

1. はじめに

近年、コンクリート構造物に発生するひび割れが問題となっている。橋台やボックスカルバート等のマスコンクリートでは、打設初期段階において乾燥収縮ひび割れのほかに温度ひび割れといわれるセメントの水和熱により構造体が収縮膨張する際、外部拘束によって自由に収縮できず、構造体内部に引張応力が発生することで生じるひび割れが発生する。実構造物においては、構造体は底面または底面と両端を固定されていることが多く、ひび割れが発生しやすい状態にある。温度ひび割れは構造物を橋軸直角方向に貫通するものが多く、構造物の景観を損ね、耐久性に大きな影響を与えるため、施工前の段階から十分な対策を検討することが重要となってくる。これまで多くの研究者によって研究がなされているものの、ひび割れの発生位置やひび割れ幅を予測することは難しいとされている^{1)~3)}。そのため、ひび割れからの劣化が問題とならないような場合にはそれを許容するという考え方がある。すなわち、コンクリート構造物に発生するひび割れは発生することよりも、その幅が問題とされている。本研究では、山口県の工事データを分析し、打設間隔および鉄筋比の違いがひび割れ幅に与える影響について確認する。

2. 実構造物の状況

(1) 概要

実構造物におけるひび割れの発生状況を確認するために、山口県のコンクリート工事のデータベース⁴⁾を使用した。橋台たて壁工事のうち、ひび割れが発生した93リフトを対象に、合計ひび割れ幅、最大ひび割れ幅、平均ひび割れ幅、鉄筋比とひび割れ本数の関係を調査した。橋台は高さが高いため、複数回に分けてコンクリートを打設する。各打設ごとに分割した構造物のことをリフトという。構造物のデータの範囲を表-1に示す。

(2) 鉄筋比—合計ひび割れ幅

表-1 構造物のデータ範囲

高さ(m)	厚さ(m)	幅(m)	セメント種類	
1.2~5.4	1.2~3.0	6.7~31.1	高炉B種89体, 普通3体, 低発1体	
鉄筋比(%)	試験強度(N/mm ²)	コンクリート打設温度(°C)	コンクリート最高温度(°C)	
0.04~0.48	30.3~40.9	6.0~29.0	37.3~75.5	

鉄筋比と合計ひび割れ幅の関係を図-1に示す。鉄筋比0.1%付近のリフトと鉄筋比0.3%付近のリフトのどちらも、合計ひび割れ幅は約0.05mm~約1mmと鉄筋比の増加による合計ひび割れ幅の変化はあまり見られなかった。

(3) 鉄筋比—平均ひび割れ幅

鉄筋比と平均ひび割れ幅の関係を図-2に示す。平均ひび割れ幅は、式(1)により求める。

$$w_{ave} = \Sigma w / n \quad (1)$$

w_{ave} : 平均ひび割れ幅

Σw : 合計ひび割れ幅

n : ひび割れ本数

鉄筋比が増加するにつれてひび割れ本数が増加し、ひび割れが分散してひび割れ1本当たりの幅が抑制されていると考えられる。

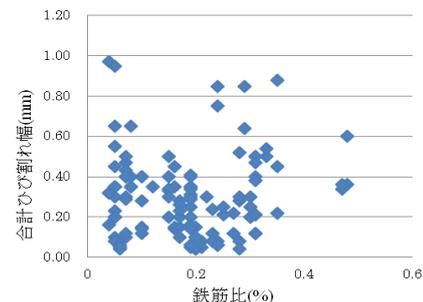


図-1 鉄筋比—合計ひび割れ幅

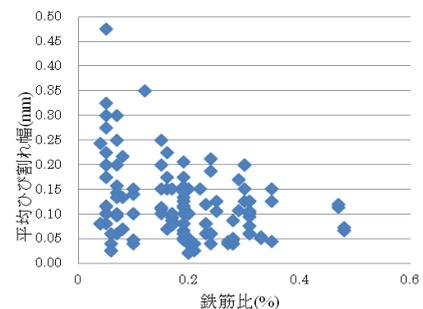


図-2 鉄筋比—平均ひび割れ幅関係

(4) 鉄筋比—最大ひび割れ幅

鉄筋比と最大ひび割れ幅の関係を図-3 に示す。鉄筋比が増加するにつれ、最大ひび割れ幅が小さくなることが確認できる。

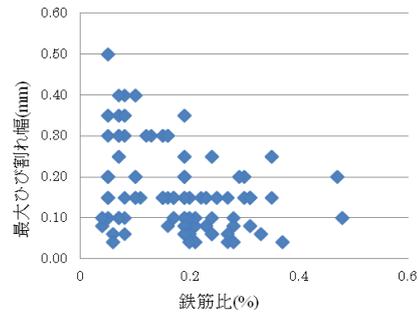


図-3 鉄筋比—最大ひび割れ幅関係

(5) 鉄筋比—ひび割れ本数

鉄筋比とひび割れ本数の関係を図-4 に示す。鉄筋比が 0.1% 付近のリフトは、ひび割れ本数が 1 本～5 本であるのに対し、鉄筋比が 0.3% 付近のリフトは 1 本～6 本、鉄筋比が 0.4% 付近のリフトは 3 本～10 本と鉄筋比が増加するにつれてひび割れ本数が増えており、ひび割れが分散している傾向がみられる。

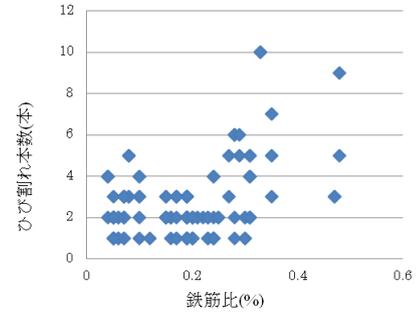


図-4 鉄筋比—ひび割れ本数関係

(6) 鉄筋比—ひび割れ間隔

鉄筋比とひび割れ間隔の関係を図-5 に示す。ひび割れ間隔は、式(2)により求める。

$$l = L / (n + 1) \quad (2)$$

l : ひび割れ間隔

L : 躯体長さ

n : ひび割れ本数

鉄筋比 0.1% 付近のリフトのひび割れ間隔は約 1.2m～約 6.0m、鉄筋比 0.3% 付近のリフトのひび割れ間隔は約 3m～約 5m と、ひび割れ間隔は 1m 程度減少している。これは、鉄筋比が増加するにつれ、ひび割れ本数が増えるためであると考えられる。

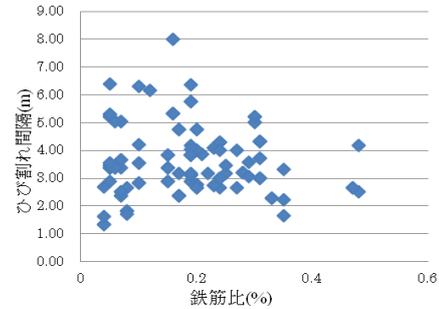


図-5 鉄筋比—ひび割れ間隔関係

3. 解析概要

「ASTEAMACS」は、有限要素法 (FEM) によるコンクリート構造物専用の3次元温度応力解析用ソフトである。形状、物性データ、境界条件等を設定して、ひび割れ指数、ひび割れ幅等を検証する。

「ASTEAMACS」では、解析によってひび割れ発生本数、ひび割れ発生位置は予測することができないため、図-6のように離散ひび割れモデル⁵⁾を用いてバネ要素であるボンドリンク要素をひび割れの発生予想位置に設定し、表現する。バネ定数はコンクリートの弾性係数を入力した。ボンドリンク要素におけるひび割れ発生は、要素の持つ引張強度を超える引張応力が発生した際にバネの剛性を低下させることで表現する。その際、ひび割れ幅は、ボンドリンク要素のひずみから算出される。鉄筋はトラス要素で表現される。

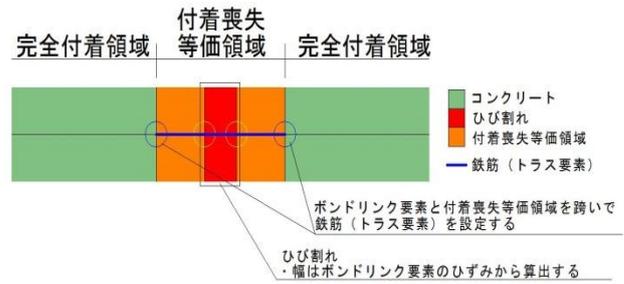


図-6 離散ひび割れモデル

(1) 打設間隔の違いによるひび割れの影響

a) 概要

橋台など高さの大きな構造物は、リフトをいくつかに分け、コンクリートを打設するため、各リフトごとにひび割れが生じているのが現状である。そこで前リフトの打設時から時間の間隔が後リフトのひび割れにどのような影響を与えるのか解析により求める。底版打設時からリフト打設時の打設間隔が 1 週間、2 週間、4 週間の 3 パターンの解析をおこなった。3 パターンともリフト打設時から 6 週間後までの解析を行った。

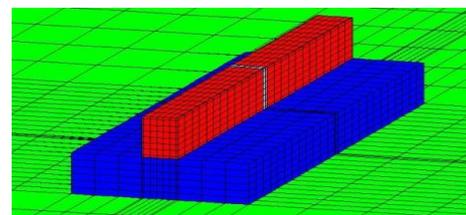


図-7 解析モデル1

b) 解析条件

図-7 に解析モデルを示す。緑色の部分が地盤、青色の部分が底版、赤色の部分がリフトを示している。解析対象は幅 5.0m、長さ 15m、厚さ 1.5m の底版の上に打ち込まれたリフト幅 1.0m、高さ 1.5m、鉄筋比 0.27% の構造物である。長手方向中央部にボ

ンドリンク要素を入力している。物性値は表-2に示すとおりである。コンクリートの乾燥収縮は考慮している。

c)解析結果

解析によって得られたひび割れ指数の履歴を図-8、ひび割れ幅の履歴を図-9に示す。図-10に底版と各打設間隔のリフトの中心部における弾性係数、温度を示す。指数は表面の底盤中央上部とリフト中央下部の値をとっている。ひび割れは構造内部に発生する引張応力がコンクリートの引張り応力を超えることで発生するとされている。

ひび割れ指数とは、ひび割れの発生する確率を算出する際に求めるものである。既往の研究では指数0がひび割れ発生確率100%、指数1がひび割れ発生確率50%、指数1.8がひび割れ発生確率5%とされている。ひび割れ発生確率の算定式¹⁾、ひび割れ指数の算定式¹⁾を式(3)、式(4)に示す。

$$P(I_{cr}) = 1 - \exp\left(-\frac{I_{cr}}{0.92}\right)^{-4.29} \quad (3)$$

$$I_{cr} = \frac{f_t(te)}{\sigma_t(te)} \quad (4)$$

$f_t(te)$: 有効材齢 te における引張強度

$\sigma_t(te)$: 有効材齢 te における最大主引張応力

$P(I_{cr})$: ひび割れ発生確率

I_{cr} : ひび割れ指数

d)考察

図-8、図-9より、打設間隔を多くすれば指数が低くなること、ひび割れ幅が大きくなることが確認された。つまり打設間隔を長くすればとるほど、ひび割れの発生確率は高くなり、また、ひび割れ幅が大きくなるということである。

図-10より、リフトの打設間隔の違いによって、リフト中心部の温度が最も高い時の底版の弾性係数がそれぞれ異なることが確認できる。また、打設間隔が長くなるにつれて底版とリフトの弾性係数の差が大きくなっていることが確認できる。これは底版が完全に硬化する前、つまり、底版の弾性係数が小さいうちにリフトを打設すると、構造物に発生する応力が小さくなるということがいえる。そのため、弾性係数が小さいと構造物のひび割れ指数が高くなり、ひび割れ幅が小さくなった

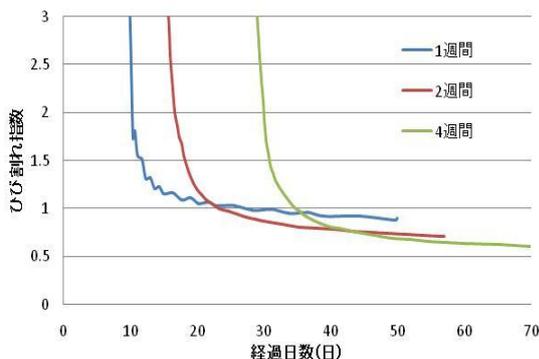


図-8 打設間隔の違いによるひび割れ指数履歴

と推測される。建設現場においては打設間隔が1週間というのは工程的に短すぎて難しいが、ひび割れ抑制のためにはリフトごとの打設間隔に考慮した作業工程管理が要求されるであろう。

表-2 物性値

物性値	地盤	底盤・リフト
熱伝導率 W/°C	1.7	2.6
密度 kg/m ³	2100	2400
比熱 kJ/kg°C	1.4	1.2
断熱温度上昇量	—	JSCE 推奨式
初期温度	20°C	33°C
ヤング率 GPa	500	200
圧縮強度 N/mm ²	22.6	JSCE 実験式
引張強度 N/mm ²	1.96	土木学会示方書
ポアソン比	0.3	0.2
線膨脹係数 μ /°C	10	10 μ /°C
乾燥収縮	—	JSCE 実験式
外気温 °C	計測気温	
熱伝達率	14	上面 : 14 側面 : 8 (10日間, その後14)

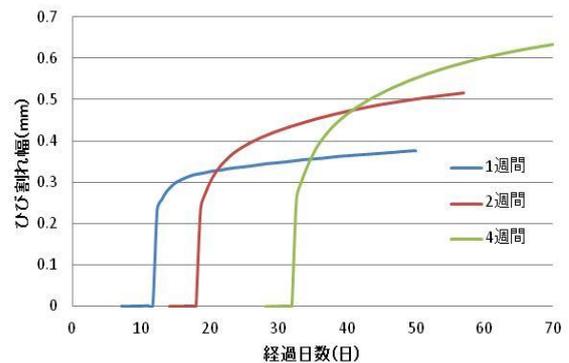


図-9 打設間隔の違いによるひび割れ幅

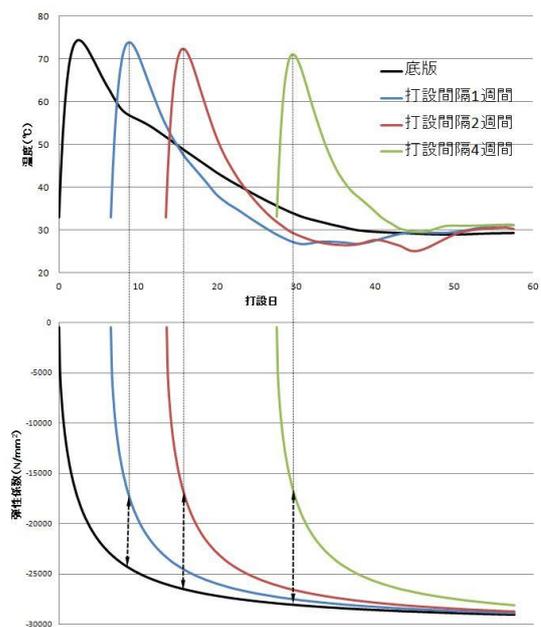


図-10 底版と打設間隔ごとのリフトの温度と弾性係数

(2) 鉄筋とひび割れ幅の関係

a)概要

実構造物の調査において、鉄筋比の増加に伴い平均ひび割れ幅が小さくなる傾向がみられた。解析において鉄筋比によるひび割れ幅の影響を確認するために、鉄筋比のみを変数とし、11パターンのひび割れ幅を算定した。解析対象構造物の断面図は図-11に示す。

b)解析対象

図-12に解析モデルを示す、解析対象は幅 5.0m、長さ 15.5m、厚さ 1.5mの底版の上に打ち込まれたリフト 1.0m、高さ 1.5mの4分の1スケールの解析モデルである。物性値は表-2に示すとおりである。なお、コンクリートの初期温度、外気温は 20℃で一定、コンクリートの乾燥収縮は考慮している。

c)解析結果と考察

図-15は実構造物調査の鉄筋比と合計ひび割れ幅のグラフに解析結果をプロットしたものである。図-15によれば、図-13のようにリフト下部から上部まで全部分にひび割れ要素を配置した解析モデルでは、鉄筋比の増大に伴いひび割れ幅が抑制されることが確認できた。しかし、解析値が実測値に比べ大きく、一致しているとは言えない。ひび割れ要素を下部から上部まで貫通させ入力する方法は底盤が固定されているため、上部のひび割れ要素のひずみが大きく変位し、ひび割れ幅の解析結果に大きく影響することが明らかとなった。

「ASTEAMACS」では、ひび割れ要素を下部から上部まで貫通させ、ひび割れを表現している。これはひび割れがリフトの下部から上部までの貫通した場合を想定した解析モデルである。実構造物のひび割れの発生状況は、構造物の橋軸直角方向中央部付近において、底盤より約5cm上部から中央に向け生じており、1m程度の厚さの比較的大きな構造物においては下部から上部まで貫通するひび割れは見られない傾向にある。解析においても実際に発生するひび割れを想定したひび割れ解析モデルで解析を行うことが最良の手法であると考えた。したがって、図-14のようにひび割れ発生予想部位にひび割れ要素を設け、ひび割れ幅算出の解析をおこなった。図-15をみると、ひび割れ部分要素はひび割れ全要素に比べひび割れ幅が小さくなっていることが確認できた。また、ひび割れ部分要素はひび割れ全要素に比べ鉄筋比による抑制の度合いは低いものの、鉄筋比の増加に伴いひび割れ幅が小さくなっていることが確認できた。

ひび割れ全要素に比べ、ひび割れ部分要素のほうが実構造物調査データと一致している傾向にある。したがって、実構造物においてはひび割れ部分要素を用いたひび割れ解析が最良の手法であるといえる。しかし、ひび割れ部分要素の位置によってひび割れ幅が変化することが考えられるため、ひび割れ部分

要素の配置の仕方は今後の検討課題である。

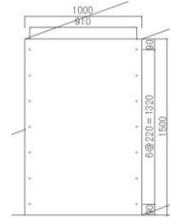


図-11 解析対象鉄筋配置図

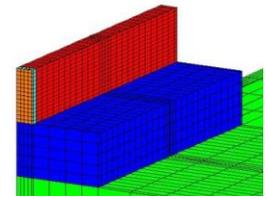


図-12 解析モデル 2

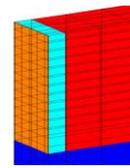


図-13 貫通ひび割れ想定解析モデル

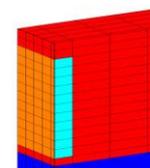


図-14 部分ひび割れ想定解析モデル

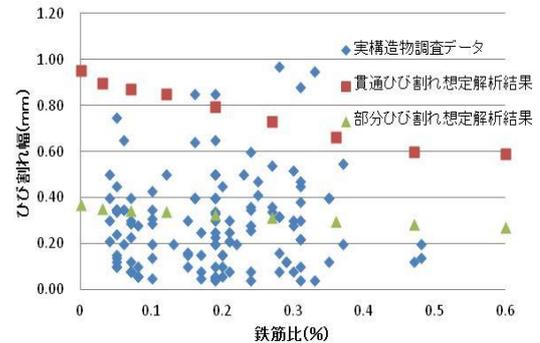


図-15 山口県工事データと解析値の比較

4. 結論

- 1) 山口県工事データ調査および解析結果より、鉄筋比の増加に伴い、ひび割れ幅が抑制された。
- 2) 橋台等の数度におたるコンクリートを打設する構造物において、前リフトと後リフトの打設間隔が短いほうが後リフトのひび割れへの影響は小さい。
- 3) ひび割れ幅を解析する際、ひび割れ要素は下部から上部まで貫通させずに、実構造物のひび割れ発生状況をもとに予想される部位にひび割れ要素を設け、ひび割れ幅を解析する手法が望ましい。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，2008。
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会 報告書，2006。
- 3) 日本コンクリート工学協会：JCI規格集，2004。
- 4) 山口県建設技術センター：
<http://www.yama-ctc.or.jp/data/index.html>
- 5) 計算力学研究センター：離散ひび割れモデルの作成について（改訂版），2011