

論文 隅角部擁壁のたて壁に生じたひび割れの発生原因に関する検討

金田 一男*1・富山 潤*2・伊良波 繁雄*3

要旨：本論文は、コンクリートの水和発熱に対して有限要素法による温度解析および応力解析、また、作用土圧に対してフーリエ級数による断面力解析を実施し、コンクリート隅角部擁壁のたて壁に生じたひび割れの発生原因を数値解析的に検討したものである。その結果、コンクリートの水和発熱の温度降下期間において隅角部たて壁のひび割れ発生方向と垂直な引張応力度が確認され、コンクリート打設直後にたて壁の内部で微少なひび割れが生じる可能性があり、その後の埋戻し土圧作用によって、たて壁の表側が引張され、ひび割れが顕著に現れた可能性が見出された。

キーワード：コンクリート隅角部擁壁、ひび割れ、有限要素法、土圧、温度応力解析

1. はじめに

土地造成等にコンクリート擁壁構造物がよく使用されている。その擁壁の平面配置およびブロック分けによって、直線部の他に隅角部擁壁が生じる。しかし、隅角部擁壁の設計方法に関する明確な規定がないため^{1),2),3)}、また、隅角部たて壁の特有な拘束条件等により、その表側(土圧が作用していない側)にひび割れが発生しやすいことが分かっている^{4),5)}。しかし、今までの研究はその発生メカニズムを解明しているとは言えない。

本論文は、既設のコンクリート隅角部擁壁のたて壁に生じたひび割れを研究対象とし、そのひび割れの発生メカニズムを検討し、今後の設計参考資料を提供することを目的とする。

本論文では、隅角部擁壁の施工順序および拘束条件を配慮し、コンクリート打設直後の水和発熱による温度ひび割れの発生可能性を有限要素法を用いて検討し^{6),7)}、また、著者らが提案したフーリエ級数による二隣辺固定二辺自由板の解析手法^{8),9)}を用いて、ひび割れ発生箇所の曲げモーメント分布状況を検討し、ひび割れ発生原因について考察した。

化して打設し造ったものであるため、拘束条件等が複雑である。この擁壁に使用されたコンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=24\text{kN/mm}^2$ であり、そのレディーミクスコンクリートの配合は表-1に示す通りである。また、そのスランブは8.0cm程度であり、空気量は約4.8%である。

擁壁の背後に単位体積重量 $\gamma=18.0\text{kN/m}^3$ の粘性土を用いて埋め戻され、底版下面からの地下水高は1.5mである。

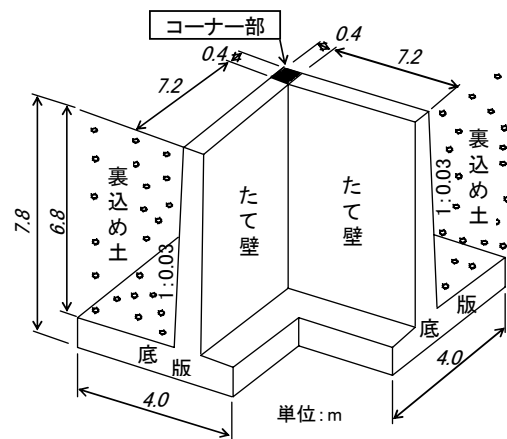


図-1 検討対象隅角部擁壁の詳細

2. 検討対象隅角部擁壁

検討対象隅角部擁壁の詳細を図-1に示す。そのたて壁の幅は7.2m、高さは6.8m、天端の厚さは0.4mである。また、たて壁の裏込土側に1:0.03の勾配を設けているため、たて壁付根の厚さが0.60mとなっている。このような隅角部のたて壁は、底版コンクリートを打設・硬化した後互いにほぼ直角となるたて壁のコンクリートを一体

表-1 レディーミクスコンクリートの配合表 (kg/m³)

セメント	水	細骨材		粗骨材	混和剤
		(a)	(b)	(c)	(d)
322	164	498	341	999	1.288
水セメント比 (%)		51.0		細骨材率 (%)	46.3

(a)：東村新川産 海砂； (b)：琉球セメント安和鉱山 砕砂
(c)：本部石山原鉱山 砕石2005； (d)：AE減水剤(標準形)

*1 (株) ホープ設計 技術管理部構造部長 工修 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科准教授 工博 (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

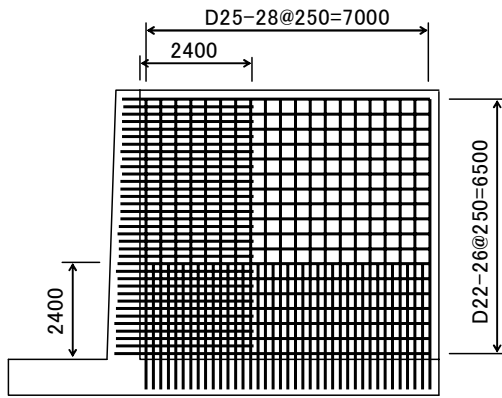


図-2 隅角部たて壁の土圧作用側の配筋イメージ

本隅角部たて壁に使用した鉄筋種類は SD345 であり、隅角部であるため縦・横両方向に主鉄筋を配置している。図-2 は本隅角部たて壁の土圧作用側の配筋イメージを示す。縦方向には D25-@125 の鉄筋を配置しているが、付け根から約 2.4m の位置で段落としされたため、それより上の部分の配筋は D25-@250 となっている。横方向にはコーナー部から D22-@125 の鉄筋をたて壁の全高さ範囲に配置しているが、コーナー部から約 2.4m の位置で段落とししている。

3. 隅角部たて壁のひび割れ発生概要

検討対象隅角部のたて壁は、平成 16 年 12 月に打設され、打設後に 1 週間程度の自然養生期間を設けていた。また、材齢 28 日のコンクリート設計基準強度に達した後、擁壁背後の埋戻しが実施された。更に 1 ヶ月後に隅角部に対するひび割れ調査を実施したが、異常は見付からなかった。しかし、その数ヶ月後に写真-1 および図-3 に示すひび割れが確認された。このひび割れがコーナー付近を始点に斜め上に展開し、その最大ひび割れ幅が 0.15mm である。

更に、ひび割れの深さを確認するために、たて壁の表

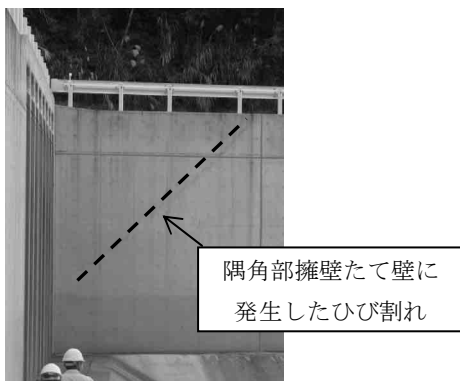


写真-1 隅角部たて壁のひび割れ発生状況

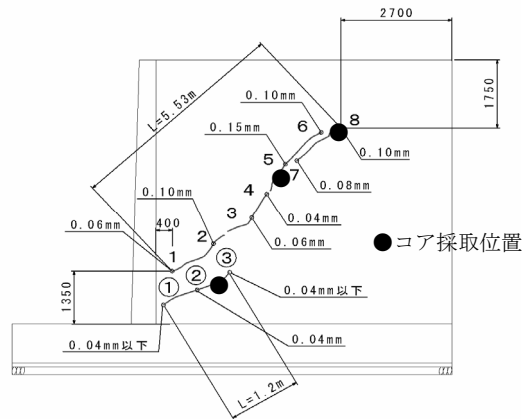


図-3 隅角部たて壁のひび割れ調査結果

側からひび割れ沿いに上中下 3 ヶ所のコア採取を実施した。3 本の中で中間位置にあるコアのひび割れ深さが最も深く、そのコア状況を写真-2 に示す。同写真から分かるように、コアの長さは 220mm 程度であり、肉眼で確認できるひび割れ深さは 170~210mm 程度である。削孔位置でのたて壁の厚さは約 500mm であるため、ひび割れが貫通しておらず、表側のみに生じているものと判断した。また、表側の表面から 50mm 付近でのひび割れ幅が 0.3mm に達しており、これは観測誤差の他に、採取したコアが開放状態となり、そのひび割れが大きくなったと考えられる。表面からの距離が更に深くなるとひび割れ幅は次第に小さくなる。

上述したひび割れの発生原因は、たて壁のコンクリート打設時に生じる水和発熱による温度ひび割れ、コーナー部と先行打設した底版の拘束を受け、たて壁が自由に収縮できないために生じる伸縮ひび割れおよびたて壁背後に作用する土圧による応力ひび割れなどが挙げられるが、今後の類似構造部のひび割れ防止のために、このようなひび割れの発生メカニズムを明らかにすることが重要と考えられる。

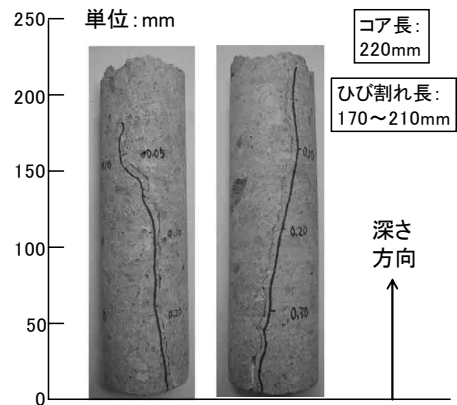


写真-2 隅角部たて壁のひび割れ深さ分布

4. 温度応力解析によるひび割れ発生原因の検討

4.1 検討手法

コンクリートの水和発熱によって打設直後のコンクリート温度が上昇する。隅角部のたて壁はフーチングやコーナー部の外部拘束および配置している鉄筋の内部拘束により温度応力度が生じる。また、打設直後のコンクリートの引張強度が低いため、温度応力によりコンクリートの中にひび割れが生じる可能性がある。

本論文では、隅角部たて壁を対象として有限要素法による温度応力解析をコンクリート打設時から自然養生期間を含めた10日間の応力分布を検討し、温度によるひび割れ発生の有無を検討する。また、温度解析と応力解析は一方向弱連成解析とし、応力解析は静的な釣合式を用いた増分解析とした。

(1) 温度解析

非定常熱伝導方程式は式(1)で与えられる⁶⁾。

$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + H \quad (1)$$

ここで、 c は比熱(kcal/kg・°C)、 ρ は密度(kg/m³)、 k_x 、 k_y 、 k_z はそれぞれデカルト座標系(x-y-z)のx、y、z軸方向の熱伝導率(kcal/m・h・°C)、 T は温度(°C)、 t は材齢(日)、 H は単位時間・単位体積当たりのセメントの水和発熱速度(W/kg)である。

式(1)を空間に関しては有限要素法で、時間に関してはクランク-ニコルソンの θ 法($\theta=1$)により離散化を行った。また、本解析では断熱温度上昇曲線としてコンクリート標準示方書[設計編]⁷⁾に基づき式(2)を設定した。

$$Q(t) = Q_\infty (1 - \exp(-\gamma \cdot t)) \quad (2)$$

ここで、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量(°C)、 Q_∞ : 終局断熱温度上昇量(°C)、 γ : 温度上昇速度に関する定数。また、 Q_∞ および γ はそれぞれ式(3)および式(4)で与えられる。

$$Q_\infty = aC + b \quad (3)$$

$$\gamma = gC + h \quad (4)$$

ここで、検討対象隅角部たて壁には、普通ポルトランドセメントが使用され、また、式(3)(4)の係数は、打込み時の平均気温が18°C前後であったことから文献7)の解説表4.2.1より18°Cに最も近い打設温度20°Cの値($a=0.11$ 、 $b=13.0$ 、 $g=0.0038$ 、 $h=-0.036$)と設定した。更に、表-1より本隅角部たて壁のレディーミクスコンクリートの単位セメント量は $C=322\text{kg/m}^3$ とした。また、式(1)の水和発熱速度 H は式(2)より得られた断熱温度上昇特性より式(5)で与えられる。

$$H = \rho c \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (5)$$

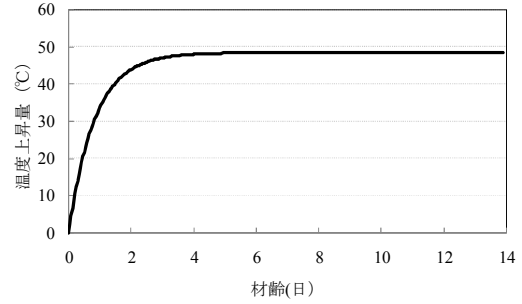


図-4 断熱温度上昇曲線

ここで、 $T_{t+\Delta t} - T_t$ は、時間増分 Δt 間の温度上昇量である。図-4に今回解析に用いる断熱温度上昇曲線を示す。

(2) 温度応力解析

温度変化による伸縮力ベクトル $\{f^T\}$ は式(6)で表現した。これを応力解析の境界値問題に付加することで温度変化による温度応力を求めることができる。

$$\{f^T\} = \int [B]^T [D] \{\varepsilon^T\} dV \quad (6)$$

ここで、 tr は転置記号、 $[B]$ は変位-ひずみマトリックス、 $[D]$ は応力-ひずみマトリックス、 $\{\varepsilon^T\}$ は温度変化による伸縮ひずみであり、式(7)で表す。

$$\{\varepsilon^T\}^{tr} = [\alpha \Delta T \quad \alpha \Delta T \quad \alpha \Delta T \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (7)$$

ここで、 α は熱膨張係数($10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)である。また、本研究では温度応力を計算するためにコンクリート標準示方書[設計編]⁷⁾に従い、材齢 t 日に応じて、圧縮強度 $f'_c(t)$ (N/mm²)を式(8)、引張強度 $f_{tk}(t)$ (N/mm²)を式(9)および有効ヤング係数 $E_e(t)$ (N/mm²)を式(10)でそれぞれ定義している。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} d(i) f'_{ck} \quad (8)$$

$$f_{tk}(t) = c \sqrt{f'_c(t)} \quad (9)$$

$$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (10)$$

ここで、 $a=4.5$ 、 $b=0.95$ 、 $d(28)=1.11$ 、 $d(91)=1.0$ 、 $c=0.44$ i は設計基準強度の基準材齢(28または91日)、 f'_{ck} は材齢 i 日の圧縮強度。 a 、 b 、 $d(i)$ はセメントの種類で決まる定数であり、普通ポルトランドセメント使用時を示した。 $\phi(t)$ は温度上昇におけるクリープの影響が大きいことによる弾性係数の補正係数で、材齢3日まで $\phi=0.73$ 、材齢5日以降 $\phi=1.0$ 、材齢3~5日は直線補間とした。

温度変化による体積変化に起因した応力は式(11)で与えられる。

$$\{\sigma_{ij}\} = [D] \{\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{kk}^T\} \quad (11)$$

ここで、 $[D]$ は材齢に応じた力学特性を考慮した応力-ひずみマトリックスである。 $\{\epsilon_{ij}\}$ は全ひずみ、 $\{\epsilon_{kk}^T\}$ は温度変化による伸縮ひずみである。

4.2 解析モデル

有限要素法による温度応力解析には、図-5に示すように隅角部たて壁の片側半分をモデル化した領域を用いた。解析には四面体1次要素を用い、要素数は190,282要素であり、節点数は37,902点であり、鉄筋は考慮していない。また、乾燥収縮や自己収縮の影響については、コンクリート打設後の外部環境の不明確さや収縮オーダーを勘案し、今回の解析では考慮していない。

表-2に温度解析条件を示す。また、打設時のコンクリート温度は施工記録より22℃と設定し、ため池周辺の気温は打設時(H16.12)の月平均気温を参考に18℃とした。

また、応力解析における境界条件は、既設コンクリートと接触する面を完全固定とし、温度による伸縮力として式(6)を与えている。

4.3 検討結果

図-6に示すたて壁のサンプリング点(3カ所)の温度履歴の計算結果を図-7に示す。また、その位置での最大主応力の経時変化を図-8に示す。なお、サンプリング点の位置は実際のたて壁に生じたひび割れ位置を想定して決定したものである。

図-7は、各サンプリング点における温度履歴の違いを表し、サンプリング点1では材齢0.5日、サンプリング点2,3では材齢1日付近で温度がそれぞれピークに達している。それ以降は低下し、材齢7日では、すべてのサンプリング点で外気温(18℃)に収束している。

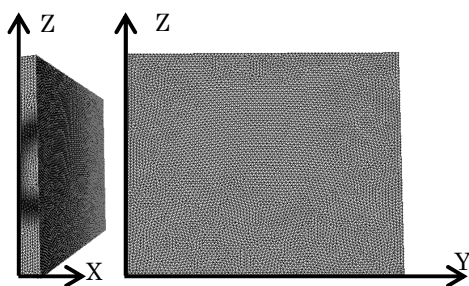


図-5 有限要素法による温度解析モデル

表-2 温度解析条件

項目	単位	値	備考	
密度	Kg/m ³	2300	---	
熱伝導	W/m・℃	2.7	2007制定 コンクリート 標準示方書 設計編 参照	
比熱	kJ/kg・℃	1.1		
表面の熱伝達率	W/m ² ・℃	上面		13
		型枠		6
		既設コン	2.7	

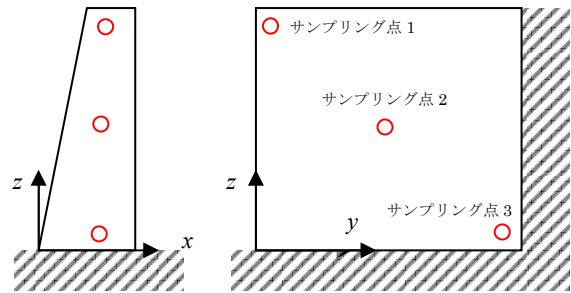


図-6 サンプリング点の位置

図-8の最大主応力の経時変化からは、温度上昇に伴う膨張により最大主応力が圧縮も経験している。しかし、材齢1.7日以降から引張に転じており、サンプリング点3においては著しい上昇率を示していることがわかる。

本論文では、数値解析で求められる最大主応力(引張)とコンクリートの引張強度との比をひび割れ指数⁷⁾として用いてひび割れ発生の定量評価を行う。ひび割れ指数が小さいほどひび割れが発生する確率が高いことを表す。

図-9に材齢に応じた力学特性を考慮したひび割れ指数を示す。図からわかるようにサンプリング点3において、材齢2日以降よりひび割れ指数が急激に小さくなり、材齢3日頃からひび割れ指数が1(ひび割れ確率が50%)以下となっており温度応力によってひび割れが生じる可能性があることがわかる。また、サンプリング点2においてもひび割れ指数が1付近まで小さくなっている。

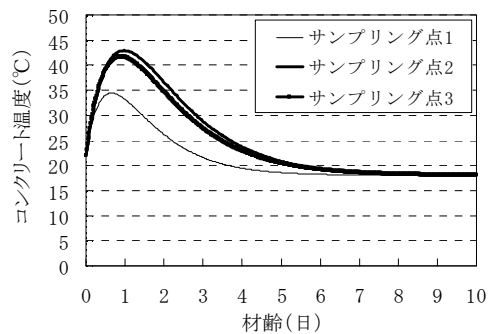


図-7 各サンプリング点の温度履歴

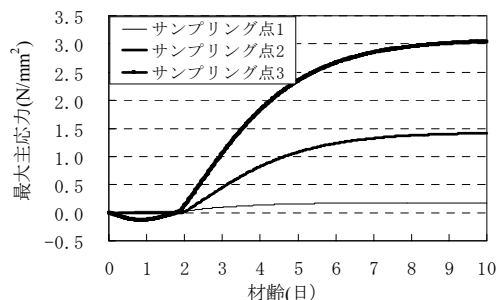


図-8 各サンプリング点の最大主応力の経時変化

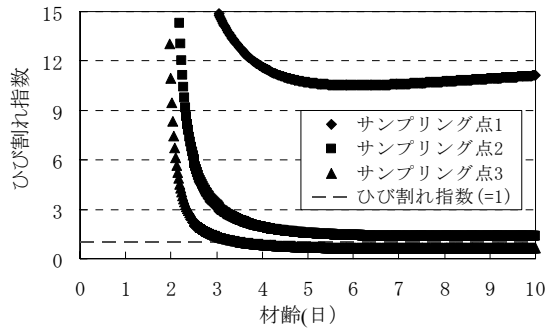
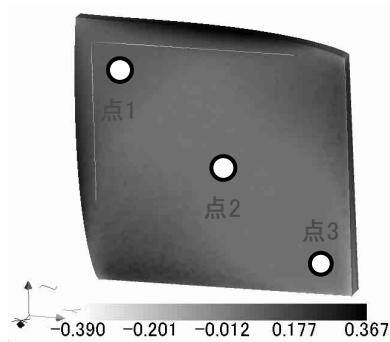
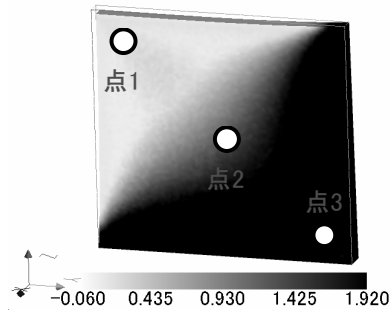


図-9 各サンプリング点のひび割れ指数



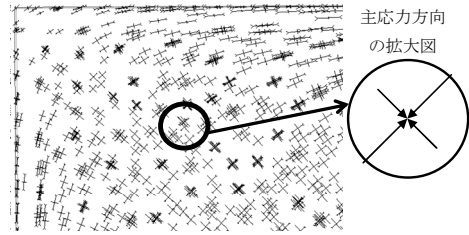
a) 材齢 1 日



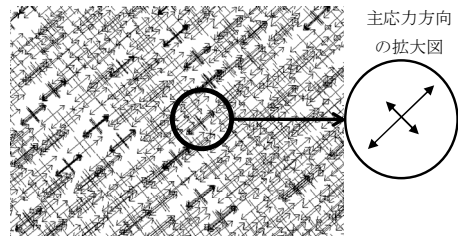
b) 材齢 10 日

図-10 最大主応力 (N/mm²) 分布と変形 (500 倍)

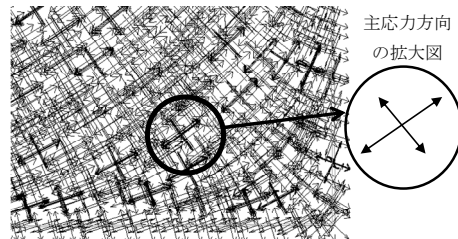
次に、水和発熱によって温度が最も上昇した材齢 1 日と最終計算結果の材齢 10 日の最大主応力と材齢 10 日におけるサンプリング点位置付近の主応力方向について検討する。図-10 は材齢 1 日と 10 日における最大主応力と変形 (500 倍) を表している。図-10 a) に示す材齢 1 日の応力状態では、熱膨張によって図中のたて壁の自由端で引張応力が局所的に大きな値を示しているが、式(9)より得られる材齢 1 日の引張強度 (0.97N/mm^2) に達していない。しかし、図-10 b) に示す材齢 10 日における最大主応力度は、その引張強度 (1.92N/mm^2) を超える領域が固定端側から中央に向かって分布している。図-11 に材齢 10 日における各サンプリング点付近の主応力方向を示す。サンプリング点 1 では主応力はすべて圧縮を示していることがわかる。サンプリング点 2, 3 では、



a) サンプリング点 1 付近



b) サンプリング点 2 付近



c) サンプリング点 3 付近

図-11 各サンプリング点の主応力方向

最大主応力が実際に生じたひび割れと直交する方向に引張として生じていることがわかる。

以上の解析結果より、サンプリング点 2, 3 付近ではひび割れ指数が 1.0 程度、コンクリート中に発生した最大応力度がその引張強度を超過しているため、初期の段階では温度によって微細なひび割れが生じていた可能性が考えられる。

5. フーリエ級数解析によるひび割れ発生の検討

土圧によるひび割れの発生有無を検討する。土圧に対する隅角部たて壁の曲げモーメント分布状況を著者が提案した二隣辺固定二辺自由な板のフーリエ級数による解析手法を用いて検討する^{8), 9)}。図-12 はその解析モデルを示す。なお、作用土圧は隅角部たて壁に最も不利となるような土圧係数を用い、既存の報告書より、 $P_1=0.0\text{kN/m}^2$ 、 $P_2=44.66\text{kN/m}^2$ とした。また、図-12 に示す解析モデルにおいて、隅角部たて壁の幅を $a=7.2\text{m}$ 、高さを $b=6.8\text{m}$ とする。土圧の作用範囲は実際の埋め戻し位置に合わせ $0.2 < y < b=6.8\text{m}$ とした。

フーリエ級数による解析結果として、図-13 は隅角部たて壁の表側にひび割れを生じさせる正の曲げモーメント分布状況を示す。図-13 a) から分かるように、 $+M_x$ の

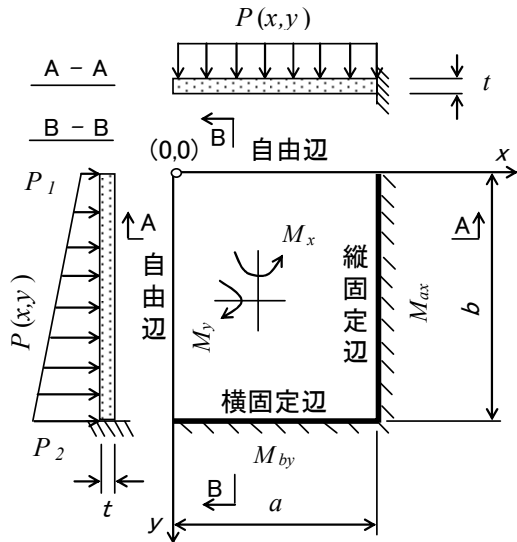


図-12 二隣辺固定二辺自由板としての解析モデル

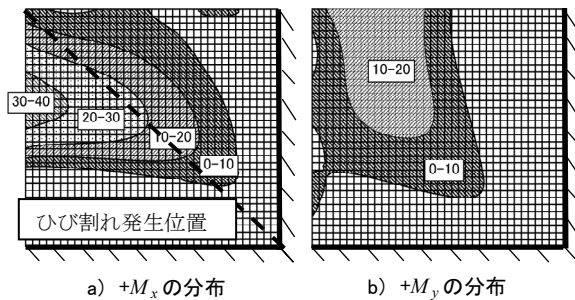


図-13 土圧作用による隅角部たて壁の正の曲げモーメント (kN・m/m) 分布状況

最大値は $40\text{kN}\cdot\text{m/m}$ 程度であり、ひび割れ発生箇所での曲げモーメントは最大 $30\text{kN}\cdot\text{m/m}$ 程度である。図-13 b) から、 $+M_y$ の最大値は $20\text{kN}\cdot\text{m/m}$ 程度である。

参考までに、道路橋示方書・下部構造編¹⁰⁾の式(解7.3.1)に示すひび割れ曲げモーメントを算出する。コンクリートの設計基準強度 $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ の場合、隅角部たて壁の平均厚さを 0.5m とすると、ひび割れ曲げモーメントは $M_c=79.7\text{ kN}\cdot\text{m/m}$ となる。この値はひび割れ発生箇所での正の曲げモーメント $+M_x=30\text{kN}\cdot\text{m/m}$ より 2.6 倍以上大きい。このような結果から、 $+M_y$ の複合作用があっても、土圧のみの作用によりたて壁の表側にひび割れが生じる可能性が小さいと判断している。

また、これらの曲げモーメントを用いて、図-2に示す配筋状況に対する断面力の照査結果は、鉄筋の引張応力度とコンクリート圧縮応力が共に許容値以内であり、構造安全性に問題はないことも確認できた。

6. まとめ

本論文は、有限要素法による温度応力解析、フーリエ級数による土圧の応力度解析手法を用いて、コンクリー

ト隅角部擁壁のたて壁のひび割れ発生原因を数値解析的に検討した。本論文で得られた知見を以下に示す。

- 1) 水和発熱の温度降下期間において、たて壁の内部に引張応力度を超える最大主応力領域が確認された。これらの最大主応力方向はたて壁に生じたひび割れ方向と垂直となり、たて壁のコンクリート打設直後に微細なひび割れが生じていた可能性がある。
- 2) 土圧作用によりたて壁の表側に正の曲げモーメントが分布されているが、その値はひび割れ曲げモーメントよりも小さく、設計で想定していた最大土圧のみでは隅角部たて壁にひび割れを生じさせることが困難と考えられる。
- 3) たて壁のコンクリート打設直後に生じた微細なひび割れが、埋戻し土圧の連続的な作用やその後の乾燥収縮の影響を受け次第に大きくなり顕著化されたものと考えられる。
- 4) 隅角部たて壁の拘束条件および温度応力分布が複雑であるため、このような擁壁を設計する際に、幅縮小による二辺固定辺の影響度合の軽減や温度管理等を考慮することが必要である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針，1999.3
- 2) 農林水産省構造改善局建設部：土地改良事業設計指針ファームポイント，1999.3
- 3) 農林水産省構造改善局建設部設計課：土地改良事業標準設計，第9編 擁壁，pp.62~67，1993.5
- 4) 金田一男ほか：コンクリート隅角部擁壁のたて壁の設計について，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.7-12，2006
- 5) 金田一男ほか：隅角部擁壁のたて壁の曲げモーメント分布とその配筋の最適化，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.31-36，2008
- 6) 矢川元基，宮崎則幸共著：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1985
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，pp.31-36，2007 制定
- 8) 金田一男ほか：土圧を受ける二隣辺固定二辺自由板の解析解とその応用，構造工学論文集 Vol.50A，pp.1025-1034，2004
- 9) Kaneda, K. Iraha, S. Takamine, T. and Shimabuku, K. : An analytical study of rectangular plates under triangularly distributed regional loads, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol. pp.17-248, Aug. 2005
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV・下部構造編，pp.173~176，2002.