

1.3 温度ひび割れの分析手法に関する研究

研究年度：令和2年度～

研究分野：ダムコンクリートの劣化

調査研究名：温度ひび割れの分析手法に関する研究

研究者：川崎秀明

【要約】

ダムにおけるコンクリート温度ひび割れ対策は、従前から続く重要課題である。近年は合理化施工による打設速度の上昇とともにその重要性は増しており、ダム再生のコンクリート増厚工事においても新設ダムと違う面でひび割れ対策が重要な課題になっている。

そうした中、土木学会2013年制定の「コンクリート標準示方書 ダムコンクリート編」の改定作業が2021年秋に開始された。本論文は、この改定の事前整理に資するべく、ダムコンクリートの温度ひび割れ分析手法に関する主要文献を取りまとめたもので、温度ひび割れ分析手法の現状について整理するとともに、米国と日本の手法の違いについて考察した。

【キーワード】

マスコンクリート、温度ひび割れ、温度勾配、クラック分析、ACI

【背景・目的】

ダムにおけるコンクリート温度ひび割れの軽減は、戦前のコンクリートダム発展期から続く重要課題である。近年は合理化施工の進展で打設速度が上がるとともにその重要性は増しており、最近では、監査廊等の空洞構造物の配置や鋼製埋設型枠の普及も関係して温度ひび割れが増える傾向にあると思われる。また、ダム再生事業のコンクリート増厚工事における温度ひび割れの抑制も外部拘束への対応の難しさから、新設ダムと違う面で重要な課題になっている。

温度ひび割れを記載した具体的な書籍としては、ダム技術センター編集・発行の「コンクリートダムの細部技術（1983年2月初版、1987年3月改定版、2010年7月改定3版）」が最初であり、発生原因、発生パターン、補修例等が総括的に記された。また、ダム技術センター編集・発行の「多目的ダムの建設」（1987年改定版、2005年3月改定3版）においてもひび割れ予測手法が記された。

しかしながら、ダムコンクリートのひび割れについては施工者負担で補修されることが大半であり、具体的事例の紹介には至っていなかった。と言っても、鉄筋コンクリートにおいては、橋梁等の事故によって2010年頃にはひび割れが社会問題化し、設計や施工の責任問題が浮上するようになり、明確な原因究明が求められるようになってきた。ただし、ダムにおけるひび割れは、マスコンクリートの発熱による温度ひび割れであり、鉄筋コンクリートのひび割れとは様相が異なる。

そうした中、ダム工学会施工研究部会では数年を

かけてコンクリートダムの施工中における具体的なひび割れ事例が、発生位置・状況、温度解析、推定原因、補修対策等に分類、整理された。さらに、2021年7月には日本ダム協会から「コンクリートダムの温度ひび割れの現状と対応」が発行され、施工時の温度ひび割れの具体的な発生状況と対応事例が多数紹介されている。

「河川砂防技術基準設計編 第2章ダムの設計」改定版が2021年10月に公表され、改定前の1995年版と同様に、

- ・4.5.1節 温度規制計画の策定 において
「コンクリートダムでは、最高上昇温度及び温度履歴について考慮し、有害な温度ひび割れが生じないよう温度規制計画を策定するものとする。」
- ・4.5.2節 温度規制計画の策定 において
「コンクリートダムには、ダムコンクリートの有害な温度ひび割れを防止するため、適切な間隔で収縮継目を設けるものとする。」

と規定され、温度ひび割れ対応の重要性が最新事例でもって確認されている。

上記の動きに少し遅れるが、土木学会2013年制定の「コンクリート標準示方書 ダムコンクリート編」の改定作業が2021年秋に開始された。ダムコンクリート編は、ダムコンクリート工事の施工仕様を規定する契約図書であるので、近年の温度ひび割れに関する具体的な知見は、新たな示方書の中に多く活かされることになるとと思われる。

もちろん、働き方改革でダムコンクリートの施工

条件自体が大きく変わるため、ひび割れの発生環境も異なってくることを考慮する必要がある。このようにダムコンクリートのひび割れ対策は大きな変革期を迎えている。

一方、世界的には、米国の ACI (アメリカコンクリート学会) の ACI 委員会 207 (ダムコンクリート関係) による「マスコンクリートに関する技術報告シリーズ」がひび割れ知見に関する世界標準とされている。その最新は 2007 年刊行の ACI 207.2R-07 「Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete マスコンクリートのひび割れに影響を及ぼす温度と体積の変化に関する報告」である。

米国の温度ひび割れに関する研究は、Boulder dam (現フーバーダム) の建設前に始まり、1950 年頃には、現代につながるパイプクーリングやプレクーリングによるダムコンクリートの温度規制方法が確立された。このような経緯もあって、温度ひび割れに関する知見は米国によるものが圧倒的に多く、国内ダムの温度規制は米国流を基本としてきた。

【研究の経緯】

令和 1~3 年度： ひび割れ事例の現地・文献調査
 (1) 温度ひび割れの分析手法

現在の温度ひび割れの主な分析手法には、拘束度を用いた手法と FEM 解析がある。以下に両手法の現状と課題について記す。ここで、分析手法とは、ひび割れ予測や原因究明のための経験的または数値計算的な手法を意味している。

① 拘束度を用いた手法

当手法は、岩盤や既打設コンクリートによる拘束に起因する堤体中央部のひび割れ発生を許容ひずみとの比較から経験的に予測する簡易手法であり、国内・海外において、ひび割れリスクを予備的に評価する方法論として重要である。

<経緯>

拘束度の概念は、1980 年代の RCC 工法等の面状工法の進展とともに打設面中央部の引張応力を簡易的に知る経験的手法として米国等で普及した。

図-1 は、ACI 207.2R (次章参照) 収録の経験値に基づく拘束度であり、実際にはコンクリート躯体は岩盤で外部的に拘束されるか、または温度勾配の存在のため場所ごとに異なるコンクリートの変形によって内部的に拘束される。例えば、硬い基礎岩盤を仮定した場合コンクリートは岩盤との境界面で完全拘束($K_R=1.0$) を受けるが、境界面から離れるにしたがって図-1 に示すように拘束が減少する。異なる

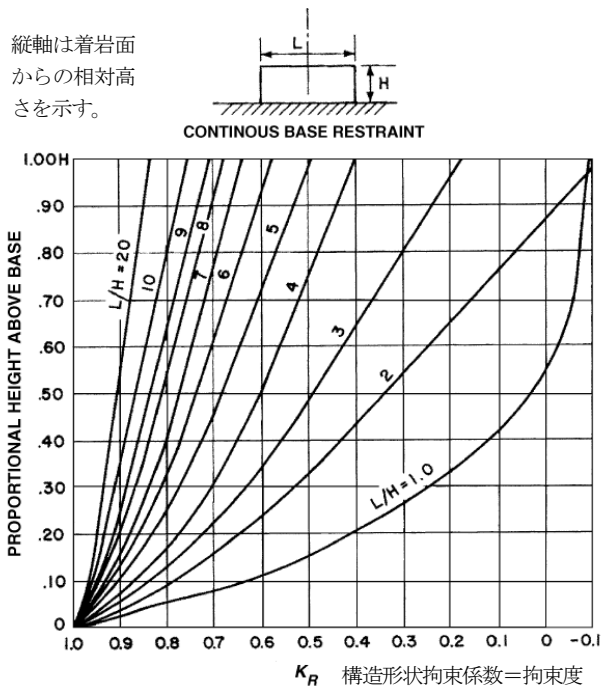


Fig. 5.1—Degree of tensile restraint at center section.

引張応力 σ_t は拘束度 K_R を用いて次式で表される。

$$\sigma_t = K_R [E/(1+\phi) a\Delta T]$$

σ_t : 引張応力、 K_R : 拘束度、 E : concrete 弾性係数、 a : 線膨張係数、 ΔT : 温度差、 ϕ : クリープ係数
 クリープによる応力低減への影響は大きい。

図-1 ACI 207.2R -23 における拘束度の考え方

リフト間の拘束についても同じ論理を適用できる。

日本における拘束度の最初の記述は、「多目的ダムの建設、1987 年版」であり、ACI の図を改良した拘束度と躯体形状の関係図が掲載された (図-2)。

「多目的ダムの建設、2005 年版」においては、拘束度マトリックス法による計算事例が追記された。拘束度マトリックス法は、1980 年代後半に日本で開発され、面状工法の打設開始時期や打設休止の影響を確認するための簡易法であったが、その後、数値計算によって拘束による打設面中央部の引張ひずみを厳密に確認する手法に変化した。

2013 年制定のコンクリート標準示方書ダムコンクリート編では、拘束度マトリックス法が標準編 4.2.2 予測手法の条文に追記され、「(1)温度ひび割れ予測に用いる手法は、実績を有しひび割れが発生する可能性を定量的に予測できるものでなければならない。手法としては、拘束度マトリックス法または有限要素法を標準とする。(2)温度ひび割れの評価指標は、拘束ひずみまたはひび割れ指数を標準とする。」と記された。

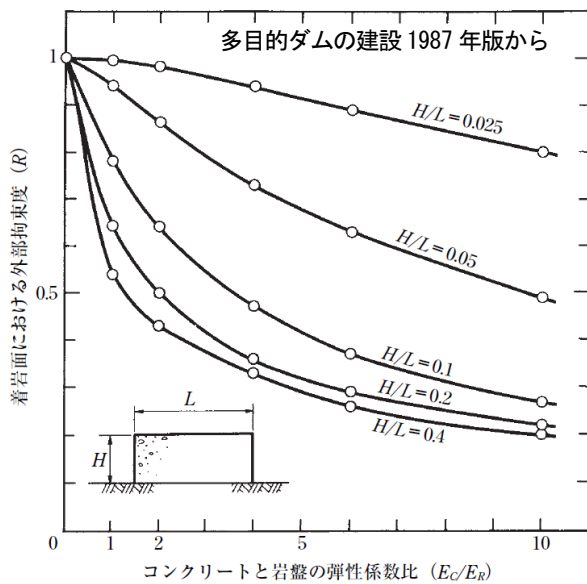


図 24-19 基礎岩盤による外部拘束度

図-2 日本における外部拘束度 (R) の考え方

$\sigma_t = R (E_c \alpha \Delta T) \cdots R$ 以外の定義は図-1 と同じ

図-2 は、一様な温度降下が生じるコンクリートブロックに対して、ブロックの縦横比と外部（岩盤）拘束度の関係を示した図である。ACI の図-1 と比べて横軸をコンクリートと岩盤の弾性係数比に修正し、岩盤拘束と打設面間との関係に特化しており、中間標高の拘束度を知ることができなくなっている。

拘束度マトリックス法は、この欠点を補うために標高別打設層をマトリックス化して、外部拘束のみならず内部拘束も拘束度に取り入れることができるように改良した手法であるが、以下の問題があり、現在は予備的な使用にとどまっている。

- ・ 打設面中央部の拘束度であるため、現地で実際に生じるひび割れ発生場面に使えない。
- ・ クリープと拘束度はともに応力低減をもたらすが、両者は発生メカニズムが全く異なるため、区別すべきである（図-1 参照）。
- ・ リフト層別に整然と温度収縮するのが前提にあるが、実際はそれほど単純ではない。
- ・ 拘束度自体が堤体位置や岩盤によって異なるため、着岩面に対して一様でない。

② FEM 解析法

コンピューター技術の発達によって、20 数年ほど前から国内海外を含めて温度ひび割れ分析には FEM 解析が一般的に用いられている。

拘束度を用いた手法と比べると、各種試験値との関係も明確であり、温度ひずみによる引張応力を細部位置まで算出することができる。打設から最終安定温度までの温度履歴解析も容易である。

ただし、現在の FEM 解析には下記の不確定要因があり、これらの影響を加味する必要がある。→は精度を高めるために今後一層望まれる対応策である。

- 温度以外の収縮（自己収縮＋乾燥収縮）：温度変化との時間差はあるが温度以外の収縮によっても引張応力は増大する。増厚や部材厚が薄い場合に影響が大きい。
→長さ変化試験を行うか、同種配合の既往値を用いることで温度以外の収縮量を把握して、FEM 計算条件に組み込む。
- 熱伝導の時間差と最終安定温度：堤体内部温度が高いほど最大温度勾配と引張ひずみは増大する。夏の吸熱温度上昇の内部状態が初冬に来る時がひび割れリスクが最大となる。
→堤体内部での温度計測結果を整理し最終安定温度までの温度変化を把握することで、温度履歴解析に活かす。
- 躯体表面からの熱放散：鋼製埋設型枠、冬場以外の断熱養生等については、使用時期によって応力増の要因となる。
→堤体表面での温度計測を行い、モデル解析と比較することで熱放散の影響を確認できる。
- 引張応力の低減：若齢コンクリートのクリープによって引張応力は低減する。マスコンクリートは一般のコンクリートと比べてクリープが大きい傾向がある。
→コンクリート長期引張試験（クリープ試験）によって長さ一定時の応力低下を計測する。材齢別に計測結果を組み込んだ FEM 解析を行う。
- ひずみ能力：コンクリートの引張ひずみ能力はひび割れ発生と直結する最重要項目である。マスコンクリートは一般コンクリートと比べてひずみ能力が大きい傾向がある。
→コンクリートの材齢別に供試体や採取コアによる室内試験（直接引張試験、割裂試験）を行い、材齢別に引張ひずみ能力を設定する。安全側に設定する場合は、一般コンクリートのひずみ能力限界値の 100μ を用いてもよい。
- 局部箇所や異なる方向での精査：断面変化部や空洞隣接部等においてひび割れが生じやすい。
→経験的にひび割れリスクが高い箇所においては、細部モデルを作成して FEM 解析による精査を行うべきである。
- 着岩面、打設面における付着：外部拘束は境界面の付着度合によって大きく影響されるが、実際の付着度合の確認が非常に難しい。付着が弱

いほど外部拘束は小さくなる。

→高品質の施工であれば 100%付着としてよい。国内ダムの実例はないが、ひび割れ対策が難しい場合は付着を切るという考え方もある。

viii. 既設ダム増厚・嵩上げ：増厚の場合は新設よりもひび割れリスクは高まる。特に、ダム軸方向における断面にひび割れが生じやすい。増厚部の厚みを厚くすると発熱量が高くなるため、温度解析上はひび割れリスクが高くなりがちだが、実際は薄い方が外部拘束増大によってひび割れリスクは高い。

→堤体のダム軸方向も精査し、必要に応じて目地を設置する。3次元詳細モデルによる FEM 解析が有効である。

③ ひび割れ指数の使用上の留意点

近年、ダムでもひび割れ指数（コンクリート引張強度／引張応力）によるひび割れ予測と評価が行なわれることが一般であり、FEM 解析で算出された引張ひずみは、ひび割れ指数によって確率的なひび割れ発生可能性として判断される。ただし、ダムコンクリートにおいては以下に留意する必要がある。

i. 現在一般に用いられるひび割れ指数の確率図は、鉄筋コンクリートを対象に作成されたものである。しかし、温度ひび割れ主体で部材厚も大きいダムコンクリートでは、ひび割れの発生機構が異なるため、ひび割れ指数がより大きい場合でもひび割れは生じにくい傾向がある。

ii. 鉄筋コンクリートにおいては、ひび割れ指数が低い場合は、増し筋による現実的かつ簡便な対応が可能である。ダムコンクリートでは、マスの大きさから鉄筋補強が非現実的であるため、最高温度低減等によってひび割れリスクを低減することになり、対応はより複雑である。

iii. 温度ひび割れの要因が複雑であるのに対してひび割れを確率評価にすることは、原因を曖昧にすることにつながりかねない。近年のダムでのひび割れ指数の使用例を見ると、再現解析の結果、指数が低いことが判っても、原因は乾燥収縮や環境温度の漠然としたものになりがちで、明確な原因推定につながっていない。

ダムコンクリートの場合、②の要因を考慮しつつ、まずは解析で求めた最大引張ひずみが、ひずみ能力の許容値を超えるとひび割れが発生すると判断すべきであり、これは次章の ACI と同様の考え方である。ただし、諸試験によってひずみ能力が正確に求められることが前提である。

④ コンクリートの体積変化とクリープ

ひび割れは体積変化と拘束によって生じる。即ち、水和反応後の温度収縮、乾燥収縮、自己収縮等によってコンクリートの体積変化が生じ、このことによってひずみエネルギーがひずみ能力の限界を超えるとひび割れが発生する。各収縮の起きる時間差もひび割れの発生に関係する。

さらに、拘束を減退させる作用としてクリープによる応力低下の影響も大きい。国内のダム文献ではその記述が非常に少ない。図-4 にクリープのメカニズムを示すが、リラクセーションによって応力低下が生じ、これはひび割れ発生を抑制方向に働く。

なお、国内のダムの温度解析ではクリープの影響も考慮しているが、ダムのようなマスコンクリートではクリープが一般コンクリートよりも大きいので、注意を要する。

上記の体積変化とクリープの上で重要であるのが、クラック進展の微視構造である。図-4 にそのメカニズムを示すが、クリープと体積変化は密接な関係にある。

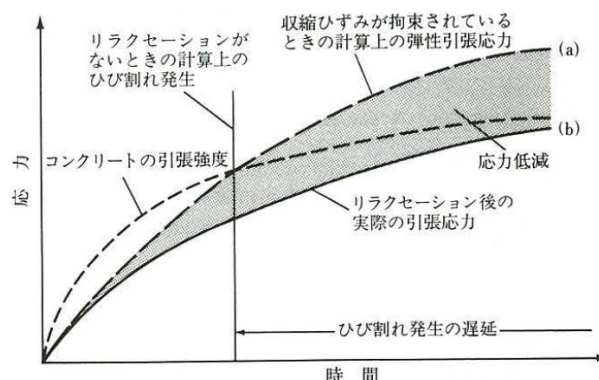


図-4 クリープによる応力低減の考え方

source : P. Kumar Mehta, P.J.M.Monteiro, Concrete 4th edition, 2014, 和訳版 コンクリート工学 微視構造と材料特性,1998

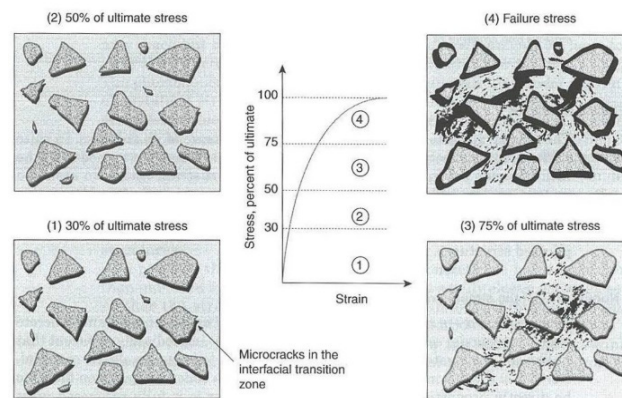


Figure 4-3 Diagrammatic representation of the stress-strain behavior of concrete under uniaxial compression. (Based on Glucklich, J., Proceedings of International Conference on the Structure of Concrete, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, Slough, U.K., pp. 176-185, 1968.) The progress of internal microcracking in concrete goes through various stages, which depend on the level of applied stress.

図-4 微細ひび割れにおける微視構造

出典：同上

(2) 米国における温度ひび割れに関する記述

ACI (米国コンクリート学会) の ACI 委員会 207 (ダムコンクリート担当委員会) によるマスコンクリート技術報告シリーズは、ダムコンクリートに関する世界標準の知見として普及している。温度ひび割れの最新は、2007 年 9 月刊行の「ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete マスコンクリートのひび割れに影響を及ぼす温度と体積の変化に関する報告」であり、これは 1995 年刊行の「ACI 207.2R-95 Effects of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete」を改定したものである。

紹介する ACI 207.2R-07 技術報告は、マスコンクリートの要素と構造の設計と挙動に対する、発熱と体積変化の影響について説明している。特に、ひび割れに対する拘束の効果と、制御された打設温度、コンクリート強度要件、および体積変化に対する材料特性の効果に重点が置かれている。以下、重要箇所について抄訳 (枠内に表示) を紹介する。インターネットで書籍名を検索すれば英語本文を容易に入手できるので、詳細はそちらで確認されたい。

右欄に、ACI 207.2R-07 技術報告の目次を示す。下線は ACI と比べて国内指針 (コンクリート標準示方書等) での記述が不足する項目であり、以下はその概述である。

- i. 一般コンクリートとの対比: 国内では、ダム用のマスコンクリートのひび割れを鉄筋コンクリートの手法で対応していることが多い。
- ii. 温度勾配: 温度勾配 (温度差/距離) がひび割れ発生に最大の影響を及ぼす。温度勾配の最大箇所が判れば原因推定も容易となる。型枠との関係も記すべきである。
- iii. クリープ: ダムコンクリートはクリープの影響が大きいが、クリープの国内記述は少ない。
- iv. ひずみ能力: 米国のダムでは引張ひずみが当値を超えるとひび割れが生じるとし、確定論としてのひび割れ予測の重要指標としている。
- v. 体積変化: 温度収縮、乾燥収縮、自己収縮等の収縮の種類や程度、収縮の時間差、ひずみエネルギー、微視構造等の記述が少ない。
- vi. 水分含有量と乾燥収縮: V/S (体積/露出表面積) が小さい場合、乾燥収縮は外部拘束によって引き起こされる応力に追加される。
- vii. 拘束: ひび割れは拘束によって引き起こされる。内部拘束と外部拘束のメカニズムをより丁寧に記すべきである。

ACI 207.2R-07、Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete

Reported by ACI Committee 207

マスコンクリートのひび割れに影響を及ぼす温度と体積の変化に関する報告 (2007 年 9 月)、ACI 委員会 207 による技術報告

目次

第 1 章-はじめに、p. 207. 2R-2

1. 1-適用範囲

1. 2-マスコンクリートと構造コンクリートの対比

1. 3-ひび割れ制御のアプローチ

第 2 章-温度挙動、p. 207. 2R-3

2. 1-一般

2. 2-温度勾配

第 3 章-物理特性、p. 207. 2R-4

3. 1-一般

3. 2-強度要件

3. 3-引張強度

3. 4-クリープ

3. 5-コンクリートの熱特性

3. 6-弾性係数

3. 7-ひずみ能力

第 4 章-熱伝導と体積変化、p. 207. 2R-8

4. 1-発熱

4. 2-水分含有量と乾燥収縮

4. 3-外気温度

4. 4-打設温度

4. 5-供用中の最終温度

4. 6-熱放散

4. 7-要約と事例

第 5 章-拘束、p. 207. 2R-22

5. 1-一般

5. 2-連続的な外部拘束

5. 3-内部拘束

第 6 章-ひび割れ幅、p. 207. 2R-25

6. 1-一般

6. 2-収縮継目 (ひび割れ制御継目)

6. 3-規制

第 7 章-参考文献、p. 207. 2R-26

7. 1-参照される基準と技術報告

7. 2-引用文献

付録 A、p. 207. 2R-27

A. 1-表記

A. 2-メートル法変換

重要なキーワードとして下記が挙げられている。

キーワード：adiabatic 外気環境、cement セメント、concrete cracking コンクリートひび割れ、creep クリープ、drying shrinkage 乾燥収縮、foundation 基礎、heat of hydration 水和熱、mass concrete マスコンクリート、modulus of elasticity 弾性係数、placing 打設、portland cement ポルトランドセメント、pozzolan ポゾラン、restraint 拘束、stress 応力、temperature 温度、tensile strength 引張強度、thermal expansion 温度膨張、volume change 体積変化

第1章-はじめに Introduction [抄訳 p.1-2]

1-適用範囲

適用対象は、一般に厚さが18インチ(460mm)以上のマスコンクリート部材であり、それほど大きくないコンクリート部材も対象とする。・・・

1.2 マスコンクリートと構造コンクリートの対比

マスコンクリートは、ACI116Rで「ひび割れを最小限に抑えるために、セメントの水和とそれに伴う体積変化による熱の発生に対処するための対策を講じる必要があるほど大きな寸法のコンクリートの体積」と定義されている。・・・

マスコンクリートの挙動を構造用と区別する最も重要な特性は温度挙動である。一般に構造物が大きいほど、構造物の内部と外面の間に大きな温度差が生じて、その後、体積変化の差と拘束により、引張ひずみと応力が発生し、構造設計、供用性、外観等に悪影響を与えるひび割れが発生する可能性がある。・・・

1.3-ひび割れ制御の方法

何日も続いての温度上昇が、弾性率(剛性)の上昇と同時に起こる。これらの状況下でさえ、打設マス全体に対して次のことが為されれば、ほとんど問題にならない。

1. 最高温度を最終温度に近い値に規制
 2. 露出面を含め、躯体全体で同じ温度に維持
 3. 拘束されることなく支持される
 4. クリープによってストレスを軽減
 5. 剛性を有していない
- ・・・

[説明]

○マスコンクリートでは主に温度差による体積変化と拘束によってひび割れが発生する。体積変化と拘束の発現の時間経緯を考える必要がある。

○ひび割れ制御方法の1と2は、国内の大半のダム

施工において実施されているが、ひび割れを完全に防止することはできない。最終温度とは、供用中の最終的に冷却された安定温度のことである。

選択肢3は、目地・継目、縁切りシート等の使用が該当する。選択肢4,5は、硬化が遅いほど、剛性が弱いほどひび割れは軽減できるという意味であるが、コンクリート強度も低くなるために変形やひび割れをある程度許容する必要がある。

なお、マスコンクリートにおける発熱とそれに伴う温度上昇は、水和反応によって弾性特性が発現する前に急速に発生するため、この段階では引張応力はほとんど発生しない。

第2章 温度挙動 Thermal behavior [抄訳 p.2-3]

2.2-温度勾配 Thermal gradients

温度勾配は、マス温度勾配または表層温度勾配のいずれかに分類される。マス温度勾配は、コンクリートマスと拘束基礎の温度差である。・・・

ひび割れを引き起こすようなひずみと応力はマス温度勾配とその結果として生じる体積変化によって引き起こされるが、これらは、マスコンクリート物性、基礎岩盤、構造物形状によるコンクリートと岩盤との接触等によってもたらされる。・・・

表層温度勾配によるひび割れは、多くの場合、深さは浅い。ただし、マス温度勾配の体積変化または他の荷重条件と合わさった条件においては、表面ひび割れが構造物に深く進展する可能性があり、ひび割れ条件を組み合わせて増大させる可能性がある。・・・

コンクリートの露出面の挙動は、周囲温度の日時および年間サイクルの影響を大きく受ける(ACI 305R)。表面コンクリートの温度変化は、毎日の気温変化と同じになる。表面から2フィート(0.6m)の深さでは、コンクリートの温度変化は気温変化よりもはるかに小さく、おそらく毎日の表面温度の変動の10%にすぎない。・・・

[用語]

- ・ 温度勾配：温度差/熱伝導の経路長
- ・ マス温度勾配：堤体全体の温度勾配
- ・ 表層温度勾配：表層コンクリートの温度勾配
- ・ 拘束基礎：基礎岩盤または硬化コンクリート

[説明]

○体積変化は、構造内の温度変化の直接的な結果である。特定の経路に沿って、または構造の断面を通過する温度変化は、温度勾配と呼ばれる。温度勾配

は、構造を通る特定の経路の温度の時間履歴を確立することによって決定される。

大きなコンクリート塊が内部のピーク温度からほぼ年間平均温度に等しい安定した温度に冷える時の長期的な最大内部温度変化が、マス温度勾配である。

表層温度勾配は、より安定した内部温度に対するコンクリート表面の冷却の結果である。「表層」が冷却によって収縮すると、表層に張力が発生してひび割れが発生する。この場合、内部コンクリートは表層に対する拘束面になる。

内部コンクリートにおいては、長期間にわたって発生する気温の変動（たとえば、気温の季節変動）による温度変動がさらに少なくなる。表層ひび割れが深いひび割れに進展するメカニズムが重要である。

第3章 物理特性 Properties [抄訳 p.3-8]

3.1—一般

この章では、ひび割れの制御に影響を与える大規模コンクリートの主要特性について説明し、それらを評価するための目安を示す。・・・

3.2—強度要件

鉄筋コンクリートの断面は、コンクリート強度とは関係なく設定されることがよくある。・・・

3.3—引張強度

内部の熱体積変化による引張応力を考慮する場合、実引張強度は最も重要な考慮事項の1つであり、限界体積変化に時間的に対応するように決定する必要がある。コンクリート材齢が増すほど、圧縮強度に対する引張強度が大きくなる。・・・

3.4—クリープ

クリープは、厚いコンクリートに熱的に誘発される応力を緩和する上で大きな役割を果たすが、温度変化が比較的短時間で発生する薄いコンクリートセクションではあまり役割を果たさない。・・・クリープ特性によって生じる応力緩和は、いくつかの方法で温度解析に使用される。弾性係数は、弾性段階での応力-ひずみ関係に関連している。この特性の変化が持続弾性係数である。持続弾性係数は、クリープによって提供される応力緩和を効果的に説明するために、いくつかのクリープ係数によって減少した弾性係数である。同様に、引張ひずみ能力と呼ばれる特性がある。これは、引張ひずみ特性を修正したものである。・・・

3.5 コンクリートの熱特性

コンクリートの熱特性は、膨張係数、導電率、比熱、および拡散係数である。拡散係数、導電率、および

比熱の関係は、(ASTM 2006)によって定義される。・・・

3.6 弾性係数

測定可能な弾性係数に達する前に、応力の発生を伴わずに体積変化が発生する。打設後、コンクリートは弾性的に変形し始める。より正確な決定がなされない限り、硬化コンクリートの引張および圧縮の弾性係数は、○○に等しいと見なすことができる。・・・

3.7—ひずみ能力

引張強度ではなく引張ひずみ能力に基づく設計の方が、より便利で単純であり、そこでの基準は線形または体積上の変化で表される。例として、温度や乾燥による収縮現象がある。・・・

[用語]

- ・ クリープ:クリープは荷重一定時の非可逆性の変位を示し、リラクセーションは長さ一定(変位拘束)時の非可逆性の荷重変化を示す。
- ・ 応力緩和:クリープ時のリラクセーションによるひび割れによって引張応力は低下する。
- ・ 持続弾性係数:時間経過によってコンクリートの弾性係数は上昇するが、クリープによってコンクリートの弾性係数は低下する
- ・ 引張ひずみ能力:ひび割れに耐える限界ひずみを意味する。
- ・ 実引張強度 actual tensile strength:ひび割れには引張強度の真値が大きく関係する。
- ・ 限界体積変化 critical volume change:体積変化の限界は打設後の時間経過とともに変化する。このため、引張強度は時間的に変化する。

[説明]

○マスコンクリートと鉄筋コンクリートでは強度上の必要条件が異なる。マスコンクリートのひび割れを鉄筋で対応する場合はこのことをよく考える必要がある。

○コンクリートの引張強度は、使用する骨材の種類と特性に影響される。砕いた粗骨材から作られたコンクリート拘束は、丸みを帯びた粗骨材から作られた同等のコンクリートよりも、ひび割れすることなく大きな温度低下に耐えることができる。

一方、圧縮強度においては、骨材の種類は引張強度にそれほど影響しない。

○クリープの主な効果は、水和反応進行後の微小要素における乾燥収縮応力の緩和である。従って、最大温度変化が比較的短時間で発生する場合、クリープは温度応力をわずかに減じるだけである。

また、弾性係数の発現前に生じる体積変化はひび割れに影響しない。

○引張ひずみ能力は、最も重要な要因の一つであり、日本において、引張ひずみ能力は過去の実験から100~200 μ として、用いられている。国内主流のFEM解析では温度ひずみを引張応力に換算し、ひび割れ指数としてひび割れ発生可能性を確率評価しているが、確定論でないため予測の不確実性が残る。

一方、米国における引張ひずみ能力の試験は、内部ひずみゲージを含む大きなマス体の梁またはプリズムのテストでコンクリートごとに決定され、曲げまたは直接引張でテストされ、大きな梁に埋め込まれたゲージによって測定される。ただし、簡便性から、間接または割裂試験を使用してコンクリートの引張強度特性を取得し、これを弾性係数で割って引張ひずみ能力に変換するのが一般的である。なお、これらの値は間接引張強度であり、推定される直接引張強度に最初に換算しておく必要がある。

第4章 熱伝導と体積変化 Heat transfer and volume [抄訳 p.8-22]

4.1- 一般

温度ひび割れにつながる体積変化は、初期の水和中に到達したコンクリートのピーク温度（通常は打設後1週間以内）と、使用条件下で要素が受ける最低温度との温度差による。・・・

4.1-発熱

設計強度の要件、耐久性、および利用可能な骨材の特性によって、コンクリートのセメント含有量が大きく左右される。発熱を制限するためのエンジニアの選択肢は次のとおりである。

- 1.低熱ポルトランドセメントの使用
- 2.混合水硬性セメント（ASTM C 595）の使用
- 3.フライアッシュ、天然ポゾラン等の使用

4.2-水分含有量と乾燥収縮

水分移動長またはV/S（体積／露出表面積）が小さい場合、乾燥収縮は外部拘束によって引き起こされる応力に追加されるため、（鉄筋）補強を設計で考慮する必要がある。

V/Sが大きい場合、乾燥収縮の拘束は完全に内部的なものであり、その結果、表面に張力がかかるか、コンクリート内にわずかな距離しか伸びない広範なパターンの表面ひび割れが発生する。この種の表面ひび割れが発生した場合、ひび割れは小さいため、鉄筋補強はこれらのひび割れの幅や間隔を軽減するのに効果的ではない。

4.3-外気温度

打設および冷却条件が適切である場合、混合物に使用されるセメントの種類または量に関係なく、特に薄い露出部材では、水和による温度上昇は小さい可能性がある。一方、同じ部材を断熱した形で高温に置くと、高温になる可能性がある。

原則として、特別な注意を払わない場合、型枠に打設されたときのコンクリートの温度は、外気温度よりわずかに高くなる。巨大なコンクリート構造物の内部の最終的な安定した温度は、その地理的な場所での年間平均気温に近似する。

4.4-打設温度

暑い気象条件の場合、ACI305Rは、打設条件に応じて、コンクリートの初期打設温度を最大24~38 $^{\circ}$ Cに制限することを勧めている。暑い時期に打設されたコンクリートの温度は、コンクリートまたは粗骨材を冷却するための対策を講じない限り、1日の平均気温を3~6 $^{\circ}$ C超える可能性がある。気温と打設温度の違いを修正するには、図4.6を使用する。例えば、24時間の外気温度が27 $^{\circ}$ C、打設時のコンクリート温度が16 $^{\circ}$ C、V/Sが0.6mの場合、温度差の60%、つまり7 $^{\circ}$ Cを吸収する。夏の最高気温は、地域の夏季最高平均気温となるが、38 $^{\circ}$ C（100 $^{\circ}$ F）を超えないようにする必要がある。

打設時の最低コンクリート温度推奨値は、ACI306Rの表3.1に記載されている。これらの最小値は、考慮すべき最低の打設温度である。

春と秋の打設温度は、夏と冬の打設温度のほぼ中間であると合理的に考えることができる。

4.5-供用中の最終温度

コンクリート内部要素において予想される最終的な温度は、それらの長期的な暴露条件によって影響される。施工中のより低温の時に発生または開く可能性のあるひび割れは、供用期間に閉じると予想されるため、ひび割れの主な懸念事項は最終的または供用中の暴露条件である。

コンクリートの最低温度は、打設後約1週間の間に発生する平均最低暴露温度と安全側に見なすこともできる。

4.6-熱放散

マスコンクリート本体からの熱放散の推定は、チャートやグラフを使用するか、手作業で計算するか、有限要素コンピュータプログラムを使用し行うことができる。特定のコンクリートを流れる熱の相対的な能力を決定する特性は、その熱拡散率である。これは、式(3-1)で定義されている。

[用語]

V/S : サイズまたは体積対露出表面積比、the size or volume-to-exposed surface ratio

[説明]

○コンクリート要素における主な懸念事項は、熱および湿気の変化に起因する体積変化である。その他の体積変化として、アルカリ骨材の膨張、自己収縮、膨張性セメントによる変化等がある。自己収縮は、水和中に発生する化学的体積変化である。

コンクリートの発熱速度と大きさは、セメントとポゾラン（存在する場合）の単位体積あたりの量、セメントの化合物の組成、セメントの細かさ、および水和中の温度に依存する。米国のセメントでは下記のもの推奨されている。これらは減水剤によってセメント量を削減してもよいとされている。

- ・低熱ポルトランドセメントの使用 : ASTM C 1157 のタイプ LH、MH、ASTMC150 のタイプ IV、V、または II、中程度の熱オプション付き
- ・混合水硬性セメント (ASTM C 595) の使用 : タイプ IS (MH)、IP (MH)、P (LH)、I (PM) (MH)、I (SM) (MH)、MH、または LH はより堅固な水和熱特性を示す。ポルトランドセメントクリンカーに水和熱制限オプションを課している。
- ・フライアッシュ、天然ポゾラン等の使用 : スラグやポゾラン材料によってセメント量を減らし、長期的な強度を保持しつつ最高温度を下げる。

○引張応力を考慮すると、乾燥収縮による体積変化は、硬化コンクリートからの水分の損失が熱の損失に比べて非常に遅いことを除いて、温度による体積変化と同様である。したがって、乾燥収縮は水分移動経路の長さに依存し、表面近くのコンクリートに影響を与えることがよくある。

V/S が大きい場合、鉄筋補強は塑性ひび割れ (ACI 116R) と呼ばれるフレッシュコンクリートの表面ひび割れの解決策でないが、V/S が小さいほど、乾燥収縮による引張応力の発生が大きくなるため、鉄筋補強が有効となる。

○ひび割れ要因として、外気温度の影響は大きい。多くの構造物では、最も重要な温度の考慮事項は、コンクリートの打設中および打設直後の平均気温、および構造物の寿命中に予想されるコンクリートの最低平均温度である。

○コンクリート打設温度は、月平均外気温度とはほぼ同じか、数度高いと推定できる。仕様は通常、通常および極端な打設条件でのコンクリートの最大および最小打設温度を制限する。

○ダム の 供 用 中 の 最 終 温 度 は、最 終 安 定 温 度 と も 呼 ば れ、供 用 中 の 暴 露 条 件 に よ っ て 大 き く 影 響 さ れ る。最 終 温 度 は、温 度 ひ び 割 れ に 重 大 な 影 響 を 与 え る 最 終 的 な 温 度 勾 配 を 決 定 す る 要 因 で も 有 る。

第5章 拘束 Restraint [抄訳 p.22-25]

5.1 一般

収縮を拘束することは、ある程度までその発生を抑止、抑制、制限または制約することである。拘束度 K_R は、完全に拘束された場合に生じる応力に対する体積変化から生じる実際の応力の比率である。ひずみは、数値的には、問題箇所に存在する拘束の程度と、コンクリート躯体が拘束されていない場合の単位長さ変化の積になる。躯体内の全要素は、通常、支持要素または躯体自体による何らかの拘束があるため、体積がある程度拘束される。

以下の説明では、考慮すべき拘束のタイプは、躯体内の全要素における連続的な外部拘束とある程度の内部拘束である。接合されていない硬い岩盤の上に置かれたコンクリート躯体は、コンクリートと岩石の境界面で本質的に拘束されるが、図 5.1 に示すように、拘束の程度は岩盤上の位置で大幅に減少する。

降伏状態の基礎は、100%未満の拘束を引き起こす。基礎自体への熱の流れの結果として、岩盤の近くのコンクリートの温度上昇（およびその後の低下）が減少するため、岩盤面での全体的な拘束が緩和される。

5.2-連続的な外部拘束

コンクリートおよびコンクリートが打設された材料の接触面に沿って、連続的な拘束が発生する。拘束の程度は、主にコンクリートと拘束材料の相対的な寸法、強度、弾性係数に依存する。

5.2.1 応力分布

定義上、ひび割れのないコンクリート部材の任意の点での応力は、コンクリートのひずみに比例する。部材の基部で連続的に拘束され、水平方向の長さが均一に変化する部材の水平応力は、部材全体の拘束の程度の変化に応じて、点ごとに化する。大規模構造の拘束条件をより完全にモデル化するために、構造形状拘束係数 K_R と基礎拘束係数 K_f の2つの拘束係数が開発された。

5.2.1.1 構造形状拘束係数 K_R

拘束の分布は、部材または構造要素の長さ-高さ比 (L/H) によって異なる。リフトの時間経過なしに打設されたコンクリートの場合をグラフで示す (図-1 図-1 参照)。この図は、クラッキング評

価における長年の経験から発展したものである。その起源は、Carlson (1937) によって最初に報告され、後に米国開拓局 (1965) によって公開されたテストデータに由来している。拘束係数 K_R は、コンクリート構造物の相対寸法に基づく式 (5-1) で算出され、拘束と応力の程度を表す。

5.2.1.2 基礎拘束係数 K_f

拘束によるコンクリートの応力は、拘束基礎材料の剛性の低下に正比例して低下する。使用される基礎拘束係数 K_f は式 (5-2) で算出される (米国開拓局 1965)。一般に、岩盤上のマスコンクリートの場合、最大有効拘束マス体面積 A_F は $2.5A_g$ と仮定でき、乗数の値を表 5.1 に示す。拘束度 K_R と K_f を使用して、長さの減少による中心線上の任意の点での引張応力を計算できる。

5.3-内部拘束

内部拘束は、メンバー内の体積変化の差に依存する。その効果は、それらの合計が 100% の外部拘束の効果を超えることは決してないことを除いて、代数的に外部拘束の効果に追加される。したがって、高い外部拘束条件が存在する場合、内部拘束の影響は無視できる可能性がある。

例えば、最小寸法が約 2 フィート (0.6 m) を超えるほとんどのコンクリート構造物の内部は、型枠が脱型された時点で気温よりも高い温度になる。コンクリートと型枠の境界では、コンクリートの温度は内部の温度より低くなるが、空気の温度より高くなる。

鋼製型枠の場合、後者の違いは小さいかもしれないが、断熱スチールまたは木製型枠の場合、違いはかなり大きいかもしれない。それらの場合、型枠が取り外されると、コンクリートは表面近くで急激な温度勾配の増大にさらされる。この突然の温度急変化は、表面ひび割れを引き起こす可能性がある。

涼しい秋の月が近づくか、貯水池が冷たい流出で満たされると、同じ状況が発生する。

気温が急激かつ大幅に低下すると、表面近くの温度勾配が急激に増大し、引張ひずみがほぼ 100% 拘束され、ひび割れ発生しやすい状態となる。

型枠のないむき出しのコンクリート表面も同様である。

これらの危険な状態は、2 番目以降の寒い季節にはほとんど回避されるが、それは内部のコンクリートから多くの熱が失われ、表面付近の温度勾配がはるかに緩和されているためである。

[用語]

基礎拘束係数 K_f を求める式 (5-1)

$$K_f = 1 / \{1 / (1 + A_g E_c / A_F E_F)\}$$

A_g : コンクリート躯体の横断面の全面積

A_F : 基礎の横断面の全面積

E_c : コンクリート弾性係数

E_F : 基礎の弾性係数

引張応力 f_i を K_R (図-1) から求める式 (5-2)

$$f_i = K_R K_f \Delta c E_c$$

f_i : 引張応力

K_R : 構造形状拘束係数

Δc : 無拘束時のコンクリート単位収縮量

[説明]

○コンクリートの塊または要素内の温度の低下に関連する長さまたは体積の変化が自由に発生する場合、拘束によって引き起こされる引張ひずみまたは応力は発生しない。巨大なコンクリート構造物と基礎の間、隣接する構造要素の間、またはコンクリート部材の内部で潜在的収縮が発生するのを防ぐ (拘束する) と引張ひずみと応力が発生する。

即ち、拘束されなければひび割れは生じない。

拘束された体積変化は、拘束のタイプと体積の変化が増加であるか減少であるかに応じて、要素に引張、圧縮、または曲げ応力を引き起こす可能性がある。コンクリートは圧縮に耐える能力があるため、通常、コンクリートに圧縮応力を誘発する拘束条件は重要でない。拘束条件の主な懸念事項は、コンクリートに誘発される引張応力がひび割れにつながる可能性があることである。

○収縮を外部拘束することで、ある程度までひび割れの発生を抑えることができるが、ひずみエネルギーは蓄積される。拘束によって蓄積されたひずみエネルギーが一気に放出された場合、大きなひび割れにつながる可能性がある。接合面の付着を強くすればするほど大きなひび割れが出やすくなるのは皮肉なことである。

○内部拘束は、断面の体積変化が不均一な部材に存在する。これは、たとえば、壁、スラブ、または表面温度よりも高い内部温度の塊、または外側から内側への乾燥収縮の差がある塊の内部で発生する。また、外縁が冷たく、内部が暖かい建物の壁から突き出ているスラブや、下部または下部が覆われ、上部が空気にさらされている壁でも発生する。

晩秋や冷水が流入する頃が、温度勾配が最大となるため、内部拘束によるひび割れリスクの最大となる時期である。

第6章-ひび割れの幅 Crack Widths [抄訳 p.25-26]

6.1-一般

大きくかつ非一定間隔のひび割れは、通常、ほとんどの構造で好ましくない。補強コンクリートにおけるこのようなひび割れ時は、ひび割れを横切る補強構造が降伏している可能性がある。

マスコンクリートで使用される場合、補強材は、発生しうるひび割れの大きさを規制することを目的としている。問題のある構造や補強の主要目的によっては、大きなひび割れを引き起こす懸念がある。

表面ひび割れの幅は、美的観点から重要であり、測定が容易であり、ほとんど規制対象となる。表面のひび割れ幅は、最初は補強材のひび割れの幅よりも大きいかもしれないが、その差は時間とともに減少すると予想される。

同様に、繊維強化は、単一の大きなひび割れではなく、多くの細かいひび割れを生じさせる。ただし、通常達成される繊維補強の割合では、繊維の効果は限られている可能性がある。

保水が要求される場合、少なくとも最初は、非常に狭く、ほとんど見えないひび割れ (0.002 インチ [0.05 mm]) が漏れる可能性がある。ただし、0.005 インチ (0.13 mm) までの動かないひび割れは、過剰な水分の存在下で治癒する可能性があるため、継続的に漏れることはないかと予想される。漏れがあると、露出したコンクリート面が汚れたり、表面コーティングに問題が発生したりする可能性がある。コンクリート構造物のひび割れを制御するための補強材を設計するための方法は、ACI224R によって提供される

6.2-ひび割れ制御継目 (収縮継目)

制御されていないひび割れの大きさと数を減らすために、伸縮継ぎ手や収縮継目を使用することは、長年にわたって一般的な方法であった。歩道や舗装の建設では、形成された溝を使用して弱点の平面を作成し、それによって溝の直線と一致するひび割れを誘発した。

6.3-規制

マスコンクリート構造物のひび割れの幅は、構造物の機能に合わせて実用的な最小サイズに規制することが望ましい。

鉄筋コンクリート構造物は、通常、ACI318または350にしたがって設計される。ACI 224Rの表4.1の妥当なひび割れ幅と暴露条件は、許容可能なひび割れ幅の歴史的な観点を表わす。それらは、許容

できると考えられるひび割れ幅の参考となる。

部材が大きくなるにつれて、補強材を使用してひび割れ幅を規制することはより困難になる。

全ての部材において温度ひび割れを制御する最も効果的な手段は、水和作用によるコンクリートの発熱温度を規制することである。これは部材が大きくなるにつれて一層重要になる。

[説明]

補強材の使い方を間違えるとより大きなひび割れにつながる事が強調されている。繊維補強についても述べられており、大きなひび割れを発生させない点で効果的であるとしている。

収縮継目の設置方法には簡便な方法も多くある。収縮継目の概念は、巨大な壁やスラブのひび割れを制御する方法として英国で発展した。この方法は、RCCコンクリートダムの表層での従来コンクリートの施工にも発展している。

温度ひび割れを制御する最も効果的な手段は、そのコンクリートの最高温度を低減することである。

【結果とりまとめ】

① 温度ひび割れの分析手法

現在の温度ひび割れの主な分析手法には、拘束度を用いた手法とFEM解析がある。

拘束度を用いた手法は、岩盤や既打設コンクリートによる拘束に起因する堤体中央部のひび割れ発生を許容ひずみとの比較から経験的に予測する簡易手法であり、ひび割れリスクを予備的に評価する方法論として重要である。

FEM解析は、国内海外を含めて温度ひび割れ分析の一般的手法である。各種試験値との関係も明確であり、温度ひずみによる引張応力を細部位置まで算出することができる。打設から最終安定温度までの温度履歴解析も容易である。今後もFEM解析がひび割れ分析の主要な方法となるが、諸試験値の反映による解析精度の向上が必要である。

② ACI 技術報告

ACI207.2R-07の内容は、ダムコンクリートの温度ひび割れ分析に関する世界的な指標となっている。

日本の温度ひび割れに関する文献と比べて、温度ひび割れのメカニズムを詳細に記載しており、引張ひずみ、体積変化、クリープ、外部・内部拘束等の参考にすべき事項は多い。現在の国内のダムコンクリートは、鉄筋コンクリートに代表される一般コンクリートの指標を使っているケースが多いが、温度ひび割れの観点からは明確に区別すべきである。