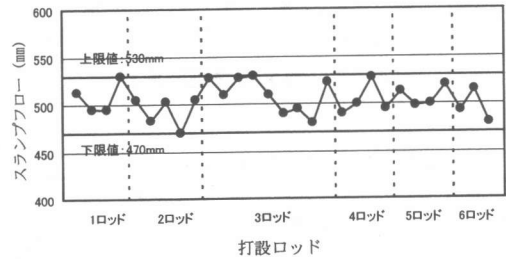


図-4 打設ロッド毎のスランプフロー

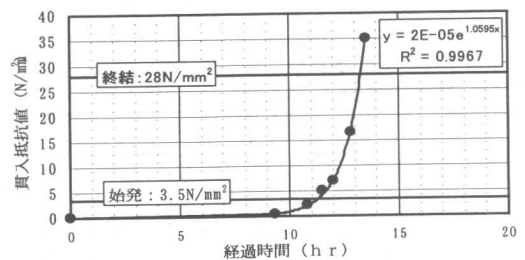


図-5 凝結時間試験結果

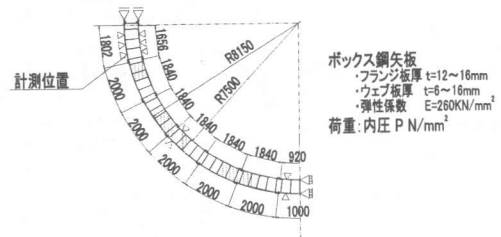


図-6 2次元フレーム計算モデル

したがって、コンクリート側圧が液圧と考えられる範囲での式(1)により換算した側圧が、理論値である液圧と合致するように補正係数 α を求めた。なお、得られた補正係数 α は0.35~2.0の範囲であった。

図-7に鋼矢板の断面と計測機器および保護鋼材の設置位置を示す。



図-7 鋼矢板詳細断面図

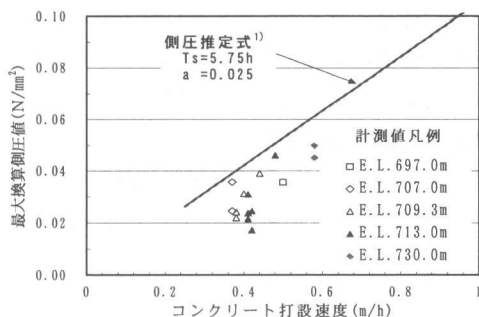


図-9 打設速度と最大側圧値の関係

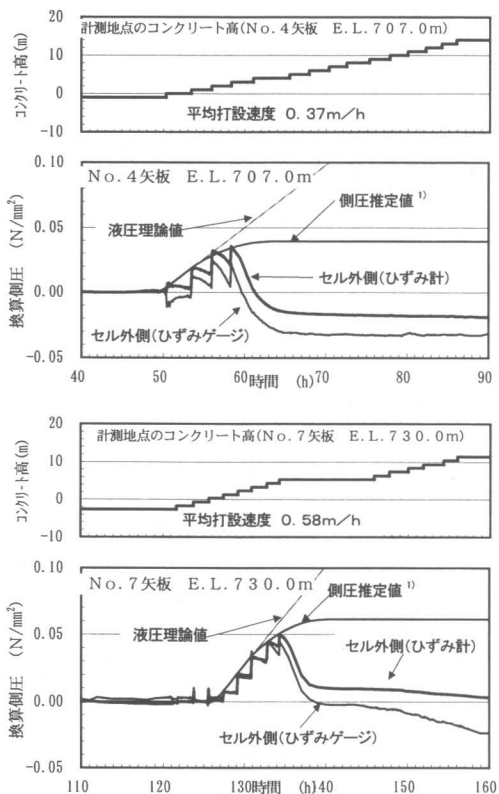


図-8 換算側圧の経時変化

3. 2 側圧の経時変化

側圧の経時変化の1例として、No.4 矢板の E.L.707.0m と No.7 矢板の E.L.730.0m における換算側圧の経時変化を図-8 に示す。横軸はコンクリート打設開始前からの経過時間を示しており、縦軸は前述した方法で計測値を液圧理論値とのキャリブレーションによって補正した換算側圧値である。なお、正の換算側圧値は、フ

ランジがボックス型鋼矢板外側へはらみ出した状態を、負の換算側圧値は内側へ変形した状態を表す。

図-8 の経時変化からは、つぎの挙動が見られた。コンクリートの打設高の増大に伴い、換算側圧値はほぼ線形に増加しており、コンクリート側圧が液圧として作用していると考えられる。そして、ある時点から側圧の増加率が低減し、最大側圧値に到達する。最大側圧値に到達した後は、側圧が急激に減少し、負の換算側圧値（負の応力値）を示す。この現象は、E.L. 730.0m 以外の計測点全てで見られた現象であり、最大側圧発生時と同等の残留応力度が残るとした側圧実験での知見と異なった。この原因については後述する。

3. 3 最大側圧と側圧推定式

図-9 に、打設速度と最大側圧値との関係を側圧実験で求めた側圧推定式の最大側圧値と比較して示す。打設速度が速いほど、最大側圧が大きくなる傾向が現れており、側圧推定式の最大側圧値よりも小さな値を示している。これは、側圧実験で得た知見と一致した。

なお、同図に示した側圧推定式は式(2)および(3)で表され、 $T_s=5.75h$ 、 $a=0.025$ である。

$t \leq T_s$ のとき

$$P = (\gamma_c - \gamma_w) \cdot V \cdot (t - t') \quad \text{式(2)}$$

$t > T_s$ のとき

$$P = \{1 - a \cdot (t - T_s)\} \cdot \gamma_c \cdot V \cdot (t - t') - \gamma_w \cdot V \cdot (t - t') \quad \text{式(3)}$$

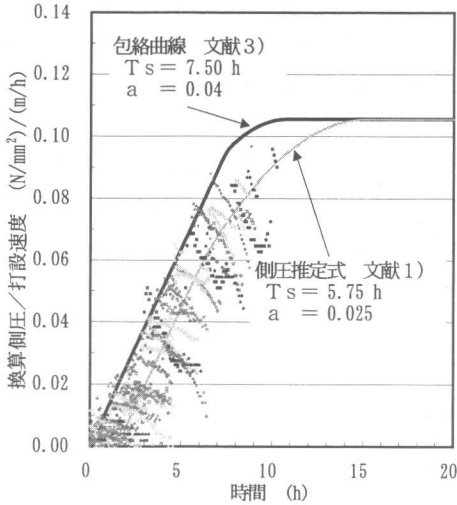


図-10 換算側圧の経時変化と包絡線

ここに、

P : 側圧(kN/m^2)

t : コンクリートを練り混ぜてからの経過時間(h)

V : 打設速度 (m/h)

γ_c : コンクリートの単位容積質量= 22.6 kN/m^3

γ_w : 水の単位容積質量= 9.81 kN/m^3

T_s : 側圧係数減少開始時間 (h)

a : 側圧減少係数 (1/h)

t' : コンクリートの練混ぜから打設までの時間=1(h)

図-10は、全計測点の最大側圧発生時までの換算側圧を重ね描きしたものである。時間軸は、各計測点の液圧の理論値がゼロとなる点を原点に採り、縦軸は換算側圧を打設速度で割った値とした。同図に示した側圧の平均的な上昇傾向を示す側圧推定式 ($T_s=5.75\text{h}$, $a=0.025$) と、文献3)に示される包絡曲線 ($T_s=7.5\text{h}$, $a=0.04$) において、いずれも換算側圧の経時特性を捉えられており、側圧実験時の推定が妥当であったと言える。

3.4 側圧減少量の経時変化

図-8に示した側圧の変化からは、コンクリート打設時から次の打設時までの間に側圧の減少傾向がみられ、その減少の程度は時間の経過に伴って大きくなる傾向を示した。この側圧減

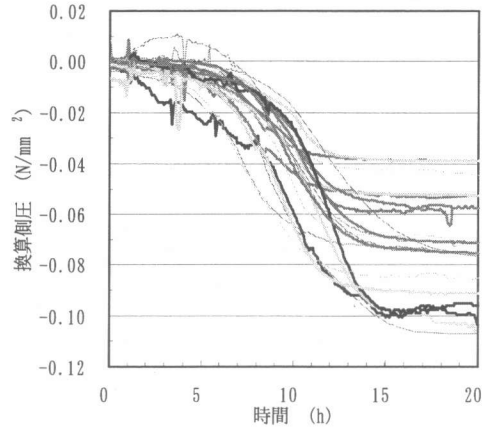


図-11 実施工における側圧減少量

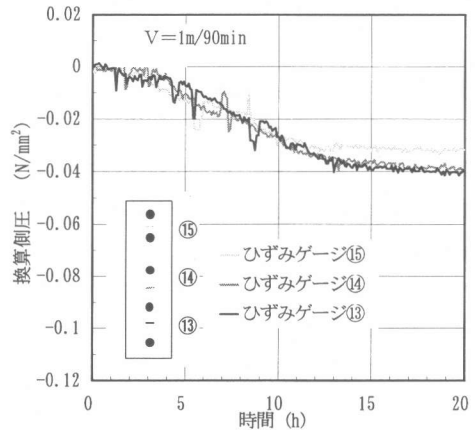


図-12 側圧実験における側圧減少量¹⁾

少は荷重の変化がない状態での現象であることから、コンクリートの状態変化が考えられ、その中でも水中不分離性コンクリートの水中での長さ変化は一般に少ないため、セルの拘束下でのクリープによる変形が主要な要因と推測される。

また、側圧減少傾向を詳細にみるために、図-11にコンクリート打設時の側圧上昇部分を無視し、コンクリート打設時から次の打設時までの間の側圧減少分のみを連ねて図化したものを示す。同図からは、コンクリート練り混ぜ後5~6時間程度から側圧の減少が顕著に現れ、凝結時間とほぼ等しい13~15時間で収束する傾向にあった。一方、図-12は、最大側圧がほぼ残留応力度として残る傾向にあった側圧実

