

論文 コンクリート壁部材を対象としたひび割れ制御鉄筋の配置方法によるひび割れ幅抑制効果に関する解析的検討

山本 翔太*1・横関 康祐*2・篠田 佳男*3・河野 一徳*4

要旨：コンクリート壁部材を対象に、温度応力解析およびひび割れ幅解析を用いてひび割れ幅を評価した。また、温度ひび割れ抑制手法の一つとして、壁部材表面付近の配筋に加えて、内部にひび割れ制御鉄筋を配置した場合のひび割れ幅を解析的に評価した。その結果、本解析の範囲では、部材厚が厚いほど、壁延長が長いほど、鉄筋比が小さいほどひび割れ幅は大きくなることが分かった。ひび割れ幅解析値は部材に発生するひび割れ幅の積算から 1 本あたりのひび割れ幅を算出することで実測値に近づいた。また、ひび割れ制御鉄筋を部材内部に配置することで、L/H が大きいほど、ひび割れ幅を抑制可能であることが示唆された。

キーワード：マスコンクリート、温度ひび割れ、ひび割れ幅、ひび割れ幅解析、ひび割れ制御鉄筋

1. はじめに

わが国では高度経済成長期に急激に社会インフラの需要が高まり、それに伴い多くの大型コンクリート構造物が建設された。しかしながら、マスコンクリートの水和熱の影響によるひび割れの抑制は今日に至るまで、課題となっている。一般にマスコンクリートはセメントの水和反応により部材の内部温度が最大で 70~80℃程になり、内部温度の上昇により温度応力が生じ、温度ひび割れは部材内部から表面に進展すると考えられている¹⁾。特に外部拘束による温度ひび割れは構造物の耐久性や使用性に影響を与えることから、マスコンクリートの温度ひび割れを制御する方法として、温度上昇の抑制や収縮ひずみの低減による体積変化の抑制方法や拘束度を低減する方法など様々な手法が推奨されている。また、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016²⁾」(以下、2016 指針)では温度ひび割れの幅をひび割れ幅の限界値以下とするためには、温度応力を低減する適切な方法を採用した上で、適切な量の鉄筋を適切な位置に配置しなければならない、とされているが、2016 指針では鉄筋比 0.25~0.93%での鉄筋比とひび割れ幅との関係については言及しているものの、具体的に適切な鉄筋配置については触れていない。

近年、マスコンクリート部材内部に補強鉄筋を配置することで、部材内部で発生した温度ひび割れを抑制するという考え方があり、特に山口県では実務で用いられている³⁾。田村らは補強鉄筋をひび割れ幅が最大になる位置に集中することで、効果的にひび割れ抑制可能であることを確認している⁴⁾が、最適な補強鉄筋の配置や鉄筋比は明確になっていない。

本研究では、まず外部拘束による温度ひび割れが発生

しやすい壁状構造物モデルで壁の長さとおよび高さの比 L/H および壁厚、鉄筋比をパラメータとしたひび割れ幅解析を行い、一般的な配筋におけるひび割れ幅を評価した。その上で部材内部のひび割れ制御鉄筋の配置位置および鉄筋比をパラメータとしたひび割れ幅解析よりひび割れ制御鉄筋のひび割れ抑制効果を解析的に検討した。なお、本研究の解析は日本コンクリート工学会マスコンクリートソフト作成委員会により開発された「JCMAC3-U」を使用し、温度応力解析、ひび割れ幅解析 i モデル(破壊エネルギーと軟化肢勾配を用いた分布ひび割れモデル)を実施した。

2. 壁状構造物での温度応力解析

2.1 解析概要

(1) 解析モデル

本解析での解析モデルは実構造物⁵⁾を参考にして、より単純な底板および壁 2 リフトから成る逆 T 字擁壁を作成した。さらに、壁厚および壁延長の部材寸法、鉄筋比をパラメータとし、対称性を考慮して 1/4 モデル(図-1)とした。壁厚 W は 1.5m, 2.0m, 壁延長 L は 9.0m, 13.5m, 18.0m, 壁高さ H は 3.0m 固定とした。また、配筋は主筋(D32@250mm)、せん断補強筋(D16@500mm)配力筋(D16@250mm, かぶり 70mm)、を基準の配筋(鉄筋比 0.106%)とし、直線 2 端点の線分情報として入力した。配力筋の鉄筋比 p は 0.106%, 0.132%, 0.159%, 0.212%, 0.530%とした。鉄筋は全て SD345, 物性値は実測値よりヤング係数 210kN/mm², 熱膨張係数 13 μ/°C とした。

(2) 解析条件

本解析では地盤、底板を非発熱体物性として壁部材のみを発熱体物性とした。物性値は表-1 に示すようにコ

*1 東洋大学 理工学研究科都市環境デザイン専攻 (学生会員)

*2 東洋大学 理工学部都市環境デザイン学科 教授 博士(工学)(フェロー会員)

*3 日本コンクリート技術(株) 博士(工学)(フェロー会員)

*4 日本コンクリート技術(株) (正会員)

ンクリートは 2016 指針に準拠し、地盤は実構造物の逆解析に適するように設定した。壁 1 側面の表面熱伝達係数は材齢 7 日まで $8\text{W/m}^2\text{C}$ 、材齢 7 日以降は $14\text{W/m}^2\text{C}$ とした。外気温は「JCMAC3-U」の緯度・標高から算出する方法とし、国土地理院 地理院地図⁶⁾より緯度 35.45 度、標高 56.9m とした。拘束条件は対称面では法線方向、地盤底面は全方向とした。なお、本解析では壁 1 に発生する温度ひび割れをみの解析結果を検討するものとした。

2.2 温度応力解析結果

温度応力解析の結果、コンクリート温度および応力、ひび割れ指数履歴を図-2 に示す。また、最大応力、最小ひび割れ指数および出力位置は図-7 に示す。壁高さ 1.5m でのコンクリート最高温度は壁厚の大きさに影響を受けるため、壁の延長の違いによらず壁厚が同一であるならば最高温度は等しい。壁厚 $W=1.5\text{m}$ では材齢 2.25 日に 67.5°C 、壁厚 $W=2.0\text{m}$ では材齢 2.75 日に 71.4°C となった。また、コンクリート表面温度は全ケース材齢 2 日に 46.8°C となり、 $W=1.5\text{m}$ では内外温度差が 20.7°C 、 $W=2.0\text{m}$ では 24.6°C となった。

コンクリートに発生した応力は同一の壁厚であっても壁延長が長いほど最大応力が大きくなり、さらに、壁厚が大きいくほど最大応力が大きくなった。最大応力ほどのケースにおいても壁 2 を打込んだ直後の材齢約 45 日で記録され、表面に発生した応力も材齢 45 日付近で最大応力となった。コンクリート中心部での応力は $W=1.5\text{m}$ において $L/H=4.5, 6.0$ では材齢 6.0 日、 $L/H=3.0$ では材齢 6.5 日で引張強度を超過した(ひび割れ指数 1.0 を下回る)。 $W=2.0\text{m}$ においても同様に L/H が大きくなるほど引張強度を超過する材齢が早くなった。

また、ひび割れ指数は応力同様に材齢 45 日付近で最小値を示し、壁厚、延長が大きくなるほどひび割れ指数は小さくなった。 $L/H=3.0, W=1.5\text{m}$ のケースにおいては最小ひび割れ指数が 0.57 となり、2016 指針のひび割れ

指数とひび割れ発生確率の関係より、ほぼ 100%全ケースで部材中心部ではひび割れが発生すると考えられる。

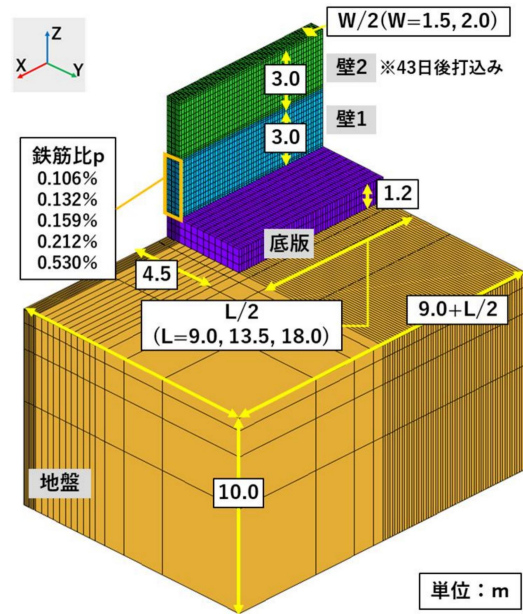


図-1 解析モデル

表-1 モデル物性値

項目	コンクリート ($W/B=52.2\%$, セメント種類 BB, 単位セメント量 322kg/m^3)	地盤
熱伝導率 ($\text{W/m}^2\text{C}$)	2.7	1.7
比熱 ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)	1.15	1.4
密度 (kg/m^3)	2293	1400
初期温度 ($^\circ\text{C}$)	25.3	25
ヤング率 (N/mm^2)	$E(t) = 6300 * \phi(t) * f'_c(t)^{0.45}$	5000
圧縮強度 (N/mm^2)	$f'_c(t) = \frac{(t - 0.42)f'_c}{(7.005 + 0.745(t - 0.42))}$	—
引張強度 (N/mm^2)	$f_t(t) = 0.21 * f'_c(t)^{0.67}$	—
ポアソン比	0.20	0.35
熱膨張係数 ($\mu/^\circ\text{C}$)	12	10

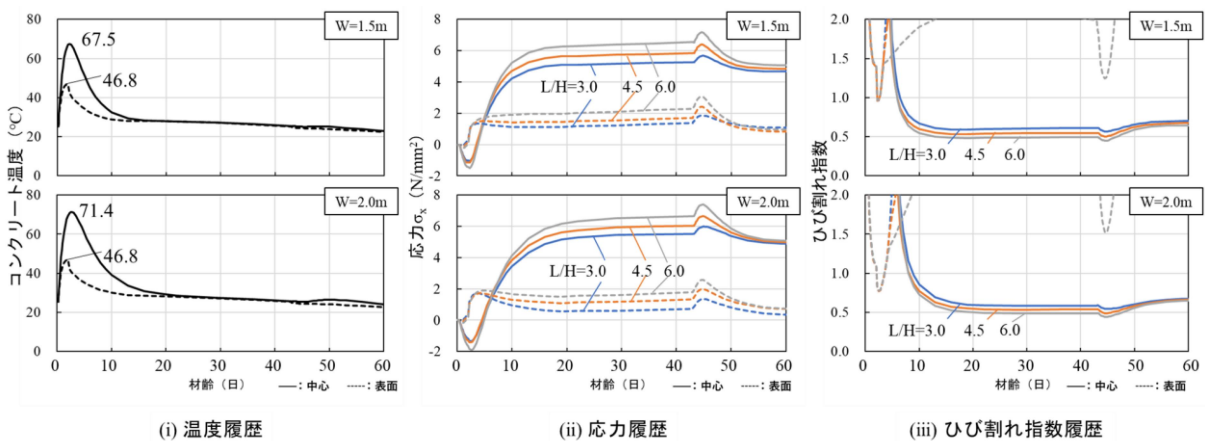


図-2 温度応力解析結果

3. ひび割れ幅解析

3.1 ひび割れ幅算出方法

本解析で使用した「JCMAC3-U」ではひび割れはクラック相当ひずみにより表現され、ひび割れ幅への換算は対象長さを積分する必要がある⁷⁾。式(1)にクラック相当ひずみ、式(2)にひび割れ幅換算式を示す。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{crack} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_t + \varepsilon_{sh} \quad (1)$$

ここに、 ε ：コンクリートの全ひずみ、 ε_e ：弾性ひずみ、 ε_{crack} ：クラック相当ひずみ、 ε_{creep} ：クリープひずみ、 ε_t ：温度ひずみ、 ε_{sh} ：収縮ひずみ

$$w = \int_0^L \varepsilon_{crack} dx \quad (2)$$

ここに、 w ：ひび割れ幅、 L ：応力解放領域長さ

以上の式によりクラック相当ひずみを応力解放領域長さで積分することでひび割れ幅を算出した。対象とするひび割れは、壁中心部で最小ひび割れ指数を示した材齢45日での観察可能な表面ひび割れとした。また、複数

のひび割れが発生した場合、その内のひび割れ幅が最も大きいひび割れを「最大ひび割れ幅」とした。加えて、今回の解析モデルは1/4モデルであるため、壁部材長さの1/2位置付近にひび割れが発生した場合、そのひび割れに関しては本来のひび割れ幅の半分の値となるため、2倍することにより1本のひび割れ幅とした。

3.2 ひび割れ幅解析結果

ひび割れ幅解析の結果、最大ひび割れ幅と鉄筋比の関係を図-3に示す。一般的に鉄筋比の増加に伴いひび割れ幅は低下するとされており、今回のケースにおいても概ね同様の傾向が確認できる。しかしながら、鉄筋比の増加に対して最大ひび割れ幅が増加しているケースもあり、これは解析モデル上において発生したひび割れ本数による影響であると考えられる。図-4に示すモデル上のひび割れ発生状況より、材齢初期(5.0日~7.0日)のひび割れ発生本数および順序が分かる。図-5に壁全長に発生したひび割れの最大値の合計である「積算ひび割れ幅」とひび割れ本数を示す。例えば、 $W=1.5$, $L/H=3.0$ のケースにおいて、鉄筋比 $p=0.212\%$ のみ壁全長に幅0.44mmのひび割れが2本発生したが、他の鉄筋比では壁部材長さの1/2位置付近にひび割れが発生したため壁全長ではひび割れが1本発生したこととなる。 $p=0.212\%$ の最大ひび割れ幅は他の鉄筋比より小さいが壁全長における積算のひび割れ幅(以下、全長積算ひび割れ幅)は他の鉄筋比と比べて最も大きくなるのが分かった。また、各L/H毎のケースでは、全長積算ひび割れ幅は鉄筋

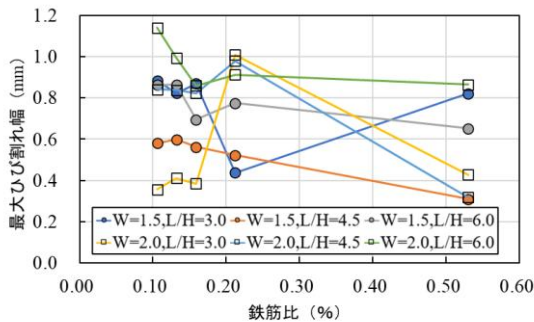


図-3 最大ひび割れ幅と鉄筋比

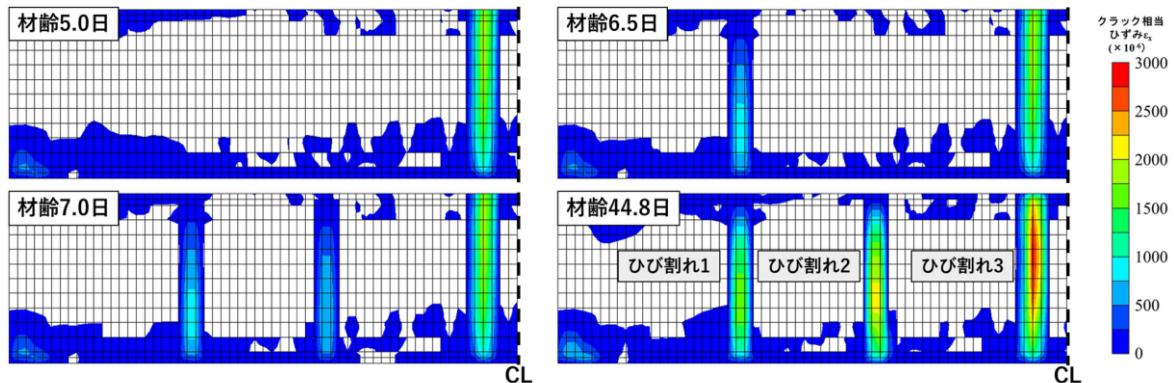


図-4 ひび割れ発生状況 ($W=1.5$ m, $L/H=6.0$, $p=0.106\%$)

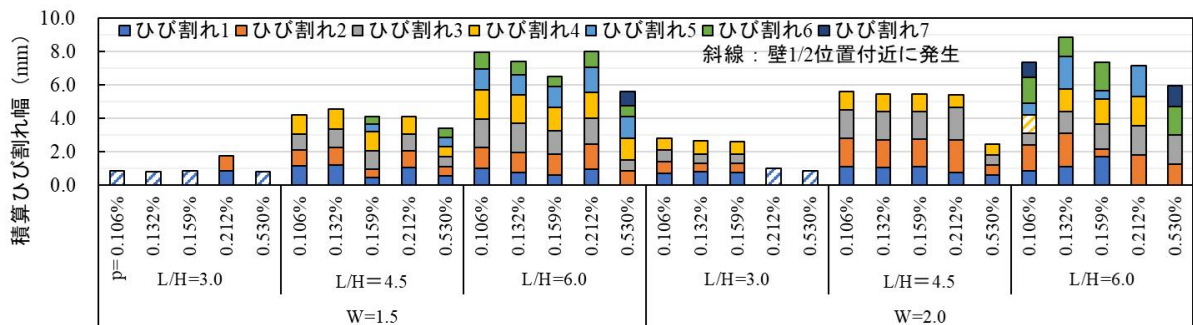


図-5 全長積算ひび割れ幅とひび割れ本数

比の増加により低下する傾向にあることが分かる。

実構造物における壁部材 (W=1.5m, L=9.0m, H=3.0m) では、材齢 143 日時点で、壁部材を 4 分割するように最大 0.30mm, 平均 0.275mm の 3 本のひび割れが観察された。一般にひび割れは 1~2H 間隔で発生するとされているが、実構造物では概ね 0.75H 間隔でひび割れが発生したことになる。

この実構造物は今回の解析ケースの内、W=1.5m, L/H=3.0, p=0.106% のケースに相当する。解析では壁全長に対し最大 0.89mm のひび割れが 1 本発生した。実構造物同様 3 本のひび割れが発生したと仮定すると、1 本あたり約 0.30mm のひび割れが発生したこととなり、実測値のひび割れとほぼ一致した。

解析ではひび割れ本数やひび割れ発生位置を実際のひび割れ発生状況に近づけるのは難しいとされているが、モデル上に発生したひび割れ幅の積算値を予測されるひび割れ本数で除した 1 本あたりのひび割れ幅はより実測に近い値になると考えられる。図-6 に 0.75H 間隔でひび割れが発生したと仮定した際の L/H と 1 本あたりのひび割れ幅の関係を示す。実際は鉄筋比の大小によりひび割れ本数も変化する可能性があるが、今回は実構造物に従い 0.75H 間隔に 1 本ひび割れが入ると仮定した。0.75H 間隔でひび割れが発生するとひび割れ本数は L/H=3.0, 4.5, 6.0 で各 3, 5, 7 本となる。L/H が増加するにつれ、発生する応力やひび割れ幅の積算値が大きくなり、1 本あたりのひび割れ幅は大きくなっている。W=1.5 よりも W=2.0 の方が全体的にひび割れ幅は大きく、鉄筋比の増加によるひび割れ幅の低下量は大きい。特に、p=0.106~

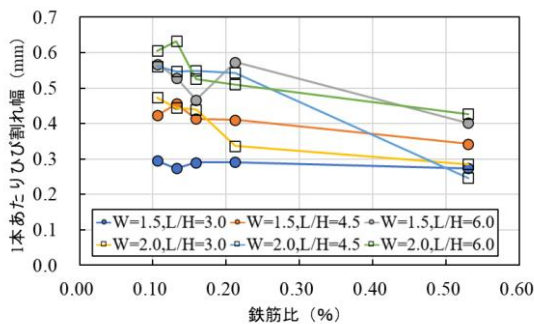


図-6 1本あたりのひび割れ幅

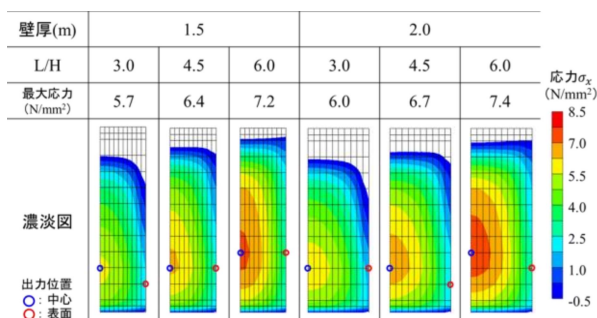


図-7 最大応力・最小ひび割れ指数濃淡図

0.212%の範囲と比較して p=0.530%では W=1.5, 2.0 共にひび割れ幅が大幅に低下していることが分かる。

4. ひび割れ制御鉄筋配置の評価

4.1 ひび割れ制御鉄筋配置位置

外部拘束による温度ひび割れは一般的に部材を貫通する。その際、貫通ひび割れは部材内部の引張応力が引張強度を卓越した時点で発生し、表面まで進展すると考えられている。また、ひび割れが発生したコンクリートは部材に発生する引張応力を担うことができなくなり、コンクリートに代わり鉄筋が引張応力を負担することとなる。本解析では部材内部でひび割れが発生しコンクリート部分が負担できなくなった分の引張応力を部材内部に配置したひび割れ制御鉄筋が負担することで、表面に発生するひび割れ幅の抑制に効果があるかを検証した。

まず、図-7 の最大応力および最小ひび割れ指数を示した材齢 45 日での壁中心の濃淡図よりひび割れ制御鉄筋の配置位置を検討した。最大応力濃淡図より最大応力が発生する材齢において部材断面の全断面で引張応力が発生しているのではなく、部材上部では圧縮応力が作用していることが分かる。一方、L/H が大きくなるほど同断面でも引張応力の発生する面積が広がっている。

今回のケースでは特に L/H=3.0 のとき、部材上部だけでなく表面側の上部までもが圧縮応力の影響を受けていることが分かる。このことから、実構造物 (L/H=3.0) では概ね 0.75H 間隔でひび割れが発生しており、引張応力が壁高さの 75%程度までしか発生していないため、実質的な L/H は 3.0 ではなく、4.0 程度に大きくなっていると考えられる。さらに、ひび割れ指数は 1.0 でひび割れ発生確率が 50%, 0.5 でほぼ 100%とされている²⁾ため、最小ひび割れ指数はひび割れ発生確率の大きい 0~1.0 の範囲で濃淡図を示している。ひび割れ指数も最大応力同様に L/H が大きくなるほど、最小ひび割れ指数が小さくなるのと同時にひび割れ発生確率の高い部分の面積が広がっている。これらの結果から圧縮応力が作用している範囲かつ、ひび割れ指数が 1.0 以上の範囲を除外した部材内部 (高さ方向に 10 メッシュまで) にひび割れ制御鉄筋を配置することで効果的に表面へのひび割れ進展を防

ることができると考えられる。

3章での鉄筋配置(かぶり 70mm)を基準配置として、鉄筋比 0.106%の基準配筋に加えてひび割れ制御鉄筋(全て D16)を配置した断面図および解析モデルを図-8に示す。配置位置は表面から壁厚深さ方向に概ね 1/4 位置、1/2 位置に配置し、鉄筋比は 0.132, 0.159, 0.212%とした。図-8には W=1.5m の配置図を示すが、W=2.0m も同様に配置しており、詳細な配置位置を表-2に示す。

4.2 ひび割れ制御鉄筋を配置した解析モデルでのひび割れ幅解析結果

3章で示した基準ケースおよびひび割れ制御鉄筋を配置した解析モデルでの 1 本あたりのひび割れ幅を図-9に示す。W=1.5, 2.0m 共に鉄筋比の増加に伴うひび割れ幅の低下傾向が確認された。また、同一鉄筋比であっても表面から 1/2 位置および 1/4 位置にひび割れ制御鉄筋を配置することで、基準配置と比較してひび割れ幅は抑制されていた。さらに、1/2 位置および 1/4 位置での配置位置によるひび割れ幅への影響は概ね同様であったが、W=1.5m の鉄筋比 0.159%, 0.212%ケースでは 1/2 位置よりも 1/4 位置にひび割れ制御鉄筋を配置することで、ど

の L/H においてもひび割れ幅を抑制することができた。

特に、図-10に示す L/H と全長積算ひび割れ幅の関係より L/H=6.0 では、鉄筋比が 2.5 倍となる $p=0.530\%$ の基準ケースよりも、鉄筋比 0.212%で部材内部にひび割れ制御鉄筋を配置することによりひび割れ抑制効果が大きくなる事が分かる。同一鉄筋比の基準配筋に比べても 1/2 位置では 56%, 1/4 位置では 53%まで全長積算ひび割れ幅を抑制できた。また、図-11に、0.75H 間隔でひび割れが発生すると仮定した場合の 1 本あたりのひび割れ幅を示す。部材内部にひび割れ制御鉄筋を配置することで L/H=4.5 よりも L/H=6.0 の方が 1 本あたりのひび割れ幅が 0.02~0.04mm 小さくなっており、図-10 の全長積算ひび割れ幅が低下していることから L/H が大きいほど鉄筋の内部配置が効果的であると考えられる。特に、L/H=6.0 では基準配置の鉄筋比 0.106, 0.212%と比較して、1/2 位置では 56%, 1/4 位置では 53%までひび割れ幅が低減され、鉄筋比 0.530%に対してはそれぞれ 1/2 位置では 80%, 1/4 位置では 75%まで 1 本あたりのひび割れ幅が抑制された。

一方、W=2.0m では鉄筋比 0.212%のみ 1/2 位置よりも 1/4 位置に配置することでひび割れ抑制効果を確認できた。ただし、W=1.5m と比較すると応力も大きくなるため、内部配筋としつつ、鉄筋比を適切に評価することが効果的であると考えられる。図-12に図-9、図-10で示した W=1.5かつ L/H=6.0 のひび割れ発生時の壁深さ方

表-2 ひび割れ制御鉄筋配置

配置位置	W=1.5m	W=2.0m
1/2 位置	表面より 637.5mm	表面より 850mm
1/4 位置	表面より 337.5mm	表面より 450mm

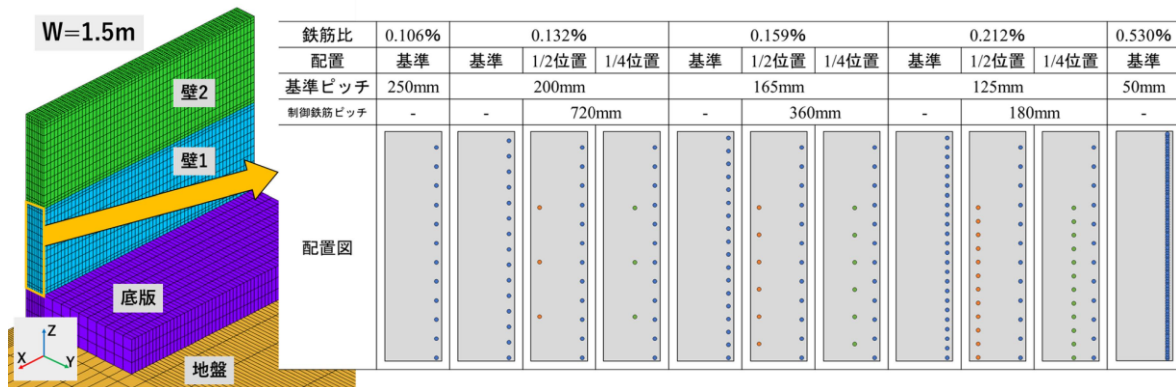


図-8 鉄筋配置図

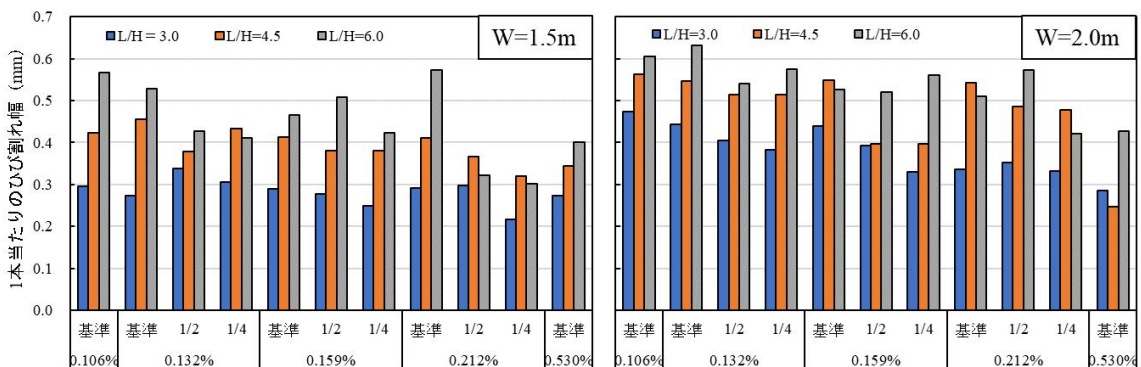


図-9 各鉄筋配置ケースにおける 1 本あたりのひび割れ幅

向におけるひび割れ発生箇所でのクラック相当ひずみ分布を示す。本解析では底版を非発熱体としたため発熱体とした場合に比べて拘束が大きくなり、クラック相当ひずみが通常発生する値より大きくなったと考えられるが、鉄筋の配置の影響による傾向は妥当であると思われる。

基準ケースでは表面から 70mm 位置にのみ配筋しており、鉄筋比が増加するにつれて表面に発生するクラック相当ひずみが深さ 300mm 程度の位置より低下していることが分かる。一方、深さ 1/2 位置に配筋したケースは壁中心部ではクラック相当ひずみを最も抑制できているが、制御鉄筋の位置よりも表面側でひずみが再度大きくなり、壁表面への進展は基準 0.212% よりも大きくなった。1/4 位置に配筋したケースでは壁中心部でのクラック相当ひずみは基準ケースと同等であるが、部材 1/4 位置に配置したひび割れ制御鉄筋がクラック相当ひずみを抑えることで、表面での発生を基準 0.530% と同等にまで低下させることができたと考えられる。

以上の結果より、温度応力解析およびひび割れ幅解析を用いて適切な位置にひび割れ制御鉄筋を配置することで表面ひび割れ幅を効果的に抑制できる可能性を示した。

5. まとめ

本論文ではマスコンクリートの温度応力解析およびひび割れ幅解析を実施し、鉄筋比およびひび割れ制御鉄筋の配置位置による温度ひび割れの抑制効果を解析的に検討した。以下に、本論文で得られた結論を示す。

- (1) 部材厚が厚いほど、壁延長が長いほど、鉄筋比が小さいほどひび割れ幅は大きくなる。
- (2) 最大ひび割れ幅はモデルの形状や発生したひび割れ本数により大きく異なるため、部材全長に発生するひび割れ幅の積算値から 1 本あたりのひび割れ幅を算出することにより解析値は実測値とほぼ同等のひび割れ幅が得られた。
- (3) ひび割れ制御鉄筋を部材内部に配置することで、同一鉄筋比であっても表面にのみ配筋した基準ケースよりひび割れ幅を抑制できることが示唆された。
- (4) 特に W=1.5m においてひび割れ制御鉄筋を壁深さ 1/2 位置に配置したケースは同一鉄筋比の基準ケースよりもひび割れ幅を 56% まで抑制できた。さらに、1/4 位置に配置したケースは 1/2 位置に配置するよりもひび割れ幅を抑制できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 小嶋進太郎ほか：非線形 3 次元 FEM による温度応力解析手法の検証と温度ひび割れ挙動の考察，鹿島技術研究所年報，第 69 号，pp.86-91，2021.12
- 2) コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ

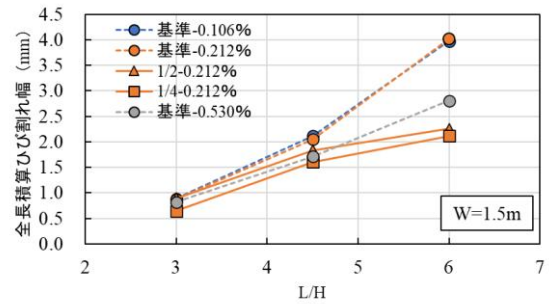


図-10 L/H と全長積算ひび割れ幅

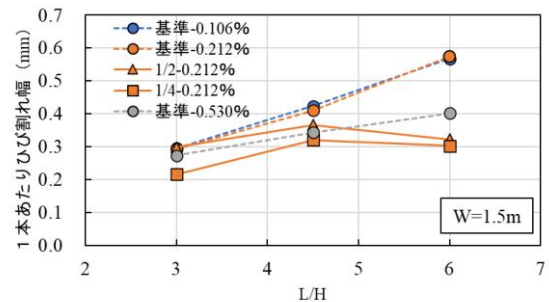


図-11 L/H と 1 本あたりのひび割れ幅

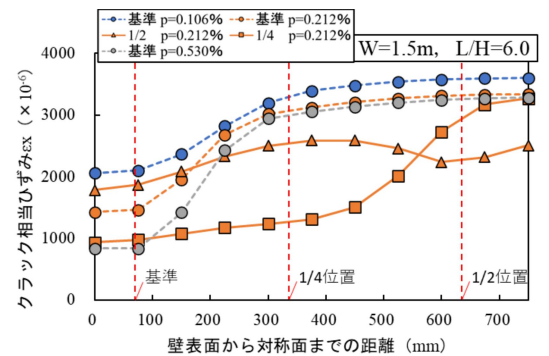


図-12 壁深さ方向のクラック相当ひずみ

制御指針 2016, 2016

- 3) 山口県土木建築部：コンクリート構造物品質確保ガイド 2021, 2021.3
- 4) 田村隆弘，林宏次郎，中谷俊晴：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.1486-1491, 2014
- 5) 山本翔太，横関康祐，篠田佳男：ひび割れ幅解析におけるメッシュ分割の影響に関する検討，第 51 回関東支部技術研究発表会，V-43, 2024
- 6) 国土地理院 地理院地図：
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
(閲覧日：2024 年 12 月 10 日)
- 7) 中村秀明，小野定：コンクリートの収縮ひび割れ対策②解析プログラムによるひび割れ幅の検討，コンクリート工学，Vol.50, No.3, pp.290-296, 2014