

剛性マトリックス法による中詰土を有する 壁体構造物の力学的挙動解析法の開発

A NUMERICAL CALCULATION METHOD BY STIFFNESS MATRIX
METHOD FOR STATIC MECHANICAL BEHAVIOR OF DOUBLE WALL
TYPE STRUCTURE WITH FILLING MATERIAL

佐藤光一¹・原田典佳²

Kohichi SATOH and Noriyoshi HARATA

¹正会員 工修 新日本製鐵株式会社 北海道支店 (〒060-0002 札幌市中央区北2西4)

²正会員 新日本製鐵株式会社 大阪支店 (〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-4)

A calculation method for static mechanical behavior of double wall type structure has not been established. In this paper, A numerical calculation method by stiffness matrix method is proposed to predict static mechanical behavior of double wall type structure. This proposed method applies theoretical equations that were obtained by Ohbori et al considering both the interaction between walls and filling material above ground and lateral resistance of walls under ground. Then, this method was considering elasto-plastic behavior of filling sand and ground.

The calculated results by this proposed method coincide well with the behavior of model structures in The paper of Ohbori et al. Furthermore, to apply this proposed method for design calculation and to evaluate the behavior of new type double wall structures, several double wall type structure models were calculated.

KeyWords : Double wall type structure, stiffness matrix method, elasto-plastic behavior

1. はじめに

中詰土を有する壁体構造物の代表例として二重壁式構造物がある。二重壁式構造物は鋼矢板や鋼管矢板等の壁体構成部材を基礎地盤に二列に打設し、これらの頭部をタイ材等で連結した後、壁体間に土砂の中詰めして構造体とするものである。構造物として完成した後には作用する土水圧、地震力、波力等の水平外力に対しては、中詰土のせん断抵抗と壁体の剛性や根入れ部の地盤反力で抵抗する。

二重壁式構造物は、水平外力、特に地震時慣性力の作用により、構造物天端には中詰土のせん断変形に伴う比較的大きな水平変位が発生する。『港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾』(以下、『技術上の基準』と略記する)』には、次に示す主旨の記載がある。『建設実績が豊富な条件に対して設計する場合には、慣用法(鋼矢板セル式係船岸及び控え工を有する矢板式係船岸の設計法を準用する方法)によることができる。しかし、慣用法では変位や断面力の分布等力学的挙動に関する総合的な検討を行うことができないので、大規模で重要な永久構造物として設計する場合には沢口の方法または大堀ら方法によってその力学的挙動を検討することが望ましい。』

沢口の方法²⁾は、二重壁式構造物の設計地盤面上部(上部構造)を壁体構成部材と非圧縮性弾性体と仮定した中詰土からなる複合構造物とみなし、上部構造における二列の壁体及び中詰土の微小水平スライス要素に関する力の

釣り合いと変形の適合条件等から導いた壁体構成部材に関する2元連立4階微分方程式を所定の境界条件の下に解くものである。

また、大堀らの方法³⁾は沢口の方法を発展させたもので中詰土の圧縮特性及び中詰土と基礎地盤の弾塑性の性質を取り入れている。しかし、文献³⁾では図-1(a)に示す頂版結合タイプの場合、頂版を計算モデルに取り込んでいないため、頂版の断面設計に必要な断面力や壁体構成部材に発生する軸方向力に関する情報等が得られないという問題がある。また、構造物を補強するために図-1(c)に示すように増し杭等を配置したり、図-1(d)に示すように中詰土の天端高さを変化させる場合等への対応も困難である。

このような状況を踏まえ、本文では二重壁式構造物をはじめ、様々な構造・荷重・境界条件下における中詰土を有する壁体構造物の力学的挙動を総合的に検討するために開発した剛性マトリックス法による解析手法について報告している。この解析手法によれば、後述の解析例に示すように頂版を計算モデルに取り込むことができ、また、増し杭等の付加部材を配置した場合や中詰土の天端高さを低くした場合等についてもその力学的挙動を計算することができる。

図-1(a)～(d)は中詰土を有する壁体構造物の構造例を示したものである。(a)、(b)は二重壁式構造物の標準的な構造例で、(a)は頂版結合タイプ、(b)はタイ材結合タイプである。(c)、(d)は今回報告する解析手法によりその

力学的挙動を計算することが可能となった構造を例示したものである。(c)は中詰土の内部に鋼管杭を打設した増し杭タイプ、(d)は中詰土の天端を低くし、その上部空間を遊水室とした低天端中詰土タイプである。

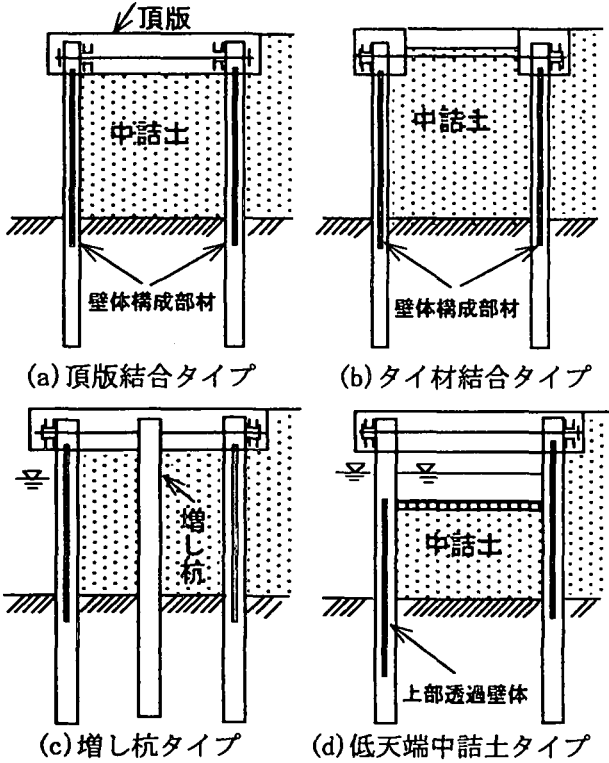


図-1 中詰土を有する壁体構造物

2. 中詰土を有する壁体構造物の力学モデルと支配方程式

構造物完成後に作用する水平外力に対する二重壁式構造物の設計法は、次の2とおりに大別することができる。

- ①中詰土のせん断抵抗のみにより抵抗とするもの
- ②中詰土のせん断抵抗と壁体の剛性及び地盤反力により抵抗とするもの

①の方法は慣用法といわれているもので、壁体構成部材等の変形や断面力を計算・照査するプロセスは存在しない。②の方法には沢口の方法やこれを発展させた大堀らの方法がある。本文では、二重壁式構造物に代表される中詰土を有する壁体構造物の変形や断面力分布といった力学的挙動の検討を目的としているため、大堀らの方法で提案されている力学モデル及び壁体構成部材に関する支配方程式を採用している。

(1) 壁体構成部材の力学モデルと支配方程式

a) 構造物完成前（中詰土充填完了時）

大堀らの方法では仮想地盤面上部と下部における壁体構成部材の部材軸直角方向の挙動を次式で表わしている。

①仮想地盤面上部における部材

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = p_1 \quad (1)$$

②仮想地盤面下部における部材

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s y = p_2 \quad (2)$$

ここに、 x は部材軸方向距離、 y は部材軸直角方向変位、 EI は部材の曲げ剛性、 E_s ($E_s = k_h L$) は変形係数、 k_h は横方向地盤反力係数、 L は法線方向の壁体幅、 p_1 、 p_2 は部材軸直角方向分布荷重強度である。

b) 構造物完成後（水平外力作用時）

①設計地盤面上部（上部構造）における部材

大堀らの方法では図-2の力学モデルを設定し図-3に示す設計地盤面上部の微小厚さの水平スライス要素に対して、力の釣り合い及び変形の適合条件、中詰土に発生するせん断力と平均せん断ひずみの関係及び中詰土に発生する圧縮応力と平均圧縮ひずみの関係を適用することにより、設計地盤面上部における壁体構成部材の部材軸直角方向の挙動を次式で表わしている。

$$EI \frac{d^4}{dx^4} (y_A + y_B) - \frac{BG}{2} \frac{d^2}{dx^2} (y_A + y_B) - k_y B = p_A + p_B \quad (3a)$$

$$EI \frac{d^4}{dx^4} (y_A - y_B) + \frac{2E_f}{B} (y_A - y_B) = p_A - p_B \quad (3b)$$

ここに、 x は部材軸方向距離、 y_A 、 y_B は壁体構成部材A、Bの部材軸直角方向変位、 EI は壁体構成部材A、Bの曲げ剛性、 p_A 、 p_B は部材軸直角方向分布荷重強度、 B は壁体幅、 G は中詰土のせん断弾性係数、 $k_y B$ は中詰土に作用する地震時慣性力、 k は設計震度、 γ は中詰土の単位体積重量、 E_f は中詰土の圧縮弾性係数である。

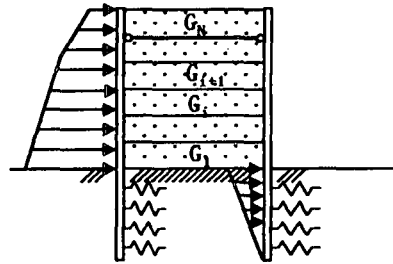


図-2 水平外力作用時の力学モデル

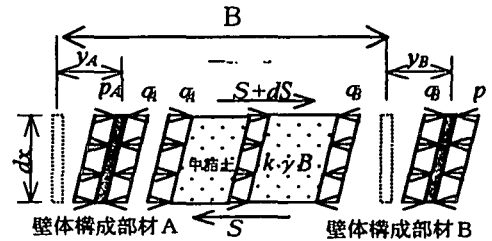


図-3 微小水平スライス要素

なお、大堀らの方法では二重壁式構造物の非線形挙動を反映させるために、中詰土のせん断弾性係数 G 及び圧縮弾性係数 E_f を次式で表わしている。

$$G = a \sigma_N^b \theta^c \quad (4), \quad E_f = 2(1 + \nu) G \quad (5)$$

ここに、 a は補正係数、 b 、 c は定数、 σ_N は中詰土の鉛直応力、 θ はせん断ひずみ角 ($\theta = (\theta_A + \theta_B)/2$)、 ν はポアソン比である。

②設計地盤面下部（下部構造）における部材

大堀らの方法では式(6)に示す中詰土のせん断変形に伴うせん断力が設計地盤面上に発生するとしている。

$$S_g = BG_g \theta_g \quad (6)$$

ここに、 S_g は設計地盤面における中詰土のせん断力、 G_g は設計地盤面における中詰土のせん断弾性係数、 θ_g は設計地盤面における中詰土のせん断ひずみ、 B は壁体幅である。

そして、このせん断力は地盤伝達力として非載荷側の壁体構成部材の地中部に逆三角形に分布荷重として作用するものとして、載荷側及び非載荷側における壁体構成部材の部材軸直角方向の挙動を次式で表わしている。

・ 載荷側 (壁体構成部材 A)

$$EI \frac{d^4 y_A}{dx^4} + E_{sA} y_A = p(x) \quad (7)$$

・ 非載荷側 (壁体構成部材 B)

$D \geq B$ における $-B \leq x \leq 0$ の領域、 $D < B$ における $-D \leq x \leq 0$ の領域に対して：

$$EI \frac{d^4 y_B}{dx^4} + E_{sB} y_B - \frac{2S_g}{B^2} x + \frac{2S_g}{B} = 0 \quad (8a)$$

$D \geq B$ における $-D \leq x \leq -B$ の領域に対して：

$$EI \frac{d^4 y_B}{dx^4} + E_{sB} y_B = 0 \quad (8b)$$

ここに、 E_{sA}, E_{sB} は壁体構成部材 A, B の変形係数 ($E_{sA} = k_{hA} L, E_{sB} = k_{hB} L$)、 k_{hA}, k_{hB} は壁体構成部材 A, B の横方向地盤反力係数、 L は法線方向の壁体幅、 D は壁体構成部材 A, B の根入れ長である。

(2) その他の部材の力学モデルと支配方程式

本文では、多様な構造・荷重・境界条件に対応するために、大堀らの方法では考慮されていない頂版等の部材に関して次に示す支配方程式を適用する。

a) 設計 (仮想) 地盤面上部 (上部構造) における部材

・ 設計 (仮想) 地盤面上部の増し杭、頂版など

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = p \quad (9)$$

・ タイ材など

$$EA \frac{d^2 u}{dx^2} = q \quad (10)$$

ここに、 u は部材軸方向変位、 EA は部材軸方向剛性、 q は部材軸方向分布荷重強度である。

b) 設計 (仮想) 地盤面下部 (下部構造) における部材

・ 設計 (仮想) 地盤面下部の増し杭など

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s y = p \quad (11)$$

3. 中詰土を有する壁体構造物の部材剛性方程式

多様な構造・荷重・境界条件に対して効率的に対応できる構造解析手法として、剛性マトリックス法⁴⁾が知られている。この解析手法を中詰土を有する壁体構造物に適用するためには、構造物を構成する各部材の部材剛性方程式を導いておく必要がある。以下に、前記した各部材の支配方程式の解析解を用いて導いた部材剛性方程式を示す。

(1) 壁体構成部材の部材剛性方程式

a) 設計地盤面上部 (上部構造) における部材

① 中詰土と一体的に挙動する壁体構成部材

式(3a), (3b) から、部材剛性方程式として式(12)を得る。

$$\begin{pmatrix} Q_{Ai} \\ M_{Ai} \\ Q_{Aj} \\ M_{Aj} \\ Q_{Bi} \\ M_{Bi} \\ Q_{Bj} \\ M_{Bj} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & k_{17} & k_{18} \\ & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} & k_{27} & k_{28} \\ & & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} & k_{37} & k_{38} \\ & & & k_{44} & k_{45} & k_{46} & k_{47} & k_{48} \\ & & & & k_{55} & k_{56} & k_{57} & k_{58} \\ & & & & & k_{66} & k_{67} & k_{68} \\ & & & & & & k_{77} & k_{78} \\ & & & & & & & k_{88} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y_{Ai} \\ \theta_{Ai} \\ y_{Aj} \\ \theta_{Aj} \\ y_{Bi} \\ \theta_{Bi} \\ y_{Bj} \\ \theta_{Bj} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ f_7 \\ f_8 \end{pmatrix} \quad (12)$$

ここに、 Q_{Ai}, Q_{Aj} 及び Q_{Bi}, Q_{Bj} は壁体構成部材 A 及び B の i 端、 j 端のせん断力、 M_{Ai}, M_{Aj} 及び M_{Bi}, M_{Bj} は壁体構成部材 A 及び B の i 端、 j 端の曲げモーメント、 y_{Ai}, y_{Aj} 及び y_{Bi}, y_{Bj} は壁体構成部材 A 及び B の i 端、 j 端の部材軸直角方向変位、 θ_{Ai}, θ_{Aj} 及び θ_{Bi}, θ_{Bj} は壁体構成部材 A 及び B の i 端、 j 端のたわみ角である。

式(12)の剛性マトリックスの各要素を式(13a)～(13t)に、荷重項の各要素を式(14a)～(14h)に示す。

$$k_{11} = k_{55} = \frac{EI\lambda^3\eta}{\varepsilon} - \frac{EI\alpha^3(\chi_2 + \omega_2)}{\delta} \quad (13a)$$

$$k_{12} = k_{56} = -\frac{EI\lambda^2(1-\zeta)}{\varepsilon} - \frac{EI\alpha^2(-\phi_2 + \psi_2)}{2\delta} \quad (13b)$$

$$k_{13} = k_{57} = -\frac{EI\lambda^3\eta}{\varepsilon} + \frac{2EI\alpha^3(\phi\omega + \chi\psi)}{\delta} \quad (13c)$$

$$k_{14} = k_{58} = -\frac{EI\lambda^2(1-\zeta)}{\varepsilon} - \frac{2EI\alpha^2\chi\omega}{\delta} \quad (13d)$$

$$k_{22} = k_{66} = -\frac{EI\lambda^2(-L\zeta + \eta/\lambda)}{\varepsilon} - \frac{EI\alpha(-\chi_2 + \omega_2)}{2\delta} \quad (13e)$$

$$k_{23} = k_{67} = -\frac{EI\lambda^2(\zeta - 1)}{\varepsilon} + \frac{2EI\alpha^2\chi\omega}{\delta} \quad (13f)$$

$$k_{24} = k_{68} = -\frac{EI\lambda^2(-\eta/\lambda + L)}{\varepsilon} + \frac{EI\alpha(-\phi\omega + \chi\psi)}{\delta} \quad (13g)$$

$$k_{33} = k_{77} = \frac{EI\lambda^3\eta}{\varepsilon} - \frac{EI\alpha^3(\chi_2 + \omega_2)}{\delta} \quad (13h)$$

$$k_{34} = k_{78} = \frac{EI\lambda^2(1-\zeta)}{\varepsilon} + \frac{EI\alpha^2(-\phi_2 + \psi_2)}{2\delta} \quad (13i)$$

$$k_{44} = k_{88} = -\frac{EI\lambda^2(-L\zeta + \eta/\lambda)}{\varepsilon} - \frac{EI\alpha(-\chi_2 + \omega_2)}{2\delta} \quad (13j)$$

$$k_{15} = \frac{EI\lambda^3\eta}{\varepsilon} + \frac{EI\alpha^3(\chi_2 + \omega_2)}{\delta} \quad (13k)$$

$$k_{16} = k_{25} = -\frac{EI\lambda^2(1-\zeta)}{\varepsilon} + \frac{EI\alpha^2(-\phi_2 + \psi_2)}{2\delta} \quad (13l)$$

$$k_{17} = k_{35} = -\frac{EI\lambda^3\eta}{\varepsilon} - \frac{2EI\alpha^3(\phi\omega + \chi\psi)}{\delta} \quad (13m)$$

$$k_{18} = k_{45} = -\frac{EI\lambda^2(1-\zeta)}{\varepsilon} + \frac{2EI\alpha^2\chi\omega}{\delta} \quad (13n)$$

$$k_{26} = -\frac{EI\lambda^2(-L\zeta + \eta/\lambda)}{\varepsilon} + \frac{EI\alpha(-\chi_2 + \omega_2)}{2\delta} \quad (13o)$$

$$k_{27} = k_{36} = -\frac{EI\lambda^2(\zeta - 1)}{\varepsilon} - \frac{2EI\alpha^2\chi\omega}{\delta} \quad (13p)$$

$$k_{28} = k_{46} = -\frac{EI\lambda^2(-\eta/\lambda + L)}{\varepsilon} - \frac{EI\alpha(-\phi\omega + \chi\psi)}{\delta} \quad (13q)$$

$$k_{37} = \frac{EI\lambda^3\eta}{\varepsilon} + \frac{EI\alpha^3(\chi_2 + \omega_2)}{\delta} \quad (13r)$$

$$k_{38} = k_{47} = \frac{EI\lambda^2(1-\zeta)}{\varepsilon} + \frac{EI\alpha^2(-\phi_2 + \psi_2)}{2\delta} \quad (13s)$$

$$k_{48} = -\frac{EI\lambda^2(-L\zeta + \eta/\lambda)}{\varepsilon} + \frac{EI\alpha(-\chi_2 + \omega_2)}{2\delta} \quad (13t)$$

$$f_1 = \left(-\frac{\lambda L^2 \eta}{12\varepsilon} + \frac{1}{2\lambda^2 L} - \frac{L}{8} \right) (p_A + p_B) \quad (14a)$$

$$+ \left(\frac{\lambda L^2 \eta}{12\varepsilon} - \frac{1}{2\lambda^2 L} - \frac{L}{8} \right) (p_A + p_B) \\ + \frac{1}{8\alpha^2 \delta L} \{ (\phi_2 - \psi_2 - 4\chi\omega + 2\alpha L\chi_2 + 2\alpha L\omega_2)(p_A - p_B) \\ + (-\phi_2 + \psi_2 - 4\alpha L\phi\omega - 4\alpha L\chi\psi + 4\chi\omega)(p_A - p_B) \}$$

$$f_2 = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{L^2 \zeta}{3} + \frac{L\eta}{2\lambda} + \frac{\varepsilon}{2\lambda^2} - \frac{L^2}{6} \right) (p_A + p_B) \quad (14b)$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{L^2 \zeta}{6} + \frac{L\eta}{2\lambda} - \frac{L^2}{3} \right) (p_A + p_B) \\ + \frac{1}{8\alpha^2 \delta L} \{ (-\omega_2 + \chi_2 - 2\chi\psi + 2\phi\omega - \alpha L\phi_2 + \alpha L\psi_2)(p_A - p_B) \\ + (\omega_2 - \chi_2 - 4\alpha L\chi\omega + 2\chi\psi - 2\phi\omega)(p_A - p_B) \}$$

$$f_3 = \left(\frac{\lambda L^2 \eta}{12\varepsilon} - \frac{1}{2\lambda^2 L} - \frac{L}{8} \right) (p_A + p_B) \quad (14c)$$

$$+ \left(-\frac{\lambda L^2 \eta}{12\varepsilon} + \frac{1}{2\lambda^2 L} - \frac{L}{8} \right) (p_A + p_B) \\ + \frac{1}{8\alpha^2 \delta L} \{ (-\phi_2 + \psi_2 + 4\chi\omega - 4\alpha L\phi\omega - 4\alpha L\chi\psi)(p_A - p_B) \\ + (\phi_2 - \psi_2 - 4\chi\omega + 2\alpha L\chi_2 + 2\alpha L\omega_2)(p_A - p_B) \}$$

$$f_4 = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{L^2 \zeta}{6} - \frac{L\eta}{2\lambda} + \frac{L^2}{3} \right) (p_A + p_B) \quad (14d)$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{L^2 \zeta}{3} - \frac{L\eta}{2\lambda} - \frac{\varepsilon}{2\lambda^2} + \frac{L^2}{6} \right) (p_A + p_B) \\ + \frac{1}{8\alpha^2 \delta L} \{ (-\omega_2 + \chi_2 + 4\alpha L\chi\omega - 2\chi\psi + 2\phi\omega)(p_A - p_B) \\ + (\omega_2 - \chi_2 + 2\chi\psi - 2\phi\omega + \alpha L\phi_2 - \alpha L\psi_2)(p_A - p_B) \}$$

$$f_5 = \left(-\frac{\lambda L^2 \eta}{12\varepsilon} + \frac{1}{2\lambda^2 L} - \frac{L}{8} \right) (p_A + p_B) \quad (14e)$$

$$+ \left(\frac{\lambda L^2 \eta}{12\varepsilon} - \frac{1}{2\lambda^2 L} - \frac{L}{8} \right) (p_A + p_B) \\ - \frac{1}{8\alpha^2 \delta L} \{ (\phi_2 - \psi_2 - 4\chi\omega + 2\alpha L\chi_2 + 2\alpha L\omega_2)(p_A - p_B) \\ + (-\phi_2 + \psi_2 - 4\alpha L\phi\omega - 4\alpha L\chi\psi + 4\chi\omega)(p_A - p_B) \}$$

$$f_6 = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{L^2 \zeta}{3} + \frac{L\eta}{2\lambda} + \frac{\varepsilon}{2\lambda^2} - \frac{L^2}{6} \right) (p_A + p_B) \quad (14f)$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{L^2 \zeta}{6} + \frac{L\eta}{2\lambda} - \frac{L^2}{3} \right) (p_A + p_B) \\ - \frac{1}{8\alpha^2 \delta L} \{ (-\omega_2 + \chi_2 - 2\chi\psi + 2\phi\omega - \alpha L\phi_2 + \alpha L\psi_2)(p_A - p_B) \\ + (\omega_2 - \chi_2 - 4\alpha L\chi\omega + 2\chi\psi - 2\phi\omega)(p_A - p_B) \}$$

$$f_7 = \left(\frac{\lambda L^2 \eta}{12\varepsilon} - \frac{1}{2\lambda^2 L} - \frac{L}{8} \right) (p_A + p_B) \quad (14g)$$

$$+ \left(-\frac{\lambda L^2 \eta}{12\varepsilon} + \frac{1}{2\lambda^2 L} - \frac{L}{8} \right) (p_A + p_B) \\ - \frac{1}{8\alpha^2 \delta L} \{ (-\phi_2 + \psi_2 + 4\chi\omega - 4\alpha L\phi\omega - 4\alpha L\chi\psi)(p_A - p_B) \\ + (\phi_2 - \psi_2 - 4\chi\omega + 2\alpha L\chi_2 + 2\alpha L\omega_2)(p_A - p_B) \}$$

$$f_8 = \frac{1}{\varepsilon} \left(-\frac{L^2 \zeta}{6} - \frac{L\eta}{2\lambda} + \frac{L^2}{3} \right) (p_A + p_B) \quad (14h)$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{L^2 \zeta}{3} - \frac{L\eta}{2\lambda} - \frac{\varepsilon}{2\lambda^2} + \frac{L^2}{6} \right) (p_A + p_B) \\ - \frac{1}{8\alpha^2 \delta L} \{ (-\omega_2 + \chi_2 + 4\alpha L\chi\omega - 2\chi\psi + 2\phi\omega)(p_A - p_B) \\ + (\omega_2 - \chi_2 + 2\chi\psi - 2\phi\omega + \alpha L\phi_2 - \alpha L\psi_2)(p_A - p_B) \}$$

$$\text{ここに, } \lambda = \sqrt{\frac{BG}{2EI}}, \alpha = \sqrt{\frac{E_f}{2BEI}},$$

$$\eta = \sinh(\lambda L), \zeta = \cosh(\lambda L), \phi = \cos(\alpha L), \chi = \sin(\alpha L), \\ \psi = \cosh(\alpha L), \omega = \sinh(\alpha L), \phi_2 = \cos(2\alpha L), \chi_2 = \sin(2\alpha L), \\ \varepsilon = -4\cosh(\lambda L) + 2\lambda L \sinh(\lambda L) + 4, \delta = \sin^2(\alpha L) - \sinh^2(\alpha L), \\ \psi_2 = \cosh(2\alpha L), \omega_2 = \sinh(2\alpha L) \text{ である.}$$

また、大堀らの方法では考慮されていないが壁体構成部材 A, B の軸方向に関する部材剛性方程式として式(15)を得る。

$$\begin{pmatrix} N_A \\ N_A \\ N_B \\ N_B \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} EA/L & -EA/L & 0 & 0 \\ -EA/L & EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & EA/L & -EA/L \\ 0 & 0 & -EA/L & EA/L \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_A \\ u_A \\ u_B \\ u_B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -q_A L/3 - q_A L/6 \\ -q_A L/6 - q_A L/3 \\ -q_B L/3 - q_B L/6 \\ -q_B L/6 - q_B L/3 \end{pmatrix} \quad (15)$$

ここに、 EA は軸方向剛性、 L は部材長、 N_A は壁体構成部材 A の i 端の軸方向力、 N_A は壁体構成部材 A の j 端の軸方向力、 N_B は壁体構成部材 B の i 端の軸方向力、 N_B は壁体構成部材 B の j 端の軸方向力、 q_A は壁体構成部材 A の i 端の部材軸方向分布荷重強度、 q_A は壁体構成部材 A の j 端の部材軸方向分布荷重強度、 q_B は壁体構成部材 B の i 端の部材軸方向分布荷重強度、 q_B は壁体構成部材 B の j 端の部材軸方向分布荷重強度である。

したがって、この軸方向に関する部材剛性方程式も考慮すると設計地盤面上部において中詰土と一体的に挙動する壁体構成部材の部材剛性マトリックスは12行×12列となる。

②中詰土と一体的に挙動しない壁体構成部材

図-1(d)に示したように壁体構成部材には中詰土と一体的に挙動しない部分もある。この部分は式(1)に示す支配方程式（通常の梁部材）に基づいて挙動するものとする。式(1)に対応する部材剛性方程式は式(16)で示される。

$$\begin{pmatrix} Q_i \\ M_i \\ Q_j \\ M_j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 6EI/L^2 & 4EI/L & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ \text{SYM} & & & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \\ y_j \\ \theta_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -7Lp_i/20 - 3Lp_j/20 \\ -Lp_i/20 - Lp_j/30 \\ -3Lp_i/20 - 7Lp_j/20 \\ -Lp_i/30 - Lp_j/20 \end{pmatrix} \quad (16)$$

ここに、 Q_i 及び Q_j は部材の i 端及び j 端のせん断力、 M_i 及び M_j は部材の i 端及び j 端の曲げモーメント、 y_i 及び y_j は部材軸直角方向変位、 θ_i 及び θ_j は部材のたわみ角、 EI は曲げ剛性、 L は部材長、 p_i 及び p_j は部材の i 端及び j 端の部材軸直角方向分布荷重強度である。

b) 設計地盤面下部（下部構造）における部材

設計地盤面下部における壁体構成部材については式(2)に示す支配方程式（弾性床土上の梁部材）に基づき挙動するものとする。なお、式(8a)、式(8b)に示したように、部材軸直角方向分布荷重強度は載荷側と非載荷側について分けて考える。

式(8a)に対応する部材剛性方程式は式(17)のとおりである。式(8b)に対応する部材剛性方程式は式(17)において荷重ベクトルをゼロとすれば良い。

$$\begin{pmatrix} Q_i \\ M_i \\ Q_j \\ M_j \end{pmatrix} = EI\beta^3 \delta \begin{pmatrix} 2\beta^2(\chi_1 + \omega_2) & \beta(-\phi_2 + \psi_2) & -4\beta(\phi\omega + \chi\psi) & 4\beta\chi\omega \\ -\chi_1 + \omega_2 & -4\beta\chi\omega & 2(-\phi\omega + \chi\psi) & 2\beta^2(\chi_1 + \omega_2) \\ \text{SYM} & & & \beta(-\phi_2 + \psi_2) \\ -\chi_1 + \omega_2 & & & -4\beta\chi\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \\ y_j \\ \theta_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$f_1 = \frac{1}{4\beta^2 \delta L} \{ (\phi_2 - \psi_2 - 4\chi\omega + 2\beta L\chi_2 + 2\beta L\omega_2)p_i \\ + (-\phi_2 + \psi_2 - 4\beta L\phi\omega - 4\beta L\chi\psi + 4\chi\omega)p_j \} \quad (18a)$$

$$f_2 = + \frac{1}{4\beta^3 \delta L} \{ (-\omega_2 + \chi_2 - 2\chi\psi + 2\phi\omega - \beta L\phi_2 + \beta L\psi_2)p_i \\ + (\omega_2 - \chi_2 - 4\beta L\chi\omega + 2\chi\psi - 2\phi\omega)p_j \} \quad (18b)$$

$$f_3 = \frac{1}{4\beta^2\delta L} \{(-\phi_2 + \psi_2 + 4\chi\omega - 4\beta L\phi\omega - 4\beta L\chi\psi)p_i + (\phi_2 - \psi_2 - 4\chi\omega + 2\beta L\chi_2 + 2\beta L\omega_2)p_j\} \quad (18c)$$

$$f_4 = \frac{1}{4\beta^3\delta L} \{(-\omega_2 + \chi_2 + 4\beta L\chi\omega - 2\chi\psi + 2\phi\omega)p_i + (\omega_2 - \chi_2 + 2\chi\psi - 2\phi\omega + \beta L\phi_2 - \beta L\psi_2)p_j\} \quad (18d)$$

$$\text{ここに, } \delta = \sin^2(\beta L) - \sinh^2(\beta L), \quad \beta = \sqrt{\frac{E_s}{4EI}},$$

$$\phi = \cos(\beta L), \quad \chi = \sin(\beta L), \quad \psi = \cosh(\beta L), \\ \omega = \sinh(\beta L), \quad \phi_2 = \cos(2\beta L), \quad \chi_2 = \sin(2\beta L), \\ \psi_2 = \cosh(2\beta L), \quad \omega_2 = \sinh(2\beta L) \text{ である.}$$

(2) その他の部材の部材剛性方程式

多様な構造条件等に対応するために、大堀らの法では考慮されていない頂版等の梁部材に関して、下記に示す部材剛性方程式を適用する。

a) 設計(仮想)地盤面上部(上部構造)における部材

- ・設計(仮想)地盤面上部の増し杭、頂版など
部材剛性方程式は式(16)と同様である。
- ・タイ材など

部材剛性方程式は式(15)を準用できる。

b) 設計(仮想)地盤面下部(下部構造)における部材

- ・設計(仮想)地盤面下部の増し杭など
部材剛性方程式は式(17)を準用できる。

4. 中詰土を有する壁体構造物の力学的挙動解析の基本と解析フロー

(1) 力学的挙動解析の基本

a) 全体剛性方程式

部材剛性マトリックスを所定の手続きにより全体剛性マトリックスへ重ね合わせることで中詰土を有する壁体構造物の全体剛性方程式として式(19)を得る。

$$\{F\} = [K]\{u\} + \{f\} \quad (19)$$

ここに、 $\{F\}$ は外力ベクトル、 $[K]$ は全体剛性マトリックス、 $\{u\}$ は変位ベクトル、 $\{f\}$ は分布荷重ベクトルである。

b) 大堀らの方法に特有の処理

大堀らの方法では、中詰土の層間におけるせん断力の不連続性を評価するために、層間におけるせん断力の差を集中荷重とし評価する等特有の処理を行っている。本解析法でも、明らかに大堀らの方法に特有の事項についてはこれに準じた処理を行っている。

c) 壁体構成部材上端の境界条件

壁体構成部材上端における境界条件は、頂版等の拘束がない場合には自由端とする。頂版を有する場合、大堀らの方法では上端部の境界条件を固定ローラーとみなし、単独部材として扱っている。このため、頂版の変形や断面力に関する情報を得ることができない。本文に示す解析手法によれば、大堀らの方法のような操作は不要であり、壁体構成部材と頂版部材の交点を剛結合節点とすればよい。

d) 付加部材の処理

増し杭等の付加部材についても剛性マトリックス法の解析手法に基いて処理すればよい。

(2) 剛性マトリックス法による解析フロー

剛性マトリックス法による中詰土を有する壁体構造物の力学的挙動の解析フロー概要を図-4に示す。

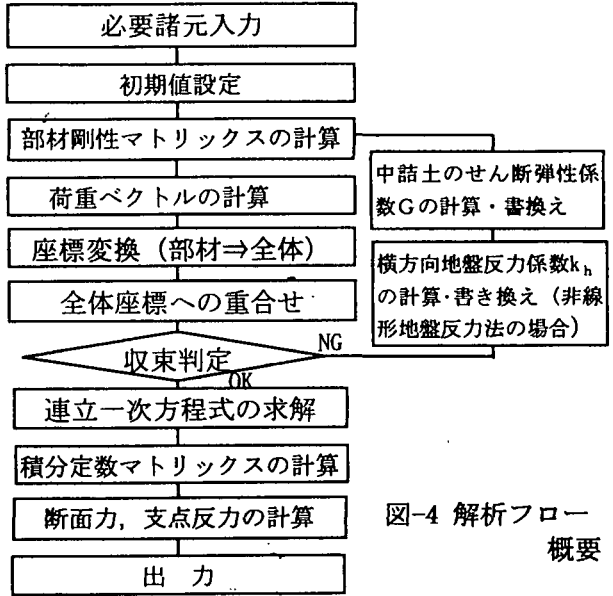


図-4 解析フロー概要

5. 中詰土を有する壁体構造物の解析例

(1) 解析対象構造と解析条件

解析対象構造を図-5に示す。(a)は頂版結合タイプ(基本タイプ)、(b)は従来、計算が困難であった増し杭タイプである。解析条件は図-6に示したとおりである。なお、ここでは解析例を示すことを目的としているので、(a)、(b)タイプとも壁体構成部材(鋼管矢板)は同一部材(Φ1200×23t, 継手有効間隔78.7mm, SKY490)としている。また、増し杭に使用する鋼管杭は壁体構成部材と同一の鋼管断面とし、その法線方向の配置ピッチを3種類(1278, 2557, 3836mm)に変化させている。

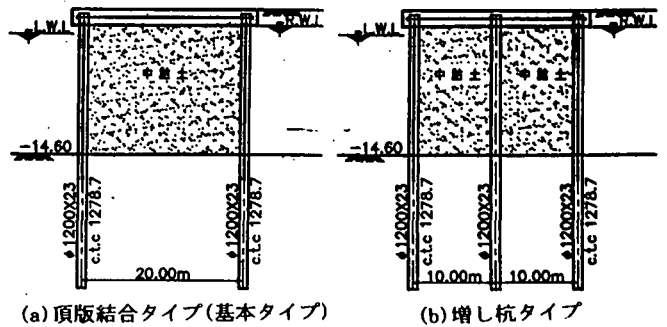


図-5 解析対象構造

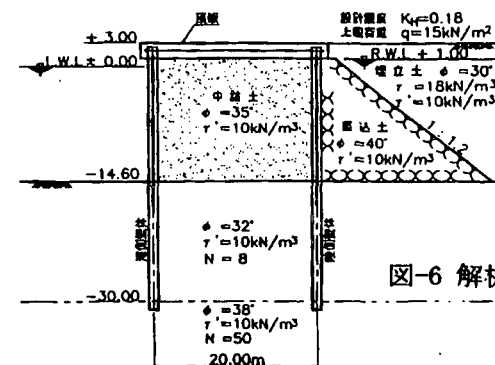


図-6 解析条件

(2) 解析結果

地震時に対する解析結果を図-7に示す。

① 壁体及び増し杭の曲げモーメント

海側及び陸側壁体の最大曲げモーメント M_{max} は土中部で発生している。基本タイプのそれは、海側壁体で約5080kN・m/m、陸側壁体で約3710kN・m/mであるが、増し杭のピッチを密にするに従い M_{max} は減少し、最大でそれぞれ約25%及び30%程度減少している。増し杭の M_{max} は頂版との結合部に発生しており、増し杭のピッチを密にするに従い M_{max} は増加し、最大で約4400kN・m/m程度となっている。

② 頂版の断面力

頂版の最大曲げモーメント M_{max} は海側壁体の直上部で発生している。基本タイプの M_{max} は約5020kN・m/mであるが、増し杭ピッチが密になるに従い減少し、最大で約40%程度減少している。

③ 水平変位

基本タイプの天端水平変位 δ_H は約24cmであるが、増し杭のピッチを密にするに従い δ_H は減少し、最大で約30%程度減少している。

④ 壁体及び増し杭の軸方向力

図示していないが、基本タイプの海側壁体には約1150kN/mの押込力が発生している。この押込力は増し杭ピッチを密にするに従い減少し、最大で約20%程度減少している。また、基本タイプの陸側壁体には約300kN/mの押込力が発生している。この押込力も増し杭ピッチを密にするに従い減少し、最も密なピッチでは約20kN/mの引抜力となっている。なお、増し杭には490～580kN/mの押込力が発生している。

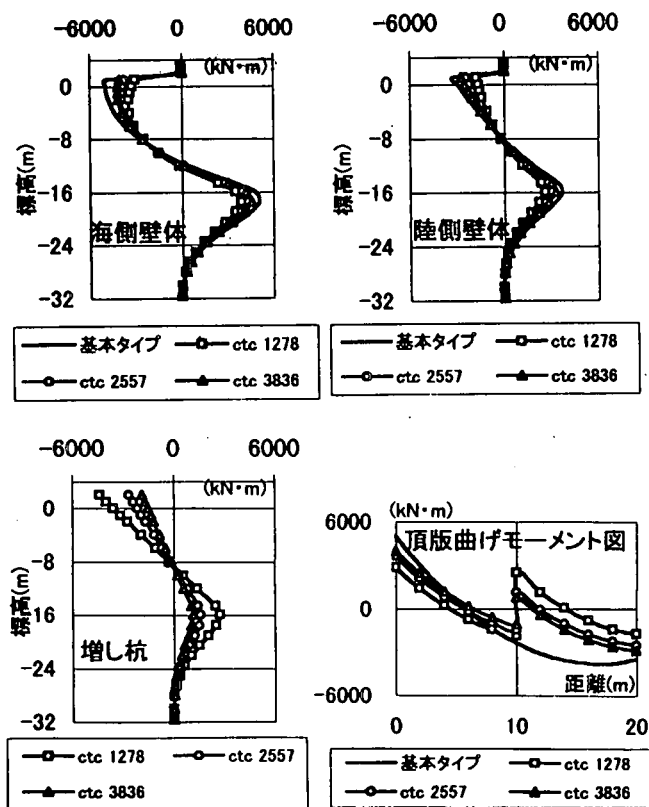


図-7(a) 曲げモーメント分布

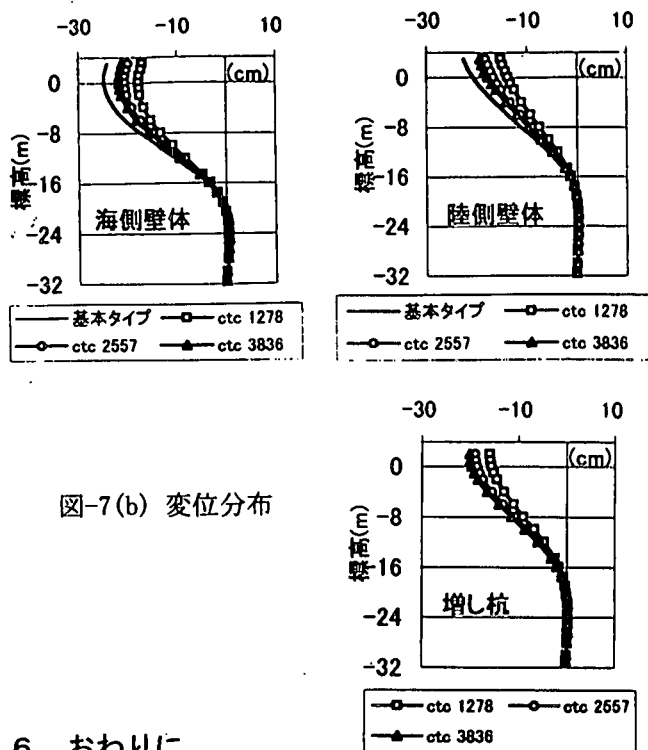


図-7(b) 変位分布

6. おわりに

二重壁式構造物の適用範囲が拡大するに伴い、その力学的挙動を的確に反映した設計法の開発が求められていた。また、従来の二重壁式構造物は図-1(a), (b)に示した頂版結合タイプかタイ材結合タイプのどちらかという画一化された構造形式であった。これは、今回解析例で示した増し杭タイプ等に対する力学的挙動の計算が困難であったことも一因しているものと考えられる。

今回報告した解析手法によれば、①頂版結合タイプにおける頂版の断面力及び壁体構成部材の軸方向力等 ②増し杭等の付加部材が存在する構造の力学的挙動 ③中詰土の天端が低い構造の力学的挙動を算定することができる。

また、二重壁式構造物をはじめとする中詰土を有する壁体構造物に関する新たな構造形式の力学的挙動の推定が可能となる。

なお、本解析法では中詰土の中に杭などの付加部材を配置したときでも、中詰土と壁体との相互作用に関しては大堀らの方法で示された支配方程式等に基づき挙動するものと仮定している。実際には、この付加部材の存在が中詰土や壁体の挙動に少なからず影響を与える場合があるが、本解析法ではこの点が考慮されていないことに留意する必要がある。

【参考文献】

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、pp. 815～818, 1999.
- 2) 沢口正俊：二重壁構造物の設計法についての一提案、港湾技術資料、No. 132, pp. 3～13, 1972.
- 3) 大堀晃・荘司喜博・高橋邦夫・上田寛・原道彦・川井豊・塩田啓介：二重矢板式構造物の力学的特性に関する研究、港湾技術研究所報告、第29巻、第1号、pp103～151, 1984.
- 4) H・C・マーチン著・吉識雅夫監訳：マトリックス法による構造力学の解法、(株)培風館、pp. 11～41, 1973.