論文 ダムコンクリート施工の工学的評価について

新美孝之介*1 大倉浩二*2 本田正治*3 森本博昭*4

要旨:構造物の早期劣化は,不適切な施工法に起因する場合が多い。施工には,環境,材料, 工法,設備など多くの要因が関わる。本研究では,ダムコンクリート施工を例に取り数多くの 施工要因がコンクリートの耐久性などの性能に及ぼす影響,ならびに所要の性能を確保するた めの諸要因の組み合わせ(施工法の選定)を,実験計画法の手法を適用して最小限の数値解析 (実験)から検討する方法を提案する。

キーワード:ダムコンクリート,温度応力,コンクリート施工,実験計画法

1. まえがき

持続可能な循環型社会の構築が急務となって いるなか,社会資本施設の長寿命化(高耐久化) が求められている。構造物の早期劣化は,不適 切な施工に起因する場合が多い。施工には,環 境,材料,工法,設備など多くの要因が関わる。

本研究では,ダムコンクリート施工を例に取 り数多くの施工要因がコンクリートの耐久性な どの性能に及ぼす影響,ならびに所要の性能を 確保するための諸要因の組み合わせ(施工法の 選定)を,実験計画法の手法を適用して最小限の 数値解析(実験)から検討する方法を提案する。

2. ダムコンクリートの施工法選定

ダムコンクリートの施工では,初期欠陥の主 要な原因となる温度応力・ひび割れを制御する ために種々の対策工が実施される。低発熱セメ ントの使用,各種クーリング,保温養生,コン クリート打設工程ならびに打設温度管理などは 代表的なものである。施工法の選定に当たって は,これら数多くの対策工(施工要因)の効果を 事前に評価しなければならない。この際,多く の検討例では,各々の施工要因ごとにその影響, 効果が単独に評価される。しかしこの場合,要 因の数によって検討に要する計算量は増大する ばかりでなく,因子間相互の影響(交互作用)が 考慮,検討できないなどの難点がある。

3.実験計画法による施工法選定

直交表による実験計画法 ¹⁾を適用することに より,多くの実験因子を考慮する場合において 飛躍的に実験数を減じることが出来る。実験結 果(特性値)についての分散分析から,各因子の 効果および因子間の交互作用の有意性、寄与率、 さらには,各因子水準の任意の組み合わせによ る特性値の期待値,信頼幅を計算することが出 来る。従って,施工法の策定に実験計画法を導 入することにより,各種施工因子の影響(主効 果)と、因子相互の関連(交互作用)を数少ない解 析(数値実験)により明らかにすることが可能と なる。そして,意味がある因子(有意性が認めら れた因子)について、これらの水準の組み合わせ に対する特性値(コンクリート温度,強度,温度 ひび割れ指数など品質,性能についての指標) を推定し、これをもとに施工法策定の検討を行 うことができる。

本研究では拡張レヤー工法で施工されるコン クリートダムの温度ひび割れ対策の検討に本手

- *1 大日本土木(株) 土木本部土木部長(正会員)
- *2 大日本土木(株) 土木本部主任 工修
- *3 岐阜大学学生 工学部社会基盤工学科
- *4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学学科 工博(正会員)



図 - 1 ダム概略図

表 - 1	配合表
-------	-----

	W/C	s/a	単位量(kg/m3)						
配 合	w/C	5/ a	W	С	S	G1	G1	G1	Ad
	(%)	(%)				80mm	40mm	20mm	
内部 A	51	32	113	220	637	495	424	495	0.55
外部 B	73	34	116	160	593	491	424	421	0.44



拡張レヤー工法は, 打設リフトの薄さ, 大きな打ち上がり速度, 打設の連続性, パ イプクーリングの省略などの特徴を持ち,経済 性に加えて,コンクリート施工,特に温度応力 制御の面において有利な工法とされている。

4. 研究計画

4.1 解析対象

解析対象としたダムの概形を図 - 1 に示す。 解析対象範囲は,図中で示した岩着部付近の7 リフト分である。図 - 2 に,解析モデルならび に1リフト分の詳細,寸法を示す。コンクリー トの配合については,耐久性を必要とする外部 コンクリートをA配合,一方,重量を必要とす る内部コンクリートはB配合とし,それぞれの 配合を表 - 1 に示す。

本研究では、寒中施工における温度ひび割れ



図-2 解析モデル図

とコンクリート凍害の二つを検討項目として, それぞれの指標に温度ひび割れ指数およびコ ンクリート温度を選定した。検討部位は、図 -2 に示す 49 リフトの表面部(以下,要素1と呼 ぶ)と中央部(以下,要素2と呼ぶ)の2箇所と した。

4.2 数値実験因子と水準値

数値実験因子は,温度ひび割れならびにコン クリート凍害に関わる施工要因の中から,上 下流面養生(型枠材料:以下,要因Aと記す),

コンクリート打設温度(以下,要因 B と記す),

打設間隔(以下,要因 C と記す), セメント 種別(以下,要因 D と記す), 打設面養生(以下, 要因 E と記す),および リフト厚(以下,要因 F と記す)の6要因を選定した。各要因の水準は3 水準とし各水準値は過去の施工実績などを参考 にして決定した。6要因は,各要因間の交互作 用を考慮しながら直交配列表 L₂₇(3,13)に割り付 けた。表 - 2 に,各要因の水準値を示す。

4.3 解析条件および諸定数

セメント断熱温度上昇特性を表 - 3 に示す。コ ンクリートの圧縮強度は 積算温度で評価した。 評価式は、過去のダム施工の際に得られた実測 値から求めた。図 - 3,4 に A 配合および B 配合 コンクリートの圧縮強度評価式を示す。温度解 析および応力解析に用いた解析諸定数をまとめ て表 - 4,5 に示す²⁾。外気温は,図 - 5 に示す中 国地方山間部における実測値を用いた。

4.4 解析方法

温度解析と温度応力解析は,直交配列表 L₂₇(3,13)に示された各要因の水準値に従って計 27 ケースを FEM により実施した。解析により 得られた要素1の上部リフト打設前の最高温度 と温度ひび割れ指数の最小値,および要素2の 上部リフト打設前後の温度ひび割れ指数の最小 値を求め,得られた4種類の特性値について分 散分析を実施した。分散分析で有意と判定され

表-2 要因水準

水準要因	特性値:単位	水準 1	水準2	水準3
上下流面型枠	熱伝達率: Kcal / mm ² hr	メタル型枠 1.2×10 ⁻⁵	木製型枠 7×10 ⁻⁵	断熱型枠 1.5×10 ⁻⁶
打設温度	温度:	5	8	10
打設間隔	日数:日	10	5	21
セメント種別	断熱温度上昇量:	アッシュセメン ト	中庸熱ポルトラ ンドセメント	高炉B種
打設面養生	熱伝達率: Kcal / mm ² hr	散水養生 12×10 ⁻⁵	湛水養生 5×10 ⁻⁵	断熱マット 2.2×10 ⁻⁶
リフト厚	コンクリート厚:c m	75	100	150

表-3 断熱温度上昇特性

区別項目	練上温度	5		8		1 0	
セメント種別	配合	К	α	к	α	К	α
中庸熱	А	35.52	0.138	33.63	0.22	32.86	0.276
フライアッシュ	В	26.93	0.132	25.49	0.211	24.91	0.264
	А	32.26	0.176	34.33	0.28	33.54	0.352
中庸熱	В	26.83	0.169	25.4	0.271	24.82	0.339
	A	46.3	0.139	43.83	0.222	42.82	0.277
高炉 B 種	В	36.65	0.111	34.69	0.178	33.9	0.223

た要因について要因効果図を求めその影響を検討した。さらに,有意な要因それぞれの水準値に対する特性値の期待値(工程平均)を求め,水準値の組み合わせ(施工法選択)と特性値(温度ひび割れと凍害の危険性)との関係を検討した。

5. 解析結果

5.1 要因の主効果

表 - 6 に, 27 の解析ケースにおける要因水準 値の組み合わせと特性値を示す。以下に,各特 性値についての分散分析結果を示す。

(1) 要素 1(上下流表面部)の最高温度

有意と判定された要因は,上下流面養生、打 設温度、およびリフト厚であった。要因効果図 を図-6に示す。最大の寄与率を持つ要因は, 上下流面養生であり,その効果は打設温度の約 2倍リフト厚の約1.5倍である。冬季施工のコ ンクリートの凍結防止に断熱養生材が有効であ ることがわかる。

表-4 温度特性

特性	比熱	熱伝導率	熱伝達率	密度
単位	Kcal / kg	Kcal / m hr	Kcal / mm2 hr	Kg / m3
コンクリート	0.3	31	12	
岩盤	0.49	1.23		1.8

表 - 5 解析諸定数

項目	物性値
ヤング率 (N/mm ²)	JSCE 圧縮強度より
ポアソン比	0.18
線膨張係数(µ/)	10
初期温度()	打込み温度
乾燥収縮ひずみ	JSCE 実験式
圧縮強度	圧縮強度結果
引張強度	JSCE 圧縮強度より

(2) 要素 1(上下流表面部)の温度ひび割れ指数 有意と判定された要因は,リフト厚と打設面 養生であった。要因効果図を図 - 7 に示す。最 大の寄与率を持つ要因は,リフト厚であった。 リフト厚が大きくなると内部温度が上昇し凍害 防止に有効であるが,反面温度ひび割れの面で は不利であることがわかる。

(3) 要素 2(リフト中央)の温度ひび割れ指数 (上部リフト打設前)

有意と判定された要因は,打設間隔,リフト 厚,および打設面養生であった。大きな寄与率 を持つ要因は,打設間隔とリフト厚であった。 要因効果図を図-8に示す。打設間隔が短いと 既設ブロックの剛性が小さく,また既設ブロッ クとの温度差も緩やかなため外部拘束応力が小 さくなり,温度ひび割れ指数が大きく温度ひび 割れ制御の面で有利であることがわかる。リフ ト厚が大きくなると,リフト形状 L/H が大きく なり外部拘束が緩和され温度ひび割れ指数が大 きくなる。ただし,リフト厚が大きくなると, 前述のように表面部の温度ひび割れ指数が小さ くなるので総合的な検討が必要である。

(4) 要素 2(リフト中央)の温度ひび割れ指数 (上部リフト打設後)

有意と判定された要因は,リフト厚であった。 要因効果図を図 - 9 に示す。上部リフト打設後 もリフト厚が大きいほど温度ひび割れ指数が大 きくなり,温度ひび割れ制御の面では有利であ ることがわかる。

5.2 要因水準値の組み合わせによる特性値の 推定(施工法の選定)

分散分析の結果を用いて,有意と判定された 要因水準値の組み合わせに対する特性値を推定 することができる。このことにより,所定の性 能を確保するための施工法を総合的に検討する ことが可能となる。以下に,リフト中央の温度 ひび割れ指数に対する検討例を示す。図 - 10 は, 要因組み合わせ 27 ケースに対するリフト中央 部の温度ひび割れの工程平均値(推定値)である。 この図から,所要の温度ひび割れ指数を確保す



図 - 3 圧縮強度評価式(A 配合)



図-4 圧縮強度評価式(B配合)



図-5 外気温データ

表 - 6	解析組合せおよび特性値結果
-------	---------------

∖項目	敏长田之水准	要素1		要素2		
NU	解伽西子小牛 組合わせ	小学 温度 指		指数		
NO	組合わせ	加皮	JEAX	前	後	
1	A1B1C1D1E1F1	5.5	6.7	14.4	3.6	
2	A1B1C2D2E2F2	6.9	4.5	20.0	1.8	
3	A1B1C3D3E3F3	9.2	1.5	20.0	3.8	
4	A1B2C1D2E2F3	10.1	1.3	20.0	6.4	
5	A1B2C2D3E3F1	8.5	6.4	20.0	1.2	
6	A1B2C3D1E1F2	8.0	4.0	2.2	1.8	
7	A1B3C1D3E3F2	10.2	4.4	9.5	1.4	
8	A1B3C2D1E1F3	10.0	1.2	20.0	4.6	
9	A1B3C3D2E2F1	10.0	6.2	2.0	1.6	
10	A2B1C1D2E3F2	8.9	6.3	20.0	1.7	
11	A2B1C2D3E1F3	11.2	1.3	20.0	10.5	
12	A2B1C3D1E2F1	6.9	8.3	4.3	3.3	
13	A2B2C1D3E1F1	9.1	5.3	3.3	2.3	
14	A2B2C2D1E2F2	9.3	5.1	20.0	1.9	
15	A2B2C3D2E3F3	13.3	1.4	20.0	4.8	
16	A2B3C1D1E2F3	16.8	1.3	20.0	2.8	
17	A2B3C2D2E3F1	11.2	8.3	20.0	1.4	
18	A2B3C3D3E1F2	11.9	3.1	1.8	1.3	
19	A3B1C1D3E2F3	19.9	1.6	20.0	3.8	
20	A3B1C2D1E3F1	12.1	7.0	20.0	2.5	
21	A3B1C3D2E1F2	11.4	4.9	3.8	2.2	
22	A3B2C1D1E3F2	15.2	6.9	10.1	2.2	
23	A3B2C2D2E1F3	20.7	1.3	20.0	6.8	
24	A3B2C3D3E2F1	14.3	6.9	2.5	1.8	
25	A3B3C1D2E1F1	13.7	5.7	2.2	1.8	
26	A3B3C2D3E2F2	19.2	3.9	20.0	1.2	
27	A3B3C3D1E3F3	23.0	1.7	20.0	3.8	

るための要因の組み合わせを把握することがで きるが、以下のように考えるとさらに明確にな る。いま,寄与率のもっとも大きな要因 C(打設 間隔)の水準ごとに温度ひび割れ指数をグルー プ化して観察すると, 各グループとも温度ひび 割れ指数はほぼ同様の傾向を示していることが わかる。そして,要因Cの第3水準のグループ が他グループに比べて温度ひび割れ指数が小さ くなっている。そこで,要因Cの第3水準値グ ループの 温度ひび割れ指数工程平均と要因 E, 要因 F との関係を示すと図 - 11 のようになる。 例えば,温度ひび割れ指数の目標値を2以上と すると,目標値を確保できない要因の組み合わ せは,95%の信頼区間を考慮すると(C1,E1,F 1),および(C1,E1,F2)であることが判明する。 以上のような検討を部材各部で各特性値ごとに 行い検討結果を総合すれば,最適な施工法を選 定することができると考える。



図-6 要素1要因効果図(温度)



図 - 7 要素 1 要因効果図(指数)



図 - 8 要素 2(打継前) 要因効果図







図 - 11 工程平均等高線

6. まとめ

本研究では,ダムコンクリート施工を例に取 り数多くの施工要因がコンクリートの耐久性な どの性能に及ぼす影響,ならびに所要の性能を 確保するための諸要因の組み合わせ(施工法の 選定)を,実験計画法の手法を適用して最小限の 数値解析(実験)から検討する方法を提案した。

本研究で得られた結論を以下にまとめる。 (1) 施工法選定を目的として多くの施工要因の 響を数値解析(数値実験)により検討する場 合,直交配列表を用いた実験計画法を用いる と数値解析量を大きく減じることができる。

- (2) 数値解析結果を分散分析することにより 各要因の効果,および要因間の交互作用を 一括して検討することができる。
- (3)分散分析結果をもとに各要因の組み合わせ に対する温度ひび割れ指数などの特性値の 工程平均から,所定の目標特性値を得るた めの施工法の選定を総合的かつ効率よく行 うことができる。
- (4) 拡張レヤー工法における温度ひび割れには、 リフト厚と打設間隔が大きく影響する。また,冬期施工におけるコンクリート凍害防止には断熱養生が有効である。

参考文献

- 1) 田口玄一:新版実験計画法上・下巻丸善株式会社,1972.11
- 2)土木学会:平成8年制定 コンクリート標準
 示方書 施工編