

論文 マスコンクリートの鉄筋によるひび割れ幅の抑制に関する研究

田村 隆弘*1・林 宏次朗*2・中谷 俊晴*3

要旨：山口県のコンクリート工事のデータベースから、ひび割れの発生状況を調査し、実構造物でも鉄筋比の増加によってひび割れ本数は増加し、最大ひび割れ幅及び平均ひび割れ幅が抑制されることを確認した。一方で、底部をコンクリート底版で拘束された壁式橋脚のたて壁を想定した解析モデルを作成し、実構造物との解析結果の比較を行った。そして、実構造物で発生するひび割れは、断面方向に貫通していても高さ方向で貫通する場合とそうで無い場合があることに着目して、ひび割れの発生状態、ひび割れ補強鉄筋の配置方法の違いによるひび割れ幅の変化を検証した。さらに、ひび割れ発生状況に応じてひび割れ補強鉄筋を配置することで、ひび割れ幅を効果的に抑制できることを確認した。

キーワード：マスコンクリート、壁式橋脚、ひび割れ補強鉄筋、ひび割れ幅、鉄筋比、鉄筋位置

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。実構造物において、コンクリート部材は底面または底面と両端を固定されていることが多く、収縮によるひび割れが発生しやすい状態にある。しかし、コンクリート構造物に発生するひび割れの原因は、材料や施工、環境、構造など様々な要因が複雑に関連していることから、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、ひび割れの発生確率やひび割れ幅を予測することは非常に難しいとされている^{1),2),3)}。また、現在では解析により温度応力によるひび割れ発現の可能性は比較的精度良く予測できるようになってきたが、ひび割れ幅や鉄筋等によるひび割れ分散効果を表現することは難しく、複雑な環境条件等が含まれることで実構造物での結果と一致しない場合も多くみられる。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おり、ひび割れ幅やひび割れ間隔を容易に求める算定式の確立が望まれている。

このような背景の中で本研究では、鉄筋によるひび割れ幅の抑制を効果的に行う方法を見出すこと目的として、まず、実際の構造物の鉄筋比とひび割れ幅の関係を調査した。そして、コンクリート構造物の温度応力解析によ

り、ひび割れの発生状態やひび割れ補強鉄筋の配置方法の違いがひび割れ幅に与える影響を検証した。

2. ひび割れ幅の予測に関する既往の研究

ひび割れ幅に関する研究については、長年にわたり各学会等で多く行われており、その中でひび割れ幅の予測式もいくつか提案されている^{1),2),3)}。しかし、田村、稲津らは、山口県の実構造物のデータを用いて、現在までに提案されている予測式について統計的な評価を行い、式の適用範囲内の構造物であっても、実測値を精度良く求めることは出来ていないことを指摘している^{4),5)}。また、大野らも同様に、温度解析によるひび割れの予測値と実測値の比較を行い、予測値に比べて実測値のひび割れ幅が小さくなることを確認しており⁶⁾、解析的手法の実構造物への適用性と精度については未だ課題を残している。

3. 実構造物の状況

3.1 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⁷⁾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（コンクリート打設のロット）を対象に、鉄筋比と合計ひび割れ幅、平均ひび割れ幅、最大ひび割れ幅関係を調査した。構造物のデータの範囲を表-1に示す。

表-1 実構造物のデータ範囲

リフト高さ(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, 普通ポルトランド3体, 低熱ポルトランド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

*1 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科 工博 (正会員)

*2 徳山工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (学生会員)

*3 徳山工業高等専門学校 土木建築工学科

山口県のデータベースにはひび割れ発生状況がリフト毎にスケッチと各ひび割れの最大値で示されている。ここで、合計ひび割れ幅とは対象リフトに発生した全てのひび割れのひび割れ幅の合計を、平均ひび割れ幅とは対象リフトに発生したひび割れ幅の平均値を、そして、最大ひび割れ幅とは対象リフトの中で最大のひび割れ幅をいう。

3.2 鉄筋比-合計ひび割れ幅

表-1の全ての構造物の鉄筋比と合計ひび割れ幅の関係を図-1に示す。鉄筋比0.05%付近～0.25%付近のリフトでは鉄筋比が大きくなる程ひび割れ幅が小さくなる傾向が見られるが、鉄筋比0.25%～0.35%付近のリフトでは、合計ひび割れ幅が約0.05mm～約1mmの範囲にあり、鉄筋比を増加させることにより合計ひび割れ幅を抑制することは困難であることが確認できる。

3.3 鉄筋比-ひび割れ本数

鉄筋比とひび割れ本数の関係を図-2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、このことは、鉄筋比が増加することによってひび割れが分散していくことを示している。

3.4 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-3に示す。ここで平均ひび割れ幅は、式(1)により求めることとした。鉄筋比0.1%付近のリフトは、平均ひび割れ幅が0.025mm～0.47mm、鉄筋比0.3%付近のリフトの平均ひび割れ幅は0.05mm～0.2mmと、最大ひび割れ幅と同様に平均ひび割れ幅が減少している。こちらも、鉄筋比が増加するにつれ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からと考えられる。

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

w_{ave} : 平均ひび割れ幅(mm)

$\sum w$: 合計ひび割れ幅(mm)

n : ひび割れ本数(本)

3.5 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-4に示す。鉄筋比0.1%付近のリフトは、最大ひび割れ幅0.05mm～0.5mmであるのに対し、鉄筋比0.3%付近のリフトの最大ひび割れ幅は、0.05mm～0.25mmと最大ひび割れ幅が減少している。鉄筋比が増加するにつれ、ひび割れ本数が増加することで、ひび割れ幅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。

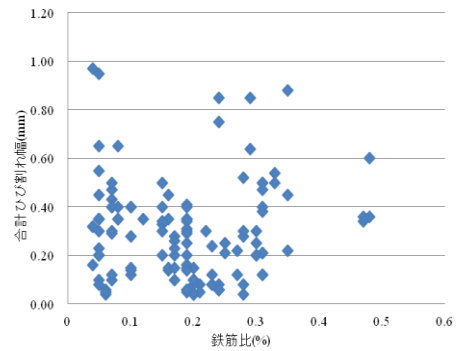


図-1 鉄筋比-合計ひび割れ幅

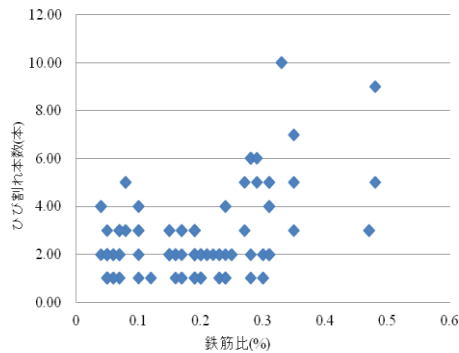


図-2 鉄筋比-ひび割れ本数

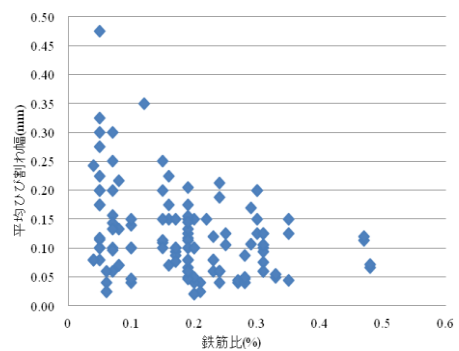


図-3 鉄筋比-平均ひび割れ幅

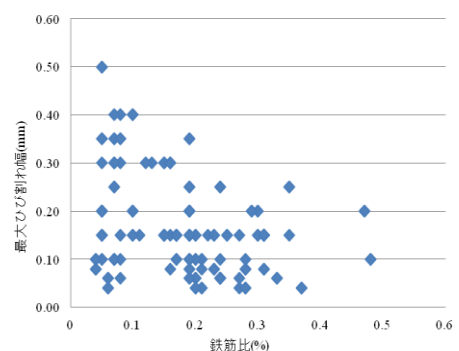


図-4 鉄筋比-最大ひび割れ幅

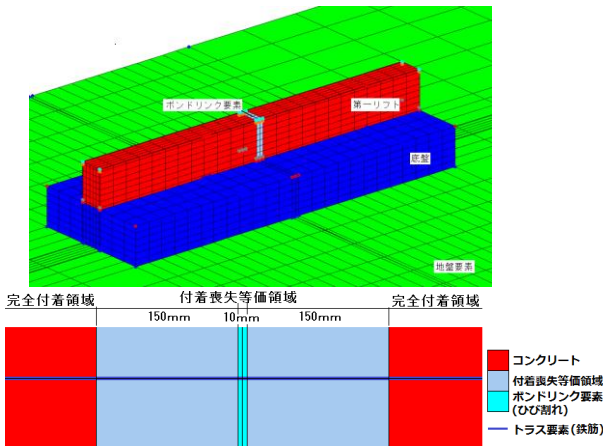
4.解析概要

4.1 解析ソフト

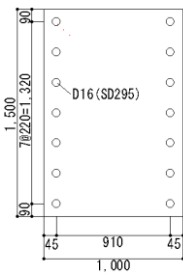
解析は、コンクリート構造物のひび割れ解析ソフト「ASTEAMACS」を使用した。「ASTEAMACS」は、有限要素法によるコンクリート構造物専用の3次元温度応力解析用ソフトである。ここでは、形状、物性データ、

表一 物性値

物性値	コンクリート	地盤
熱伝導率	2.7 W/m°C	3.45 W/°C
密度	2400 kg/m ³	2650 kg/m ³
比熱	1.15 kJ/kg°C	0.79 kJ/kg°C
断熱温度上昇	$T=45(1-e^{-0.957t})$	—
初期温度	20°C	20°C
ヤング率	$E = 4700\sqrt{F_c(t)}$	6000 kN/mm ²
圧縮強度	$F_c(t)=t/(6.2+0.93t)*24*1.15$	22.60 N/mm ²
引張強度	$F_t(t) = 0.44\sqrt{F_c(t)}$	1.96 N/mm ²
ポアソン比	0.2	0.3
線膨脹係数	10 μ/°C	10 μ/°C
トラス要素		
降伏応力	ヤング率	線膨脹係数
295 N/mm ²	200 kN/mm ²	10 μ/°C



図一 5 コンクリート構造物解析モデル



図一 6 解析モデルの配筋図

境界条件等を設定してコンクリート構造物をモデル化し、実構造物のデータとの整合性を検証する。

4.2 解析条件

コンクリート構造物の解析モデルを作成し、50日間の解析を行った。各物性値を表一に示す。環境温度は、2008年から2011年までの山口県の日別平均気温とする。ひび割れは、バネ要素であるボンドリンク要素をひび割れ発生位置に設定することでモデル化する。ボンドリンク要素におけるひび割れ発生は、要素の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。鉄筋はトラス要素でモデル化し、完全付着領域では完全付着状態、付着喪失等価領域では付着がな

い状態とした。実構造物に発生するひび割れの発生位置や本数は、3章で示したように概ね傾向があるものの、本解析ソフトでは、これらを直接求めることは出来ない。よって、ここでは、ひび割れが第一リフトの長さ方向中央の位置に1か所発生すると仮定することで、合計ひび割れ幅として表現する。1本のひび割れの平均ひび割れ幅は、ボンドリンク要素のひずみから算出され⁸⁾、上部、中部、下部の3点を平均して求める。

4.3 解析モデルの形状・寸法

解析対象は、全長15,000mm、高さ1,500mm、幅5,000mmの底盤の上に打ち込まれた、全長15,000mm、高さ1,500mm、幅1,000mm、鉄筋比0.185%の第一リフトである(図一5参照)。解析モデルは、前壁と後壁のかぶり45mmの位置に鉄筋D16(SD295)を220mm間隔で、計14本配置する。解析モデルの配筋図を図一6に示す。

5. 実構造物と解析結果の比較

5.1 合計ひび割れ幅の比較

解析を行った構造物と同程度(表一3に示す構造物の範囲)の鉄筋比と合計ひび割れ幅の関係を図一7に示す。解析モデルの合計ひび割れ幅は0.42mmであり、同程度の鉄筋比の構造物の合計ひび割れ幅の平均値0.19mmと比較してかなり大きい。

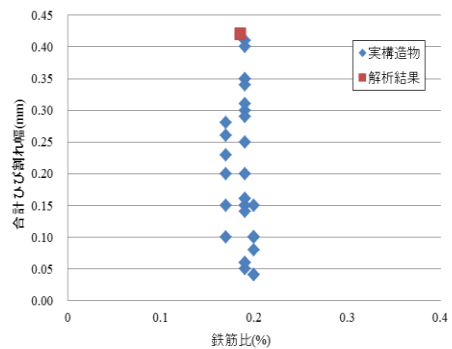
5.2 平均ひび割れ幅の比較

鉄筋比と平均ひび割れ幅の関係を図一8に示す。ひび割れ本数は図一2の鉄筋比0.185%付近のひび割れ本数の中間値から、本構造物ではひび割れ本数を2本とした。

解析結果の平均ひび割れ幅は0.21mmであり、同程度の鉄筋比の構造物の平均ひび割れ幅の平均値0.10mmと比較して0.11mm大きく、最大値0.21mmと最小値0.02mmの間に収まっていない。

表一 3 解析と比較した構造物の範囲

リフト高さ(m)	厚さ(m)	幅(m)	鉄筋比(%)
1.7~5.1	1.4~2.0	8.0~12.7	0.17~0.2



図一 7 鉄筋比ー合計ひび割れ幅

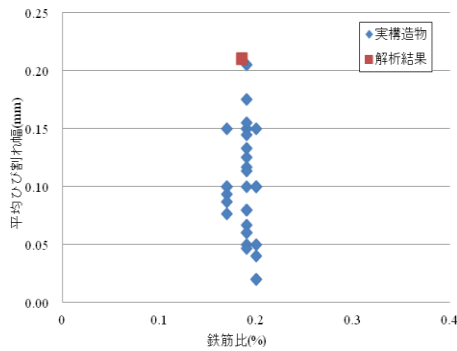


図-8 鉄筋比-平均ひび割れ幅

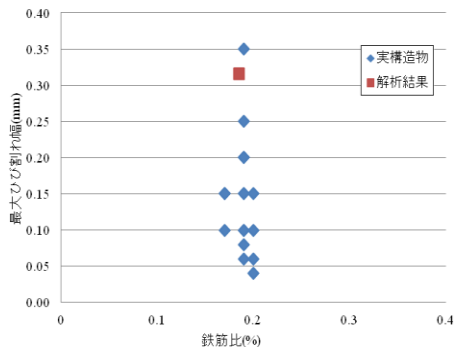


図-9 鉄筋比-最大ひび割れ幅

5.3 最大ひび割れ幅の比較

ACI では、平均ひび割れ幅の 1.5 倍を最大ひび割れ幅としている⁹⁾。ここでは、平均ひび割れ幅の値を 1.5 倍し、理論上の最大ひび割れ幅とした。鉄筋比と最大ひび割れ幅の関係を図-9 に示す。解析結果の合計ひび割れ幅は 0.32mm で、平均ひび割れ幅と同様に、同程度の鉄筋比の構造物の最大ひび割れ幅の平均値 0.14mm と比較して 0.18mm 大きい、最大値 0.35mm と最小値 0.04mm の間には収まっている。

6. ひび割れ発生状況のモデル化

6.1 解析条件

前項で述べた解析値と実測値の誤差については、解析では発生したひび割れが第一リフトの上端まで達していると想定して、ボンドリンク要素を設定したため、実構造物と比較してひび割れ幅が大きくなったことが考えられる。「ASTEAMACS」を使用した解析では、一般的にボンドリンク要素を構造物の上端まで設定して解析を行っている。しかし、山口県のデータベース⁷⁾で確認すると実際の構造物の多くのひび割れは、ひび割れが上端まで到達せず途中で止まっていることが多い。そこで、ボンドリンク要素の高さを変化させ、ひび割れの発生状態を考慮した場合の 1 本のひび割れの平均ひび割れ幅の違いを検証した。従ってここでの解析条件は、ひび割れを仮定したボンドリンクの高さで、(a) 0-1,500mm, (b) 0-1,410mm, (c) 90-1,410mm, (d) 90-1,190mm の計 4

パターンである (図-10 参照)。

6.2 解析結果

解析によって得られた 1 本のひび割れの平均ひび割れ幅を表-4 に示す。上端までひび割れが到達した状態を想定したモデル(a)と比較して、上端までひび割れが到達していないモデル(b), モデル(c), モデル(d)のひび割れ幅が小さくなった。これは、図-10 に示されるように、モデル(a)では部材の下部から上部に行くに従いひび割れ幅が大きくなり部材頂部で 1 本のひび割れの最大ひび割れ幅となるが、ひび割れが上端まで達していないと仮したその他のモデルでは、ひび割れを想定した高さの中

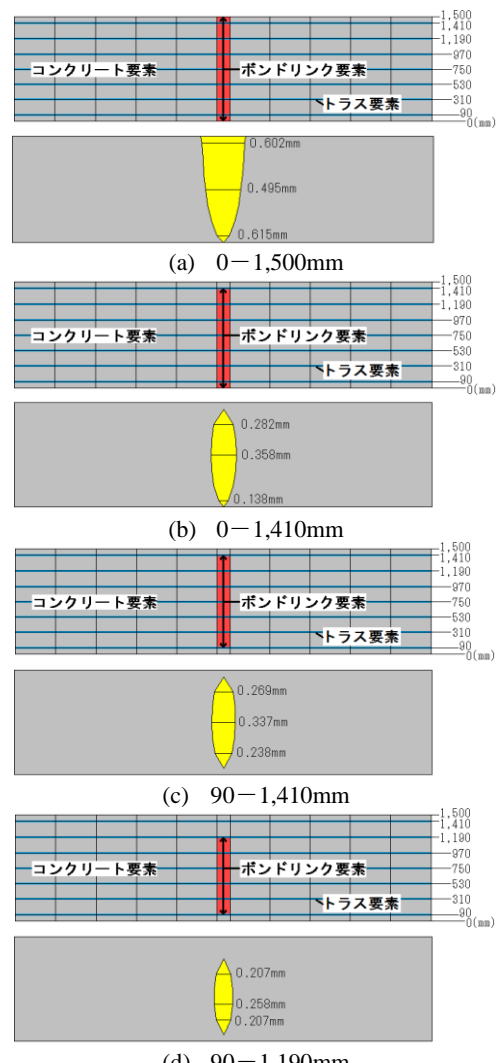


図-10 ひび割れの状態とイメージ図

表-4 各ひび割れ想定状態におけるひび割れ幅

モデル	ひび割れ想定領域 (ボンドリンク要素の範囲)	1 本のひび割れの 平均ひび割れ幅(mm)
(a)	0-1,500mm	0.42
(b)	0-1,410mm	0.22
(c)	90-1,410mm	0.21
(d)	90-1,190mm	0.16

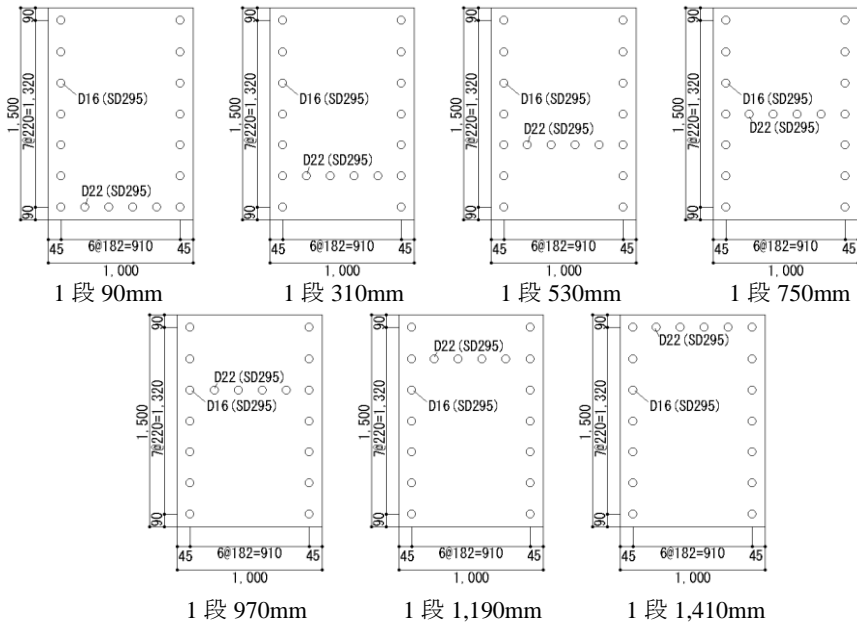


図-11 解析モデルの配筋図（1段配置：数字は下面から鉄筋中心までの距離）

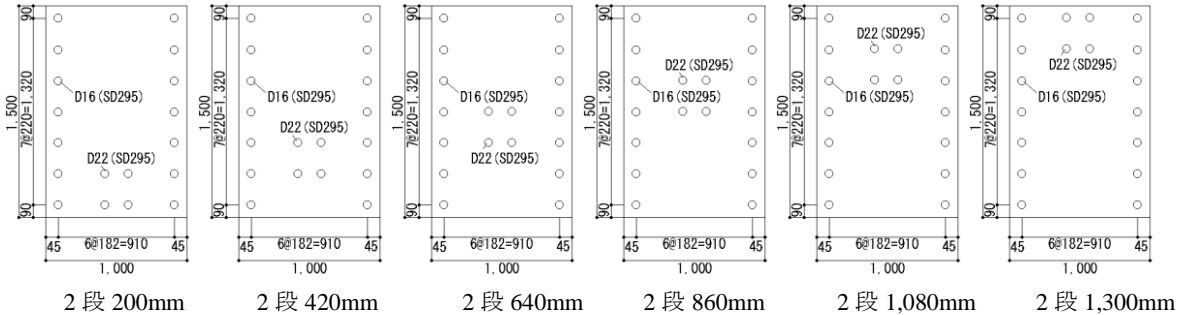


図-12 解析モデルの配筋図（2段配置：数字は下面からひび割れ補強鉄筋重心までの距離）

中央付近でひび割れ幅が最大となり部材頂部ではひび割れが閉じていることに起因すると考えられる。すなわち、ひび割れを想定した高さによってひび割れ形状が異なり1本のひび割れの平均ひび割れ幅が異なることから、実構造物のひび割れ幅を解析する際は、ひび割れの発生状態を解析に適応させる必要があると言える。

7. ひび割れ補強鉄筋の位置とひび割れ幅の関係

7.1 解析概要

ここでは、前項で使用したひび割れの状態を考慮した解析モデルのうち、(a) 0-1,500mmの解析モデルと、実際の構造物で多く見られるひび割れ状態の、(d) 90-1,190mmの解析モデルを取り上げる。ひび割れ補強鉄筋としてD22 (SD295)を4本配置し鉄筋比を0.288%とした時の鉄筋位置の違いが1本のひび割れの平均ひび割れ幅に与える影響を検証した。使用した物性値は前項と同様である。各解析モデルの配筋図を図-11、図-12に示す。

7.2 解析結果

解析によって得られた1本のひび割れの平均ひび割れ幅を表-5に示す。補強鉄筋を配置したモデルでは、いずれも基本形と比較するとひび割れ幅が抑制されており、

鉄筋比の増加によるひび割れ幅の減少が見られた。

ひび割れ状態(a)の場合、1段配配置と2段配置のどちらも、鉄筋位置90mm(200mm)のひび割れ幅が一番大きく、鉄筋位置が上に移動するにつれてひび割れ幅が小さくなった。ひび割れ状態(a)の場合では、上端に発生するひび割れ幅が一番大きいいため、鉄筋を底盤に近い位置に配置した場合、第一リフト上部の収縮量が低減せず、ひび割れ幅が抑制されなかったと考えられる。また、ひび割れ状態(d)の場合では、補強鉄筋の位置がひび割れ高さの中央に近いほどひび割れ幅が小さくなり、第一リフトの上部、下部にいくに従いひび割れ幅が大きくなった。

1段配置と2段配置の結果を比較すると、ひび割れ状態(a)の場合では、1段配置も2段配置も同等のひび割れ幅の抑制効果が見られる(図-13参照)。また、ひび割れ状態(d)の場合でも、鉄筋高さ530mmから750mmで若干のばらつきが見られるが1段配置も2段配置もほぼ同等のひび割れ幅の抑制効果が見られる(図-14参照)。配筋位置が、図中青線で示すひび割れ幅が最大となる位置に近い位置でひび割れ幅が最少となることから、ひび割れ補強鉄筋はひび割れ幅が最大となる位置に集中して配置するのが効果的であると言える。

表-5 ひび割れ幅

1本のひび割れの平均ひび割れ幅(mm)					
ひび割れ状態	0-1,500mm (図-10(a))		90-1,190mm (図-10(d))		
配置方法	1段	2段	1段	2段	
鉄筋位置	基本形	0.421		0.157	
	1,410mm	0.359	—	0.156	—
	1,190mm (1,300mm)	0.364	0.364	0.155	0.156
	970mm (1,080mm)	0.373	0.371	0.152	0.154
	750mm (860mm)	0.384	0.380	0.148	0.151
	530mm (640mm)	0.394	0.390	0.149	0.150
	310mm (420mm)	0.406	0.402	0.153	0.152
	90mm (200mm)	0.418	0.412	0.156	0.155

*()内の数字は2段配置のひび割れ補強鉄筋の重心位置

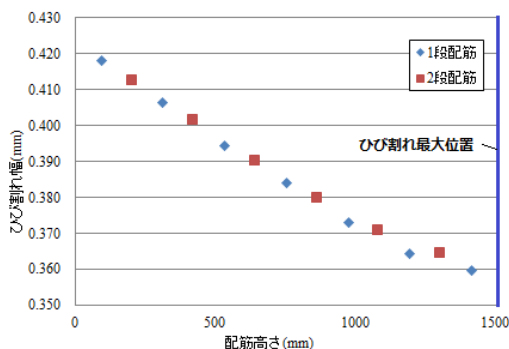


図-13 配筋高さ-ひび割れ幅(0-1,500mm)

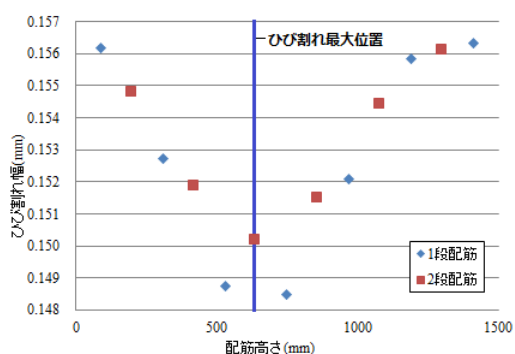


図-14 配置高さ-ひび割れ幅(90-1,190mm)

8. まとめ

山口県のコンクリート工事のデータベースを使用し、ひび割れの発生状況を調査した。また、底部を底盤で拘束された橋脚を想定した解析モデルを作成し、実構造物のデータとの整合性を検証した。さらに、ひび割れの発生状態、鉄筋位置の違いによるひび割れ幅の変化を検証した。得られた結果より、結論を以下に示す。

- 1) 実構造物の調査より、鉄筋比が増加するにつれてひ

び割れ本数が増加する。

- 2) 鉄筋比が増加しひび割れ本数が増加することで、最大ひび割れ幅、平均ひび割れ幅ともに抑制される。
- 3) ひび割れの到達高さによって1本のひび割れの平均ひび割れ幅が異なることから、実構造物のひび割れ幅を解析する際は、ひび割れの発生状態を解析に適応させる必要がある。
- 4) 1本のひび割れのひび割れ幅が最大となる位置に集中してひび割れ補強鉄筋を配置することで、効果的にひび割れ幅を抑制することができる。

今回の解析では、ひび割れ要素を中央に1か所のみ設定し、それを構造物全体に発生したひび割れの合計としている。実際の構造物では、ひび割れが複数発生することや、別の位置にひび割れが発生することが多くあるため、今後はひび割れ要素を複数設定した場合の解析方法や、ひび割れの発生位置を考慮した解析について検討する必要がある。

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温度応力研究委員会 報告書，1992
- 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指針 2008，2008
- 3) 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
- 4) 田村隆弘，稲津貴和子，国重典宏：実構造物のデータベースを用いた初期ひび割れ幅の予測式に関する研究，コンクリート工学年次論文集，pp1331-1336，2011
- 5) 稲津貴和子，田村隆弘，澤村修司：山口県のコンクリート工事に関するデータベースを用いたひび割れ幅に関する統計的研究，コンクリート工学年次論文集，pp1337-1342，2011
- 6) 大野又念，細田暁：山口県の実構造物のデータベースの温度応力解析による分析，コンクリート工学年次論文集，pp1228-1293，2012
- 7) 山口県建設技術センター：
<http://www.yama-ctc.or.jp/data/index.html>
- 8) 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
- 9) ACI Committee 207: Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, ACI Journal, Vol.70, 1973

付記

温度解析には、株式会社 計算力学研究センターの ASTEA MACS Ver.7 を使用した。