

論文 コンクリート隅角部擁壁のたて壁の設計について

金田 一男^{*1}・伊良波 繁雄^{*2}・高嶺 哲夫^{*3}・山城 建樹^{*4}

要旨：土圧を受けるコンクリート隅角部擁壁のたて壁の挙動は複雑であるため、設計手法が確立されていないのが現状である。そのたて壁を二隣辺固定二辺自由版にモデル化した場合、版厚や解析モデルの影響で解析結果の適用性に関する検討が必要である。本研究は有限要素法とフーリエ級数による解析手法を用いて、コンクリート隅角部擁壁のたて壁の応力度分布や固定辺に生じる断面力に関する検討を行い、たて壁の設計上における問題点を明らかにした。

キーワード：コンクリート、隅角部擁壁、たて壁、土圧、有限要素法、フーリエ級数

1. はじめに

ため池、道路の切盛土斜面、宅地造成などにコンクリート擁壁構造物がよく使用されている。その中では、片持ちばり式の擁壁構造物がたて壁と底版で構成され、土圧や裏込め土の自重の作用に対して、たて壁と底版は互いに固定された片持ち版として設計されている^{3~4)}。

一方、図-1に示すようなため池の擁壁構造物の平面配置では、一般部の外に、a)直角隅角部、b)鈍角隅角部及びc)鋭角隅角部が生じる。

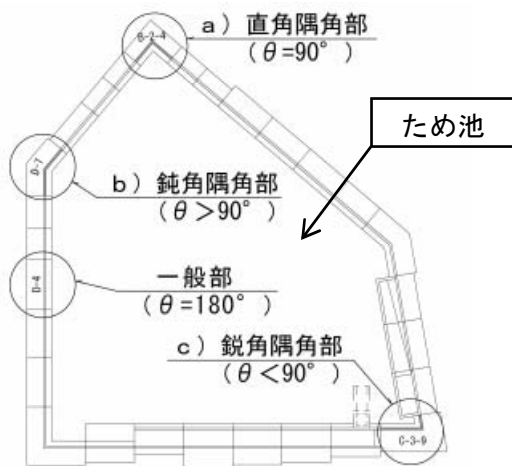


図-1 コンクリート擁壁構造物の平面配置例

隅角部擁壁の形状、構造特性および作用土圧は複雑であるため、既往の研究が少なく、現行の設計基準^{3~5)}においても、明確な設計手法は示されていないのが現状である。本論文は、コンクリート隅角部擁壁の中で最もよく使用されている直角隅角部を取り上げ、有限要素法(FEM)¹⁾およびフーリエ級数による解析手法²⁾を用いて、隅角部擁壁のたて壁の断面力に関する比較検討を行った。さらに、解析モデルによるたて壁の断面力の相異および設計上における問題点を明らかにした。

2. コンクリート隅角部擁壁のモデル化

図-1に示す一般部のコンクリート片持ちばり式擁壁として、逆T型、L型および逆L型擁壁が良く使用される。このような擁壁の適用高さは $H=3\sim 10\text{m}$ 、擁壁の最小天端幅は $t=0.3\sim 0.4\text{m}$ とされている^{3~5)}。また、コンクリート擁壁のたて壁の断面形状は、施工性を考慮して、規模の大きい擁壁を除き等厚が望ましいとされているが、通常、視覚を考慮して前面に $1:0.02$ の勾配が設けられる^{3~5)}。

*1 (株) ホープ設計 技術管理部設計部長 工修 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

*3 (株) ホープ設計 取締役社長

*4 琉球大学大学院 理工学研究科生産エネルギー工学専攻 工修 (正会員)

一方、コンクリート隅角部擁壁に関する設計の詳細は規定されておらず、一般部擁壁の寸法・形状に準拠して設計されるのが一般的である。本論文では、コンクリート隅角部擁壁のモデル図を図-2に示し、土圧の対称性からコーナー部に直交で取付けられた両方向のたて壁を同じ幅 L と仮定する。なお、本研究は、図-1に示してある実業務である掘込式ため池のコンクリート擁壁の平面配置・形状・寸法を勘案し、図-2に示すたて壁の高さ $H=6.0\text{m}$ 、辺長比 $L/H=0.5, 1.0, 1.5$ の3ケース、天端幅 $t=0.4\text{m}$ 、前面勾配 $1:0.02$ の条件について検討を行う。

たて壁に作用する土圧は、裏込め材の単位体積重量 $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ 、内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ 、文献3)に定められた擁壁のたて壁の設計用クーロン土圧による主働土圧係数を用いて算出した。上載荷重を考慮しない場合、土圧の最大値は $P_{max}=40\text{kN/m}^2$ である。

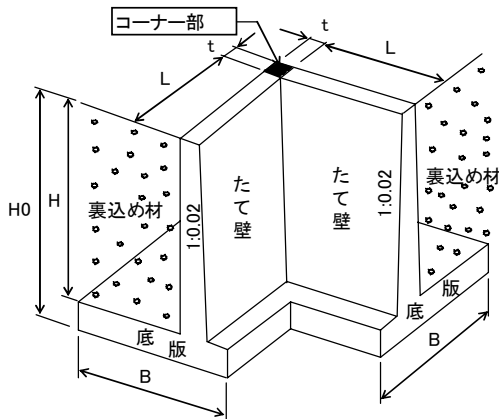


図-2 コンクリート隅角部擁壁

3. 解析手法および解析モデル

3.1 解析手法

図-2に示してあるコンクリート隅角部擁壁のたて壁の断面変化や解析精度を考慮し、本研究では松原ら¹⁾が提案した精度のよい立体要素である回転自由度を有する四面体要素（ソリッド要素）を採用した。この概念図を図-3に示す。

また、隅角部擁壁のたて壁は、底板に拘束されたものと仮定し、さらに、等断面でかつコーナー部で互いに拘束されたものと仮定すれば、

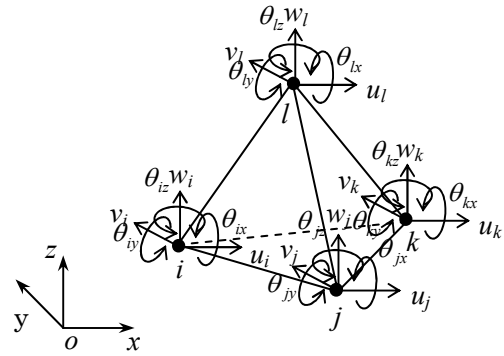


図-3 回転自由度を有する四面体要素

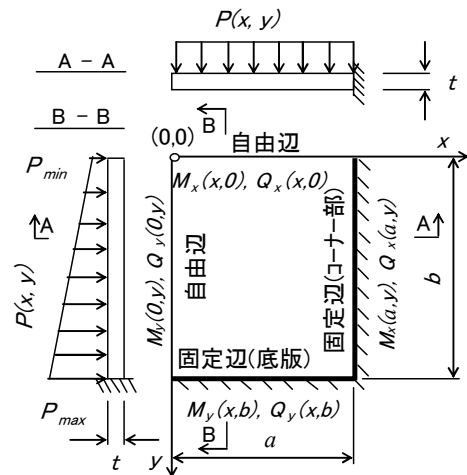


図-4 二隣辺固定二辺自由板の解析モデル

解析モデルは図-4のようになり、著者らが提案したフーリエ級数による解析手法²⁾が適用される。図-4において、 $P_{min}=0$ の場合は、三角形土圧の作用状態を示すことになる。

上記二方法で解析する際に、一般的に用いられる「平面保持の法則」と「微小ひずみの仮定」の外に、隅角部擁壁のたて壁の材質は等方性で均質のコンクリート材料とし、中に配置する鉄筋の影響を無視する。また、コンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数は $E=2.5 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は $\mu = 1/6$ とする。

3.2 解析モデル

図-2に示すコンクリート隅角部擁壁のたて壁は、二方向からの土圧の作用によりその合力方向に変形することが考えられる。さらに、たて壁は変断面であるため、その曲げ剛性が位置によって異なる。従って、このような隅角部擁壁のたて壁を二隣辺固定二辺自由の等断面版に

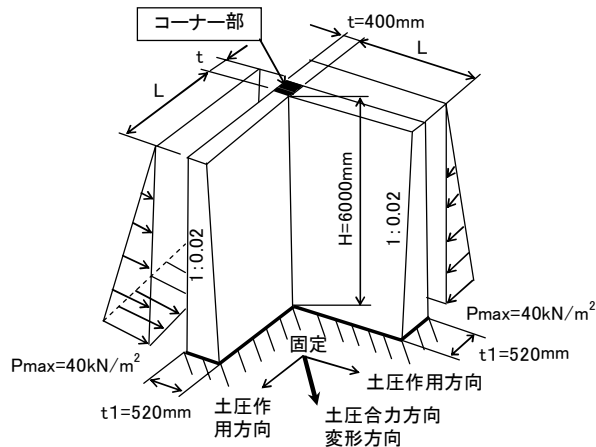


図-5 底辺で固定されたコンクリート隅角部擁壁のたて壁 (モデル 1)

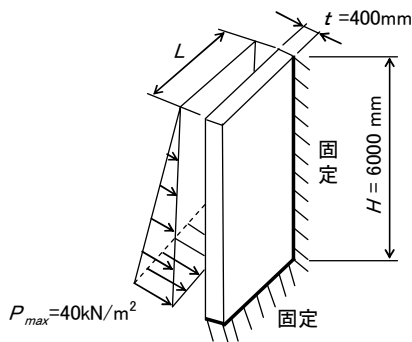


図-6 二隣辺固定二辺自由版 (モデル 2)

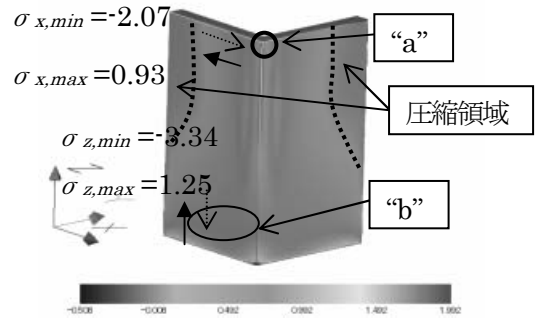
モデル化する場合は、モデルによる解析結果への影響を検討する必要がある。このような目的で本研究では、図-5および図-6に示す2種類のモデルを選定し比較検討を行なう。

4. 解析結果

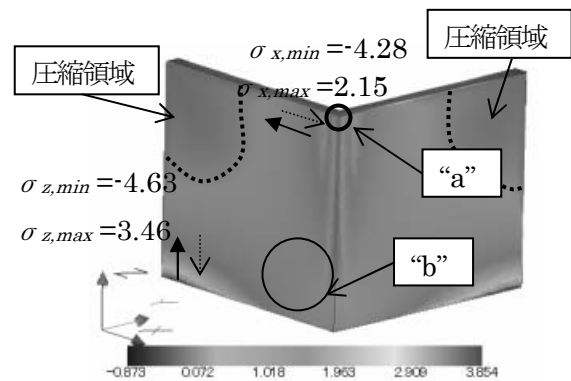
4.1 モデル 1 の解析結果

モデル 1 に対し、たて壁の辺長比 $L/H=0.5, 1.0, 1.5$ の 3 ケースについて FEM 解析を行った。各ケースの解析結果である土圧作用側の主応力の分布状況を図-7に示す。同図の中なたて壁の底版とコーナー部付近の表面最大引張(表)および最大圧縮(裏)応力を矢印で併せて示す。

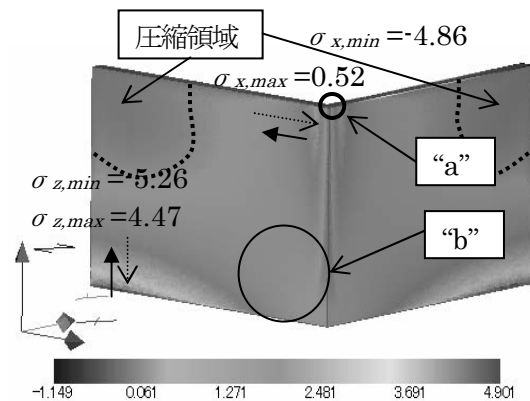
図-7 の着目点”a”において、辺長比 $L/H=0.5, 1.0, 1.5$ に対し、作用土圧の合力方向にそれぞれ $0.29, 0.10, 0.07\text{mm}$ の天端水平変位が生じている。しかし、いずれの値も小さく設計上では無視できるものと考えられる。



a) 辺長比 $L/H=0.5$



b) 辺長比 $L/H=1.0$



c) 辺長比 $L/H=1.5$

図-7 モデル 1 の主応力の分布状況 (N/mm^2)

図-7 a) から分かるように、底版およびコーナー部付近の主応力は”b”部付近まで広範囲に分布し、”b”部付近ではその最大値が現れる。これは辺長比が小さい場合、コンクリート隅角部の応力分布が複雑であることを教示している。一方、図-7 の b) と c) に示す最大主応力はそれぞれ底版とコーナー部付近に分かれて局所的に分布し、”b”部付近に低主応力領域が見受け

られる。

隅角部擁壁のたて壁は、土圧の作用に対し互いに控え壁の機能を有するため、その控え壁の断面に圧縮応力度が生じる。この圧縮応力度の影響を受け、図-7の中に矢印で示したたて壁の底版とコーナー部付近の表面最大引張および最大圧縮応力度は、その絶対値に大きな差が見られる。

4.2 モデル2の解析結果

図-6 に示してあるモデル2に対する各ケースの解析結果を図-8に示す。同図から辺長比 L/H に関係なく、大きな主応力度は底版と縦の固定辺付近に顕著に現れる。図-7のb)とc)と同様、“b”部付近に低主応力度領域が見受けられる。

一方、図-7に示した解析結果と比較すると、図-8の矢印で示す各固定辺付近の表面最大引張および最大圧縮応力度の差が小さい。これは、解析モデル2において土圧による軸力が生じないためである。

5. 固定辺の断面力に関する比較

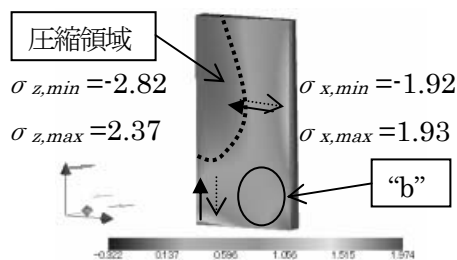
たて壁の設計では、単鉄筋のRC部材として、底版とコーナー部に生じる曲げモーメントに対する必要鉄筋量をそれぞれ配筋するとともに、部材に生じるせん断力に対する版厚の照査を行う必要がある。従って、各固定辺の断面力の特定が必要である。

5.1 作用曲げモーメント

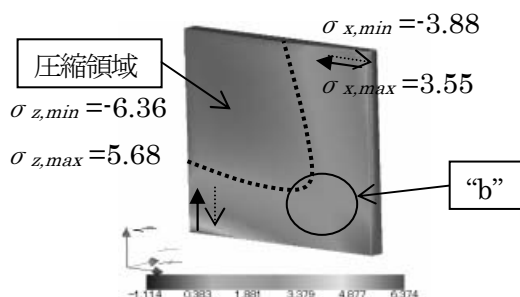
たて壁の各固定辺に生じた曲げモーメントは、FEM解析で得られた固定辺付近の版の表面応力度を用いて近似的に算出することができる⁶⁾。この方法は、FEM解析で得られた版の表面に生じた引張応力度 (σ_2) と圧縮応力度 (σ_1) を既知条件とし、単位幅の版に作用する曲げモーメント M は、式(1)で求める。なお、たて壁に生じた軸力は擁壁設計への影響が小さいため、ここで無視している。

$$M = \frac{t^2}{12} (\sigma_2 - \sigma_1) \quad [N \cdot m / m] \quad (1)$$

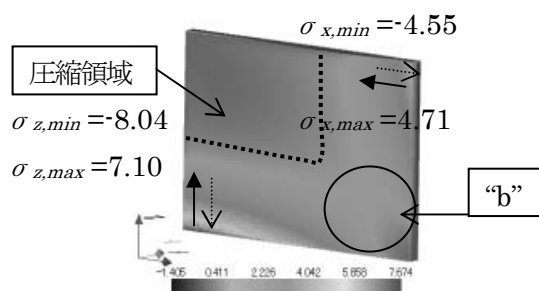
ここに、 t : 版の厚さ(mm)。



a) 辺長比 $L/H=0.5$



b) 辺長比 $L/H=1.0$



c) 辺長比 $L/H=1.5$

図-8 モデル2の主応力度の分布状況 (N/mm^2)

σ_1 : 版の圧縮側の表面応力度, 負の値を取る。単位: N/mm^2

σ_2 : 版の引張側の表面応力度, 正の値を取る。単位: N/mm^2

5.2 作用曲げモーメントの比較

モデル1, 2のFEM解析結果から、各々の固定辺付近の版表面の引張応力度および圧縮応力度を求め式(1)に代入すると、各固定辺の作用曲げモーメントが求められる。さらに、モデル2に対するフーリエ級数による解析を行い²⁾、その結果を併せて示し比較検討を行う。

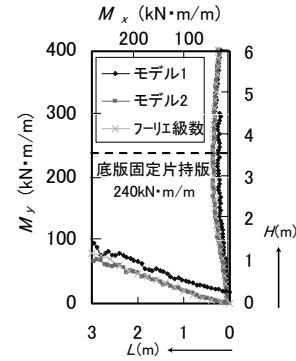
図-9は各固定辺の作用曲げモーメント M_x , M_y の分布状況を、表-1は M_x , M_y の最大値およびフーリエ級数による解析結果に対する割合をそれぞれ示す。

図-9 a)および表-1 から、各ケースの M_x の分布状況に差異が見られるものの、その最大値は 4%程度の誤差で一致している。それに対し、モデル1の M_y の計算結果はモデル2およびフーリエ級数による解析結果より約 1.2 倍と大きくなる。図-9 b)および表-1 から、モデル1の計算結果はモデル2およびフーリエ級数によるものより、 M_x が 10%程度小さく、 M_y が 10%程度大きくなる。図-9 c)および表-1 から、 M_x に関するモデル1の計算結果の最大値はフーリエ級数によるものより 3 割程度小さくなっている。逆に、 M_y に関しては、モデル1の計算結果の最大値はフーリエ級数によるものより 6%程度大きくなっている。

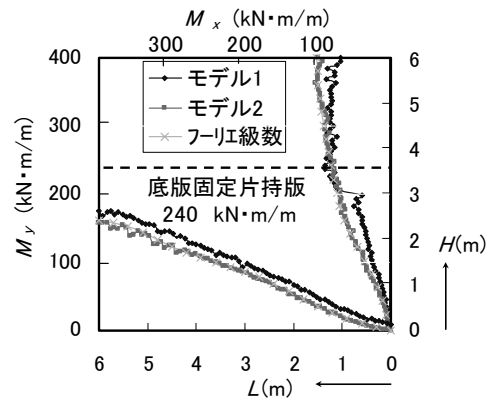
一方、図-9 および表-1 に示すモデル2とフーリエ級数による計算結果を対比すると、図-9 a)の M_y には 15%、c)の M_x には 9%の誤差が見られるが、それ以外に、 M_x 、 M_y の分布状況およびそれらの最大値がいずれもほぼ一致している。

参考までに、図-9 では、上限値として同じ荷重条件の底版に固定された片持ち版の曲げモーメント値を破線で示している。

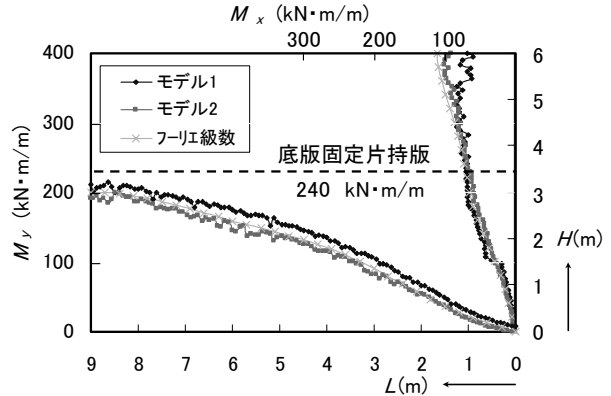
以上の計算結果から、コンクリート隅角部擁壁のたて壁を等断面の二辺固定版にモデル化した場合、 M_x が過大評価、 M_y が過小評価される。ここでは、本研究の計算結果に基づき、たて壁の設計曲げモーメントに関する補正係数を提案する。すなわち、参考文献2)の付表-1、2 に示した曲げモーメント $M_{x(a,y)}$ および $M_{y(x,b)}$ に式(2)



a) 辺長比 $L/H=0.5$



b) 辺長比 $L/H=1.0$



c) 辺長比 $L/H=1.5$

図-9 曲げモーメントに関する比較結果

表-1 作用曲げモーメントの最大値の比較

辺長比 (L/H)	解析 モデル	M_x の最大値 ($\text{kN} \cdot \text{m/m}$)	M_y の最大値 ($\text{kN} \cdot \text{m/m}$)
0.5	モデル1	46 (1:0.96)	95 (1:1.20)
	モデル2	49 (1:1.02)	67 (1:0.85)
	フーリエ級数	48 (1:1.00)	79 (1:1.00)
1.0	モデル1	86 (1:0.90)	176 (1:1.09)
	モデル2	98 (1:1.02)	159 (1:0.99)
	フーリエ級数	96 (1:1.00)	161 (1:1.00)
1.5	モデル1	102 (1:0.76)	214 (1:1.06)
	モデル2	123 (1:0.91)	200 (1:1.00)
	フーリエ級数	135 (1:1.00)	201 (1:1.00)

および式(3)の補正係数をそれぞれ乗じて設計することを提案する。

$$m_x = -0.16(L/H)^2 + 0.12(L/H) + 0.94 \quad (2)$$

$$m_y = 0.16(L/H)^2 - 0.46(L/H) + 1.39 \quad (3)$$

5.3 せん断力に関する比較

せん断力に関する比較結果の一例を図-10 に示す。縦および横の固定辺に作用するせん断力 Q_x および Q_y は、モデル1およびモデル2のFEM

解析で得られた各固定辺付近の平均応力度に断面積を乗じて算出した。フーリエ級数によるせん断力の解析結果も併せて図-10に示す。フーリエ級数による解析手法ではせん断力の収束性が良くない²⁾が、図-10に示すFEM解析においても、せん断力の計算結果に乱れが見られる。しかし、両解析手法共に端部ではせん断力が大きくなる事が分かる。

コンクリート隅角部擁壁のたて壁の厚さは、底版付近の最大せん断力を用いて照査する。また、一般的には、単位幅の断面に生じた平均せん断応力度 τ はコンクリートのみでせん断力を負担する場合の許容せん断応力度 τ_a より小さいことを照査すればよい。本研究では、図-10に示すように各ケースの最大せん断力 Q_y は、片持ち版として算出されたせん断力の上限值(120kN/m)より平均的に1.3倍程度大きく、辺長比 $L/H=0.5, 1.5$ の場合でも同様な結果となった。従って、コンクリート隅角部擁壁のたて壁の厚さは、一般部に準拠して設計する場合、そのせん断耐力の照査は1.3倍の片持ち版として算出されたせん断力を用いて行われれば、ほぼ妥当な設計になると考えられる。

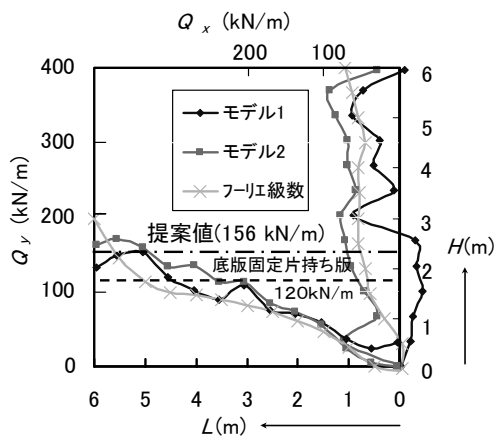


図-10 せん断力の比較結果例 ($L/H=1.0$)

6. おわりに

本論文は、FEM およびフーリエ級数による解析手法を用いて、コンクリート隅角部擁壁のたて壁の断面力や設計上の問題点について検討した。その結果をまとめると以下ようになる。

- (1) コンクリート隅角部擁壁のたて壁の主応力度分布状況は辺長比によって異なり、辺長比 $L/H=0.5$ 場合、コーナーと底版の交差部付近に、辺長比 $L/H=1.0, 1.5$ の場合にコーナーと底版付近にそれぞれ大きな主応力度が分布している。この現象は版の設計および配筋計画に十分な留意が必要である。
- (2) コンクリート隅角部擁壁のたて壁を等断面の二辺固定版にモデル化して曲げモーメントを求める場合、 M_x が過大、 M_y が過小評価する傾向がある。設計の安全性と経済性から設計曲げモーメントの補正係数の計算式を提案した。
- (3) コンクリート隅角部擁壁のたて壁の厚さは、一般的に一般部に準拠して設計される。しかし、FEM 解析およびフーリエ級数によるせん断力の解析結果は端部で大きく、片持ち版として算出されたせん断力より平均的に3割程度アップしている。従って、設計の安全性および便宜性から同じ条件の片持ち版のせん断力に安全率1.3を乗じて照査する方法を提案した。

参考文献

- 1) 松原仁, 伊良波繁雄, 他3名: 回転自由度を有する四面体要素を用いたフリーメッシュ法, 土木学会論文集, No.766/I-68, 97-107, 2004.7
- 2) 金田一男, 他3名: 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
- 3) 日本道路協会: 道路土工 擁壁工指針, 1999.3
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Kaneda, K. Iraha, S Takamine, T. Shimabuku K: An analytical study of rectangular plates under triangularly distributed regional loads, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol.8 (August 2005), P.17-24