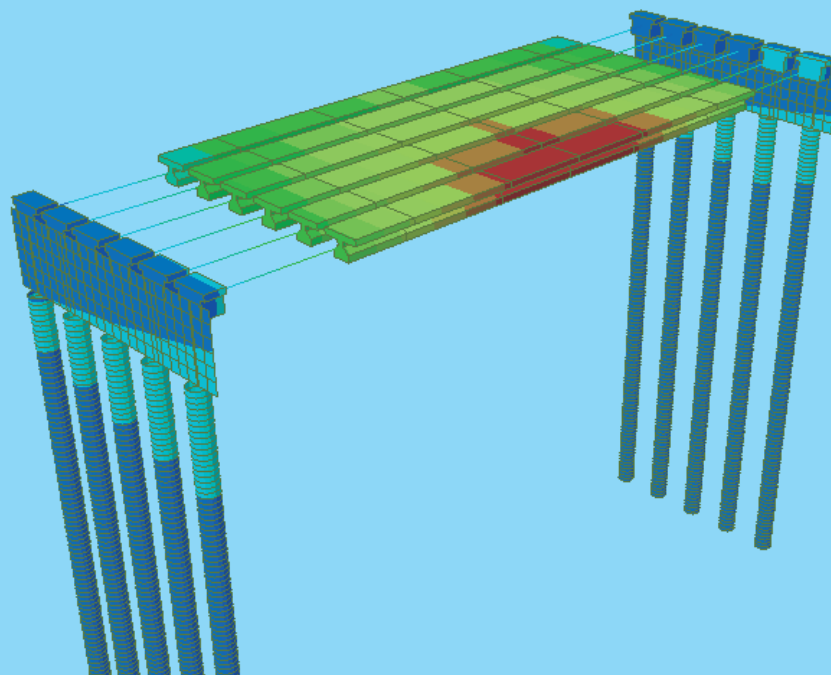


MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

河川・港湾構造物



MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

河川・港湾構造物

01. midas Civil機能紹介2018
 02. Tutorial - 斜め組杭栈橋の耐震解析(L1)
 03. Tutorial - 斜め組杭栈橋の耐震解析(L2)
 04. 杭の支持力解析
新日鐵住金株式会社
 05. 周辺地盤を考慮した群杭基礎の地震応答解析法に関する一考察
土木学会北海道支部 論文報告集
 06. 異なる基礎形式を有する基礎
- 地盤系モデルの地震応答特性に関する一考察
地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム 講演論文集
 07. RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃挙動に関する
二次元骨組解析法の妥当性検討
コンクリート工学年次論文集
-

**MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
DOCUMENT
COLLECTION**

河川・港湾構造物

01.

midas Civil 機能紹介2018

midas Civil 機能紹介

株式会社マイダスアイティジャパン

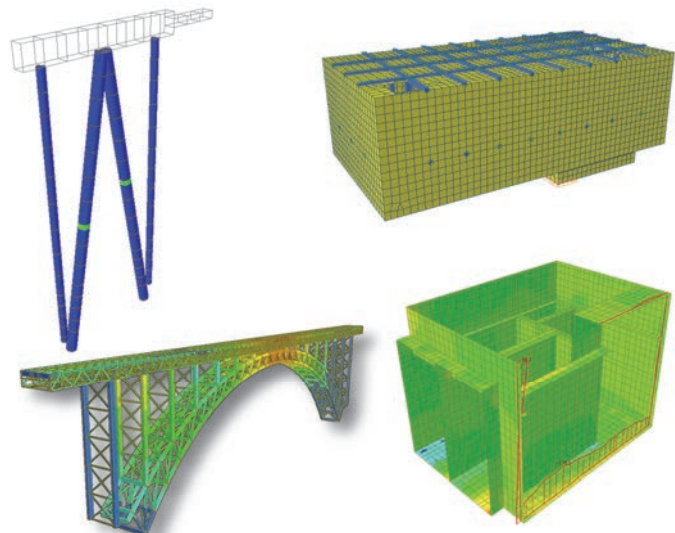
midas Civil 機能概要

- あらゆる土木構造物のモデリングと解析が可能
→ 静的解析から高度な解析まで、あらゆる解析に対応

1 多様な解析機能

- > **Standard**
静的線形解析、格子解析
座屈・固有値解析
- > **動的解析**
線形動的（応答スペクトル/時刻歴）
非線形動的($M-\phi$)、ファイバー解析
- > **静的非線形フレーム解析**
プッシュオーバー解析
- > **段階施工解析**
クリープ・乾燥収縮、段階施工
- > **幾何非線形解析**
- > **材料非線形**
静的材料非線形
- > **熱応力解析**
熱伝導、水和熱解析

橋梁 港湾・河川構造物 上下水道施設
プラント施設 トンネル ダム



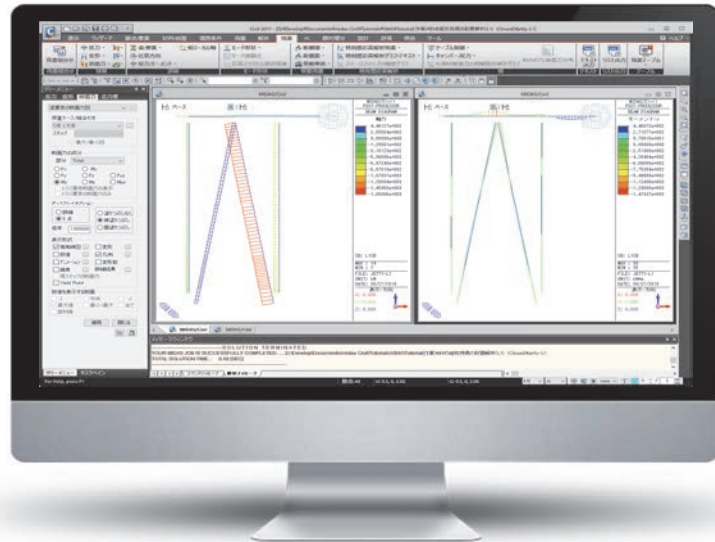
midas Civil 機能概要

- 最新インターフェイスを用いた便利なモデリングと簡単なデータの検討と修正

2 直観的なUI環境

- ワークツリーによるモデルや作業内容確認
- 他人が作業したモデルでも一目でわかる。
- 段階施工データの簡単な確認
施工段階単位のデータ管理
段階施工アニメーション
- モデル自動チェック機能
重複要素、フリーエッジ、フリーフェイス、要素座標系の不具合
- マルチウィンドウ制御による作業効率性Up
同モデルに対する結果成分別の比較

マルチウィンドウ制御の作業効率性の向上



3

midas Civil 機能概要

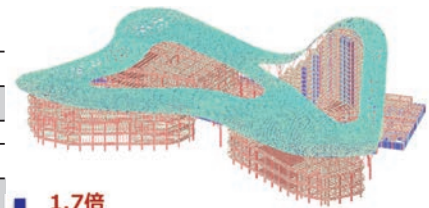
- 64ビット対応の優れた計算性能
→ プリポスト、ソルバー共に64ビット対応

3 優れた計算性能

- 64ビット対応のプリポストとソルバー
GPUソルバー対応
- 使用できるメモリの制限がない。
大規模モデルの解析や結果データ量の大きい動的解析で有効

比較-1

要素	56,634
解析タイプ	静的解析
システム環境	計算時間
Civil 32-bit	2641.57 秒
Civil 64-bit	1590.49 秒



↓ 1.7倍
速度向上

比較-2

要素	116,586
節点	158,256
解析タイプ	材料非線形解析
システム環境	計算時間
Civil 32-bit	Out of Memory
Civil 64-bit	13663.80 秒



↓ 解析可能

4

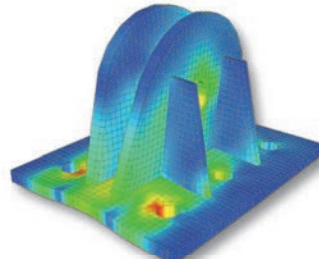
midas Civil 機能概要

■ 多彩な結果表示

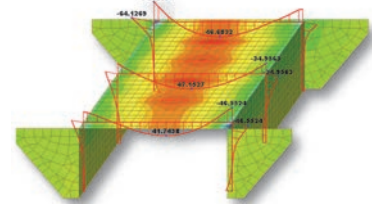
→ビジュアル表示だけでなく、EXCELやWordと連動して結果分析をサポート

4 多彩な結果表示

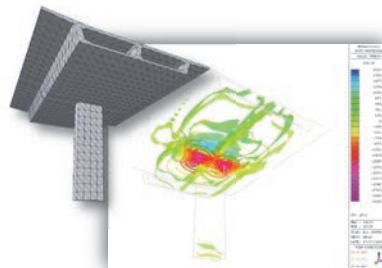
- ▶ **変形図、分布図、コンター表示**
フレーム、シェル要素、ソリッド要素の断面力・応力度のコンター/分布図表示
- ▶ **結果アニメーション**
アニメーション再生、AVIファイルに保存
- ▶ **多彩な時刻歴結果表示**
非線形梁部材の断面力履歴
ファイバー断面のセル別の非線形状態
履歴グラフのEXCEL形式へ書き出し
- ▶ **Word形式の解析計算書**
解析条件変更による再解析後に
既作成計算書の自動更新



Von-Mises 応力 + 変形後形状



シェル要素の単位幅当たりの断面力分布



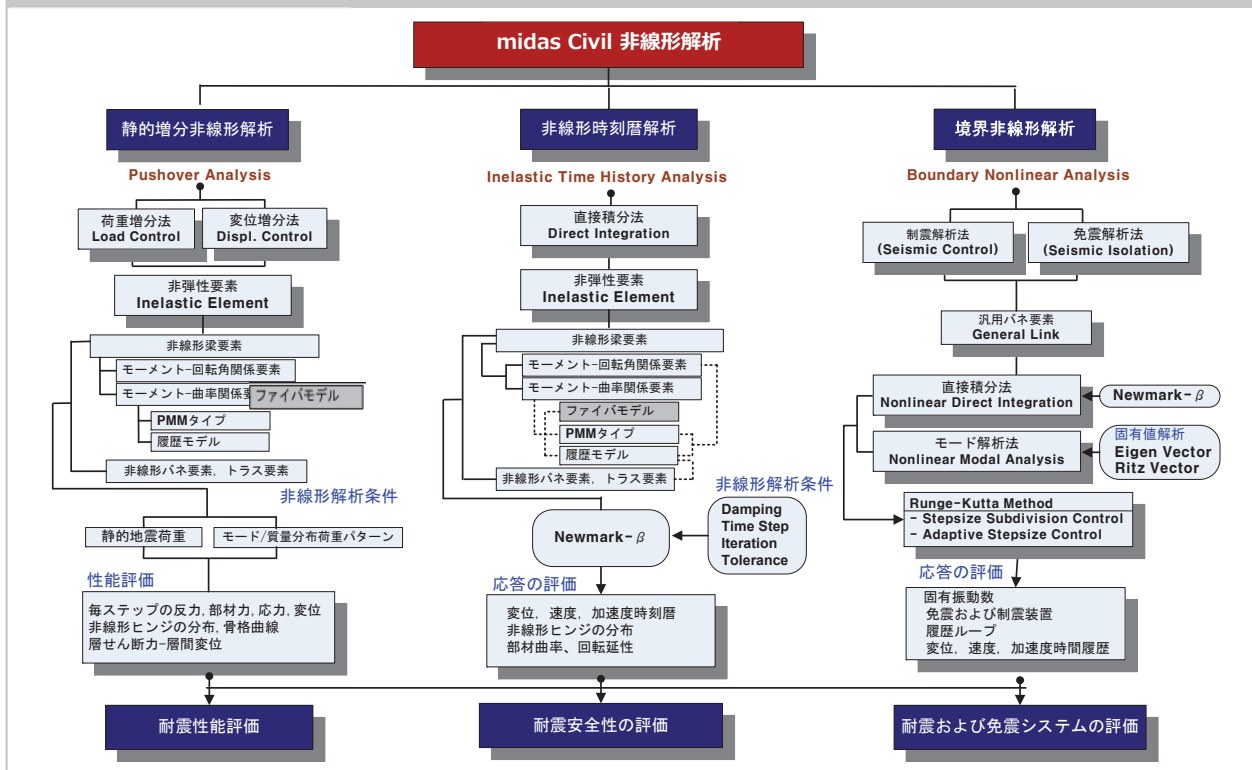
ソリッド応力 - 同値面



変形コンター

midas Civil 解析機能

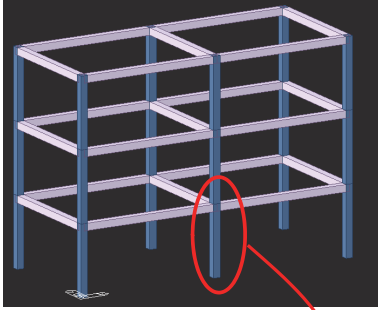
非線形解析一覧



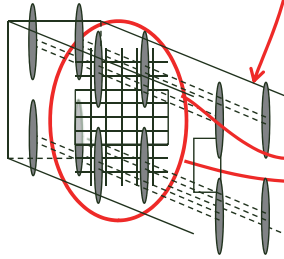
midas Civil 解析機能

フレーム非線形 – ヒンジとファイバーモデル

■ 構造部材レベル

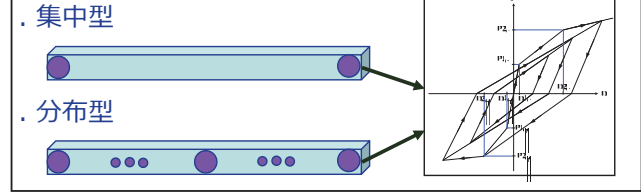


■ 要素レベル

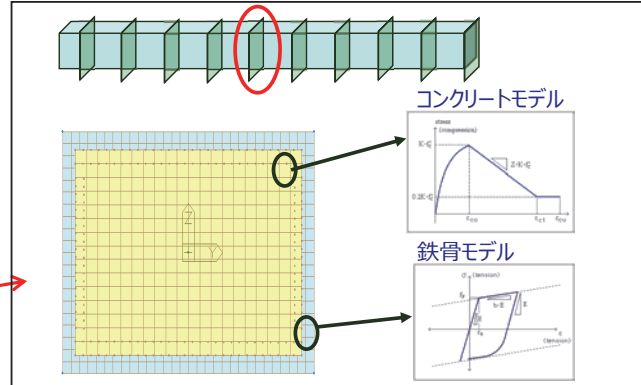


■ 断面レベル

■ ヒンジモデル



■ ファイバーモデル



midas Civil 解析機能

多様な減衰モデル

■ 構造減衰

■ モード減衰

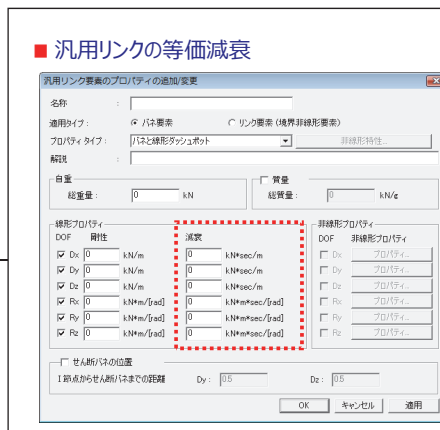
■ ひずみエネルギー比例減衰

■ レーリー減衰

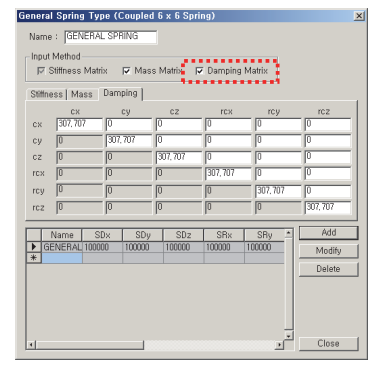
■ グループレーリー減衰 - 直接積分法のみ

■ その他の減衰

■ 汎用リンクの等価減衰



■ 支持バネの減衰



■ 減衰の更新：非線形直接積分法のみ

■ レーリー減衰

$$C = \alpha M + \beta \sum_{n=1}^N (K_n^{Crnt})$$

：剛性マトリックスの更新

■ グループレーリー減衰

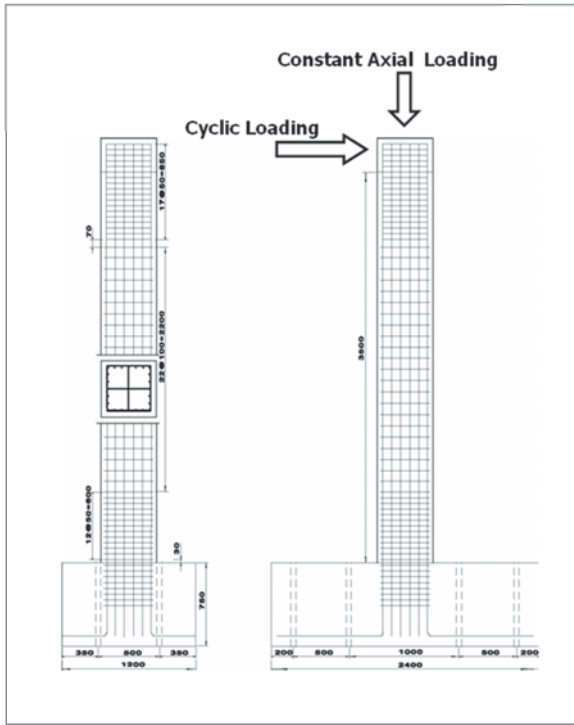
$$C = \sum_{n=1}^N (\alpha_n M_n + \beta_n K_n^{Crnt})$$

→ 瞬間剛性比例型

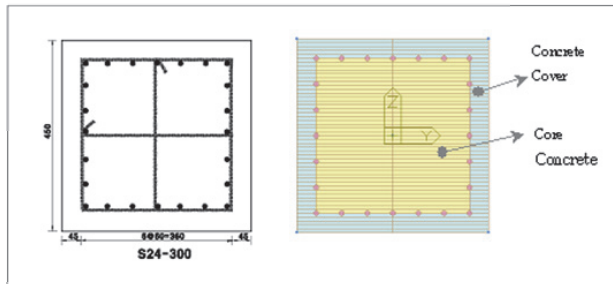
midas Civil 解析機能

ファイバーモデルの検証

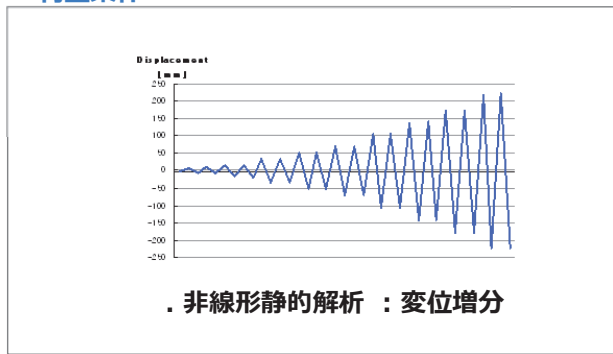
■ 実験および解析モデル



■ ファイバ断面分割



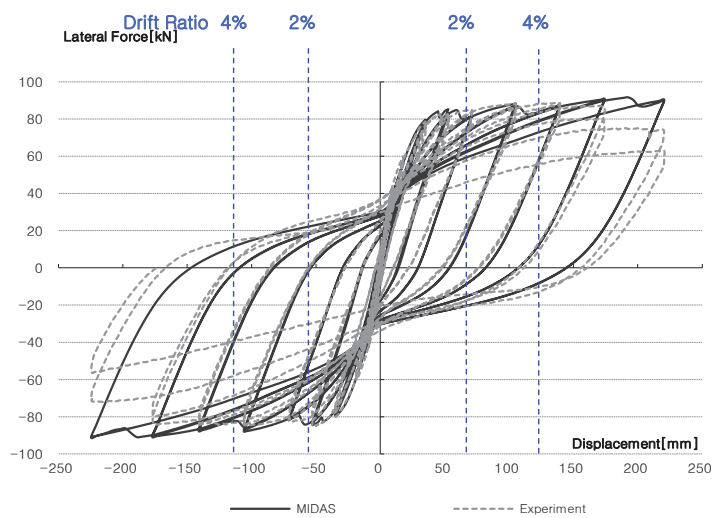
■ 荷重条件



9

midas Civil 解析機能

ファイバーモデルの検証



	MIDAS	Experiment	Error[%]
Max. Lateral Force [kN]	88.5124	89	0.55
Min. Lateral Force [kN]	-88.6498	-84.8	4.54

10

midas Civil 解析機能

地盤バネ - 多様なバネタイプ

- **線形リンク** : 1節点バネ、2節点バネ、面分布バネ
- **汎用リンク** : 非線形タイプ
 - 弾塑性モデル : 非線形梁と同じ履歴特性が使用可能
 - マルチリニア型 : 弾性 / 移動硬化 / 武田型 / Pivot型

非線形特性: マルチリニア-塑性移動硬化

タイプ
 両方 引張専用 圧縮専用

マルチリニアの力と変位関係

	変位 (rad)	力 (in*kips)
6	-1.4000	-216.0000
7	-0.7000	-160.0000
8	-0.2500	-86.0000
9	-0.1200	-48.0000
10	0.0000	0.0000
11	0.1200	48.0000
12	0.2500	86.0000
13	0.7000	160.0000
14	1.4000	216.0000
15	2.3000	253.0000
16	3.4500	279.0000
17	4.7500	296.0000
18		

スケルトン曲線

塑性進行段階
 塑性率 D/D1 D/D2

ヒンジ状態

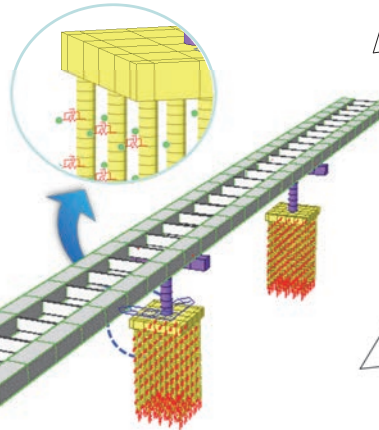
レベル	(+)	(-)
1	0.5	0.5
2	1	1
3	2	2
4	4	4
5	8	8

倍率: 変位 1 力 1

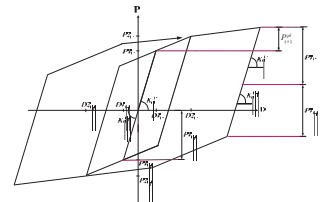
初期剛性
 (+) 400 in*kips
 (-) 400 in*kips

OK キャンセル(C)

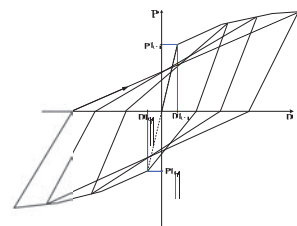
『マルチリニア-移動硬化ヒンジモデル』



『杭-地盤の相互作用を考慮』



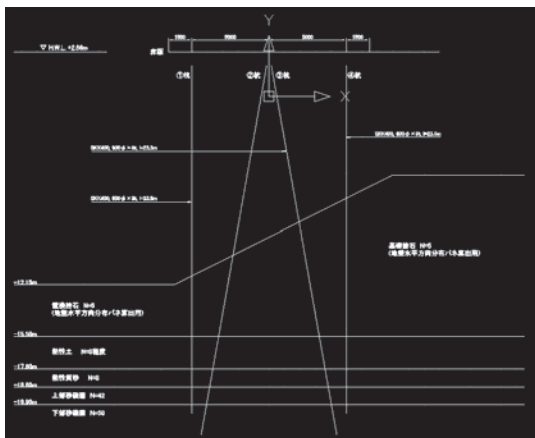
『移動硬化型モデル』



『武田型モデル』

活用例 - 港湾分野(棧橋の耐震照査)

1. CADデータの活用



『CADデータ』

DXFファイルの読み込み

DXFファイル名
 sap0524セサナー4棟橋形状.dxf 参照

全てのレイヤ 選択されたレイヤ

1-REGION-VIEW
 Depoints
 stratum

読み込み 節点 節点 & 要素

番号付け
 開始節点番号: 39
 開始要素番号: 34

材料 & 断面
 材料: 1
 断面: 1
 厚さ: 1

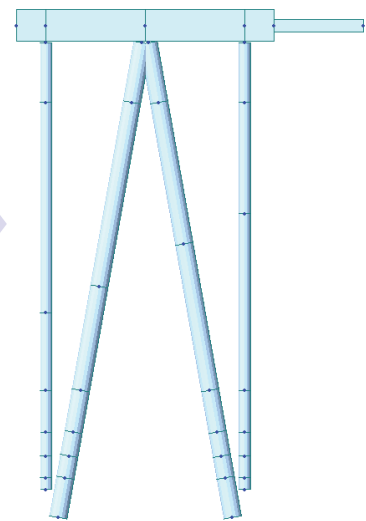
スケール & 基準点
 スケール: 1
 基準点: 0, 0, 0

回転角度
 Rx: 90 Ry: 0 Rz: 0

許容誤差
 重複節点のマージ
 交差点で要素分割

OK 閉じる 適用

『読み込みダイアログ』

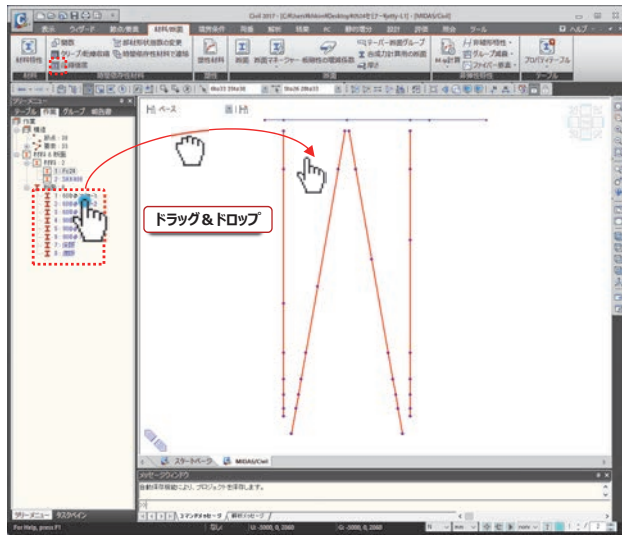


『読み込んだ形状-梁要素』

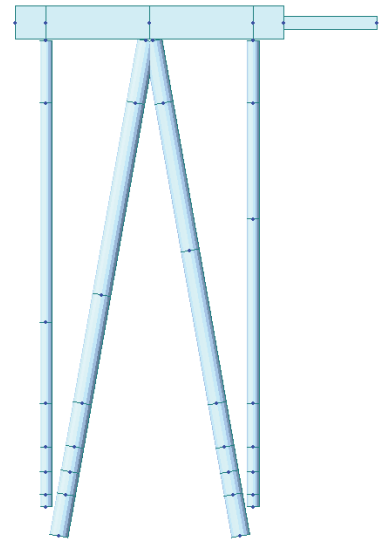
- DXFのラインデータの読み込み: 読み込むレイヤを選択
- CADの線が自動的に梁要素に置換
 - ✓ 梁要素の材料、断面を指定
- 要素の配置や形状のスケールも可能

活用例 - 港湾分野(栈橋の耐震照査)

2. ドラッグ&ドロップによるデータ変更



『断面データをドラッグ&ドロップによって部材に割当る』



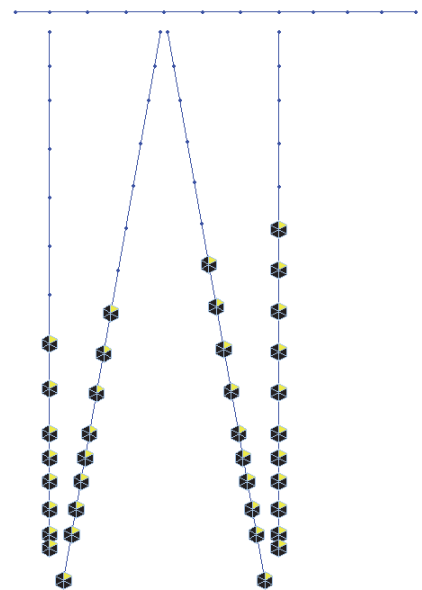
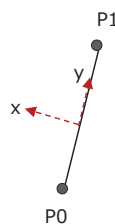
- 作業ツリー上のデータを実作業画面で選択した節点・要素にドラッグ&ドロップするだけで適用・変更
 - ✓ 要素タイプの変更: 例) 梁要素→トラス要素
 - ✓ 材料、断面の割当・変更
 - ✓ 境界条件の変更: 支持条件、部材の結合条件 など

活用例 - 港湾分野(栈橋の耐震照査)

3. 面分布支持バネ



『斜杭直角方向の設定』



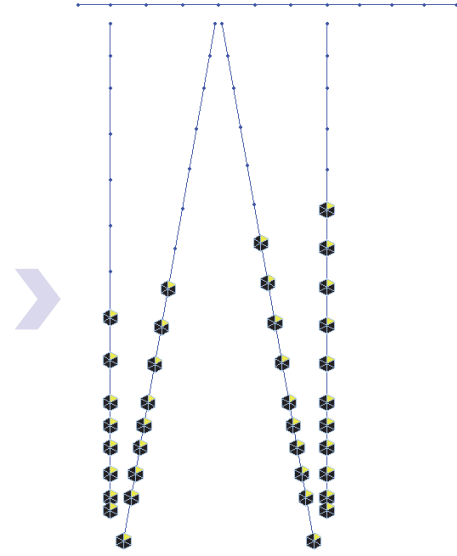
『面分布地盤バネの設定』

- 斜杭の部材軸に沿った節点座標系の設定
 - ✓ 斜杭の2点を画面でクリックするだけで、斜杭の部材軸と直角方向の座標系を簡単設定
- 地盤反力係数と部材幅の指定による地盤バネの設定
 - ✓ 斜杭の各節点が負担する要素長さを自動計算してバネ剛性を自動計算

活用例 - 港湾分野(栈橋の耐震照査)

4. 荷重ケース別の境界条件

荷重ケース & 解析	境界グループ組合せ
静的荷重ケース	
- 積自重	Level1
- 上部工自重	Level1
- 敷荷重	Level1
- レベル1	Level1
- レベル2	Level2
- OB同時	実変なし
- 移動荷重/格子解析	実変なし
- 支点沈下解析	実変なし
- 時刻歴/応答スペクトル/固有値解析	Level2
- 非線形動的を利用した静的解析	実変なし
- その他の解析ケース	実変なし



Level 1 : 線形ハネ
Level 2 : 非線形ハネ

- ① 荷重条件別に変更する境界条件タイプを指定
- ② 荷重条件別に変更する境界グループを指定
- ③ “②” で指定した複数の境界グループを組み合わせる
- ④ 荷重ケースに境界グループ組合せを適用 : 境界条件を変更したい荷重ケースで選択して、“境界グループ組合せ”で境界グループを指定

活用例 - 港湾分野(栈橋の耐震照査)

5. マルチウィンドウによる複数結果の確認

荷重ケース指定

結果成分指定

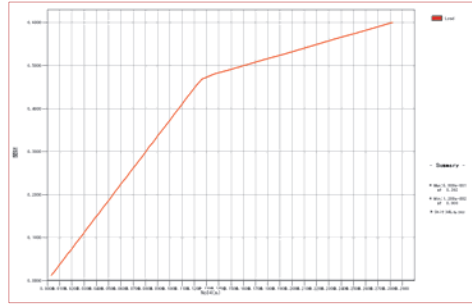
- 作業画面を分割表示して、異なる結果成分の比較検討が可能
 - ✓ 異なる結果成分 (例 : 抗軸力と曲げモーメント) の比較表示
- 作業画面を分割表示して、各荷重による影響を比較分析
 - ✓ ウィンドウ毎に異なる荷重ケースを指定して各荷重による影響を比較表示



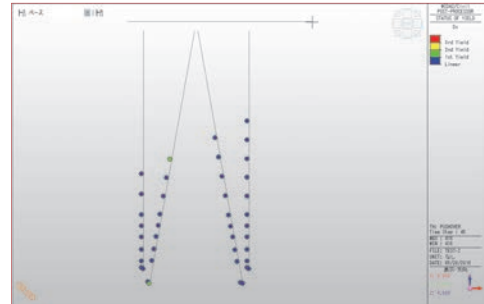
6. 一つのデータで線形と非線形の解析を実行



『増分解析』



『プッシュオーバー解析による水平力-水平変位結果』



『地盤パネの降伏状態の表示』

- 一つのデータで線形解析や非線形解析などの複数の検討が可能
 - ✓ レベル1地震動に対する部材応力の検討
 - ✓ レベル2地震動に対する部材耐力の検討
- 構造全体の荷重-変位関係、部材の損傷状態の確認

**MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
DOCUMENT
COLLECTION**

河川・港湾構造物

02.

midas Civil Tutorial

斜め組杭栈橋の耐震解析(L1)

概要

● 解析モデル

- 上部工・杭：線形梁
- 地盤：線形パネ

● 荷重及び境界条件

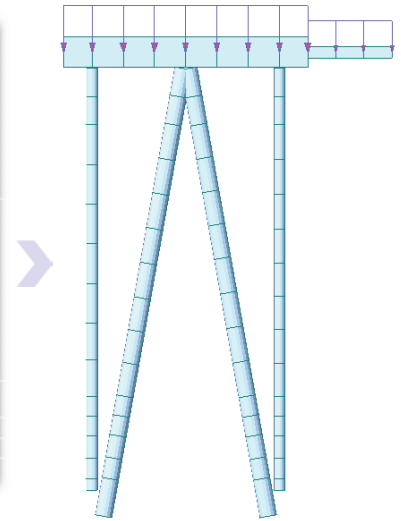
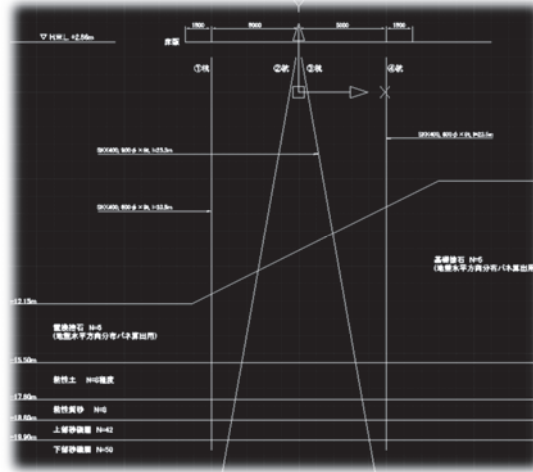
- 自重、載荷重、水平力
- 支持条件
 - ① 杭支持端：ピン
 - ② 渡版右端：水平ローラー
 - ③ 杭法線方向に線形地盤パネ

● 結果評価

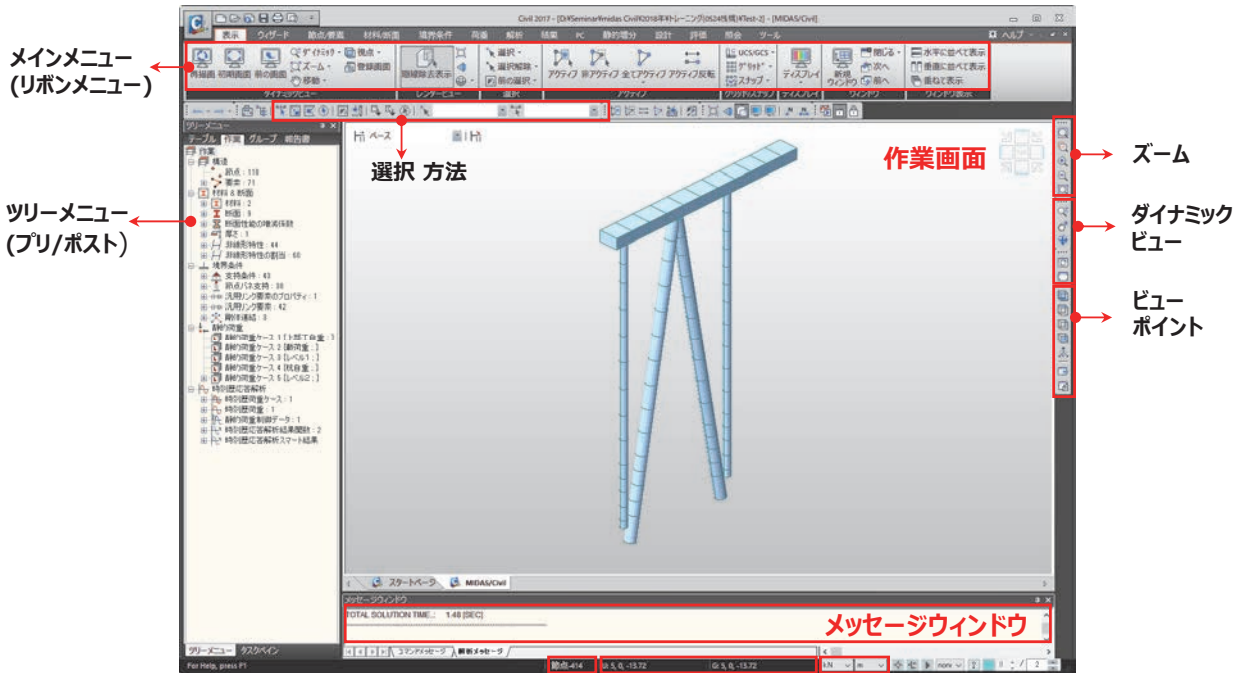
- 変位結果
- 断面力結果
- 杭の応力、支持力照査

斜め組杭栈橋の耐震解析

- レベル1地震動



画面構成と操作方法

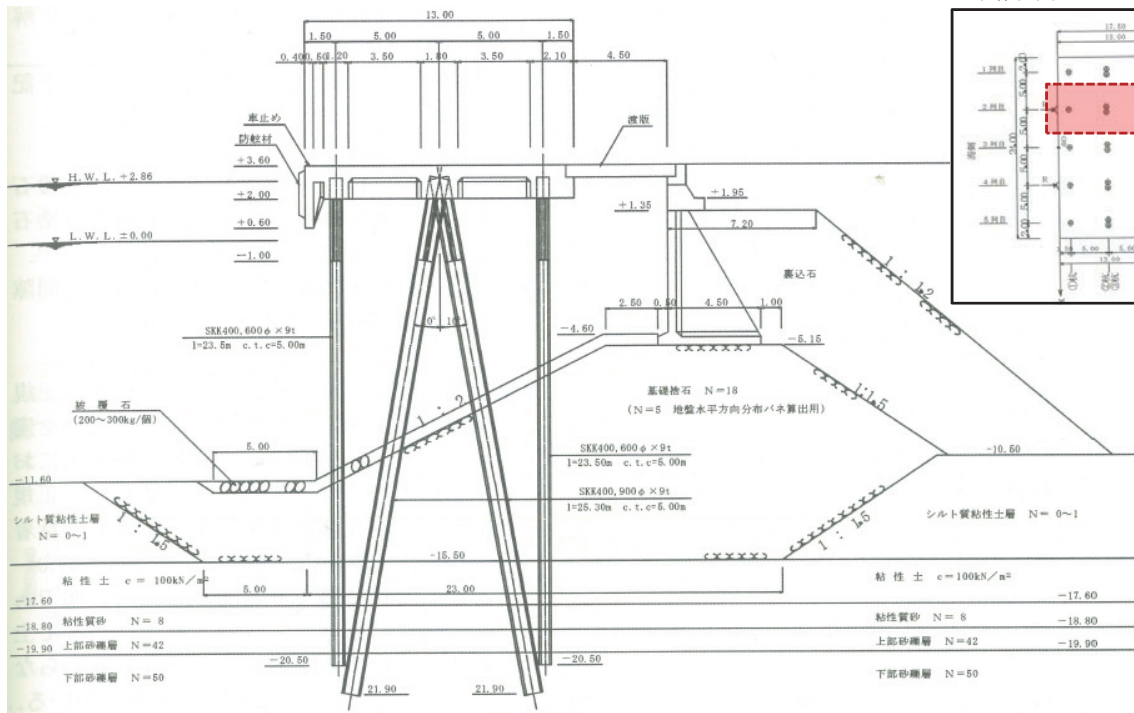


・中ボタン	: モデル移動	Ctrl+A	: ウィンドウフィット
・中ボタンスクロール	: モデル拡大、縮小	Ctrl+Y	: やり直し
・Ctrl + 中ボタン	: モデル回転	Ctrl+Z	: 元に戻す
		[Esc]キー	: 閉じる
		[Enter]キー	: 適用

モデル概要

■ 解析モデル

: 下図に示す栈橋の2列目杭列(作用分担幅B=5m)を取り出し、2次元骨組解析を用いて構造検討を行う。



※ 港湾技術研究センター「港湾構造物の設計事例集」より

解析条件

■ 地盤条件

地層	深度(m)	N値	単位体積重量 (kN/m ³)	C (kN/m ²)	Φ (°)	地盤反力係数 (kN/m ³)	in batter ※ (kN/m ³)	out batter ※ (kN/m ³)
基礎捨石	-10.5~-15.5	5	18.0 (γ'=10.0)	-	40.0	5400	7236	3996
粘性土	-15.5~-17.6	8	17.0 (γ'=7.0)	100.0	-	8640	-	-
粘土質砂	-17.6~-18.8	8	18.0 (γ'=10.0)	-	32.9	8640	-	-
上部砂礫層	-18.8~-19.9	42	18.0 (γ'=10.0)	-	42.3	45360	-	-
下部砂礫層	-19.9~-21.9	50	18.0 (γ'=10.0)	-	45.0	54000	-	-

※ 基礎捨石層では、杭の傾斜角を考慮して、地盤反力係数を調整

■ 部材諸元

1. 上部工

部材	断面	材料
上部工	H 1.6 × B 0.9 (m)	Fc24

2. 杭諸元

1) 腐食代 tc

- 杭頭部 (-1.00m以浅) : 0.0mm
- 水中部 (-1.00m~海底面) : 0.5mm
- 杭頭部 (海底面以深) : 1.5mm

2) 杭諸元

部材	断面	材料
直杭	600Φ × 9t	SKK400
斜杭	900Φ × 9t	SKK400

※ 本例題では腐食代を考慮して、水中部と土中部の杭剛性を元の剛性に対して其々94%、83%に低減させる。

解析条件

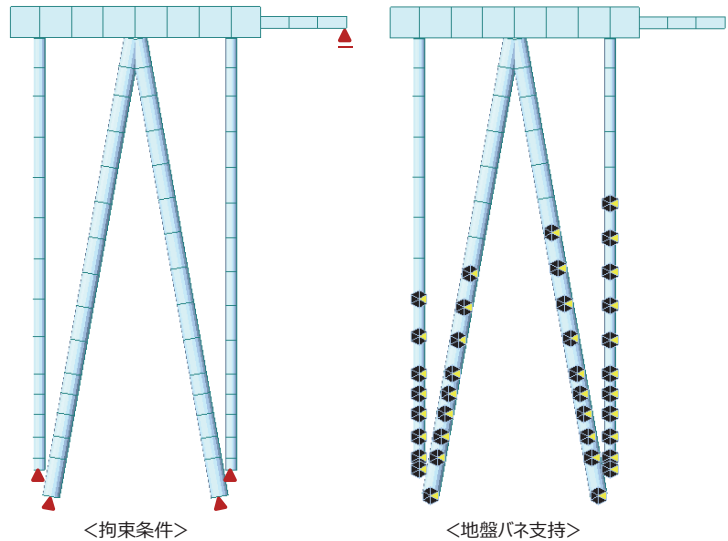
■ 荷重条件

部 材	作用強度 ω (kN/m ²)	負担幅 B(m)	鉛直荷重(kN/m)
上部工床版	21.00	5.0	105.0
渡版	14.26	5.0	71.3
載荷重	10.00	5.0	50.0
杭自重	単板体積重量 77.0(kN/m ³) を「自重」機能を利用して、分布載荷		

- レベル 1 照査用震度 : 0.18

■ 境界条件

1. 支持条件
 - 杭先端 : ピン支持
 - 渡版 : ローラー支持
2. 横方向の地盤バネ
 - 杭の法線方向に線形の面分布バネを設定



5

01 新規プロジェクトの開始

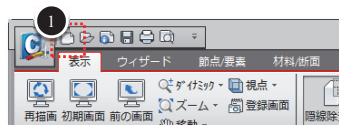
手順

ファイルの保存

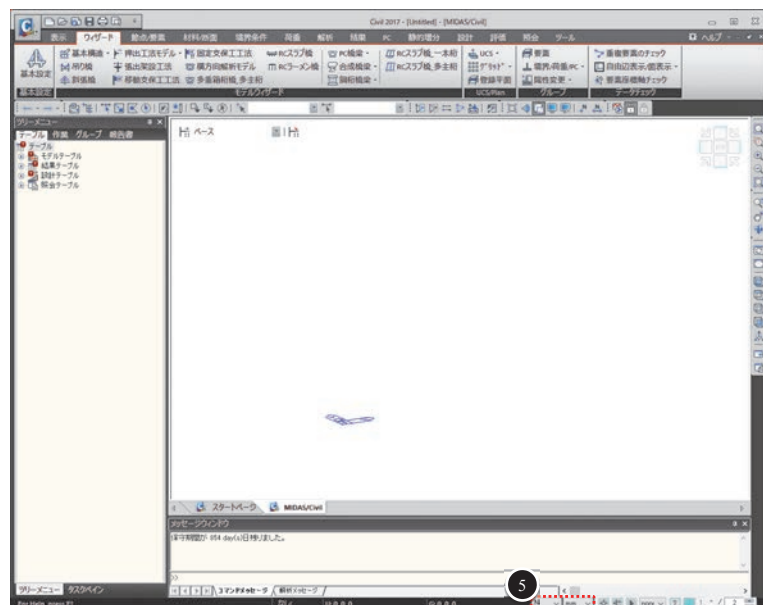
- ① 新規プロジェクト をクリック
- ② ファイル > [保存]
- ③ ファイル名 : [jetty-L1.mcb]
- ④ [OK] ボタンをクリック

単位系及びスナップの設定

- ⑤ 単位系 : N, mm
「ツール > セッティング > 単位系」で
設定することも可能です。



プログラムを起動すると「スタートページ」が表示されます。
そこで、「新規プロジェクト」をクリックするとモデルビューが開きます。

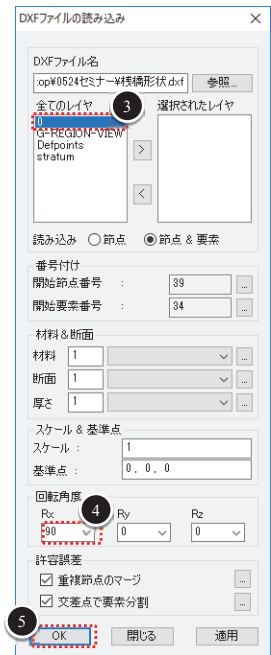
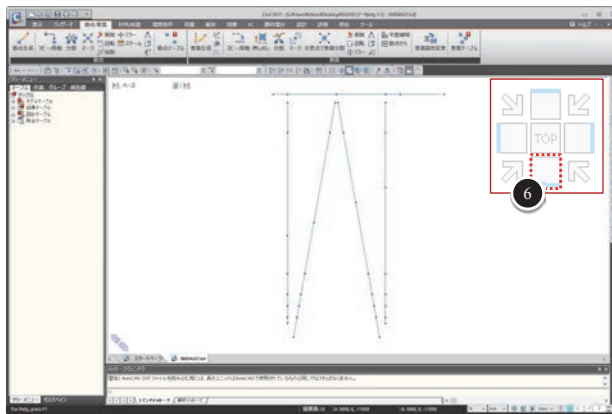
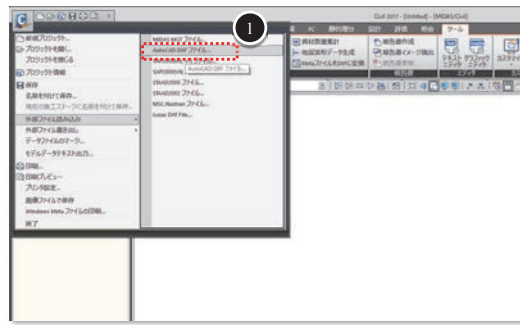


6

02 栈橋形状の読み込み

手順

- 1 アイコンメニュー[外部ファイル読み込み] > [AutoCAD DXFファイル…]
- 2 本資料が入っているチュートリアルフォルダの[栈橋形状.dxf]を開く
- 3 全てのレイヤ から“0”を選択し、
> クリックして、“選択したレイヤ”に移動
- 4 回転角度：“Rx：90”
- 5 [OK]ボタンをクリック
- 6 作業画面右上にある“視点変更”ボタンの“正面”ボタンをクリック

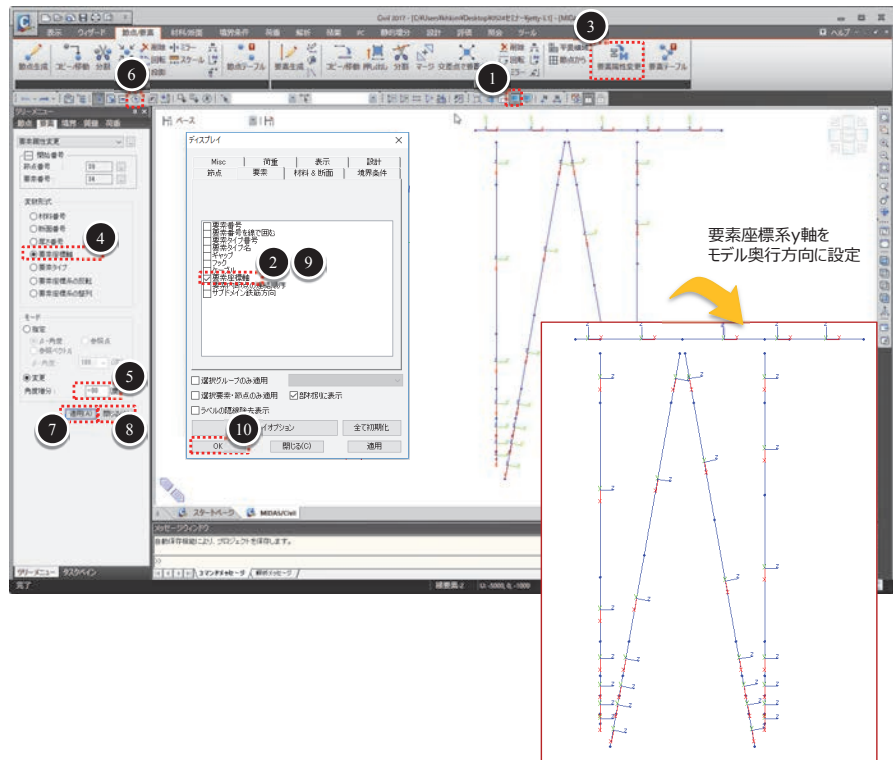


7

03 要素座標系の変更

手順

- 1 アイコンツールバーの[ディスプレイ]をクリック
- 2 [要素>要素座標軸] チェックオン
- 3 メインメニュー[節点/要素] > [要素属性変更]
- 4 変数形式：“要素座標軸”
- 5 変更>角度増分：“-90”[度]
- 6 アイコンツールバーから“全て選択”をクリック
- 7 [適用]ボタンをクリック
- 8 [閉じる]ボタンをクリック
- 9 [要素>要素座標軸] チェックオフ
- 10 [OK]ボタンをクリック



*1 dxfの線形状はmidas Civilで梁要素として読み込まれます。
ここでは、部材断面の強軸（要素座標系y軸）を断面の奥行方向に設定します。

8

04 材料の定義

構造部材の材料データを入力します。

手順

- ① メインメニュー[材料&断面] > [材料] > [材料特性]
- ② [材料]タブを選択
- ③ [追加] クリック
- ④ 名称：“Fc24”
- ⑤ タイプ：“コンクリート”
- ⑥ 規格：“なし”
- ⑦ 弾性係数：“2.5e4”
- ⑧ ボアソン比：“0.2”
- ⑨ [適用] ボタンをクリック
- ⑩ タイプ：“鉄骨”に変更
- ⑪ 種別：“SKK400”
- ⑫ [OK] ボタンをクリック

9

05 断面の定義

構造部材の断面データを入力します。

手順

- ① [断面]タブを選択
- ② [追加] クリック
- ③ [規格/ユーザー]タブを選択
- ④ 断面リストから“パイプ断面”を選択
- ⑤ 名称：“600*9-1”
- ⑥ [ユーザー]を選択
- ⑦ D：“600”、tw：“9”
- ⑧ [適用] ボタンをクリック
- ⑨ 表を参照し、手順⑤から⑧までと同じ要領で断面2~6 まで入力
- ⑩ 断面リストから“矩形”を選択
- ⑪ 名称：“床版”
- ⑫ [ユーザー]を選択
- ⑬ H：“1600”、B：“900”
- ⑭ [適用] ボタンをクリック
- ⑮ 名称：“渡版”
- ⑯ H：“600”、B：“900”
- ⑰ [OK] ボタンをクリック
- ⑱ [閉じる] ボタンをクリック

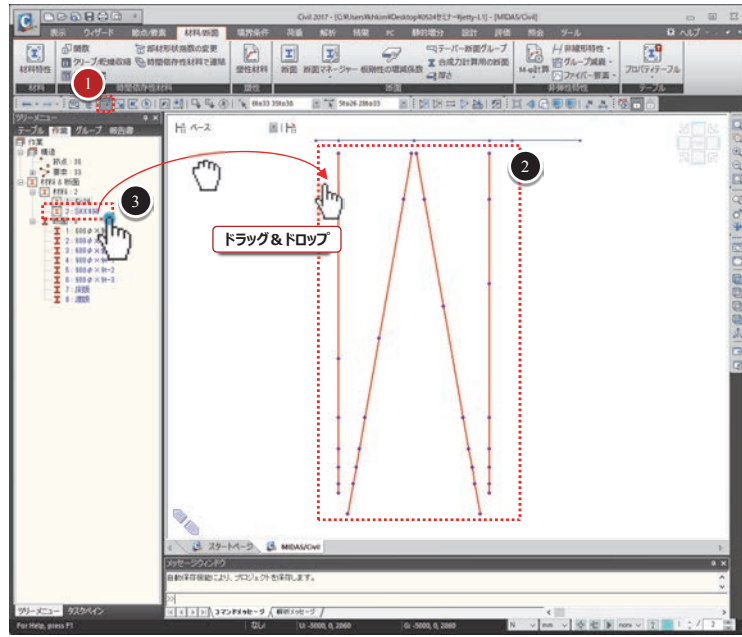
部材番号	名称	タイプ	形状	寸法
1	600*9-1	ユーザー	パイプ断面	600D × 9tw
2	600*9-2	ユーザー	パイプ断面	600D × 9tw
3	600*9-3	ユーザー	パイプ断面	600D × 9tw
4	900*9-1	ユーザー	パイプ断面	900D × 9tw
5	900*9-2	ユーザー	パイプ断面	900D × 9tw
6	900*9-3	ユーザー	パイプ断面	900D × 9tw

10

06 杭材料の割当

材料や断面を該当部材に割り当てます。

- 手順**
- 1 アイコンツールバーの“単一選択/解除”をクリック
 - 2 作業画面上の4本の杭を囲んで選択
 - 3 作業ツリーの【材料&断面>材料>SKK400】をクリックしたまま、マウスを作業画面上に持っていき、マウスを放す(ドラッグ&ドロップ)

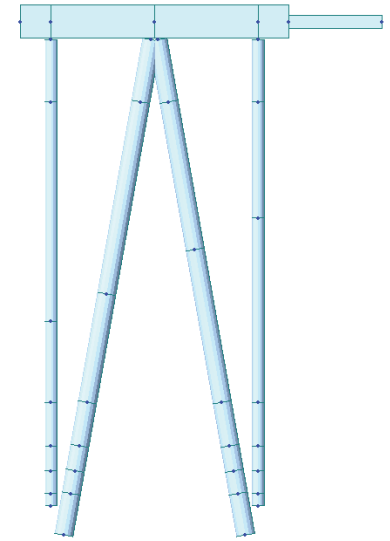
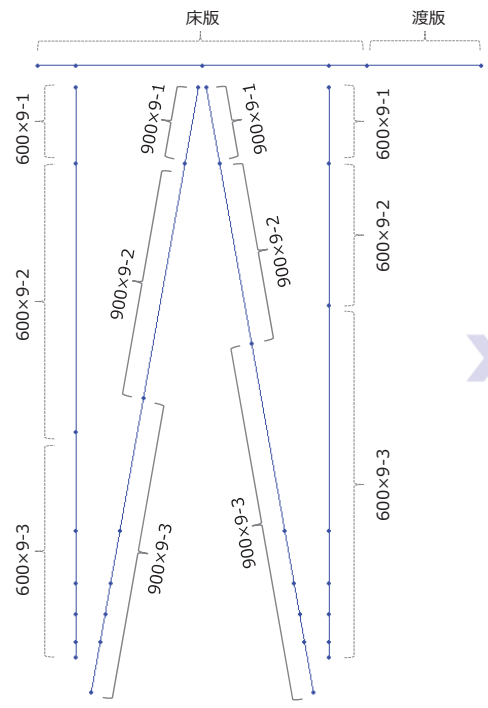


*1 選択した対象に材料を割り当てる際、必ずしも選択した部材の上にマウスをドラッグする必要はありません。材料を割り当てる部材が選択されていれば、作業画面上のどの位置にドラッグ&ドロップしても構いません。

07 部材断面の割当

材料や断面を該当部材に割り当てます。

- 手順**
- 1 右図を参照しながら、作業ツリーの【材料&断面>断面】に対して該当の断面を割り当てる
 - 2 メインメニュー【表示】>【レンダビュー】>【陰線除去表示】をクリックして、部材断面が正しく適用されたかを確認
 - 3 メインメニュー【表示】>【レンダビュー】>【陰線除去表示】チェックオフ

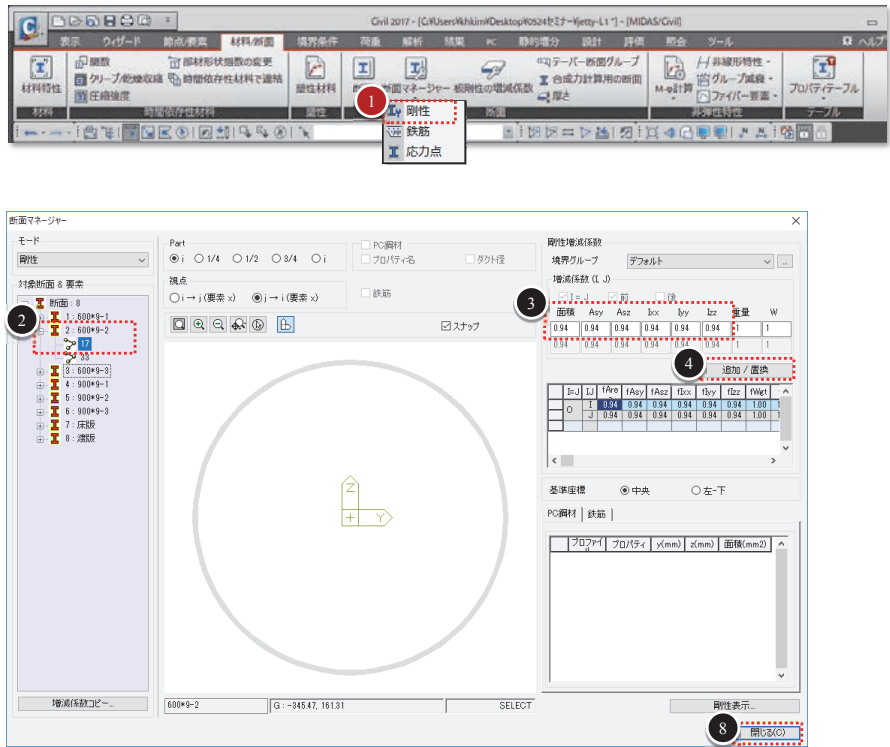


*1 杭部材の断面は、腐食代を考慮するために、同じ部材で深さ方向に断面を区分して設定します。

08 杭の腐食代の設定

水中部と土中部における鋼管杭の腐食代の影響を剛性低減係数で設定します。

- 手順**
- ① メインメニュー[材料&断面] > [断面] > [断面マネージャー] > [剛性]をクリック
 - ② [対象断面&要素] ツリーの“2:600×9-2”断面から、要素の一つを選択
 - ③ 面積~Izz: “0.94”
 - ④ [追加/置換]をクリック
 - ⑤ 同様に、“3:600×9-3”断面に対し
面積~Izz: “0.83”
 - ⑥ “5:900×9-2”断面に対して、
面積~Izz: “0.94”
 - ⑦ “6:900×9-3”断面に対して、
面積~Izz: “0.83”
 - ⑧ [閉じる] ボタンをクリック

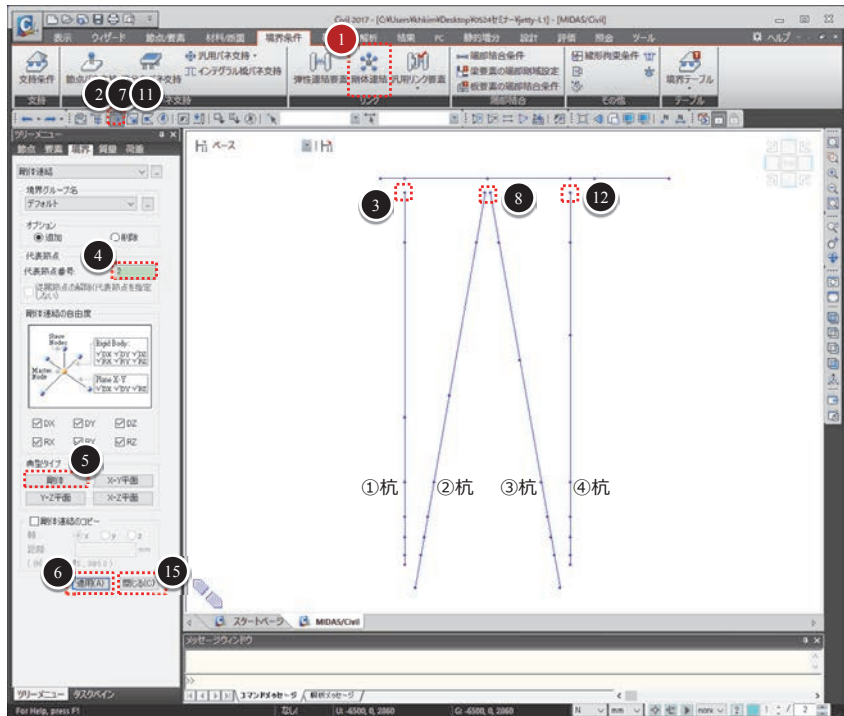


*1 断面マネージャーでは同じ断面を持つ複数の要素から任意の1つの要素にだけ設定をします。すると、自動的に他の要素にも設定が適用されます。

09 杭頭部の剛体連結

床版に食い込む杭頭部を剛体連結します。

- 手順**
- ① メインメニュー[境界条件] > [リンク] > [剛体連結]をクリック
 - ② “単一選択/解除”をクリック
 - ③ ①杭の杭頭部の節点を選択
 - ④ 代表節点番号: “2”
 - ⑤ 典型タイプ: “剛体”
 - ⑥ [適用] ボタンをクリック
 - ⑦ “単一選択/解除”をクリック
 - ⑧ ②杭と③杭の杭頭部の節点を選択
 - ⑨ 代表節点番号: “3”
 - ⑩ [適用] ボタンをクリック
 - ⑪ “単一選択/解除”をクリック
 - ⑫ ④杭の杭頭部の節点を選択
 - ⑬ 代表節点番号: “4”
 - ⑭ [適用] ボタンをクリック
 - ⑮ [閉じる] ボタンをクリック



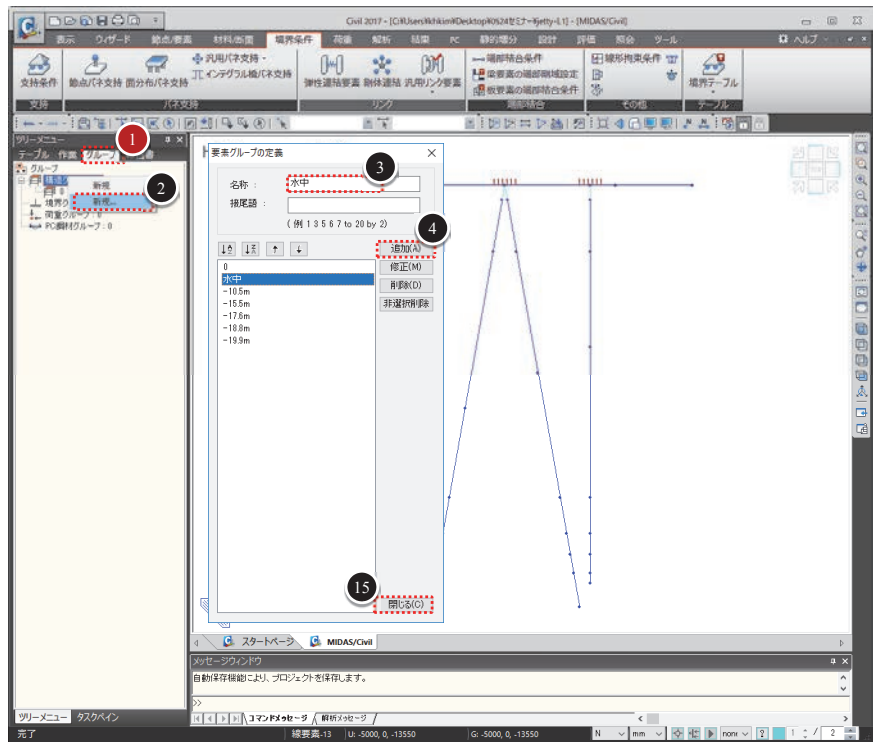
*1 “代表節点番号”の節点入力欄をクリックすると、背景が緑色に変わります。この状態で作業画面で該当の節点を選択すると、選択した節点の節点番号が自動的に入力されます。

10 杭のグルーピング-1

地盤バネの設定をしやすくするために、地層に基づいて杭をグループ分けします。

手順

- ① ツリーメニュー[グループ] タブをクリック
- ② “構造グループ” をマウスで右クリックして、“新規...” クリック
- ③ 名称：“水中”
- ④ [追加] ボタンをクリック
- ⑤ 名称：“-10.5m”
- ⑥ [追加] ボタンをクリック
- ⑦ 名称：“-15.5m”
- ⑧ [追加] ボタンをクリック
- ⑨ 名称：“-17.6m”
- ⑩ [追加] ボタンをクリック
- ⑪ 名称：“-18.8m”
- ⑫ [追加] ボタンをクリック
- ⑬ 名称：“-19.9m”
- ⑭ [追加] ボタンをクリック
- ⑮ [閉じる] ボタンをクリック



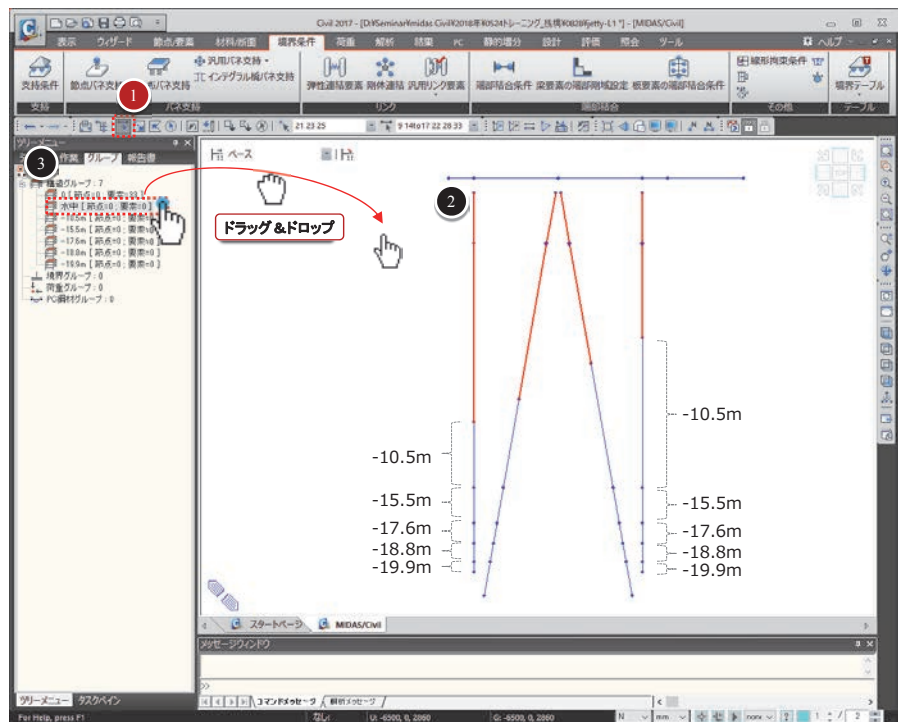
15

11 杭のグルーピング-2

地盤バネの設定をしやすくするために、地層に基づいて杭をグループ分けします。

手順

- ① アイコンツリーバーの“単一選択/解除” クリック
- ② 右図のように作業画面上で水中にある杭を囲んで選択
- ③ グループ ツリーメニューの [構造グループ > 水中] をクリックしたまま、マウスを作業画面の上に持っていき、マウスを放す
- ④ 残りの部分に対しても同様にグループ分け

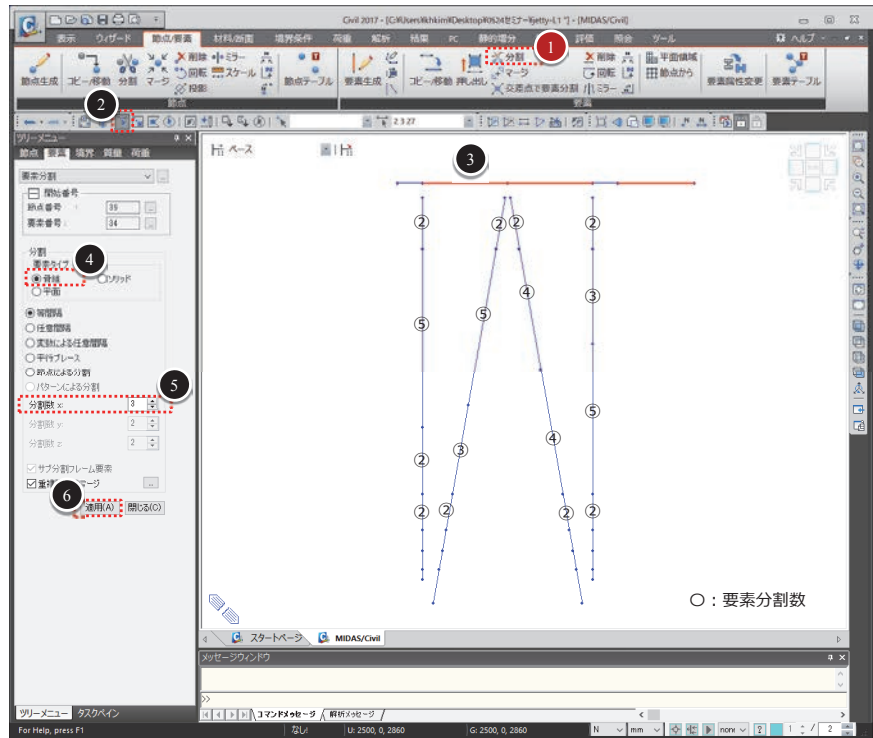


16

12 要素分割

杭を地盤区間に適切な長さに分割します。

- 手順**
- ① メインメニュー【節点/要素】>【要素】>【分割】をクリック
 - ② アイコンツールバーの“単一選択/解除”をクリック
 - ③ 右図の赤色(床版と渡版)の部分を選択
 - ④ 要素タイプ：“骨組”
 - ⑤ 分割数x：“3”
 - ⑥ 【適用】ボタンをクリック
 - ⑦ 右図を参照しながら残りの部分に対しても同様に要素分割

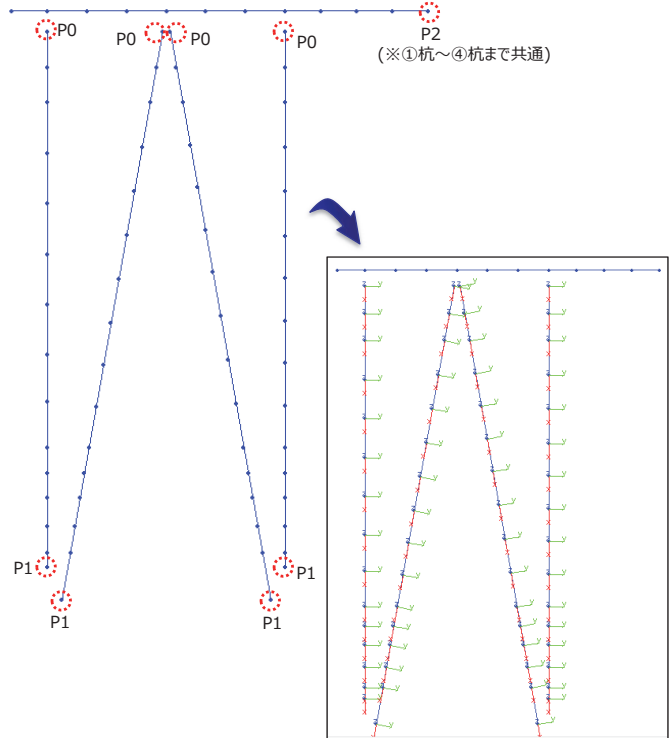
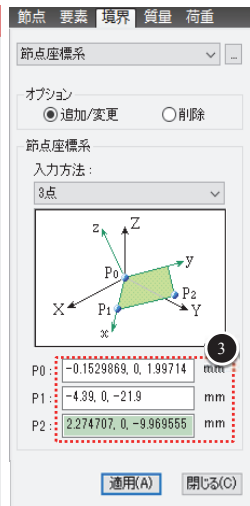


*1 グループ化されている要素は要素分割されても分割前のグループに属します。

13 節点座標系

地盤バネを設定する前に、直杭と斜杭の法線方向を指定します。

- 手順**
- ① メインメニュー【境界条件】>【その他】>【節点座標系】をクリック
 - ② 入力方法：“3点”
 - ③ “P0” 入力欄をクリックすると、緑色に変わるので、その状態で作業画面で①杭のP0,P1,P2を順番にクリック
 - ④ “単一選択/解除”をクリック
 - ⑤ ①杭上の節点を全て選択
 - ⑥ 【適用】ボタンをクリック
 - ⑦ 手順3~6を繰り返して、残りの②杭~④杭に対して節点座標系を設定

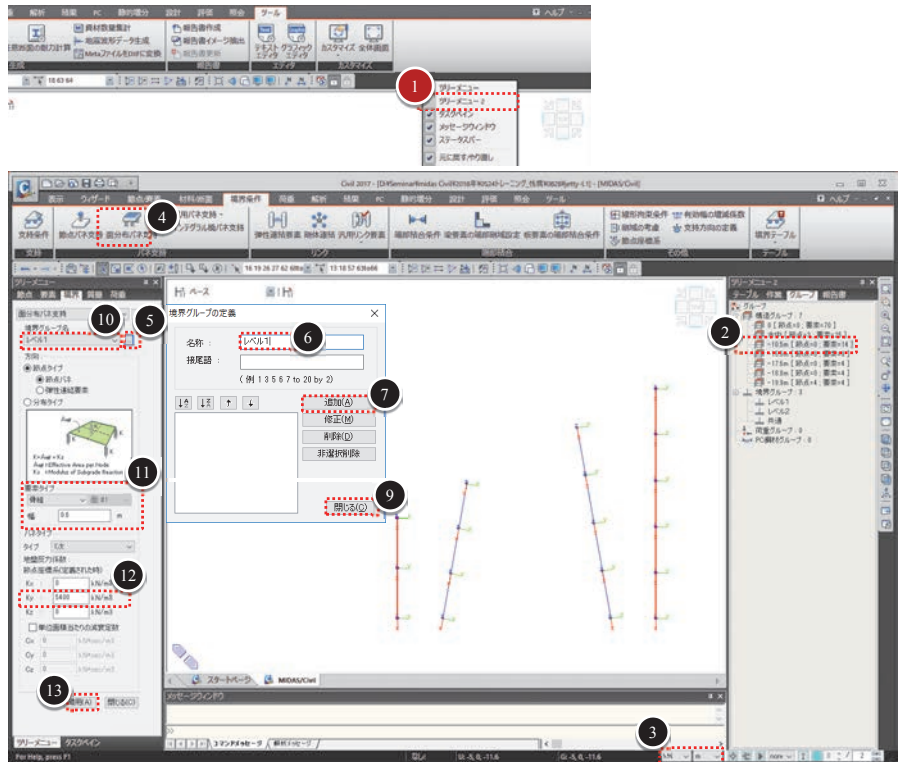


*1 ここでは地盤バネの横方向をy方向に指定します。
一方、節点座標系を選択するときに要素と一緒に選択されても構いません。

14 地盤バネの設定-1

レベル1用の線形の地盤バネを設定します。

- 手順**
- 1 ツールバーをマウスで右クリックして、「**ツリーメニュー 2**」をクリック
 - 2 作業画面右の**グループ ツリーメニュー**から**[構造グループ> -10.5m]**を右クリックして、「**アクティブ**」選択
 - 3 単位系：“**kN, m**”
 - 4 メインメニュー**[境界条件] > [リンク] > [面分布バネ支持]**をクリック
 - 5 境界グループ名の **[]** ボタンをクリック
 - 6 名称：“**レベル 1**”
 - 7 **[追加]** ボタンをクリック
 - 8 追加で“**レベル 2**”、“**共通**” 名称を追加
 - 9 **[閉じる]** ボタンをクリック
 - 10 境界グループ名：“**レベル 1**”
 - 11 要素タイプ：“**骨組**”、幅：“**0.6**”
 - 12 地盤反力係数>Ky：“**5400**”
 - 13 ①杭と④杭を選択して、**[適用]** クリック

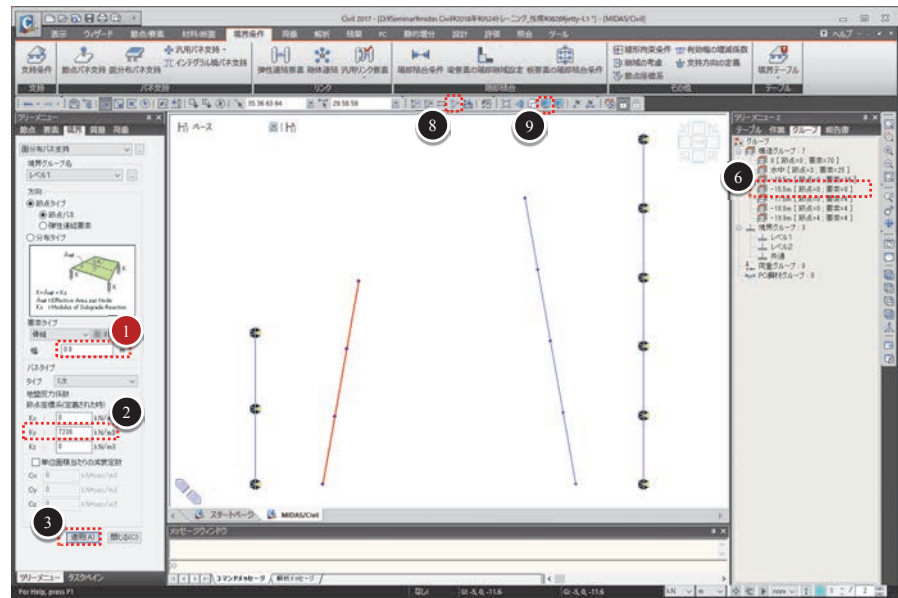


*1 地盤反力係数は本資料の「解析条件」頁の地盤条件表を参照してください。

15 地盤バネの設定-2

レベル1用の線形の地盤バネを設定します。

- 手順**
- 1 幅：“**0.9**”
 - 2 地盤反力係数>Ky：“**7236**”
 - 3 ②杭を選択して、**[適用]** ボタンをクリック
 - 4 地盤反力係数>Ky：“**3996**”
 - 5 ③杭を選択して、**[適用]** ボタンをクリック
 - 6 **[構造グループ> -15.5m]**を右クリックして、「**アクティブ**」選択
 - 7 下表を参照しながら“粘性土～下部砂礫層”の杭部材に地盤バネを設定
 - 8 全て設定した後、**[▶ 全てアクティブ]** ボタンをクリックして、モデル全体を表示
 - 8 アイコンツールバーの**[ディスプレイ]**をクリック
 - 9 **[境界条件]** タブの“**節点バネ支持**”チェックオフ
 - 10 **[OK]** ボタンをクリック



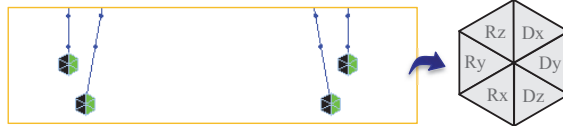
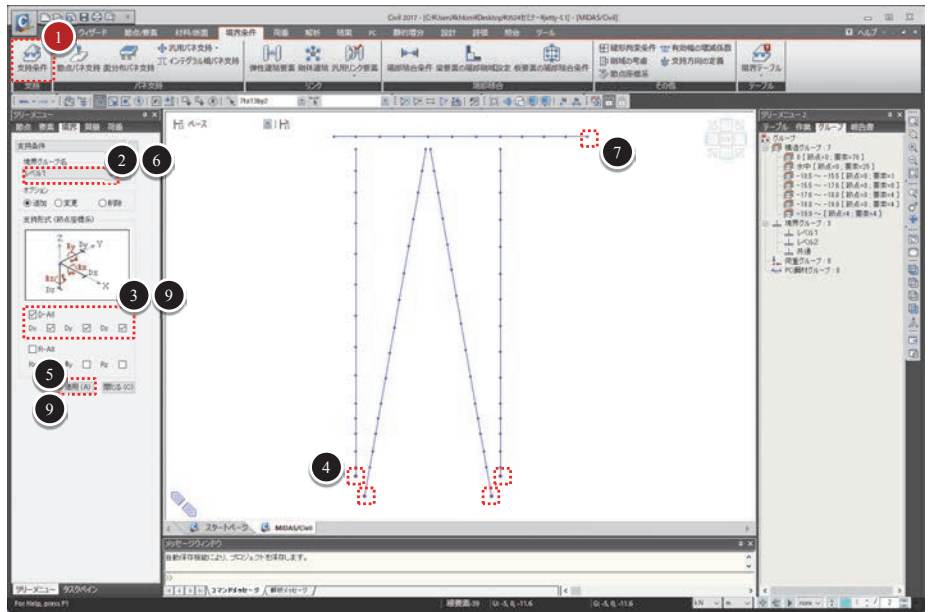
地層	深度 (m)	N値	地盤反力係数 (kN/m ³)	in batter (kN/m ³)	out batter (kN/m ³)
基礎捨石	-10.5~-15.5	5	5400	7236	3996
粘性土	-15.5~-17.6	8	8640	-	-
粘土質砂	-17.6~-18.8	8	8640	-	-
上部砂礫層	-18.8~-19.9	42	45360	-	-
下部砂礫層	-19.9~-21.9	50	54000	-	-

16 支持条件の設定

レベル1用の支持条件を設定します。

手順

- 1 メインメニュー-[境界条件] > [支持] > [支持条件] クリック
- 2 境界グループ名：“レベル1”
- 3 “D-All” チェックオン
- 4 作業画面から4本の杭先端の節点を選択
- 5 [適用] ボタンをクリック
- 6 境界グループ名：“共通”
- 7 作業画面から渡版の右端の節点を選択
- 8 “Dx” チェックオフ
- 9 [適用] ボタンをクリック



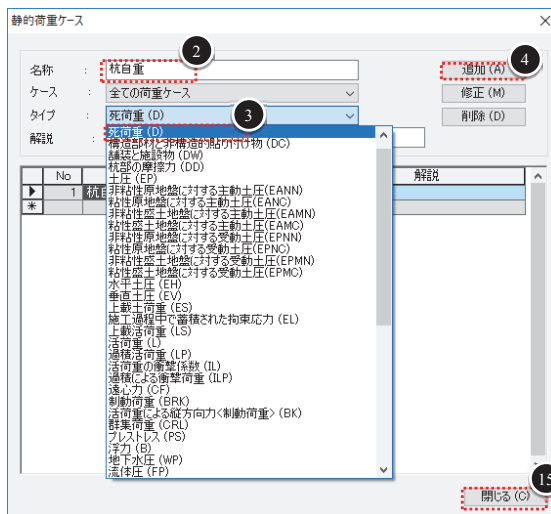
*1 支持条件を設定すると、該当の節点に6角形の支持マークが表示されます。この時、拘束された自由度が緑色に表示されます。

17 荷重ケースの定義

レベル1用の荷重ケース名を定義します。

手順

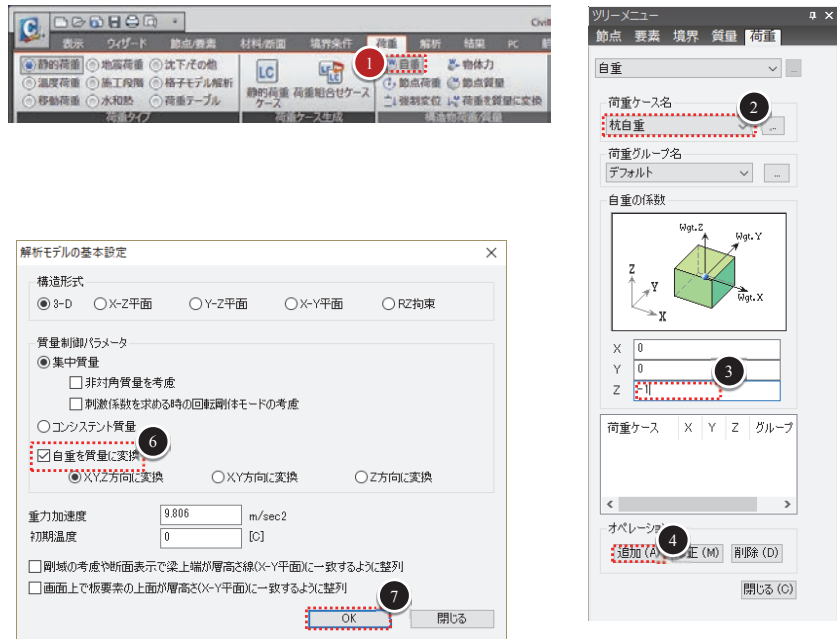
- 1 メインメニュー-[荷重] > [荷重ケース生成] > [静的荷重ケース] クリック
- 2 名称：“杭自重”
- 3 タイプ：“死荷重(D)”
- 4 [追加] ボタンをクリック
- 5 名称：“上部工自重”
- 6 [追加] ボタンをクリック
- 7 名称：“載荷重”
- 8 タイプ：“上載活荷重(LS)”
- 9 [追加] ボタンをクリック
- 10 名称：“L1水平”
- 11 タイプ：“地震荷重(E)”
- 12 [追加] ボタンをクリック
- 13 名称：“L2水平”
- 14 [追加] ボタンをクリック
- 15 [閉じる] ボタンをクリック



18 杭自重の定義

杭の自重を定義します。

- 手順**
- 1 メインメニュー-[荷重] > [構造物荷重/質量] > [自重] クリック
 - 2 荷重ケース名：“杭自重”
 - 3 自重の係数：“Z:-1”
 - 4 [追加] ボタンをクリック
 - 5 メインメニュー-[ウィザード] > [基本設定] > [基本設定] クリック
 - 6 “自重を質量に変換” チェックオン
 - 7 [OK] ボタンをクリック

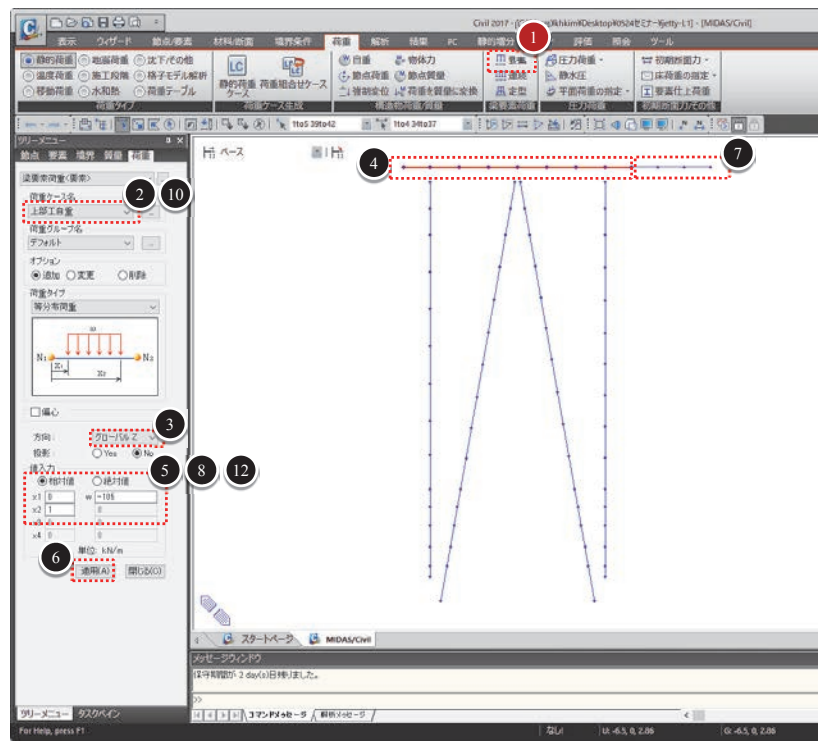


*1 自重は「材料で設定した単位体積重量×部材の断面や形状から計算した体積×自重の係数」より算定します。
 *2 “自重を質量に変換”は、後で“物体力”機能を利用して構造体質量に対する慣性力作用とされる際にご利用されます。

19 上部工荷重の定義

レベル1用の上部工自重と載荷重を定義します。

- 手順**
- 1 メインメニュー-[荷重] > [梁要素荷重] > [要素] クリック
 - 2 荷重ケース名：“上部工自重”
 - 3 方向：“グローバル”
 - 4 右図の作業画面から床版の要素を選択
 - 5 値入力：“相対値”
x1：“0”、x2：“1”、w：“-105”
 - 6 [適用] ボタンをクリック
 - 7 右図の作業画面から渡版の要素を選択
 - 8 値入力：“相対値”
x1：“0”、x2：“1”、w：“-71.3”
 - 9 [適用] ボタンをクリック
 - 10 荷重ケース名：“載荷重”
 - 11 作業画面から床版と渡版の要素を選択
 - 12 値入力：“相対値”
x1：“0”、x2：“1”、w：“-50”
 - 13 [適用] ボタンをクリック

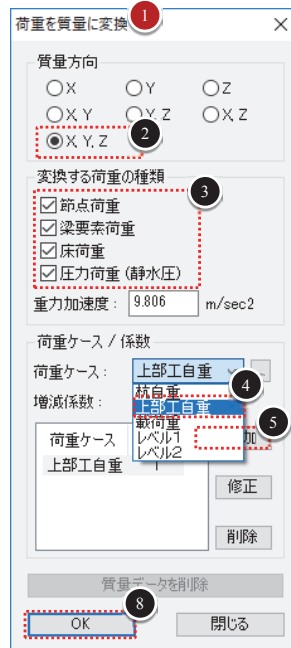


20 荷重を質量に変換

死荷重や載荷重へ震度を掛けるために、対象の荷重を質量に変換します。

手順

- ① メインメニュー-[荷重] > [構造物荷重/質量] > [荷重を質量に変換] クリック
- ② 質量方向：“X,Y,Z”
- ③ 変換する荷重の種類：全てチェックオン
- ④ 荷重ケース：“上部工自重”
- ⑤ [追加] ボタンをクリック
- ⑥ 荷重ケース：“載荷重”
- ⑦ [追加] ボタンをクリック
- ⑧ [OK] ボタンをクリック



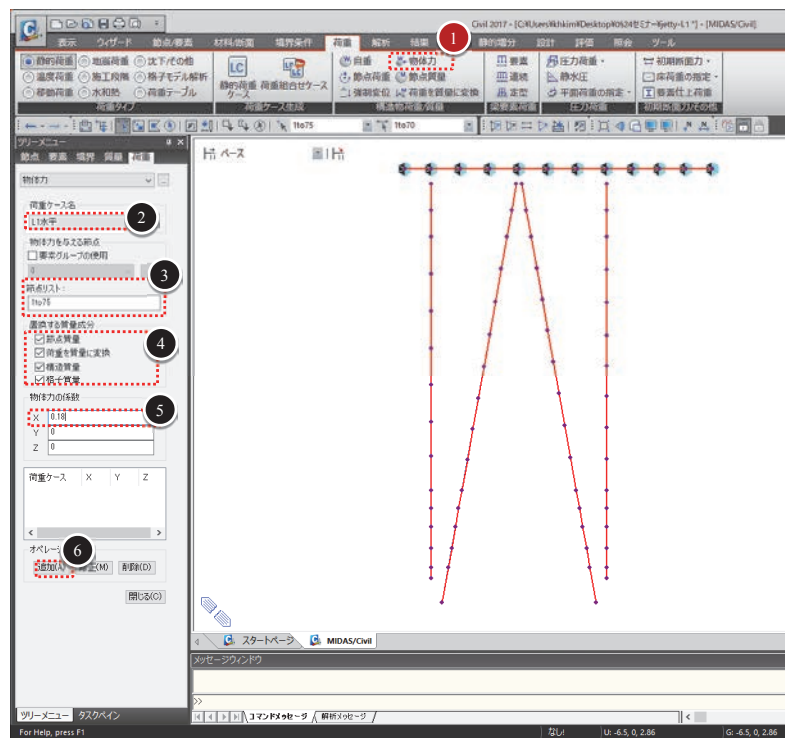
*1 ここで質量に変換する荷重タイプは“節点荷重”、“梁要素荷重”、“床荷重”、“圧力荷重”です。一方、自重は「解析モデルの基本設定」の“自重を質量に変換”の設定で質量に変換します。

25

21 水平力の定義

手順

- ① メインメニュー-[荷重] > [構造物荷重/質量] > [物体力] クリック
- ② 荷重ケース名：“L1水平”
- ③ 節点リスト：“1to75”
- ④ 置換する質量成分：全てチェックオン
- ⑤ 物体力の係数 x：“0.18”
- ⑥ [追加] ボタンをクリック



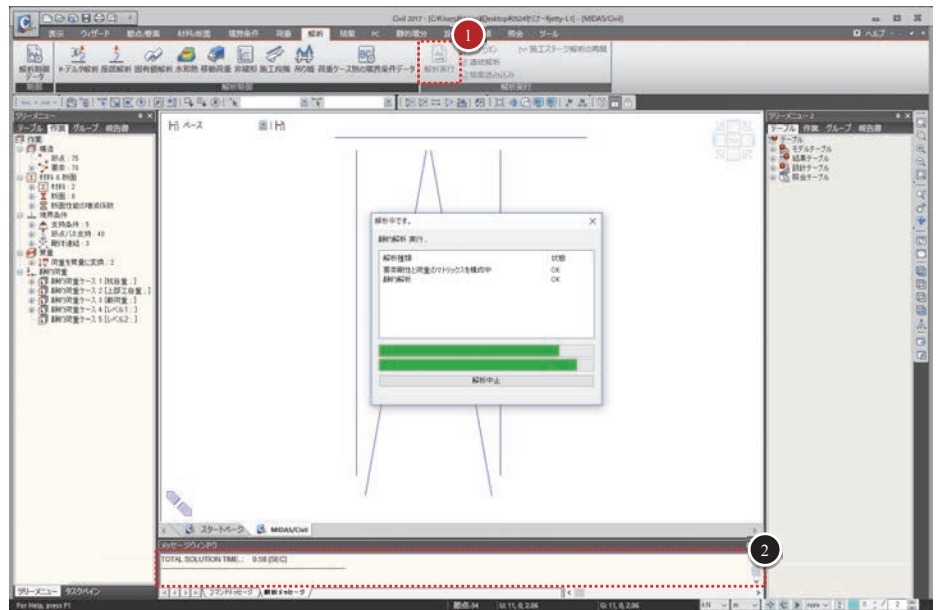
*1 節点番号は作業画面から全ての要素を選択すれば、自動的に入力されます。

26

22 構造解析実行

手順

- ① メインメニュー-[解析] > [解析実行]
> [解析実行]をクリック




- ◆ 構造解析実行中は画面中央に構造解析が実行されていることを知らせるダイアログボックスが表示されます。
- ◆ モデルビューの下の(図中の②)のメッセージウィンドウに要素剛性行列の構成と組合せ過程などのすべての解析過程が表示されます。
- ◆ 解析作業が完了すると、全ての解析所要時間がメッセージウィンドウに表示され、画面中央のウィンドウは閉じます。

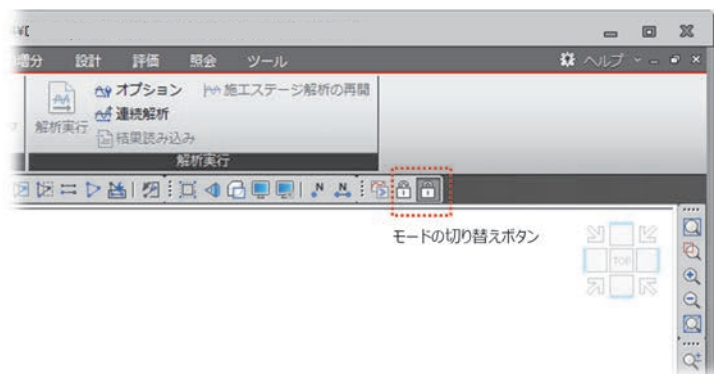
27

23 解析結果の検討

手順

モード

- ◆ midas Civilはプログラムの効率性とユーザーの利便性のために、プログラム環境が**解析前処理モード**と**解析後処理モード**に区別されています。
- ◆ モデリング作業に付随する全ての入力作業は、解析前処理モードで可能で、反力・変位・断面力・応力度など解析結果に対する検討作業は解析後処理モードで行われるように設定されています。
- ◆ 解析作業が完了した後、解析後処理モードから解析前処理モードに切り替えて入力事項を修正します。変更すると既に解析された内容が削除されるので注意が必要です。
- ◆ 解析がエラーなしに完了した後、モード環境が解析前処理モードから解析後処理モードに自動転換されます。
- ◆ モデリング作業で入力された項目の再確認、一部データの修正、変更などのために解析後処理モードから処理モードを切り替える場合はツールバーの  をクリックします。

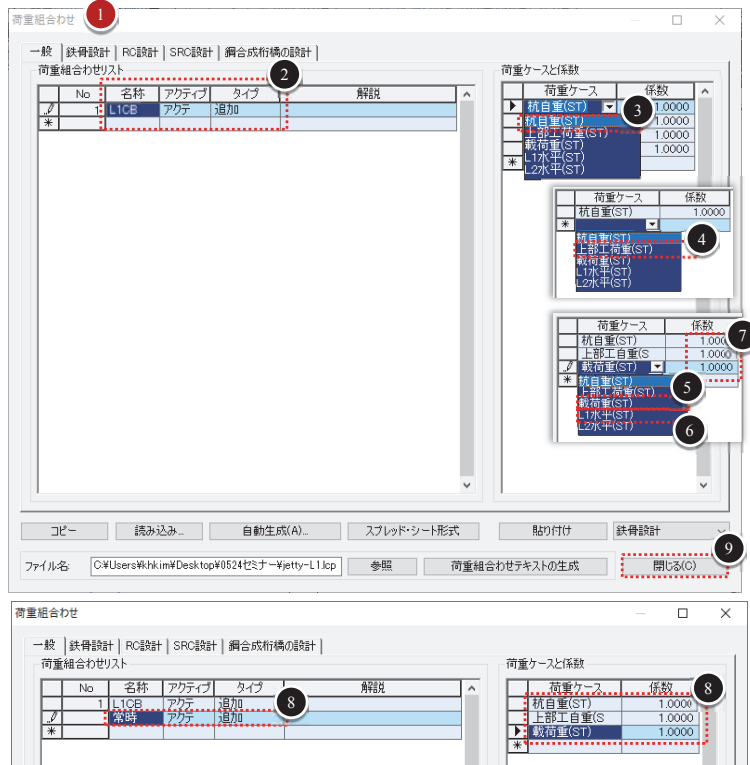


28

24 荷重組合わせ条件の設定

解析が完了した4つの荷重ケース(杭自重+上部工自重+載荷重+レベル1)を線形重ね合わせる手順について説明します。*1

- ### 手順
- ① メインメニュー-[結果]> [荷重組合せ]> [荷重組合せ]をクリック
 - ② 名称：“L1CB”
アクティブ：“アクティブ”
タイプ：“追加”
荷重ケースと係数ボックスで荷重ケースの入力ボックスをクリックすると が表示されます。
 - ③ をクリックし、“杭自重(ST)”を選択
 - ④ 次の行：“上部工自重(ST)”を選択
 - ⑤ 次の行：“載荷重(ST)”を選択
 - ⑥ 次の行：“L1水平(ST)”を選択
 - ⑦ 係数：すべて“1.0”
 - ⑧ 同様に右下図のように常時の荷重のみ合わせを作成
 - ⑨ [閉じる]をクリック

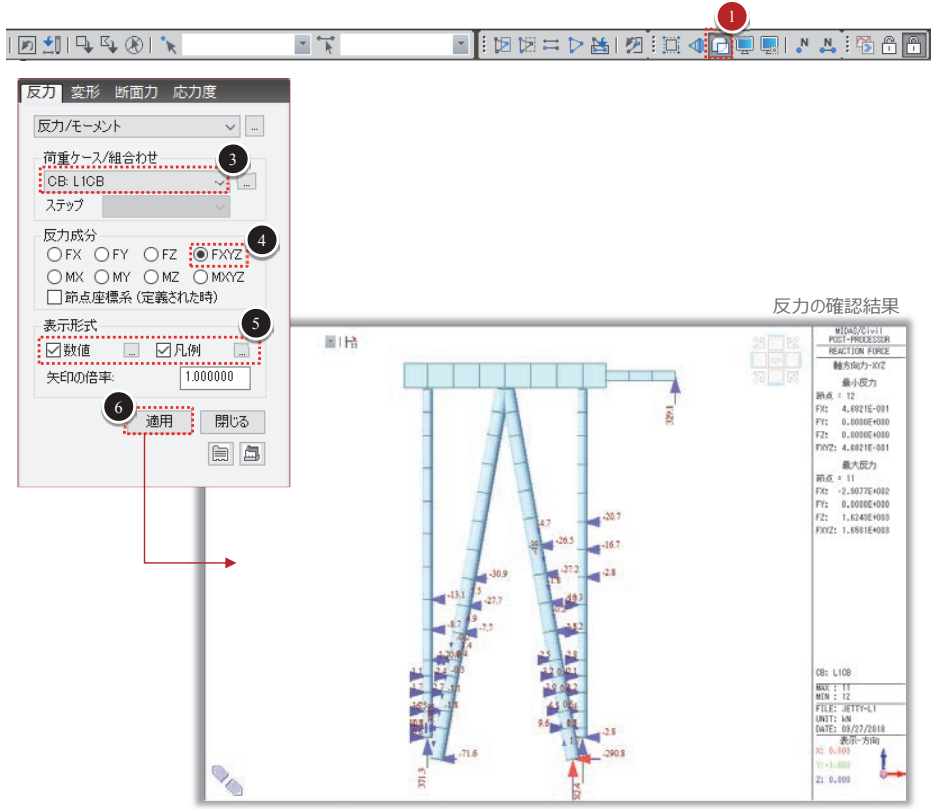


*1 この例題では、レベル1照査用に以下のような荷重組合せ条件を定義します。
- レベル1 荷重組合せ (L1CB) : 1.0 (杭自重+上部工自重+載荷重+L1水平)

25 反力確認

モデルの支点の反力を確認します。

- ### 手順
- ① 隠線除去表示をクリック (トグルオン)
 - ② メインメニュー-[結果]> [結果]> [反力]> [反力/モーメント]
 - ③ 荷重ケース/組合せ：“CB : L1CB”
 - ④ 反力成分：“FXYZ”
 - ⑤ 表示形式：“数値”、“凡例”^{*1}
 - ⑥ [適用]をクリック

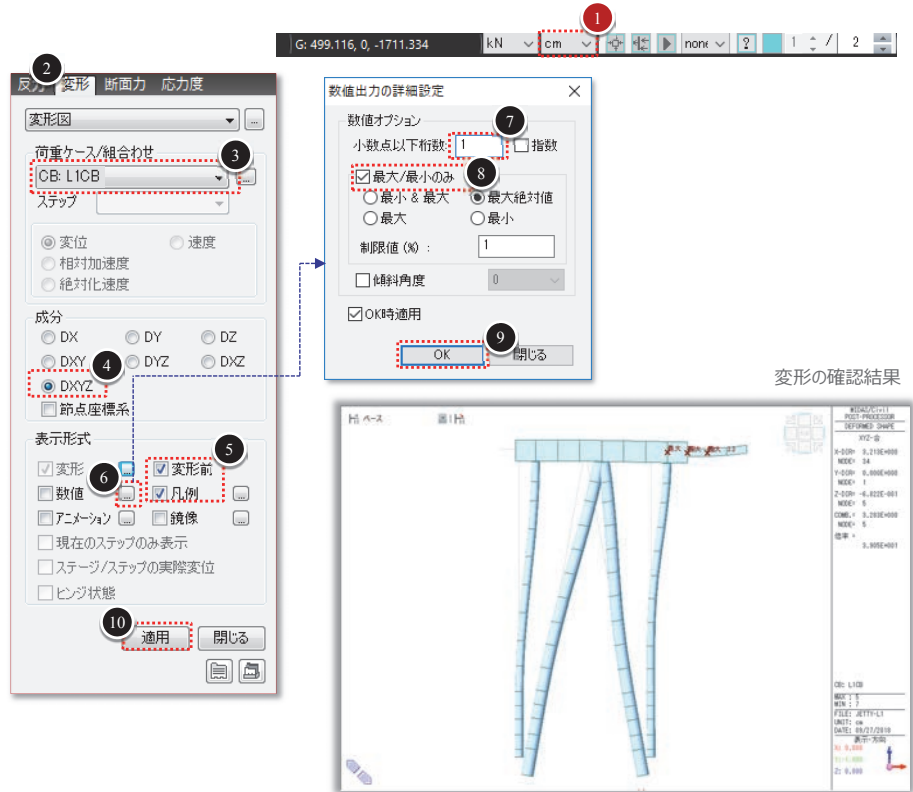


*1 表示形式の数値右側にあるボタンをクリックすると画面に出力される反力の桁数を調節することができます。赤色で表現された部分が最大反力が発生する支点です。

26 変形確認

モデルの変形を確認します。

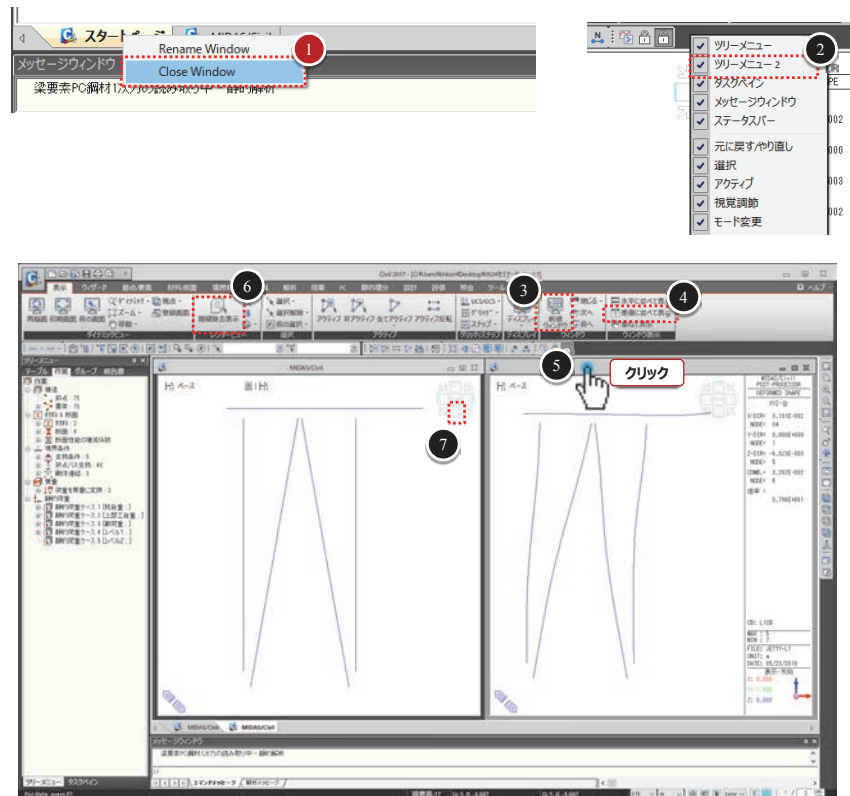
- ### 手順
- 1 単位系：“m” → “cm”
 - 2 メインメニュー[結果] > [結果] > [変形] > [変形図]
 - 3 荷重ケース/組合わせ：“CB:L1CB”
 - 4 成分：“DXYZ”^{*1}
 - 5 表示成分：“変形前”、“凡例” オン
 - 6 [数値]の[]をクリック
 - 7 少数点以下桁数：“1”
 - 8 “最大/最小のみ”にチェック
 - 9 [OK]をクリック
 - 10 [適用]をクリック
- ^{*1} $DXYZ = \sqrt{DX^2 + DY^2 + DZ^2}$



27 マルチウィンドウ表示

複数の断面力成分の結果を同時表示するために作業画面を2つ並べて表示します。

- ### 手順
- 1 作業画面下の「スタートページ」を右クリックして、“Close Window” クリック
 - 2 アイコンツールバーを右クリックして、“ツリーメニュー-2” チェックオフ
 - 3 メインメニュー [表示] > [ウィンドウ] > [新規ウィンドウ] クリック
 - 4 メインメニュー [表示] > [ウィンドウ表示] > [垂直に並べて表示] クリック
 - 5 陰線表示されている作業画面のタイトルバーをクリック
 - 6 隠線除去表示をクリック(トグルオフ)
 - 7 新しく追加したウィンドウの表示視点を正面にします。

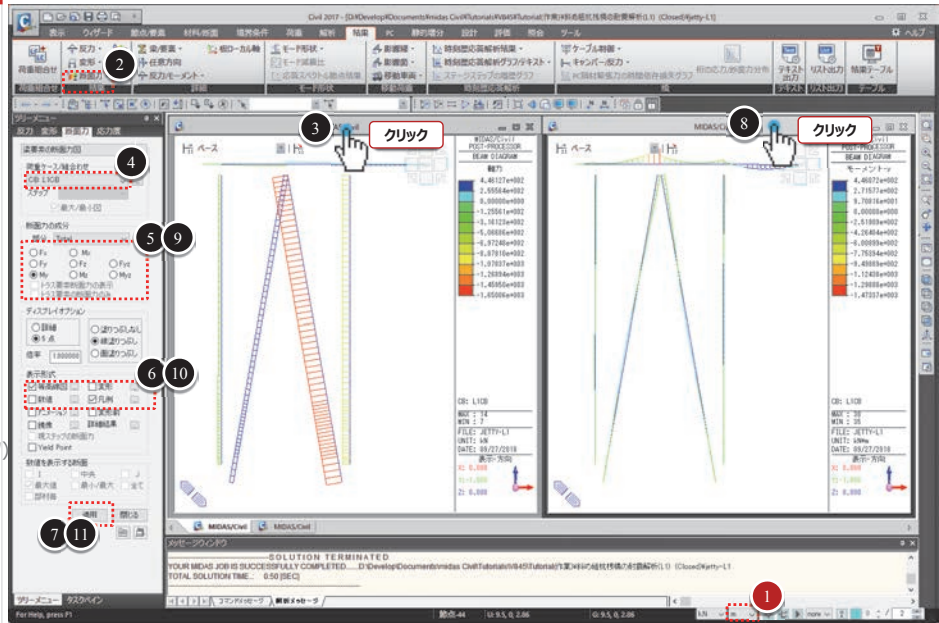


28 断面力確認

軸力と曲げモーメントを同時表示します。

手順

- ① 単位系：“cm” → “m”
- ② メインメニュー [結果] > [断面力] > [梁要素の断面力図]
- ③ 左側のウィンドウをクリックして選択
- ④ 荷重ケース/組合せ：“CB:L1CB”
- ⑤ 断面力の成分：“Fx”
- ⑥ 表示形式：“凡例”、“等高線図”
- ⑦ [適用]をクリック
- ⑧ 右側のウィンドウをクリックして選択
- ⑨ 断面力の成分：“My”
- ⑩ 表示形式：“凡例”(オン)、“数値”(オフ)
- ⑪ [適用]をクリック



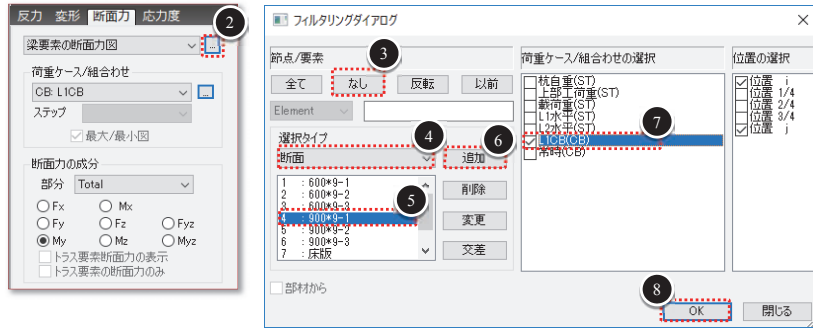
33

29 杭応力の照査-1

斜杭の応力を照査します。

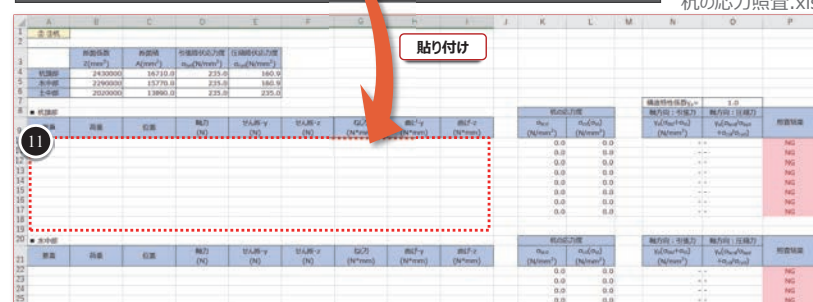
手順

- ① 単位系：“kN,m → N,mm”
- ② [梁要素の断面力図] メニューから [-] ボタンをクリック
- ③ 節点/要素：“なし”をクリック
- ④ 選択タイプ：“断面”にして、
- ⑤ “4:900*9-1” クリックを選択
- ⑥ [追加]をクリック
- ⑦ 荷重ケース/組合せの選択：“L1CB(CB)”
- ⑧ [OK]をクリック
- ⑨ 出力した断面力を“Ctrl+C”キーでコピー
- ⑩ 本資料が入っているチュートリアルフォルダの[杭の応力照査.xls]を開く
- ⑪ EXCELの“■杭頭部”の要素結果欄に断面力の結果を張り付け
- ⑫ 結果テーブルの [X] ボタンをクリックして、テーブルを閉じる



結果-[梁要素の断面力]

行番	荷重	位置	軸力 (kN)	せん断-y (kN)	せん断-z (kN)	ねじり (kN*m)	曲げ-y (kN*m)	曲げ-z (kN*m)
14	L1CB	[0]	446.13	0.00	-25.35	0.00	-263.66	0.00
14	L1CB	[46]	443.22	0.00	-28.87	0.00	-218.60	0.00
16	L1CB	[0]	-16.0233	0.00	-43.85	0.00	-219.58	0.00
16	L1CB	[46]	-16.0624	0.00	-43.33	0.00	-265.04	0.00
41	L1CB	[46]	443.31	0.00	-30.33	0.00	-218.60	0.00
41	L1CB	[0]	440.41	0.00	-30.30	0.00	-171.86	0.00
42	L1CB	[47]	-16.0633	0.00	-43.29	0.00	-253.24	0.00
42	L1CB	[0]	-16.0634	0.00	-43.34	0.00	-188.68	0.00



34

30 杭応力の照査-2

杭の応力を照査します。

手順

① 同様な方法で斜杭の残りの部材の断面力についても照査

※1 杭断面名とEXCELの照査箇所は以下のように対応します。

断面	EXCELの照査箇所
4:900×9-1	杭頭部
5:900×9-2	水中部
6:900×9-3	土中部

※2 [杭の応力照査.xls] には予め右下に示す応力算定式が組み込まれています。従って、Civilで断面力結果を張り付けるだけで、杭の応力照査が行えます。

■ 杭の応力照査 (レベル1)

1. 軸方向力が引張の場合

$$Y_a \times (\sigma_{td} + \sigma_{btd}) \leq \sigma_{tyd}$$

$$Y_a \times (-\sigma_{td} + \sigma_{bcd}) \leq \sigma_{byd}$$

2. 軸方向力が圧縮の場合

$$Y_a \times (\sigma_{cd} / \sigma_{cyd} + \sigma_{bcd} / \sigma_{byd}) \leq 1.0$$

応力度	鋼種	SKK400	SKK490
軸方向引張応力度 σ_{ty}		235	315
軸方向圧縮応力度 σ_{ty}	$l/r \leq 18$	235	315
	$18 < l/r \leq 92$	$235 - 1.39 \left(\frac{l}{r} - 18 \right)$	$315 - 2.04 \left(\frac{l}{r} - 16 \right)$
	$l/r > 92$	$\frac{2,010,000}{6,700 \times \left(\frac{l}{r} \right)^2}$	$\frac{2,040,000}{5,000 \times \left(\frac{l}{r} \right)^2}$
曲げ圧縮応力度 σ_{by}		235	315

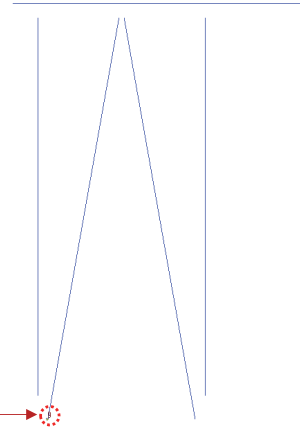
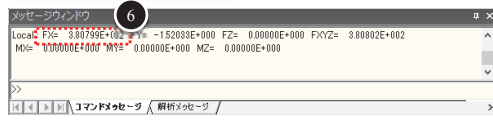
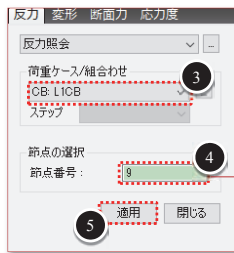
35

31 杭支持力の照査

斜杭の支持力を照査します。

手順

- ① 単位系: "N,mm → kN,m"
- ② メインメニュー [結果]>[反力]>[反力/モーメントの照査]
- ③ 荷重ケース/組み合わせ: "CB:L1CB"
- ④ 節点の選択>節点番号: "9"
- ⑤ [適用]をクリック
- ⑥ メッセージウィンドウに表示される②杭の軸方向の力"Fx" の値を確認
- ⑦ [杭の応力照査.xls]の"支持力"シートの軸力"Pd(kN)"欄に②杭支持端の軸力を入力



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	②杭							
2	項目	記号	単位		備考			
3	杭直径	φ	m	0.90				
4	切端面積	Ap	m ²	0.64				
5	先端位置(値)	N1		50.0				
6	水中部分の平均N値	N2		41.7	-18.3 ~ 21.9m			
7	N=(N1+N2)/2	N		45.9				
8	先端傾斜率	a		0.6				
9	(a)杭先端の静的最大軸方向抵抗力	Rp	kN	5281.9				
10								
11	移動平均N値	N'		27.2	-10.0 ~ -15.5m			
12	移動における杭側面積	As	m ²	24.0	-17.6 ~ -21.9m			
13	移動における杭側面積抵抗力	R _s	kN	1307.2				
14	粘土層平均付着力	R _{c1}	kN/m ²	100.0	-15.5 ~ 17.6m			
15	粘土層における杭側面積	Ac	m ²	5.94				
16	粘土層における杭側面積抵抗力	R _{c2}	kN	594.0				
17	(b)杭の側面積抵抗力	R _r	kN	1901.2				
18								
19	地盤の静的最大軸方向抵抗力(挿込杭)	R _{is}	kN	7183.2	(a)+(b)			
20	地盤の静的最大軸方向抵抗力(引抜杭)	R _{is}	kN	1901.2	(b)			
21								
22								
23		分類		地盤の最大静的軸方向抵抗力				
24				最大抵抗力	部分係数	設計用値		
				R _{is} (kN)	γ _{is}	R _{is} (kN)		
				挿込杭	7183.2	0.4	2873.3	

杭の反力を入力

*1 "杭の応力照査.xls"では引抜力を(-)符号にしていますので、符号に注意してください。

36

**MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
DOCUMENT
COLLECTION**

河川・港湾構造物

03.

midas Civil Tutorial

斜め組杭栈橋の耐震解析(L2)

概要

● 解析モデル

- 上部工：線形梁
- 杭：非線形梁
- 地盤：非線形パネ

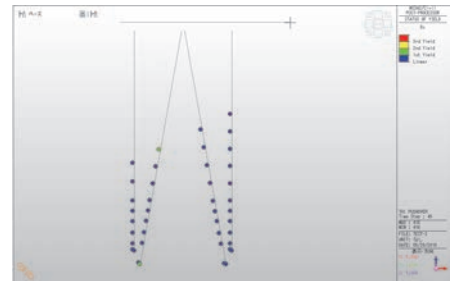
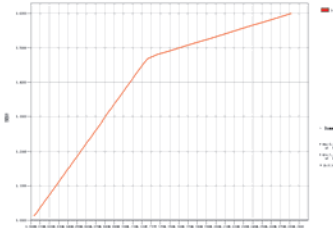
● 荷重及び境界条件

- 「上部工自重」、「載荷重」を床版の杭頭位置に漸増的に載荷
- 支持条件
 - ① 杭支持端：非線形支持パネ
 - ② 渡版右端：水平ローラー
 - ③ 杭法線方向に非線形地盤パネ

● 結果評価

- 荷重-変位関係
- 杭の損傷状態

斜め組杭棧橋の耐震解析 - レベル2地震動



画面構成と操作方法

メインメニュー (リボンメニュー) (Main Menu / Ribbon Menu)
ツリーメニュー (プリ/ポスト) (Tree Menu / Pre/Post)
選択方法 (Selection Method)
作業画面 (Working Screen)
ズーム (Zoom)
ダイナミックビュー (Dynamic View)
ビューポイント (View Point)
メッセージウィンドウ (Message Window)

節点、要素番号 座標系(GCS, WCS) 単位系

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ・中ボタン : モデル移動 ・中ボタンスクロール : モデル拡大、縮小 ・Ctrl + 中ボタン : モデル回転 | <ul style="list-style-type: none"> Ctrl+A : ウィンドウフィット Ctrl+Y : やり直し Ctrl+Z : 元に戻す [Esc]キー : 閉じる [Enter]キー : 適用 |
|--|---|

レベル2照査用の解析データ

“斜め組杭栈橋の耐震解析 - レベル1地震動”の続資料編である本例題では、レベル2地震動に対して、地盤の水平抵抗及び鋼管杭の弾塑性挙動を考慮して、増分解析による詳細な解析を行います。

レベル2地震動の耐震解析のために、追加で作成する解析データは以下のようになります。

1. 2節点間地盤バネ用の節点作成

：レベル1の検討では1節点バネを設定しましたが、非線形バネでは2点間を結ぶバネタイプになりますので、追加で地盤バネの固定端部の節点を作成します。

2. 杭部材の非線形特性の設定

：杭部材の弾塑性性を考慮するために、部材断面力の非線形特性(曲げ-曲率関係)を定義します。

3. 非線形地盤バネの設定

：水平方向バネと杭先端支持バネに対して、地盤の非線形特性を定義します。

4. 漸増荷重の定義

：設計震度 $K_h=1.0$ の時の水平力を漸増増加させながら、荷重を載荷します。

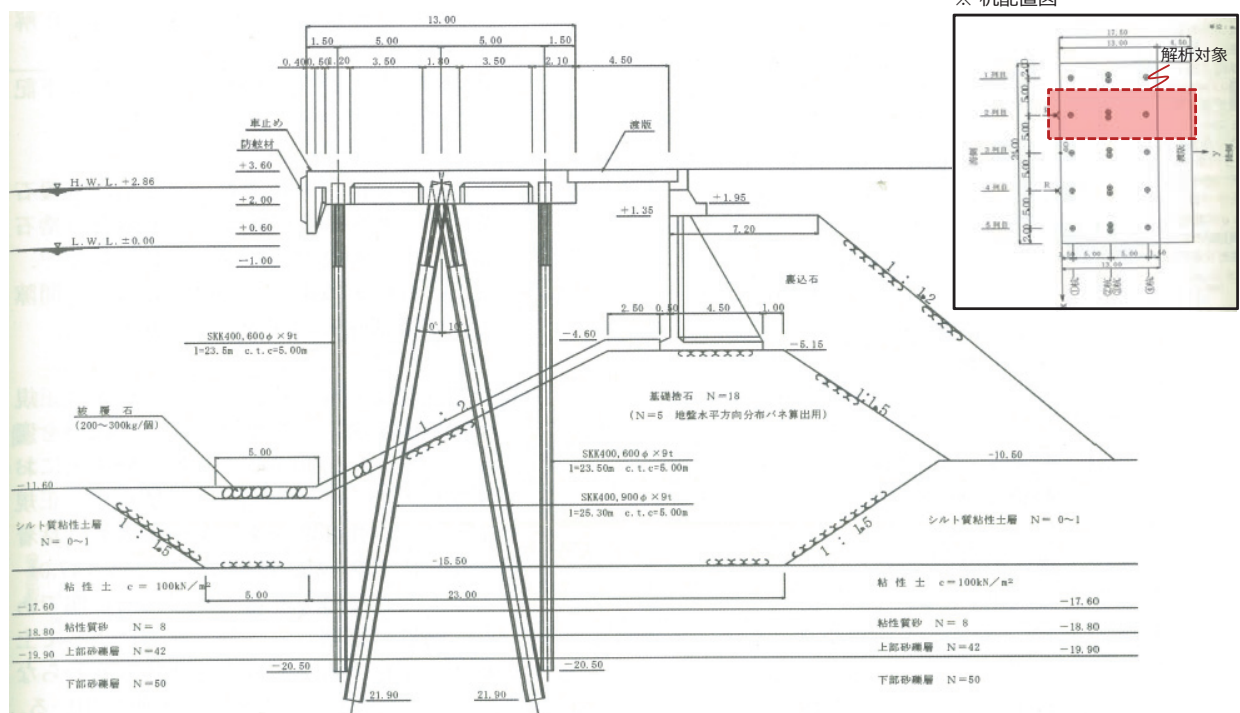
※ midas Civilでは漸増的に増加するプッシュオーバー荷重を時刻歴荷重の中で定義します。

3

モデル概要

■ 解析モデル

：下図に示す栈橋の2列目杭列(作用分担幅 $B=5\text{m}$)を取り出し、2次元骨組解析を用いて構造検討を行う。



4

解析条件

■ 地盤条件

地層	深度(m)	N値	単位体積重量 (kN/m ³)	C (kN/m ²)	Φ (°)	地盤反力係数 (kN/m ³)	in batter [※] (kN/m ³)	out batter [※] (kN/m ³)
基礎捨石	-10.5~-15.5	5	18.0 (γ'=10.0)	-	40.0	5400	7236	3996
粘性土	-15.5~-17.6	8	17.0 (γ'=7.0)	100.0	-	8640	-	-
粘土質砂	-17.6~-18.8	8	18.0 (γ'=10.0)	-	32.9	8640	-	-
上部砂礫層	-18.8~-19.9	42	18.0 (γ'=10.0)	-	42.3	45360	-	-
下部砂礫層	-19.9~-21.9	50	18.0 (γ'=10.0)	-	45.0	54000	-	-

※ 基礎捨石層では、杭の傾斜角を考慮して、地盤反力係数を調整

■ 部材諸元

1. 上部工

部 材	断 面	材 料
上部工	H 1.6 × B 0.9 (m)	Fc24

2. 杭諸元

1) 腐食代 tc

- 杭頭部 (-1.00m以浅) : 0.0mm
- 水中部 (-1.00m~海底面) : 0.5mm
- 杭頭部 (海底面以深) : 1.5mm

2) 杭諸元

部 材	断 面	材 料
直杭	600Φ × 9t	SKK400
斜杭	900Φ × 9t	SKK400

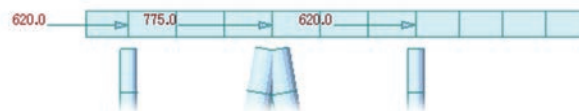
※ 本例題では腐食代を考慮して、水中部と土中部の杭剛性を元の剛性に対して其々94%、83%に低減させる。

5

解析条件

■ 荷重条件

- 設計震度1.0の時の「上部工自重」、「載荷重（栈橋部）」を床版の杭頭位置に漸増的に荷重(Kh=0.6まで)



■ 境界条件

1. 杭先端支持：完全バイリニア型の弾塑性バネ

部 材	剛性(KN/m)	上限値(kN)	
		押込降伏点	引抜
直杭-①杭	123679	2537.4	979.3
斜杭-②杭	168066	4660.9	1930.6
斜杭-③杭	167994	4789.3	2066.3
直杭-④杭	124799	2799.2	1149.5

2. 横方向地盤バネ (完全バイリニア型)

- $K_{cdk} = 2 \times 1500 \text{N}(\text{kN}/\text{m}^3)$
- 横方向地盤反力の上限値は受働抵抗の上限値とする

3. 渡版：ローラー支持

6

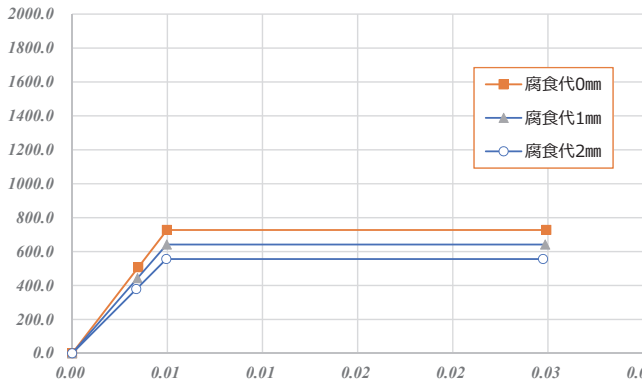
解析条件

■ 杭の非線形特性

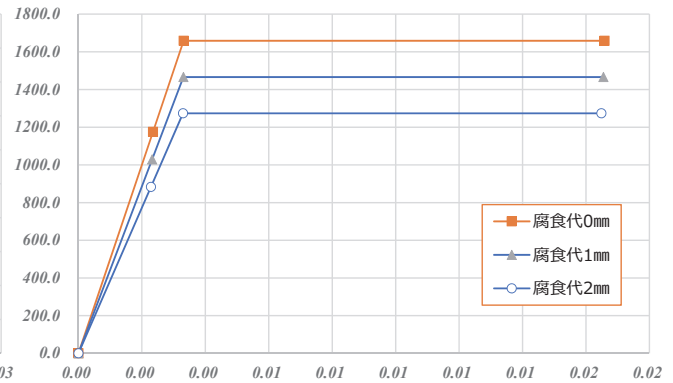
- 下表に示すように全塑性モーメントを上限值とするバイリニア型とする

部 材	全塑性モーメント (kN・m)	曲率(1/m)	
		降伏時	終局時
直杭-①杭	727.34	4.984e-3	2.492e-2
斜杭-②杭	1658.55	3.317e-3	1.658e-2
斜杭-③杭	1656.30	3.312e-3	1.656e-2
直杭-④杭	710.66	4.869e-3	2.435e-2

※ 腐食代=0.0mの場合



①杭の非線形特性(曲げ-曲率関係)

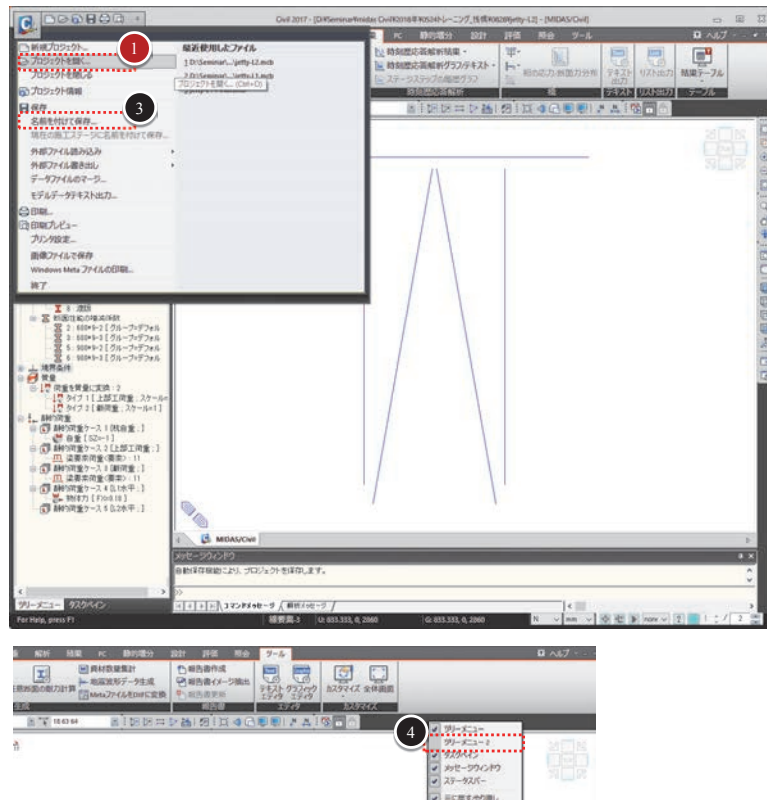


②杭の非線形特性(曲げ-曲率関係)

01 ファイルを開く


手順

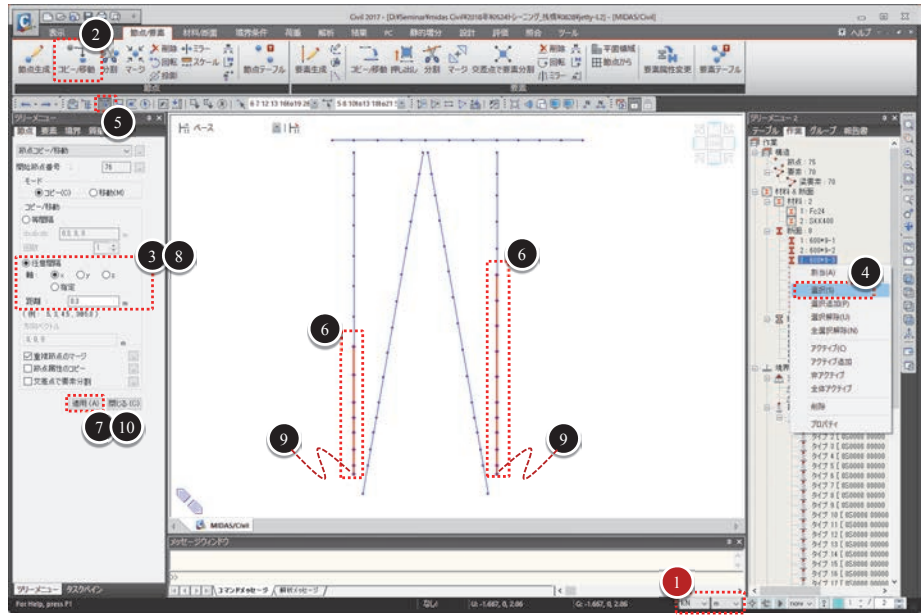
- ① アイコン>プロジェクトを開く…
- ② 本資料が入っているチュートリアルフォルダの“jetty-L1.mcb”を開く
- ③ アイコン>名前を付けて保存…
ファイル名：“jetty-L2.mcb”
- ④ ツールバーをマウスで右クリックして、「ツリーメニュー-2」をクリック



02 地盤バネ用の節点生成-1

手順

- ① 単位系：“kN, m”
- ② メインメニュー [節点/要素] > [節点] > [コピー/移動] クリック
- ③ 任意間隔，軸：“x”
距離：“0.3”
- ④ ツリーメニュー2の[作業] タブから「材料&断面>断面>3:600×9-3」を
マウス右クリックして、“選択(S)” クリック
- ⑤ “ 単一選択/解除” (トグルオン)
- ⑥ “600×9-3” 断面を持つ部材の節点を
マウスで囲んで選択
- ⑦ [適用]をクリク
- ⑧ 任意間隔，軸：“z”
距離：“-0.3”
- ⑨ ①直杭と④直杭の支持端の節点をマウスで選択
- ⑩ [適用]をクリク



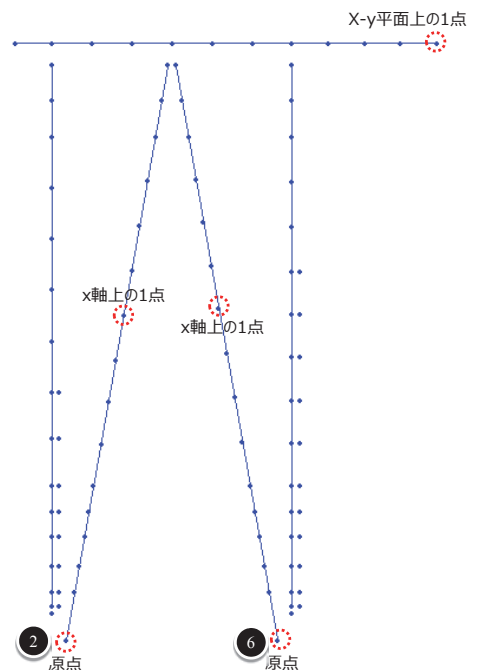
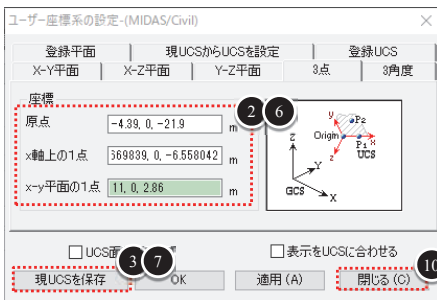
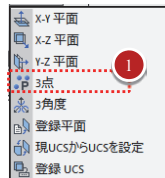
9

03 ユーザー座標系

杭の部材軸に沿ったユーザー座標系を設定します。

手順

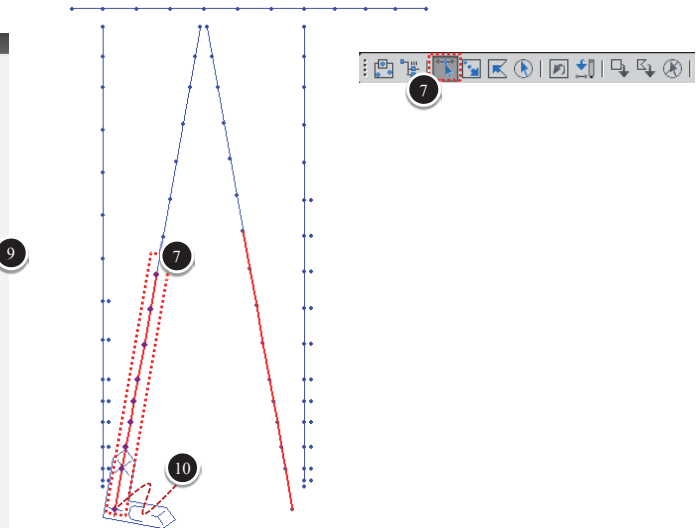
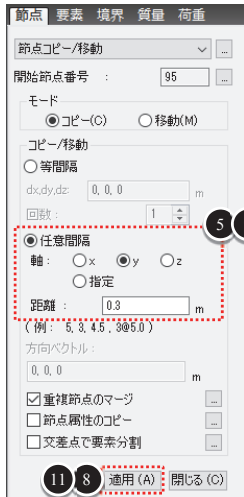
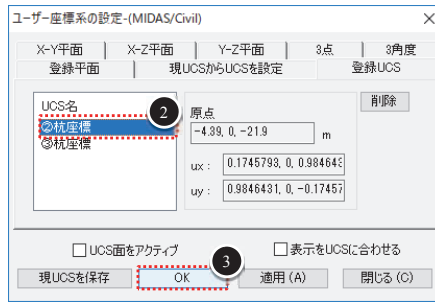
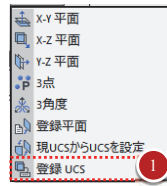
- ① メインメニュー [ウィザード]>[UCS/Plan] > [UCS]>[3点] クリック
- ② ②杭のユーザー座標系を設定
“原点”：入力欄をクリックして緑色に変わったら、②杭の支持端の節点を選択
“x軸上の1点”：②杭の任意の節点
“x-y平面の1点”：渡版の右端
- ③ [現UCSを保存] をクリク
- ④ UCSの名前：“②杭座標”
- ⑤ [OK]をクリク
- ⑥ ③杭のユーザー座標系を設定
“原点”：入力欄をクリックして緑色に変わったら、③杭の支持端の節点を選択
“x軸上の1点”：③杭の任意の節点
“x-y平面の1点”：渡版の右端
- ⑦ [現UCSを保存] をクリク
- ⑧ UCSの名前：“③杭座標”
- ⑨ [OK]をクリク
- ⑩ [閉じる]をクリク



10

04 地盤バネ用の節点生成-2

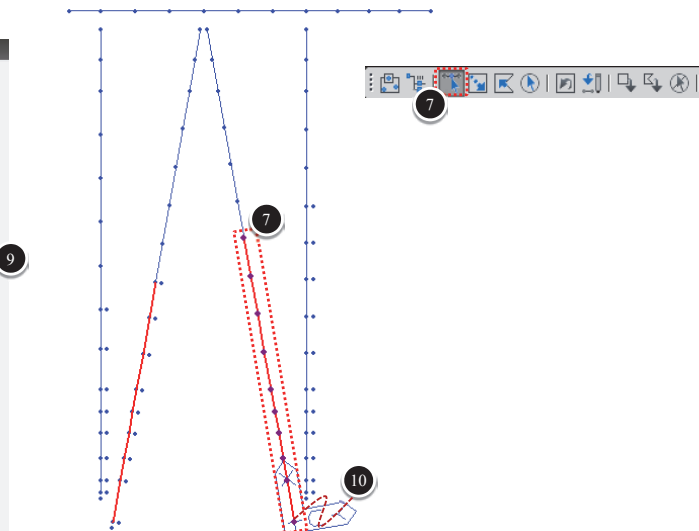
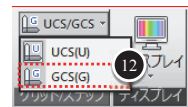
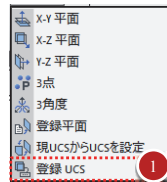
- 手順**
- ① メインメニュー [ウィザード]>[UCS/Plan]>[UCS]>[登録UCS] クリック
 - ② UCS名: "②杭座標" 選択
 - ③ [OK]をクリック
 - ④ メインメニュー [節点/要素] > [節点] > [コピー/移動] クリック
 - ⑤ 任意間隔, 軸: "y"
距離: "0.3"
 - ⑥ ツリーメニュー2の[作業] タブから「材料&断面」>断面>断面>6:900×9-3]をマウス右クリックして、「選択(S)」クリック
 - ⑦ "単一選択/解除" (トグルオン) 選択された要素から、②杭上の節点だけをマウスで囲んで選択
 - ⑧ [適用]をクリック
 - ⑨ 任意間隔, 軸: "x"
距離: "-0.3"
 - ⑩ ②杭支持端の節点をマウスで選択
 - ⑪ [適用]をクリック



11

05 地盤バネ用の節点生成-3

- 手順**
- ① メインメニュー [ウィザード]>[UCS/Plan]>[UCS]>[登録UCS] クリック
 - ② UCS名: "③杭座標" 選択
 - ③ [OK]をクリック
 - ④ メインメニュー [節点/要素] > [節点] > [コピー/移動] クリック
 - ⑤ 任意間隔, 軸: "y"
距離: "0.3"
 - ⑥ ツリーメニュー2の[作業] タブから「材料&断面」>断面>断面>6:900×9-3]をマウス右クリックして、「選択(S)」クリック
 - ⑦ "単一選択/解除" (トグルオン) 選択された要素から、③杭上の節点だけをマウスで囲んで選択
 - ⑧ [適用]をクリック
 - ⑨ 任意間隔, 軸: "x"
距離: "-0.3"
 - ⑩ ③杭支持端の節点をマウスで選択
 - ⑪ [適用]をクリック
 - ⑫ メインメニュー [表示]>[グリッド/スナップ]>[UCS/GCS]>[GCS] クリック



12

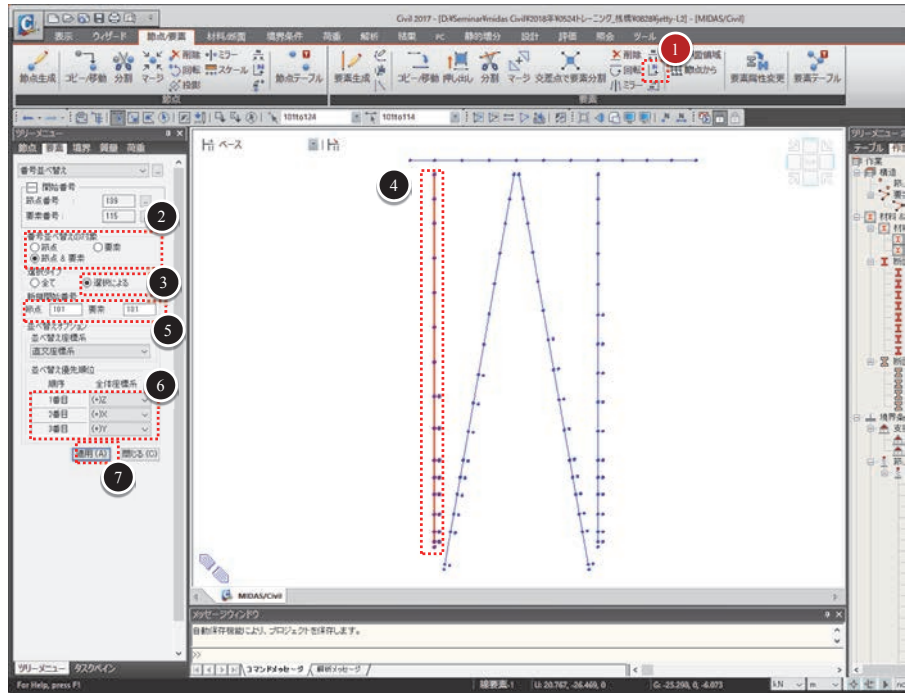
06 節点・要素番号の整理

後ほど地盤バネを設定しやすくするために、節点と要素番号を整理させます。

手順

- ① メインメニュー [節点/要素] > [要素] > [番号並べ替え] クリック
- ② 番号並べ替えの対象: “節点&要素”
- ③ 選択タイプ: “選択による”
- ④ 作業画面から①杭と地盤バネの節点を
選択
- ⑤ 新規開始番号->節点、要素: “101”
- ⑥ 並べ替え優先順位:
1番目: “(+Z”
1番目: “(+X”
1番目: “(+Y”
- ⑦ [適用]をクリック
- ⑧ 同様に地盤バネを含め、②杭から④杭に
対しても節点と要素の番号を並べ替え

対象	新規開始番号
②杭	201
③杭	301
④杭	401



*1 アイコンバーの ボタンをクリックすると、節点番号を確認することができます。

07 非線形特性の適用

杭の非線形特性は初期軸力に依存するため、断面が同じでも非線形特性値は異なります。

手順

- ① メインメニュー [材料/断面] > [非線形特性] > [非線形特性の定義] クリック
- ② [CSV読み込み] ボタンをクリック
- ③ 本資料が入っているチュートリアルフォルダの “Hinge Property.csv” を開く
- ④ [閉じる]をクリック
- ⑤ メインメニュー [材料/断面] > [非線形特性] > [非線形特性の割当] クリック
- ⑥ 非線形特性: “Hinge p1-4”
- ⑦ 右図に示すように①杭の腐食代0mmの断面を持つ部材を選択
- ⑧ [適用]をクリック
- ⑨ 同様の方法で、残りの杭部材に対して非線形のヒンジ特性を割り当てる
杭部材別のヒンジ特性を下表に示します。

	①杭	②杭	③杭	④杭
腐食代0mm	HingeP1-1	HingeP2-1	HingeP3-1	HingeP4-1
腐食代1mm	HingeP1-2	HingeP2-2	HingeP3-2	HingeP4-2
腐食代2mm	HingeP1-3	HingeP2-3	HingeP3-3	HingeP4-3

※ 非線形特性CSVファイルの仕様

“Hinge Property.csv” の非線形特性ファイルのデータ仕様は以下の通りです。

列番号	項目	入力値	説明
1	プロパティ名		非線形特性のプロパティ名
2	ヒンジタイプ	L, D, S	L : 材端バネ付きビーム要素(M- θ タイプ) D : ビーム要素(M- ϕ タイプ) S : 汎用リンク
3	ヒンジ成分	1 ~ 6	1 : Fx 2 : Fy 3 : Fz 4 : Mx 5 : My 6 : Mz
4	ヒンジ数	1, 3 ~ 20	バネタイプを選択した場合、空欄で良い
5	履歴モデル	KH, OO, PO, C, DT, TT, MT, MTT, NB, EB, E, ET	KH : Kinematic Hardening OO : Origin Oriented PO : Peak Oriented C : Clough DT : Degrading Trilinear TT : Takeda Tetralinear MT : Modified Takeda MTT : Modified Takeda Tetra NB : Nomal Bilinear EB : Elastic Bilinear E : Elastic ET : Elastic Tetralinear
6	タイプ	0, 1	0 : 対称 1 : 非対称
7	初期剛性	6, 3, 2, U, E, S	6 : 6EI/L 3 : 3EI/L 2 : 2EI/L U : 使用者定義 E : 弾性剛性 S : 骨格曲線から求める
8	初期剛性, K		7番列で"U", User Typeで入力する場合、初期剛性を直接入力
9	ヒンジプロパティ - 入カタイプ	R, D	R : 降伏強度 - 剛性低下率 D : 降伏強度 - 降伏変位
10	単位(力)		力の単位
11	単位(変位)		変位(曲率)の単位

15

※ 非線形特性CSVファイルの仕様

12 ~ 29列は降伏プロパティの入カタイプによって入力が異なります。

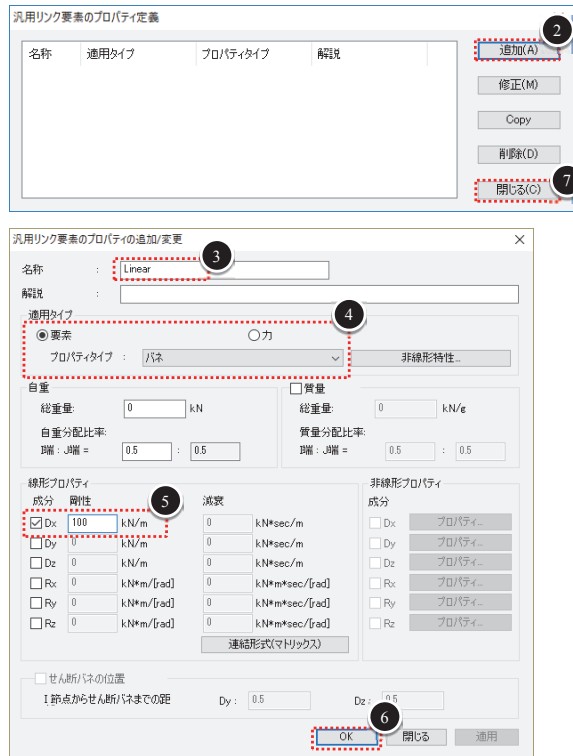
列番号	(+)/(-)	降伏強度 - 剛性低下率	降伏強度 - 降伏変位
12		P1 : 1次降伏強度	P1 : 1次降伏強度
13		A1 : 1次降伏後の剛性を初期剛性で割った比率	D1 : 1次降伏変位成分、または変形
14		P2 : 2次降伏強度	P2 : 2次降伏強度
15	(+) (引張)	A2 : 2次降伏後の剛性を初期剛性で割った比率	D2 : 2次降伏変位成分、または変形
16		P3 : 3次降伏強度	P3 : 3次降伏強度
17		A3 : 3次降伏後の剛性を初期剛性で割った比率	D3 : 3次降伏変位成分、または変形
18		-	P4 : 4次降伏強度
19		-	D4 : 4次降伏変位成分、または変形
20		P1 : 1次降伏強度	P1 : 1次降伏強度
21		A1 : 1次降伏後の剛性を初期剛性で割った比率	D1 : 1次降伏変位成分、または変形
22		P2 : 2次降伏強度	P2 : 2次降伏強度
23	(-) (圧縮)	A2 : 2次降伏後の剛性を初期剛性で割った比率	D2 : 2次降伏変位成分、または変形
24		P3 : 3次降伏強度	P3 : 3次降伏強度
25		A3 : 3次降伏後の剛性を初期剛性で割った比率	D3 : 3次降伏変位成分、または変形
26		-	P4 : 4次降伏強度
27		-	D4 : 4次降伏変位成分、または変形
28		β : 除荷剛性パラメータ (武田モデルだけ)	
29		α : 内部ループ反復時の剛性低下率 (武田モデルだけ)	

16

08 地盤バネのダミー剛性の定義

手順

- 1 メインメニュー [境界条件] > [汎用リンク要素] > [汎用リンク要素のプロパティ定義] クリック
- 2 [追加] ボタンをクリック
- 3 名称: "Linear"
- 4 適用タイプ: "要素" チェックオン
プロパティタイプ: "バネ"
- 5 線形プロパティ: "Dx" チェックオン
剛性: "100"
- 6 [OK] をクリック
- 7 [閉じる] をクリック



*1 非線形地盤バネの線形剛性は"力-変位関係"のスケルトン曲線から算定するので、ここでは、ダミーの線形剛性を定義します。

09 地盤バネ要素の定義

手順

- 1 メインメニュー [境界条件] > [テーブル] > [汎用リンク要素テーブル] クリック
- 2 本資料が入っているチュートリアルフォルダの"汎用リンク要素.xls"を開く
- 3 EXCELで2行目のB列から43行目のAA列までのデータを"Ctrl+Cキー"でコピー
- 4 "汎用リンク要素テーブル" テーブルの"節点1"のセルをクリックして"Ctrl+Vキー"で貼り付け

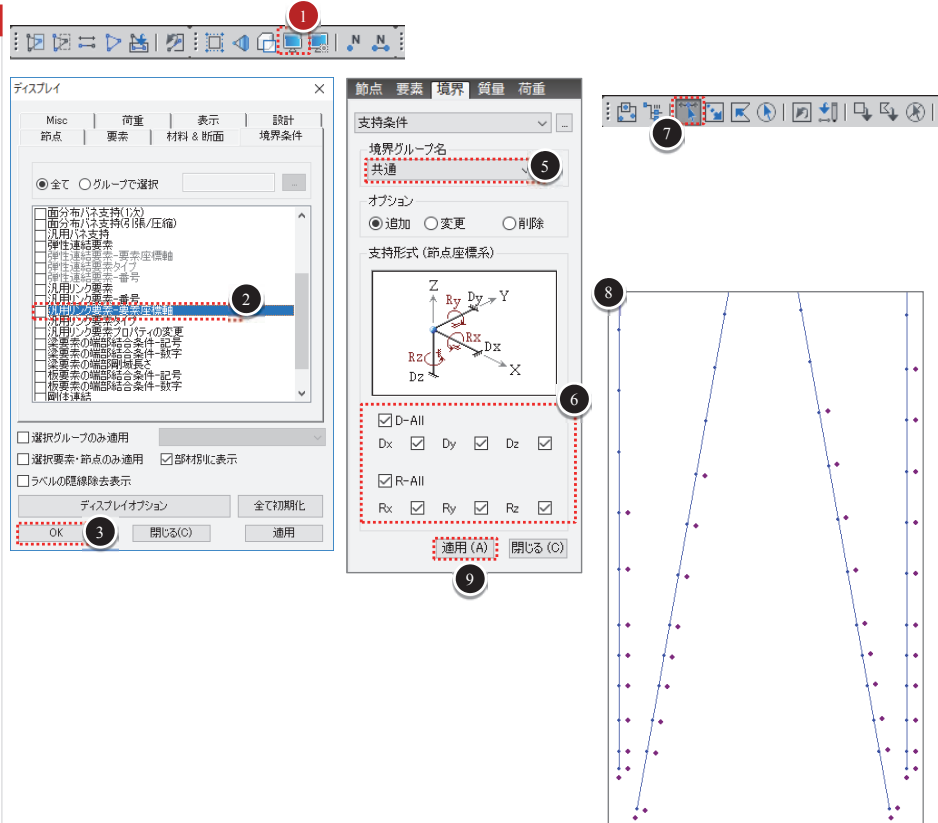
No	節点1	節点2	汎用リンク要素プロパティ	非線形特性特性値	タイプ	β-角度 (Deg.)	方法	角度-x	角度-y
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	10	103	Linear	SPH P1-1	要素座標系	0	β-角度	0	0
3	104	105	Linear	SPH P1-2	要素座標系	0	β-角度	0	0
4	106	107	Linear	SPH P1-3	要素座標系	0	β-角度	0	0
5	108	109	Linear	SPH P1-4	要素座標系	0	β-角度	0	0
6	110	111	Linear	SPH P1-5	要素座標系	0	β-角度	0	0
7	112	113	Linear	SPH P1-6	要素座標系	0	β-角度	0	0
8	114	115	Linear	SPH P1-7	要素座標系	0	β-角度	0	0
9	116	117	Linear	SPH P1-8	要素座標系	0	β-角度	0	0
10	203	202	Linear	SPH P2-1	要素座標系	0	β-角度	0	0
34	412	413	Linear	SPH P4-6	要素座標系	0	β-角度	0	0
35	414	415	Linear	SPH P4-7	要素座標系	0	β-角度	0	0
36	416	417	Linear	SPH P4-8	要素座標系	0	β-角度	0	0
37	418	419	Linear	SPH P4-9	要素座標系	0	β-角度	0	0
38	420	421	Linear	SPH P4-10	要素座標系	0	β-角度	0	0
39	422	423	Linear	SPH P4-11	要素座標系	0	β-角度	0	0
40	101	103	Linear	SPV P1	要素座標系	0	β-角度	0	0
41	201	202	Linear	SPV P2	要素座標系	0	β-角度	0	0
42	301	303	Linear	SPV P3	要素座標系	0	β-角度	0	0
43	401	403	Linear	SPV P4	要素座標系	0	β-角度	0	0

テーブル入力で一括作成された非線形地盤バネ

*1 非線形地盤バネは境界グループを"レベル2"に区分しています。

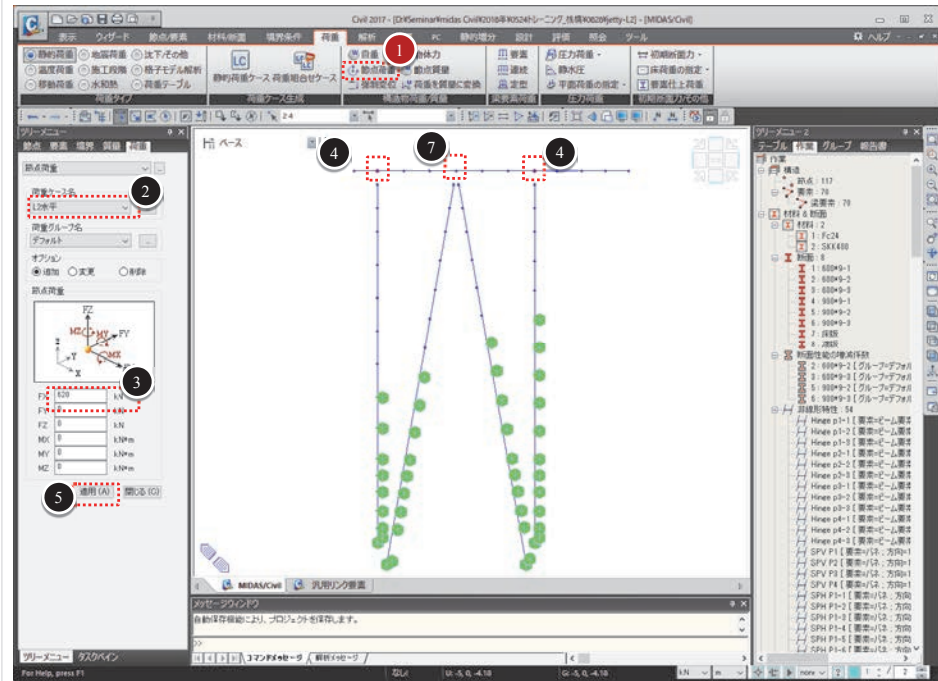
10 地盤バネ端部の拘束

- 手順**
- 1 “ ディスプレイ” (トグルオン)
 - 2 “境界条件>汎用リンク要素-要素座標軸” チェックオフ
 - 3 [OK] ボタンクリック
 - 4 メインメニュー [境界条件] > [支持] > [支持条件] クリック
 - 5 境界グループ名: “共通”
 - 6 支持形式: “D-All”、“R-All”
 - 7 “ 単一選択/解除” (トグルオン)
 - 8 作業画面から地盤バネの支持端を選択
 - 9 [適用] ボタンクリック



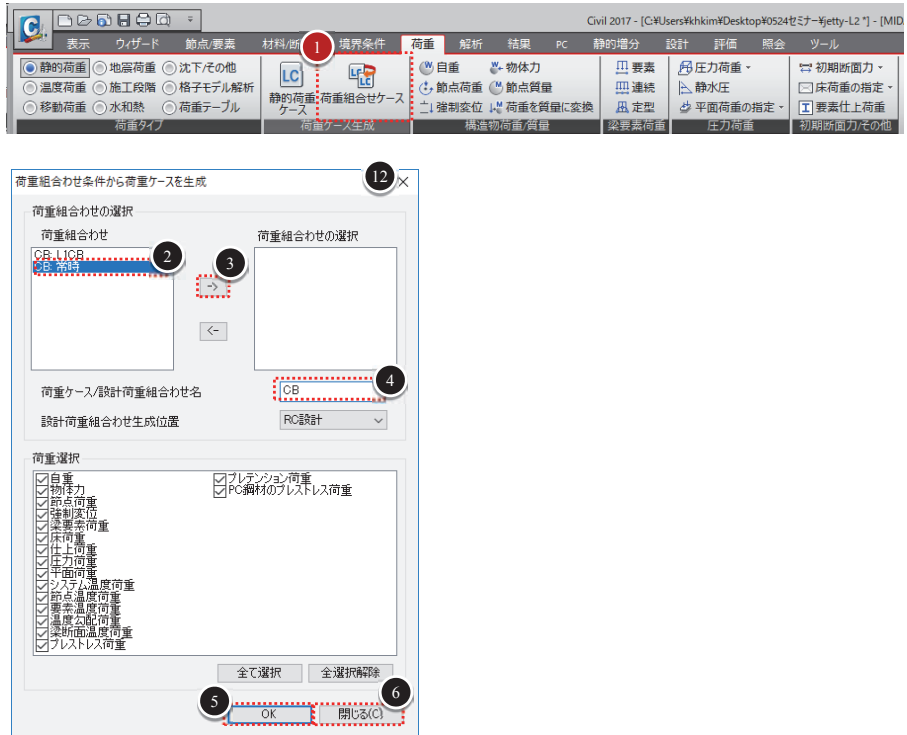
11 レベル2 水平力の定義

- 手順**
- 1 メインメニュー [荷重] > [構造物荷重/質量] > [節点荷重] クリック
 - 2 荷重グループ名: “L2水平”
 - 3 FX: “620”
 - 4 作業画面から直杭の直上にある床版の節点を選択
 - 5 [適用]をクリック
 - 6 FX: “775”
 - 7 作業画面から斜杭の直上にある床版の節点を選択
 - 8 [適用]をクリック



12 荷重組合せから荷重ケース作成

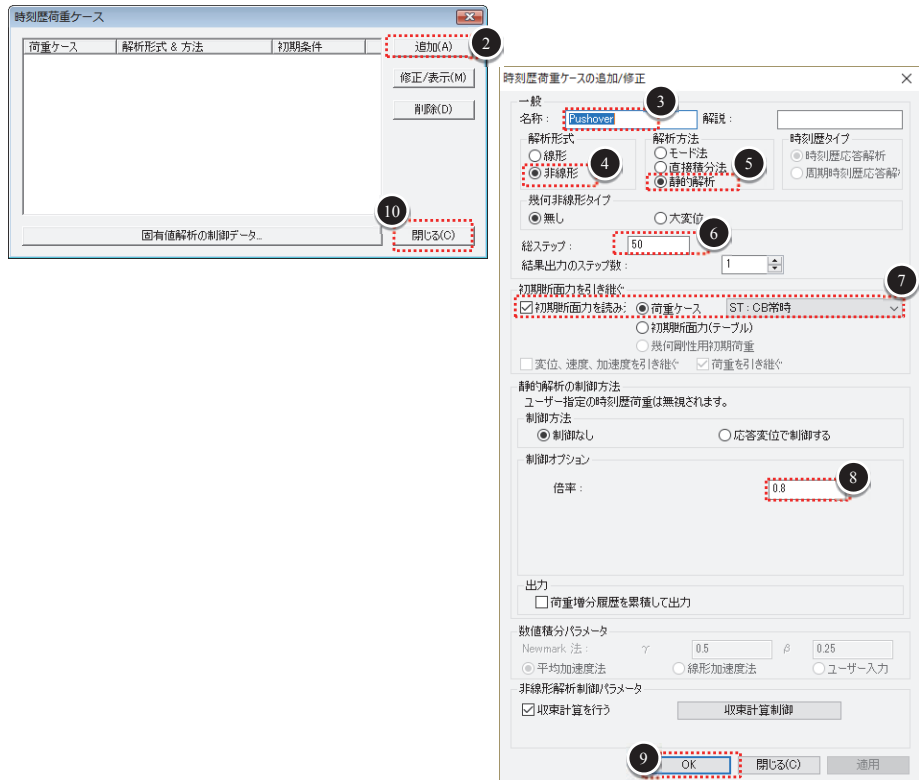
- 手順**
- ① メインメニュー [荷重] > [荷重ケース生成] > [荷重組合せケース] クリック
 - ② 荷重組合せ: “CB:常時”
 - ③ → ボタンをクリック
 - ④ 荷重ケース/設計荷重組合せ名: “CB”
 - ⑤ [OK] ボタンをクリック
 - ⑥ [閉じる] ボタンをクリック



21

13 時刻歴荷重ケースの作成

- 手順**
- ① メインメニュー [荷重] > [地震荷重] > [時刻歴応答解析データ] > [荷重ケース] クリック
 - ② [追加] ボタンをクリック
 - ③ 名称: “pushover”
 - ④ 解析形式: “非線形”
 - ⑤ 解析方法: “静的解析”
 - ⑥ 総ステップ: “50”
 - ⑦ “初期断面力を引き継ぐ” チェックオン
荷重ケース: “ST:CB常時”
 - ⑧ 倍率: “0.8”
 - ⑨ [OK] ボタンをクリック
 - ⑩ [閉じる] ボタンをクリック



*1 非線形増分解析時の常時荷重として、“荷重組合せから荷重ケース作成”で定義した鉛直荷重を指定します。

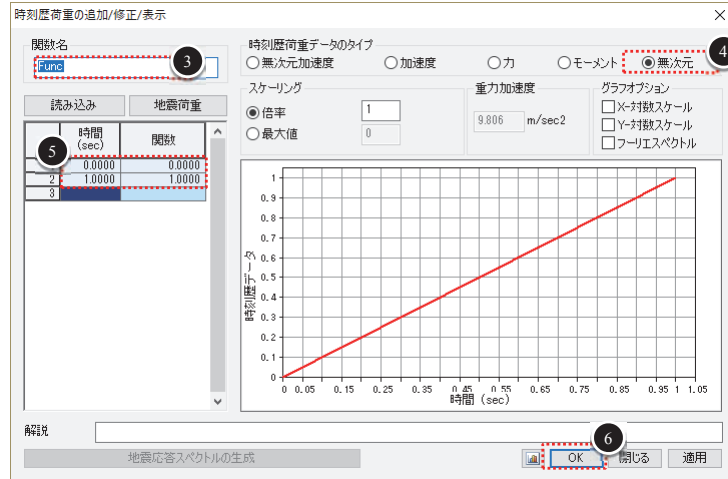
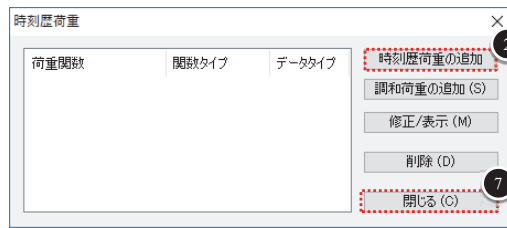
22

14 荷重増分関数の定義

手順

- ① メインメニュー [荷重] > [地震荷重] > [時刻歴応答解析データ] > [時刻歴荷重] クリック
- ② [時刻歴荷重の追加] ボタンをクリック
- ③ 関数名: "Func"
- ④ 時刻歴荷重データのタイプ: "無次元"
- ⑤ 時間関数テーブル:

時間	関数
0.0	0.0
1.0	1.0
- ⑥ [OK] ボタンをクリック
- ⑦ [閉じる] ボタンをクリック



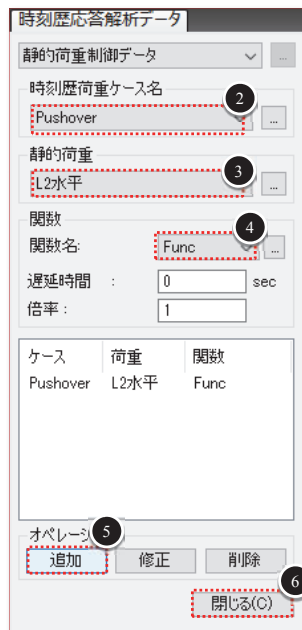
*1 ここでは、震度Kh=1.0で与えた水平力を60%載荷するように設定します。

23

15 時刻歴荷重ケースの作成

手順

- ① メインメニュー [荷重] > [地震荷重] > [時刻歴応答解析データ] > [静的荷重制御データ] クリック
- ② 時刻歴荷重ケース名: "pushover"
- ③ 静的荷重: "L2水平"
- ④ 関数名: "Func"
- ⑤ [追加] ボタンをクリック
- ⑥ [閉じる] ボタンをクリック



24

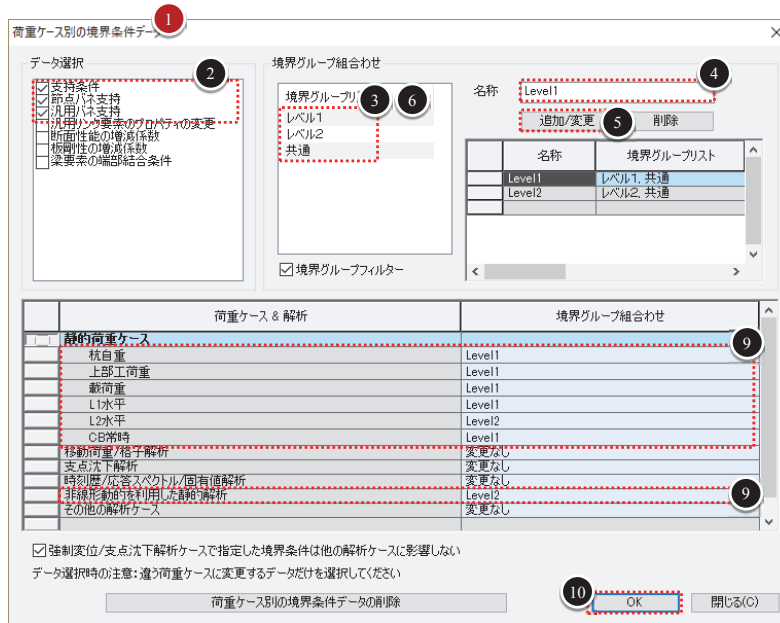
16

境界条件の使い分け

1つのモデルデータで荷重ケース別に境界条件を使い分ける際に使用します。

手順

- ① メインメニュー [解析] > [解析制御] > [荷重ケース別の境界条件データ] をクリック
- ② データ選択: “支持条件”、“節点ハネ支持”、“汎用ハネ支持” チェックオン
- ③ 境界グループ/組合せ: “レベル1”、“共通” 選択
- ④ 名称: “Level1”
- ⑤ [追加/変更] ボタンをクリック
- ⑥ 境界グループ/組合せ: “共通”、“レベル2” 選択
- ⑦ 名称: “Level2”
- ⑧ [追加/変更] ボタンをクリック
- ⑨ 右図を参照しながら、荷重ケース別に適用する境界グループを指定
- ⑩ [OK] ボタンをクリック



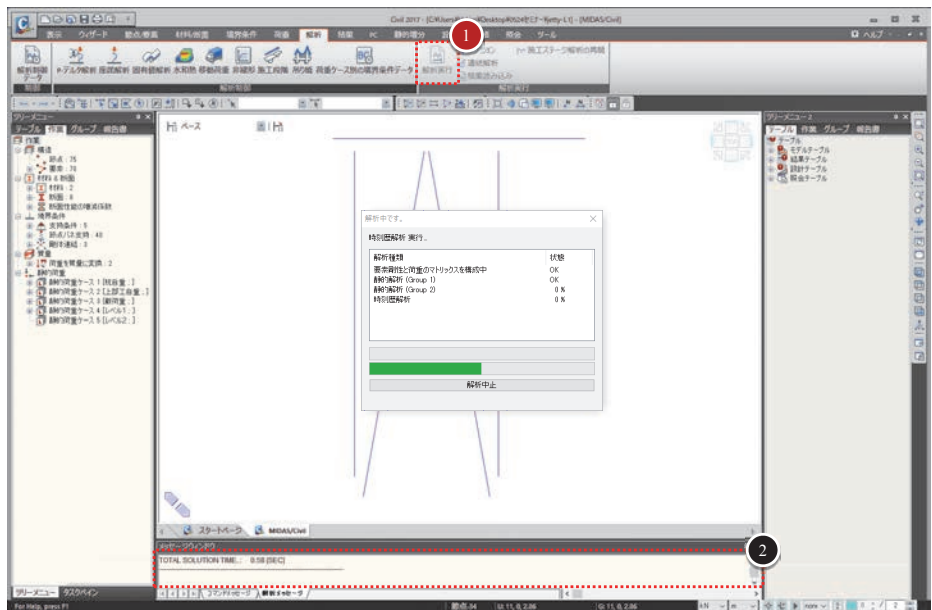
25

17

構造解析実行

手順

- ① メインメニュー [解析] > [解析実行] > [解析実行] をクリック



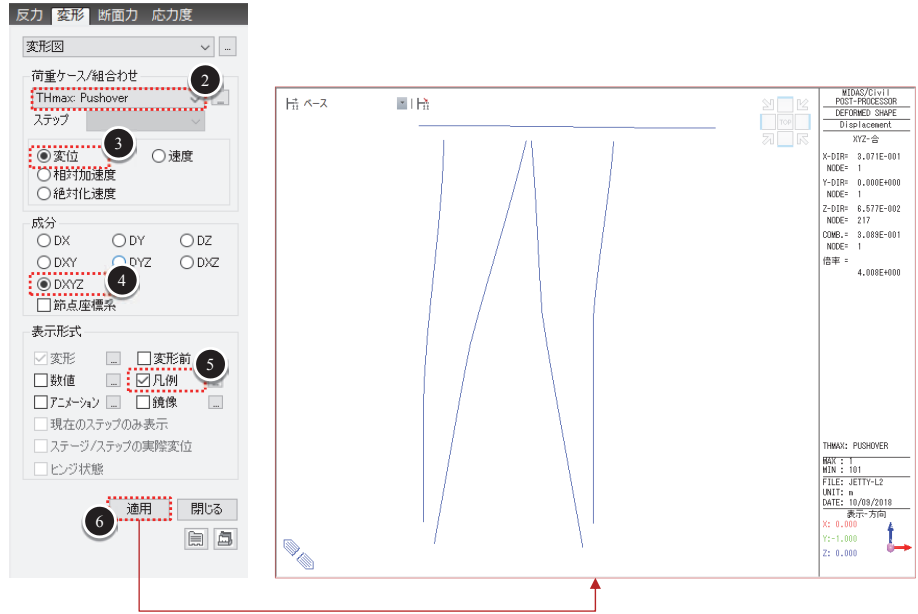
- ◆ 構造解析実行中は画面中央に構造解析が実行されていることを知らせるダイアログボックスが表示されます。
- ◆ モデルビューの下の(図中の②)のメッセージウィンドウに要素剛性行列の構成と組合せ過程などのすべての解析過程が表示されます。
- ◆ 解析作業が完了すると、全ての解析所要時間がメッセージウィンドウに表示され、画面中央のウィンドウは閉じます。

26

18 変位の確認

地震時荷重ケースに対する最大変位を確認します。

- 手順**
- ① メインメニュー-[結果]>[結果]>[変形]
>[変形図]
 - ② 荷重ケース/組み合わせ：“THmax : Pushover”
 - ③ “変位” チェックオン
 - ④ 成分：“DXYZ”
 - ⑤ 表示形式：“凡例”
 - ⑥ [適用]をクリック



*1 表示形式の数値右側にあるボタンをクリックすると画面に出力される反力の桁数を調節することができます。赤色で表現された部分が最大反力が発生する支点です。

19 解析結果の出力指定

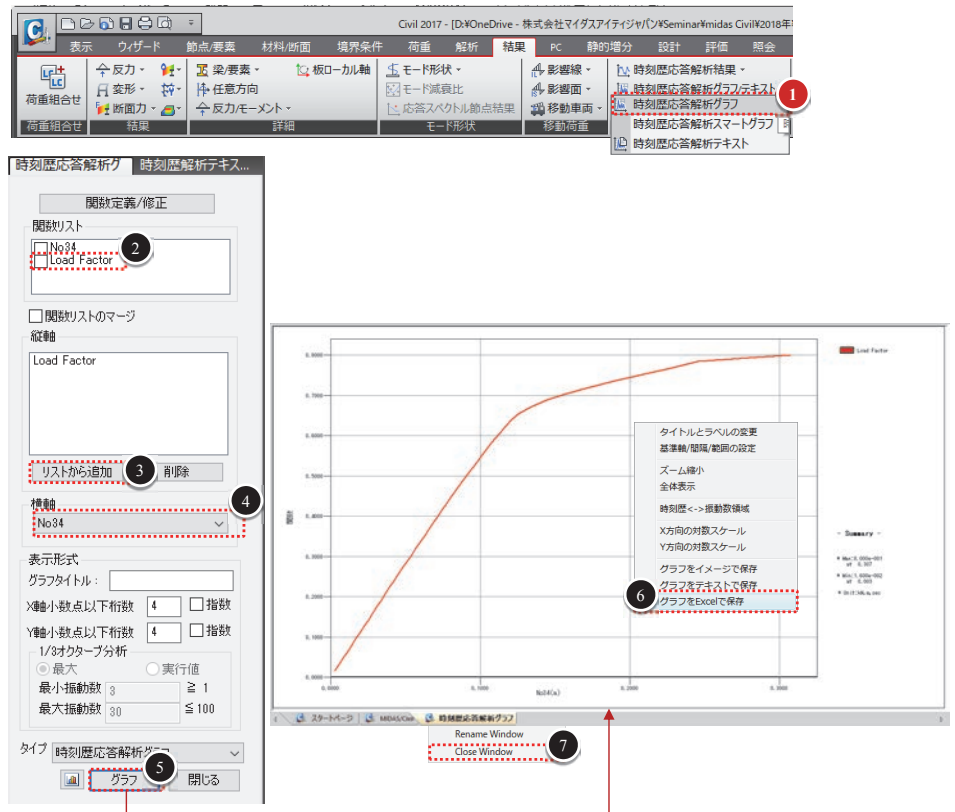
- 手順**
- ① [荷重]>[時刻歴応答解析データ]>[時刻歴出力結果の設定]
 - ② 出力指定：“変位/速度/加速度”
 - ③ [新規に出力指定を追加] ボタンをクリック
 - ④ 名称：“No34”
 - ⑤ 節点番号：“34”
 - ⑥ 出力タイプ：“変位”
 - ⑦ 基準点：“相対値”
 - ⑧ 成分：“DX”
 - ⑨ [OK] ボタンをクリック
 - ⑩ 出力指定：“荷重増分履歴”
 - ⑪ [新規に出力指定を追加] ボタンをクリック
 - ⑫ 名称：“Load Factor”
 - ⑬ [OK] ボタンをクリック
 - ⑭ [閉じる] ボタンをクリック



*1 節点34は渡板の右先端の節点番号です。

20 水平力-水平変位グラフ

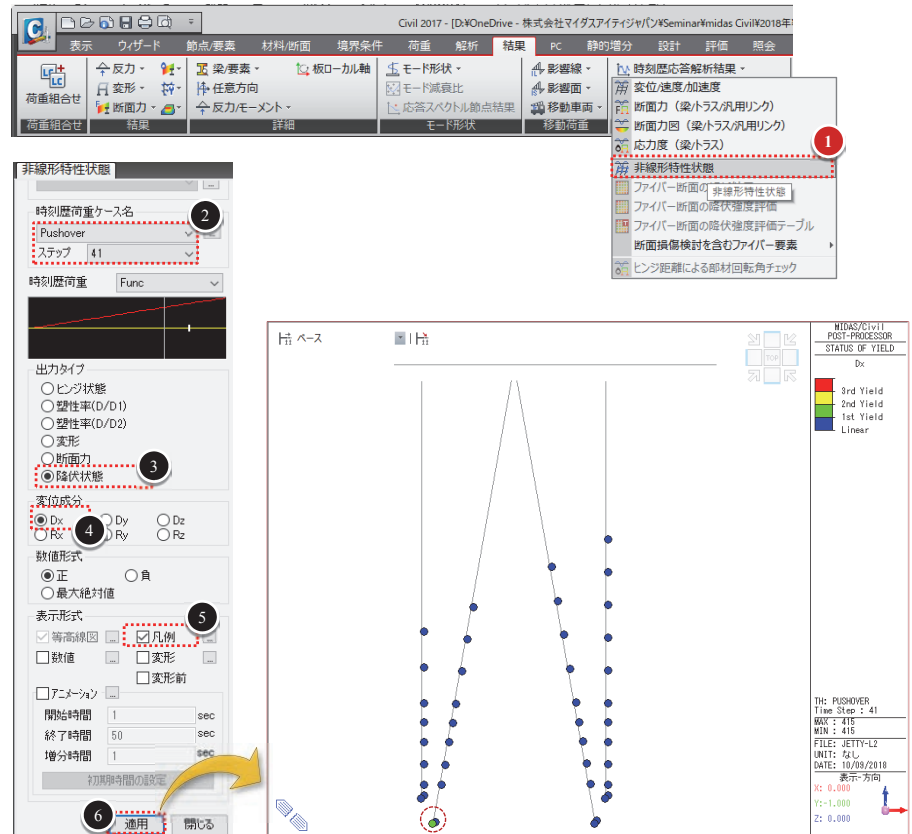
- 手順**
- 1 [結果]>[時刻歴応答解析]>[時刻歴応答解析グラフ/テキスト]>[時刻歴応答解析グラフ]
 - 2 関数リスト：“Load Factor”
 - 3 [リストから追加] ボタンをクリック
 - 4 横軸：“No34”
 - 5 [グラフ] ボタンをクリック
構造全体の水平力-水平変位関係を確認します。
 - 6 グラフ上でマウスを右クリックし、[グラフをEXCELで保存]を選択してグラフ結果をExcelに保存
 - 7 「時刻歴応答解析グラフ」タブを右クリックして“Close Windows”をクリック



29

21 地盤バネの塑性状態の確認

- 手順**
- 1 [結果]>[時刻歴応答解析]>[時刻歴応答解析結果]>[非線形特性状態]
 - 2 時刻歴荷重ケース名：“Pushover”
ステップ：“41”
 - 3 出力タイプ：“塑性状態”
 - 4 変位成分：“Dx”
 - 5 表示形式：“凡例” オン
 - 6 [適用] ボタンをクリック
- *1 ステップ数を変えながら塑性が発生する地盤バネを確認します。本例題では41ステップで②杭の鉛直支持バネが引抜き限界に達しています。

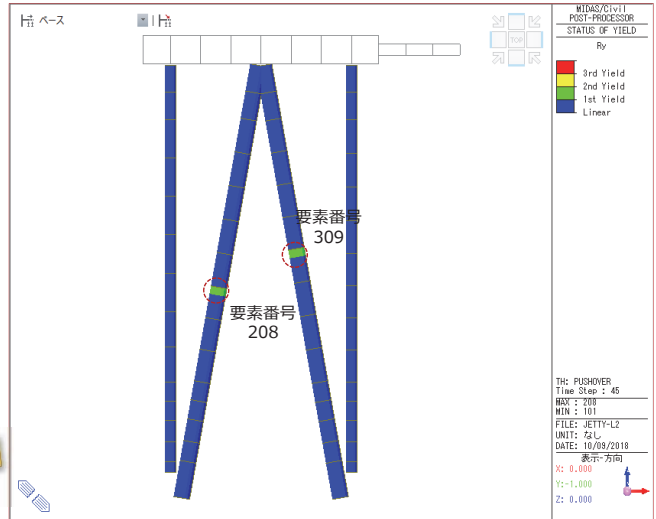
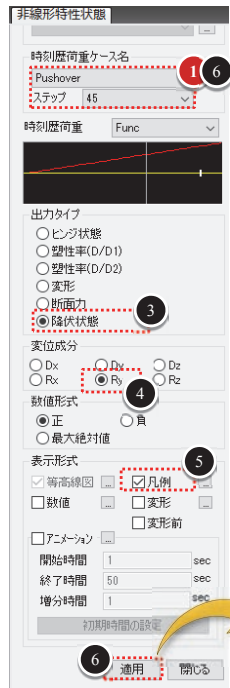


30

杭部材の塑性状態の確認

手順

- ① 時刻歴荷重ケース名：“Pushover”
ステップ：“43”
- ② 出力タイプ：“塑性状態”
- ③ 変位成分：“Ry”
- ④ 表示形式：“凡例” オン
- ⑤ [適用] ボタンクリック
- ⑥ ステップ：“45”

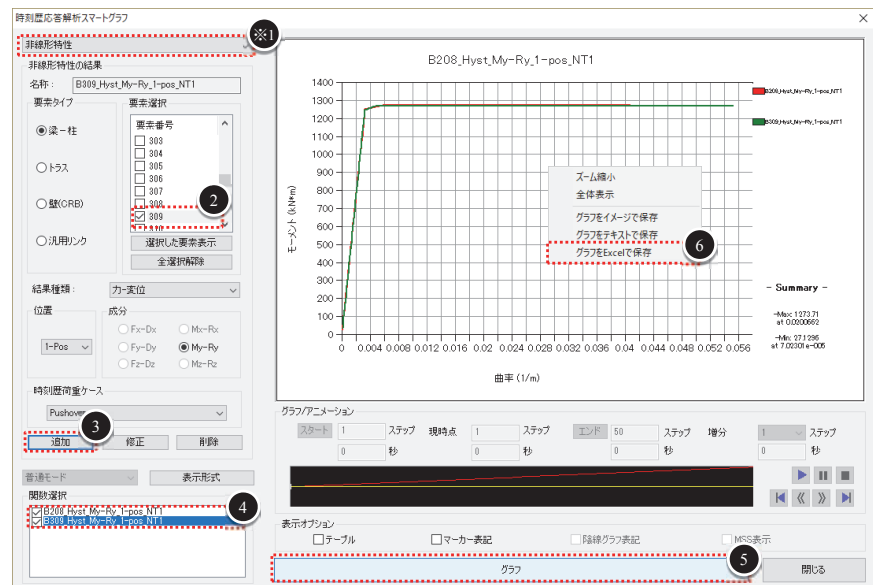


*1 ステップ数を変えながら塑性が発生する箇所を確認します。本例題では43ステップで③杭における地盤との境界部が降伏に達し、45ステップで②杭における地盤との境界部が降伏に達しています。

25 結果確認 – 応答履歴グラフ

手順

- ① [結果]>[時刻歴応答解析]>[時刻歴応答解析グラフ/テキスト]>[時刻歴応答解析スマートグラフ]>[非線形特性]
- ② 要素選択：“208”、“309” 選択
- ③ [追加] ボタンクリック
- ④ 全ての関数を選択
- ⑤ [グラフ] ボタンクリック
- ⑥ マウスを右クリックし、[グラフをEXCELで保存] を選択、グラフ結果をExcelに保存



*1 “汎用リンク”に切り替えると、地盤パネの履歴特性の確認することができます。

**MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
DOCUMENT
COLLECTION**

河川・港湾構造物

04.

杭の支持力解析

新日鐵住金株式会社

1.解析条件概要

① 載荷試験

- ・杭径：600mm
- ・杭長：25,000mm
- ・工法：打撃

② 新設杭

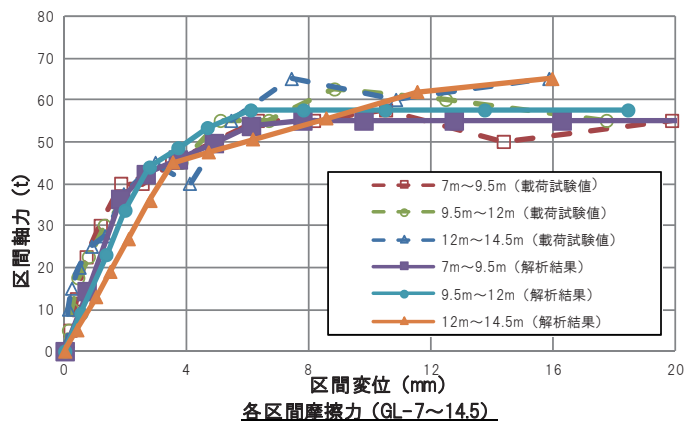
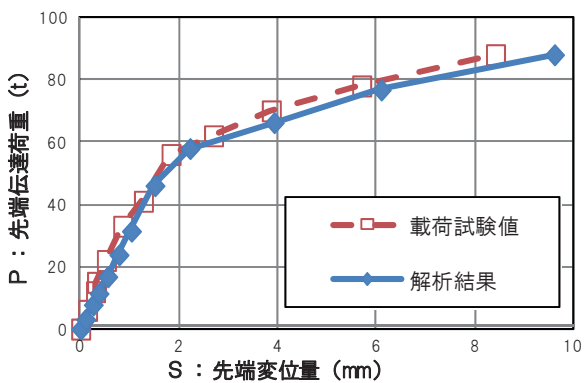
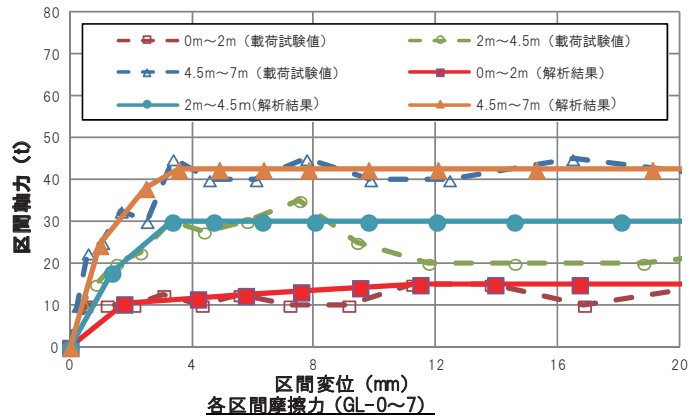
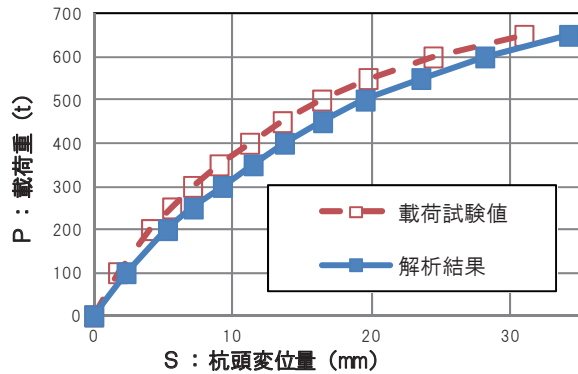
- ・杭径：700mm
- ・杭長：30,000mm
- ・工法：オーガー削孔10m+打撃

2.解析モデル

解析モデルは梁モデルとした。

3.載荷試験の再現解析結果

載荷試験値と解析結果にほぼ差異はなく、概ね再現できているといえる。



4.新設杭の支持力解析結果と静的支持力公式との比較

静的支持力算定結果と比較して、解析結果の方が大きな支持力となった。

	新設杭	
	解析結果	支持力公式
極限先端支持力	110t	252t
極限周面摩擦力	565t	260t
極限支持力	675t	512t
長期許容支持力	225t	170t
比率	1.32	-

04. 杭の支持力解析

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

河川・港湾構造物

05.

周辺地盤を考慮した群杭基礎の
地震応答解析法に関する一考察

土木学会北海道支部 論文報告集

周辺地盤を考慮した群杭基礎の地震応答解析法に関する一考察

Earthquake response analysis for foundation with rectangular pile group considering ground motion

株式会社ドーコン ○正会員 工藤 浩史 (Hiroshi KUDO)
 株式会社ドーコン 正会員 小林 竜太 (Ryuta KOBAYASHI)
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 石川 博之 (Hiroyuki ISHIKAWA)
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 岡田 慎哉 (Shinya OKADA)
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu KISHI)

1. 序論

設計実務において一般に実施されている橋梁の地震応答解析は、その簡便さから基礎-地盤系の影響を単純化した集約バネとしてモデル化する場合が多い。(図-1)しかしながら、構造物の地震時応答は基礎構造や周辺地盤の影響を大きく受けることから、実際の挙動を精度良く予測するためには基礎-地盤系における動的な相互作用効果を考慮した連成解析が必要となる。周辺地盤の影響を考慮した連成解析モデルとしては、二次元あるいは三次元有限要素モデルやバネ-質点系モデル(以下、骨組要素モデル)等が挙げられる。解析精度の観点からは有限要素モデルの適用が望ましいと考えられるが、解析規模の拡大に伴う解析所要時間や費用の観点からは、全てにおいて有限要素モデルを適用することは現実的に困難である。従って、実務への適用性に配慮する場合には比較的簡易な骨組要素モデルによって評価可能な解析モデルの構築が望ましい。

このような観点から、本研究では道路橋の一般的な群杭基礎橋脚を対象として、集約バネモデルの精度を高めた骨組要素モデルの適用性について検討を行った。なお、適用性の検討は、別途実施した三次元有限要素解析(以下、固体要素解析モデル)と比較する形で行っている。

2. 解析対象の概要

本研究では、一般国道 336 号十勝河口橋側橋梁部の P-7 橋脚(3 径間連続 PC 箱桁, 固定支承)を解析対象とした。図-2 には解析対象橋脚の諸元を示している。

本橋脚は、躯体が橋軸方向幅 3.6m, 橋軸直角方向幅 10.0m, 高さ 14.3m の小判型の鉄筋コンクリート製橋脚である。杭基礎は、全長 30m, 直径 1,219.2mm, 板厚 19mm(杭頭から 12.5m 下方位置で板厚が t=14mm に変化)の鋼管杭基礎であり計 38 本配置されている。但し、中間杭は一部で間引きされている。鋼管杭基礎は、橋軸方向幅 22.8m, 橋軸直角方向幅 21.0m, 高さ 4.0m のフーチング内に埋込み定着(定着長 1.2m)されている。

ここで、図中の地層構成は、本橋脚近傍で実施された既往の地質調査結果(ボーリング柱状図)を下に設定している。また、本橋脚は 3 径間連続箱桁区間の固定支承を有する橋脚であることから、耐震設計上は、橋軸方向には 3 径間連続桁の全重量 ($W_u=51,180\text{kN}$) を、橋軸直角方向には支点位置における死荷重反力相当の重量 ($W_u=18,200\text{kN}$) を負担する橋脚である。

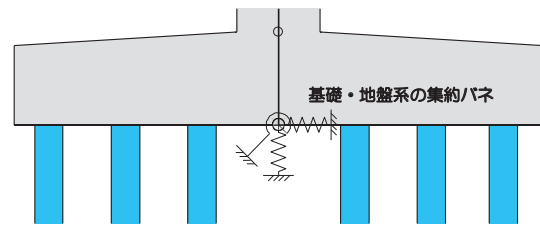


図-1 単純化した集約バネモデルの概念図

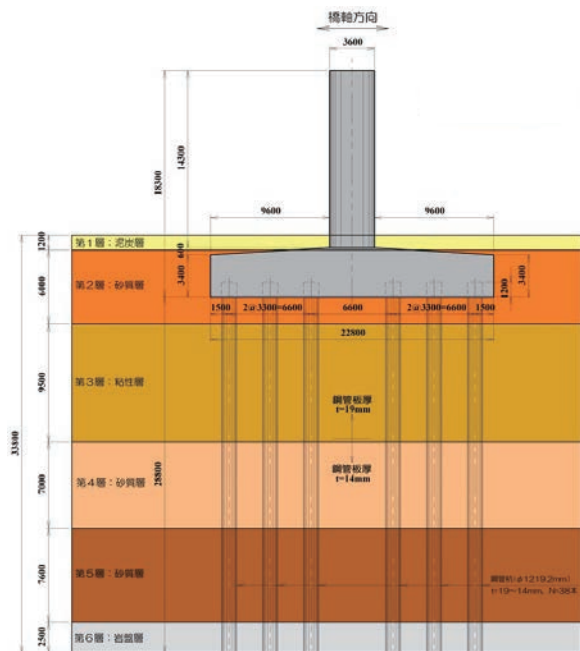


図-2 解析対象橋脚の諸元【側面図】

3. 数値解析の概要

本数値解析では、基礎-地盤系の地震応答特性評価を目的としていることから、橋脚躯体形状はモデル化せずフーチング上面までをモデル化した。なお、本数値解析で用いた動的応答解析プログラムは、骨組要素解析は MIDAS/Civil 2006, 固体要素解析は ABAQUS である。

3. 1 骨組要素解析モデル

図-3 には骨組要素解析モデルの一例として、橋軸方向地震波入力時の解析モデルを示している。本解析では、集中質量としてモデル化した周辺地盤を、相互作用バネ

を用いて杭体と連結した Penzien 型モデルにより基礎-地盤系を表現した。適用した有限要素は、フーチングおよび鋼管杭は梁要素、地盤はフーチング幅の5倍の領域の質量およびせん断剛性を考慮したマス-バネ要素である。なお、杭体-地盤間、杭体-杭体間およびフーチング-地盤間の相互作用効果も考慮する必要があることから、それらも全てバネ要素を用いて連結させた。また、フーチング下端の節点と各杭体の杭頭部節点は剛体要素を用いて連結している。ここで、杭体-周辺地盤間およびフーチング-周辺地盤間のバネ剛性は、道路橋示方書【下部構造編】に基づき下式の水平方向地盤反力係数 k_h により算定した。なお、杭体間のバネ剛性は各杭体が一体となって挙動するようにいずれも剛に連結している。

$$k_h = k_{h0} \frac{B_H^3}{D^3} \quad (1)$$

$$k_0 = k_h * D * \Delta l \quad (2)$$

ここに、

- k_h : 水平方向地盤反力係数 (kN/m³) k_{h0}
- : 水平方向地盤反力係数の基準値 (kN/m³)
- B_H : 鋼管杭の換算載荷幅 (m) k_0
- : 解析モデルに与えるバネ剛性 (kN/m) D :
- 基礎の載荷幅 (杭基礎の直径: m) Δl : バネ要素の鉛直方向間隔 (m)

境界条件は、モデル底面(杭体下端)を完全固定とし、また、橋軸方向地震波入力時には橋軸直角方向の並進方向成分および回転方向成分を、橋軸直角方向地震波入力時には橋軸方向の並進方向成分および回転方向成分を拘束している。なお、フーチング天端の節点には、上部構造分担質量と橋脚躯体質量を集中質量(橋軸方向: $m=6405.7t$, 橋軸直角方向: $m=3042.7t$)として考慮した。

3. 2 固体要素解析モデル

図-4には固体要素解析モデルの一例として、橋軸方向地震波入力時の解析モデルを示している。固体要素解析でのモデル化の範囲は対称性を考慮した1/2モデルとし、周辺地盤はフーチング幅の5倍の領域をモデル化した。使用した有限要素は、フーチングおよび周辺地盤には8節点固体要素、鋼管杭には4節点シェル要素であり、周辺地盤と鋼管杭間は完全付着を仮定した。境界条件は、モデル底面を完全固定とし、対称切断面はその面に対する法線方向変位成分を、周辺地盤の側面は鉛直方向変位成分を拘束している。なお、フーチング天端には、骨組要素解析モデルと同様にシェル要素を用いて上部構造分担質量と橋脚躯体質量を考慮している。

3. 3 材料物性値

表-1には周辺地盤の各地層における材料物性値を示している。地盤の弾性係数(動的変形係数)は、道路橋示方書【耐震設計編】に基づいて各地層の平均N値からせん断弾性波速度を評価して、地盤の動的変形係数 E_D を推定した。表-2にはフーチングおよび鋼管杭の材料物性値を示している。

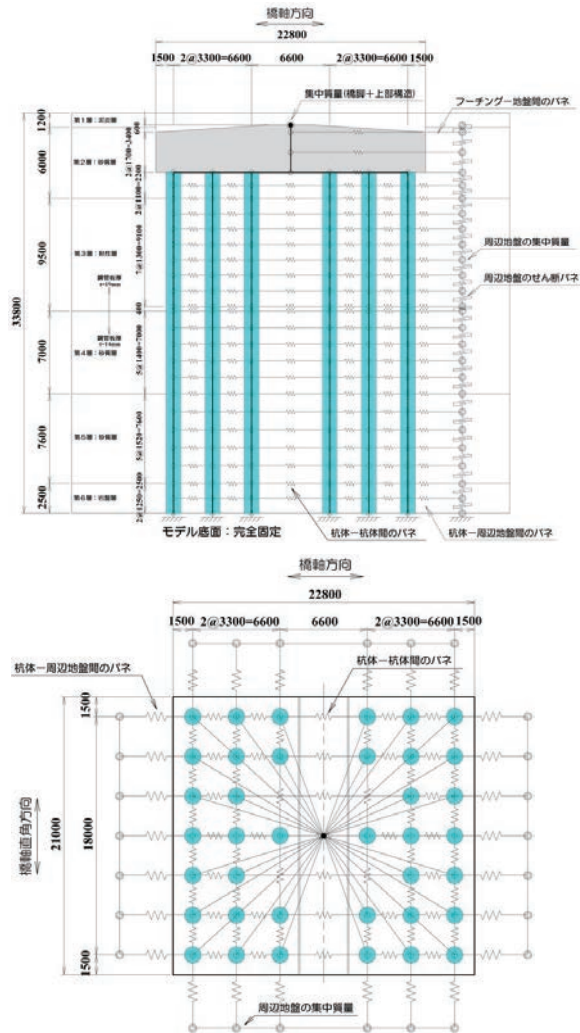


図-3 骨組要素解析モデルの一例【橋軸方向加振時】

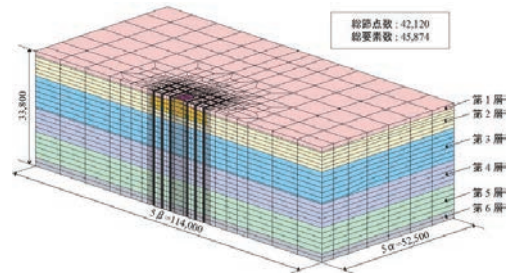


図-4 固体要素解析モデルの一例【橋軸方向加振時】

表-1 周辺地盤の各地層における材料物性値

地層番号	弾性係数 E_D (N/mm ²)	ポアソン比 ν_D	単位体積重量 W (KN/m ³)
第1層	23.5	0.49	12.0
第2層	53.7	0.49	17.0
第3層	90.6	0.49	14.0
第4層	92.2	0.49	17.0
第5層	235.1	0.49	19.0
第6層	317.6	0.40	20.0

表-2 フーチングおよび鋼管杭の材料物性値

項目	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 W (kN/m ³)
フーチング	3.00E+04	0.20	24.5
鋼管杭	2.00E+05	0.30	77.0

3. 4 地震応答解析法および入力地震動

地震応答解析は、いずれの解析モデルも直接積分法による時刻歴応答解析（線形解析）とした。数値積分は、骨組要素モデルでは陰解法に基づいた Newmark- β 法（ $\beta=1/4$ ）を用い、積分間隔を 1/100 秒と設定して実施している。一方、固体要素モデルには陽解法を適用し、積分間隔はクーランの条件を満たすように設定している。

また、粘性減衰モデルは、固体要素モデルの場合には系の 1 次固有振動数に対して $h=5\%$ となる質量比例型減衰モデルを採用し、骨組要素モデルの場合には 1 次および 2 次の固有振動数に対して $h=5\%$ となる Rayleigh 型減衰モデルを採用している。

図-5には本数値解析で用いた入力地震波形（加速度波形）を示している。本解析では、2003年十勝沖地震本震で観測された基盤面波形（十勝河口橋：A-2 橋台基盤面 GL-50m, 橋軸方向成分）を用い、これを最大加速度 100gal に振幅調整して用いることとした。また、実際に解析モデルに与えた波形は、観測波形に対して初期微動 P 波区間を除去した後の主要動 S 波区間の 30 秒間としている。図-6には入力加速度波形のフーリエスペクトルを示している。図より、本地震波形は 0.3Hz~0.4Hz 付近に卓越振動数が存在していることが分かる。

4. 数値解析結果の比較

4. 1 固有値解析結果

表-3には骨組要素モデルおよび固体要素モデルにおける固有値解析結果を、最低次固有振動数に着目して示している。表より、橋軸方向、直角方向ともにモデルによる差は 2.0%程度と小さく、両者は良く一致している。

図-7には橋軸方向の最低次固有振動モード分布を各解析モデルで比較して示している。図より、最低次固有振動モードは、周辺地盤と杭体が一体となって水平方向に変形するモード分布を示している。また、各解析モデルにおける固有振動モード分布を比較すると、鉛直方向深度-10.0m 近傍で両者に若干の差異が見られるものの、その分布性状は良く一致しているものと判断される。

4. 2 地震応答解析結果

(1) フーチング天端における各種応答特性の比較

表-4, 5には、それぞれ橋軸方向地震波入力時および直角方向地震波入力時におけるフーチング天端の絶対最大応答値を骨組要素モデルと固体要素モデルで比較して示している。また、図-8, 9には、同様に各入力方向に関する各種応答波形を両者で比較して示している。

1) 橋軸方向地震波入力時に関する比較

応答加速度に着目すると、最大応答加速度に関しては、骨組要素モデルが固体要素モデルと比較して 1.3 倍程度

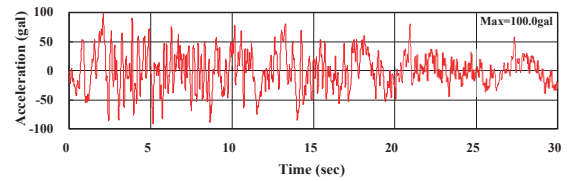


図-5 入力加速度波形【2003年十勝沖地震本震】

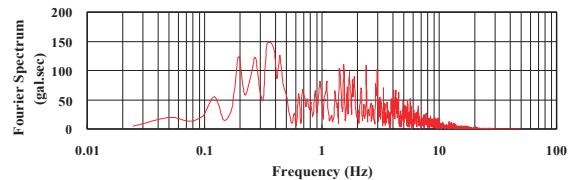


図-6 入力加速度波形のフーリエスペクトル

表-3 各解析モデルの最低次固有振動数

	骨組要素解析	固体要素解析	比率 (A/B)
	A (Hz)	B (Hz)	
橋軸方向	1.224	1.250	0.98
直角方向	1.284	1.260	1.02

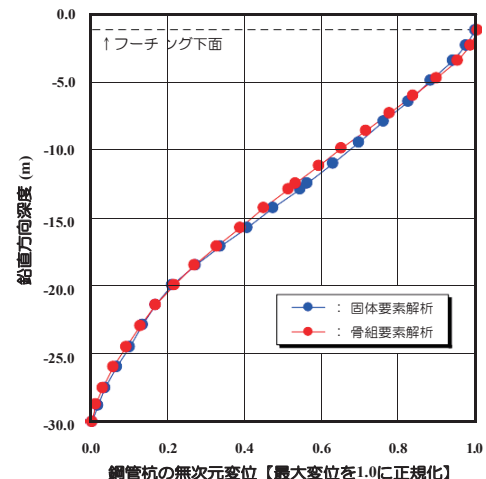


図-7 最低次振動モード分布の比較【橋軸方向】

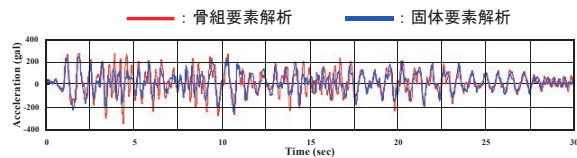
大きく評価されている。応答波形に着目すると、一部で高次モードの影響による差異が見受けられるが、周期特性は両者でほぼ一致している。しかしながら、全体的には骨組要素モデルにおける応答が大きく評価される傾向にある。一方、応答速度および応答変位に関しては、最大応答値および応答波形性状ともに両者は比較的精度良く一致していることが分かる。

2) 直角方向地震波入力時に関する比較

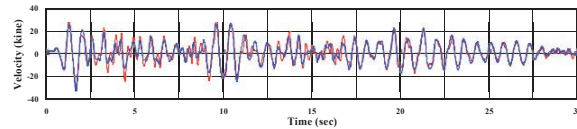
応答加速度に着目すると、橋軸方向地震波入力時と同様に骨組要素モデルが大きく評価される傾向にあるものの、その程度は橋軸方向地震波入力時よりも小さく、応答波形、フーリエスペクトルともに両者は精度良く一致している。また、応答速度および応答変位に関しても、最大応答値および応答波形性状ともに良く一致している。

表-4 フーチング天端の最大応答値の比較【橋軸方向】

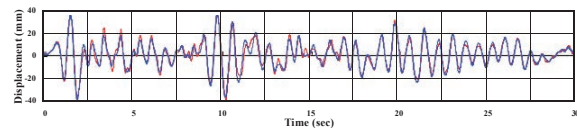
項目		骨組要素解析	固体要素解析
最大加速度	発生時刻(sec)	4.26	10.54
	応答値(gal)	347.02	258.43
最大速度	発生時刻(sec)	1.62	1.59
	応答値(kine)	32.87	32.45
最大変位	発生時刻(sec)	10.16	1.77
	応答値(mm)	39.36	39.10



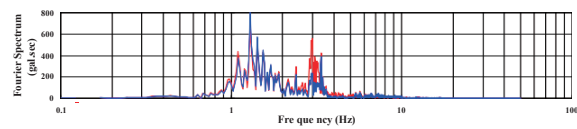
(a) フーチング天端の応答加速度波形



(b) フーチング天端の応答速度波形



(c) フーチング天端の応答変位波形



(d) 応答加速度波形に関するフーリエスペクトル

図-8 フーチング天端の応答波形に関する比較【橋軸方向】

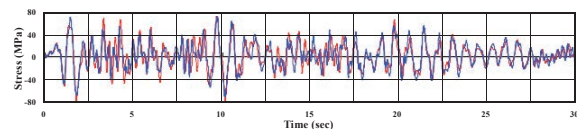


図-10 鋼管杭の軸方向応力波形に関する比較【橋軸方向】

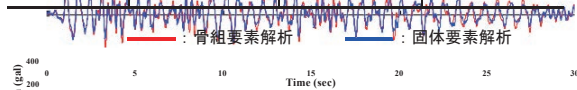
なお、いずれの応答波形に関しても、橋軸方向地震波入力時は直角方向地震波入力時と比較して両者の整合が若干低い。これは橋軸方向地震波入力モデルでは直角方向地震波入力モデルと比較して上部構造分担質量が2倍程度大きいことから、2次振動モードが励起されやすいことによるものと推察される。しかしながら、固体要素モデルではその影響は小さく、いずれの地震波入力方向においても1次振動モードが卓越していることが分かる。

(2) 鋼管杭の軸方向応力度波形に関する比較

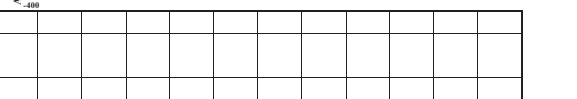
図-10, 11には、それぞれ各地震波入力方向における最外縁鋼管の杭頭部に関する軸方向（曲げ）応力度波形を各モデルで比較して示している。ここで、骨組要素モデルの応力度は両端節点の応力度を平均化して評価している。図より、橋軸方向および直角方向地震波入力

表-5 フーチング天端の最大応答値の比較【直角方向】

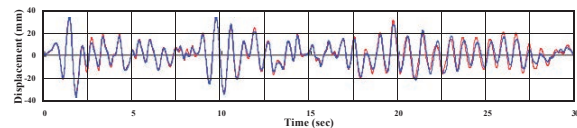
項目		骨組要素解析	固体要素解析
最大加速度	発生時刻(sec)	3.26	10.52
	応答値(gal)	283.47	251.19
最大速度	発生時刻(sec)	1.58	1.58
	応答値(kine)	31.25	30.30
最大変位	発生時刻(sec)	1.75	1.76
	応答値(mm)	36.10	36.40



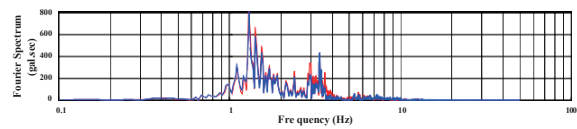
(a) フーチング天端の応答加速度波形



(b) フーチング天端の応答速度波形



(c) フーチング天端の応答変位波形



(d) 応答加速度波形に関するフーリエスペクトル

図-9 フーチング天端の応答波形に関する比較【直角方向】

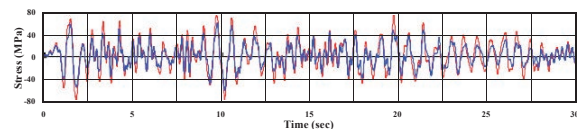


図-11 鋼管杭の軸方向応力波形に関する比較【直角方向】

時ともに発生応力度は骨組要素モデルが若干大きく評価されているものの、応答波形性状は良く一致している。なお、応力レベルは最大でも80MPa程度であり、いずれの場合においても降伏応力度には達していない。

5. 結論

本研究では、群杭基礎橋脚の基礎-地盤系を対象として、設計実務で一般的に用いられる集約バネモデルの精度を高めた骨組要素モデルの適用性について、別途実施した固体要素モデルと比較する形で検討を行った。

検討の結果、周辺地盤を多質点系せん断バネモデルで表現し、それを相互作用バネを用いて杭体と連結した骨組要素モデル（Penzien型モデル）を構築することで、固体要素モデルを用いた線形の地震応答解析結果を比較的精度良く再現可能であることが明らかとなった。

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

河川・港湾構造物

06.

異なる基礎形式を有する基礎

- 地盤系モデルの地震応答特性に関する一考察
地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計
に関するシンポジウム 講演論文集

第10回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 (2007年2月)

異なる基礎形式を有する基礎—地盤系モデルの地震応答特性に関する一考察

西 弘明¹・岡田慎哉²・京田英宏³・高畑智考⁴・小林竜太⁵・岸 徳光⁶

¹正会員 工博 (独) 寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

²正会員 工修 (独) 寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³正会員 工修 (株) 構研エンジニアリング 橋梁部 (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

⁴正会員 (株) 長大 札幌支店 技術部 (〒060-0031 札幌市中央区北1条東2丁目5-3)

⁵正会員 工修 (株) ドーコン 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

⁶フェロー 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

1. はじめに

実務設計において一般に実施されている橋梁の地震応答解析は、その簡便さから基礎—地盤系の影響を単純化した集約バネとしてモデル化する場合が多い¹⁾。しかしながら、構造物の地震時応答は基礎構造や周辺地盤の影響を大きく受けることから、実挙動を精度良く予測するためには基礎—地盤系の動的相互作用効果を考慮した連成解析が必要となる。

ここで、周辺地盤の影響を考慮した連成解析モデルとしては、二次元あるいは三次元有限要素モデル、骨組要素モデル、Penzien型(バネ—質点系)モデル等が挙げられる^{2),3),4)}。解析精度の観点からは有限要素モデルの適用が望ましいと考えられるが、解析規模等の理由から全てにおいて有限要素モデルを適用することは現実的に困難である。従って、実務での適用に配慮した場合には、比較的簡易な骨組要素モデルによって評価可能なモデルの構築が望ましい。

このような観点から、本研究では、基礎—地盤系モデルの動的相互作用効果を考慮した骨組要素モデルの適用性に関する基礎的な検討を実施した。ここで、本研究では、その適切なモデル化の手法に関する検討や妥当性の検証に資するための基礎データの収集を目的としていることから、3つの異なる基礎形式を検討対象とした。なお、骨組要素モデルの適用性検討は、別途実施した三次元有限要素解析(以下、固体要素モデル)と比較する形で行っている。

2. 解析対象とする基礎形式の概要

図-1には各基礎形式に関する概要を示している。

(1) 新石狩大橋 (P-1橋脚, 鋼管杭の斜杭基礎)

新石狩大橋 P-1 橋脚の基礎構造は、全長 37.0m、直径 812.8mm、板厚 12.7mm (杭頭から 8.8m 下方の位置で板厚が $t=9.5\text{mm}$ に変化) の鋼管杭基礎が計 12 本配置された斜杭基礎である。鋼管杭は、フーチングに対して 12.5° の角度で放射状に配置されており、それらが直径 10.0m、高さ 2.3m の円盤型のフーチングに結合されている。

(2) 石狩河口橋 (P-3 橋脚, 脚付き鋼管矢板基礎)

石狩河口橋 P-3 橋脚の基礎構造は、井筒部 12.5m、脚部 28.5m から成る全長 41.0m の脚付き鋼管矢板基礎である。井筒部には、板厚 16mm (杭頭から 10m、20m 下方の位置で板厚がそれぞれ $t=12.7\text{mm}$, $t=9.5\text{mm}$ に変化) の長杭が 30 本、板厚 12.7mm の短杭が 16 本の計 46 本配置されている。なお、鋼管直径はいずれも 812.8mm であり、これらはいずれも橋軸方向幅 10.9m、橋軸直角方向幅 22.5m、高さ 2.5m の小判型のフーチングに結合されている。

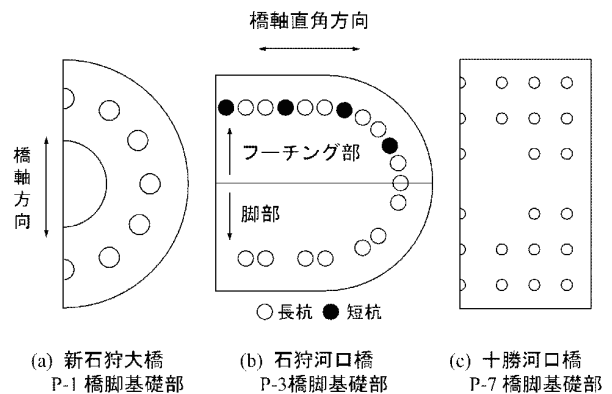


図-1 各基礎形式の概要図(半断面図)

(3) 十勝河口橋 (P-7 橋脚, 鋼管杭の群杭基礎)

十勝河口橋 P-7 橋脚の基礎構造は、全長 30m、直径 1,219.2mm、板厚 19mm (杭頭から 12.5m 下方位置で板厚が $t=14\text{mm}$ に変化) の鋼管杭基礎が計 38 本配置された群杭基礎である。杭基礎は、橋軸方向幅 22.8m、橋軸直角方向幅 21.0m、高さ 4.0m の矩形型のフーチングに結合されている。

3. 数値解析の概要

本数値解析では、基礎-地盤系モデルの地震応答特性評価を目的としていることから、橋脚躯体形状はモデル化せずフーチング上面までをモデル化した。

(1) 固体要素モデル

図-2には固体要素モデルの一例として、各基礎

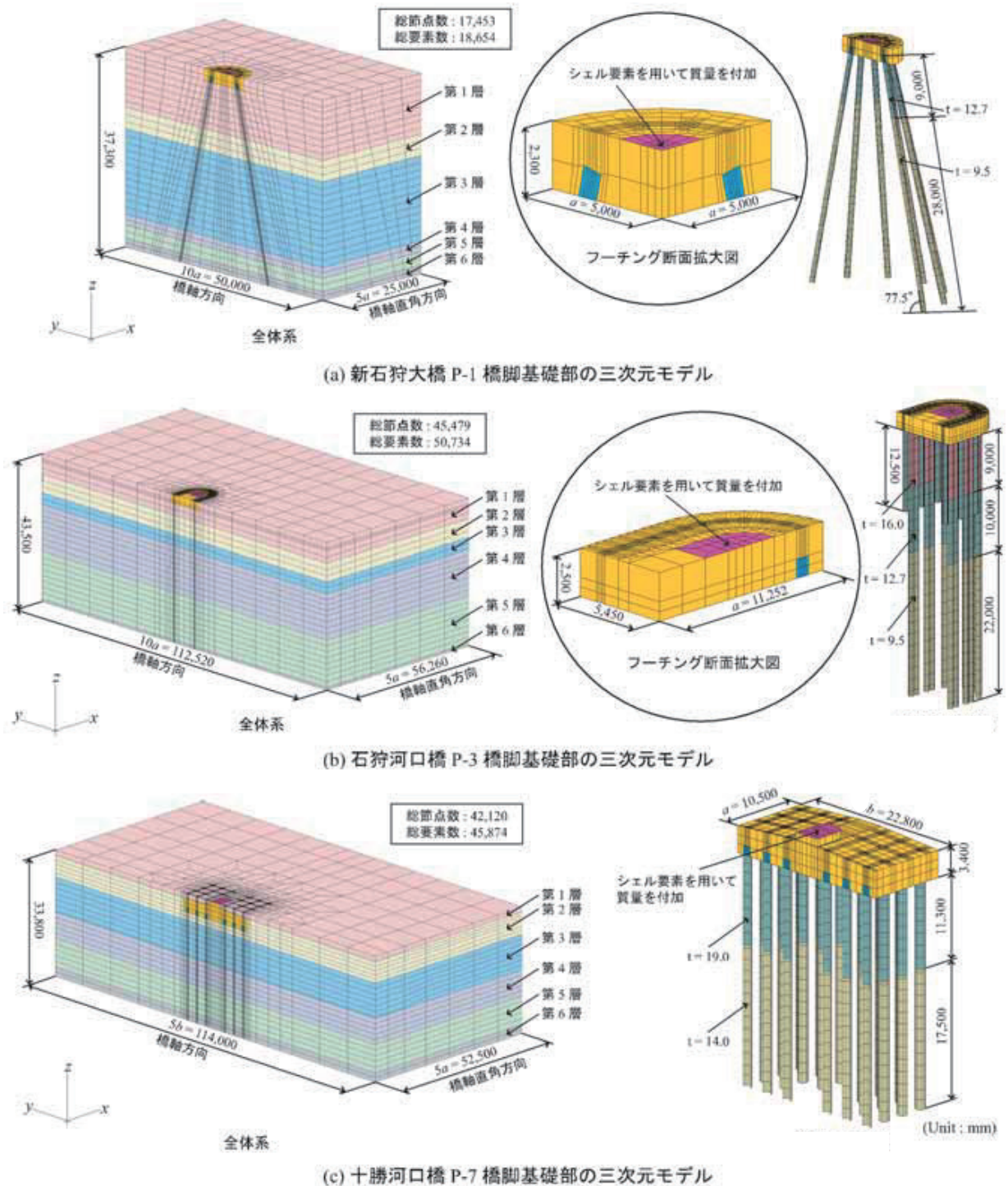


図-2 固体要素モデルの一例【橋軸方向地震波入力時】

形式に関する橋軸方向地震波入力時の解析モデルを示している。固体要素解析におけるモデル化の範囲は対称性を考慮した 1/2 モデルとし、周辺地盤にはフーチング幅の 5 倍の領域を考慮している。

使用した有限要素タイプは、フーチングおよび周辺地盤は 8 節点固体要素、鋼管は 4 節点シェル要素であり、周辺地盤と鋼管杭間はいずれも完全付着を仮定した。なお、石狩河口橋における鋼管矢板継手部は隣接する杭とシェル要素を用いて連結している。

境界条件は、モデル底面を完全固定とし、対称切断面はその面に対する法線方向変位成分を、周辺地盤の側面は鉛直方向変位成分を拘束した。また、フーチング天端には、上部構造質量と橋脚躯体質量に相当する質量をシェル要素を用いて付加している。

(2) 骨組要素モデル

図-3には骨組要素モデルの一例として、各基礎形式に関する橋軸方向地震波入力時の解析モデルを示している。解析モデルは、いずれも基礎構造系（杭基礎本体あるいは矢板基礎本体）と周辺地盤系から構成されており、基礎構造は梁要素、周辺地盤は質点とせん断バネでモデル化し、それらを相互作用バネを用いて連結させた連成系モデルである。

周辺地盤には、固体要素モデルの場合と同様に、フーチング幅の5倍の領域における質量とせん断剛性を考慮し、各地層が一体となって挙動するように同一深度における質点はいずれも剛体連結させている。また、フーチング下端の節点と各杭体の杭頭部節点に関しても全て剛体連結するものとした。

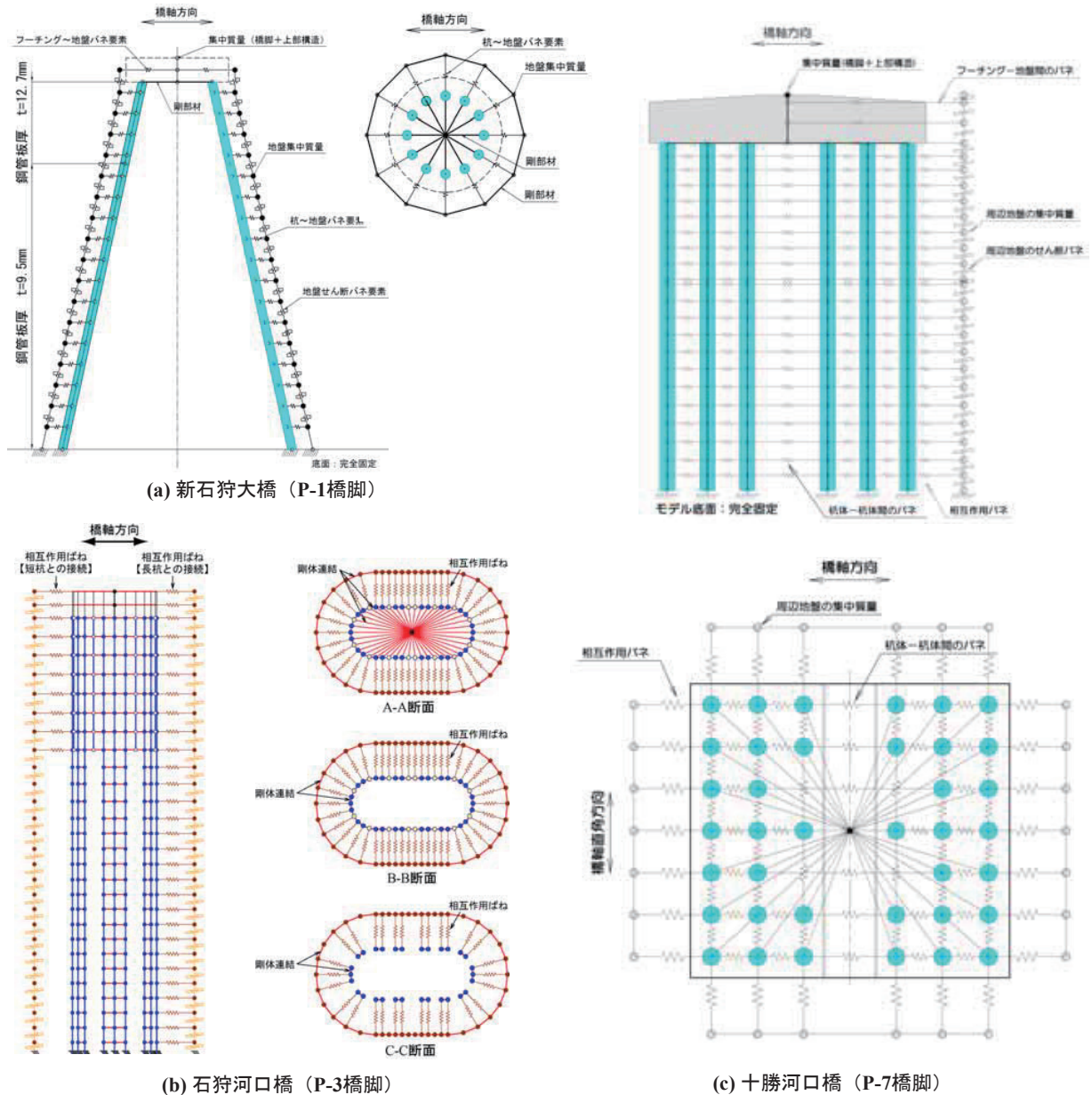


図-3 骨組要素モデルの一例【橋軸方向地震波入力時】

相互作用バネの剛性は、道路橋示方書・同解説IV【下部構造編】¹⁾に基づいて、杭基礎の水平方向地盤反力係数 k_H により評価するものとした。

境界条件は、モデル底面（杭下端および周辺地盤下端）を完全固定としている。また、フーチング天端の節点には、上部構造質量および橋脚躯体質量を集中質量として考慮している。

(3) 材料物性値

表-1にはフーチングおよび鋼管（矢板）の材料物性値を示している。表-2～4には当該地点における地質調査結果に基づいて設定した各橋梁の周辺地盤に関する各地層毎の物性値を示している。

(4) 地震応答解析法および入力地震動

地震応答解析は、骨組要素モデル、固体要素モデルともに直接積分法に基づいた線形時刻歴応答解析とした。ここで、本解析では、骨組要素モデルにはMIDAS-Civil2006⁵⁾、固体要素モデルにはABAQUS⁶⁾を使用している。数値積分は、骨組要素モデルにはNewmark β 法 ($\beta=1/4$)を適用し、積分間隔を1/100秒と設定して実施している。一方、固体要素モデルには陽解法を適用し、積分間隔はCourant条件を満足するように決定されている。粘性減衰は、骨組要素モデルの場合には1次と2次の固有振動数に対して $h=5\%$ となるRayleigh型減衰とし、固体要素モデルの場合には系の1次固有振動数に対して $h=5\%$ となる質量比例型減衰を採用している。

図-4には本解析に用いた入力地震動（加速度波形）を示している。本解析では、2003年十勝沖地震本震で観測された基盤面波形（十勝河口橋：A-2橋台基盤面GL-50m、橋軸方向成分）を用い、これを最大加速度100galに振幅調整して解析モデルの下端に入力している。また、実際にモデルに与えた入力波形は、観測波形に対して初期微動P波区間を除去した後の主要動S波区間の30秒間としている。

図-5には入力加速度波形のフーリエスペクトルを示している。図より、本地震波形は0.2Hz～0.4Hzの周波数帯が卓越していることが分かる。

4. 数値解析結果および考察

(1) 固有値解析結果

表-5には各解析モデルにおける固有値解析結果を最低次固有振動数に限定して示している。表より、橋軸方向、橋軸直角方向ともに解析モデルによる差は最大でも2%程度と小さく、骨組要素モデルと固体要素モデルは良く一致しているものと判断される。

表-1 フーチングおよび鋼管の材料物性値

部 材	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
フーチング	3.00E+04	0.20	24.5
鋼管(矢板)	2.00E+05	0.30	77.0

表-2 周辺地盤の物性値【新石狩大橋】

地層番号	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
第1層	73.1	0.493	19.1
第2層	254.5	0.487	19.0
第3層	203.9	0.491	16.7
第4層	254.5	0.487	19.0
第5層	303.3	0.488	17.4
第6層	898.1	0.477	19.1

表-3 周辺地盤の物性値【石狩河口橋】

地層番号	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
第1層	195.8	0.490	18.2
第2層	239.6	0.493	18.2
第3層	112.5	0.489	16.8
第4層	262.0	0.479	18.3
第5層	270.8	0.480	17.3
第6層	990.2	0.473	20.0

表-4 周辺地盤の物性値【十勝河口橋】

地層番号	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 ρ (kN/m ³)
第1層	23.5	0.490	12.0
第2層	53.7	0.490	17.0
第3層	90.6	0.490	14.0
第4層	92.2	0.490	17.0
第5層	235.1	0.490	19.0
第6層	317.6	0.400	20.0

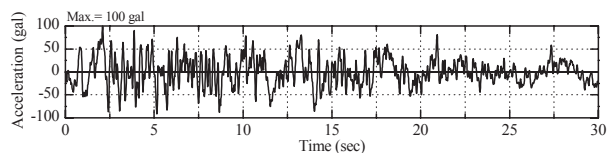


図-4 入力地震動【2003年十勝沖地震本震、基盤波形】

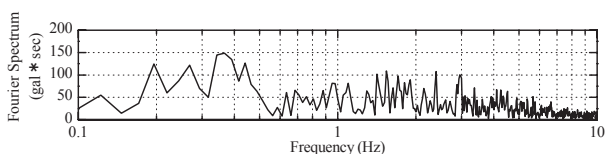


図-5 入力加速度波形のフーリエスペクトル

表-5 各モデルに関する最低次固有振動数の比較

橋梁名	橋軸方向			橋軸直角方向		
	骨組要素モデル A (Hz)	固体要素モデル B (Hz)	比率 (A/B)	骨組要素モデル C (Hz)	固体要素モデル D (Hz)	比率 (C/D)
新石狩大橋	1.290	1.300	0.99	—	—	—
石狩河口橋	1.250	1.250	1.00	1.250	1.260	0.99
十勝河口橋	1.224	1.250	0.98	1.284	1.260	1.02

※新石狩大橋は、対称構造かつ上部構造質量も各方向で同一であることから解析方向は1方向とする。

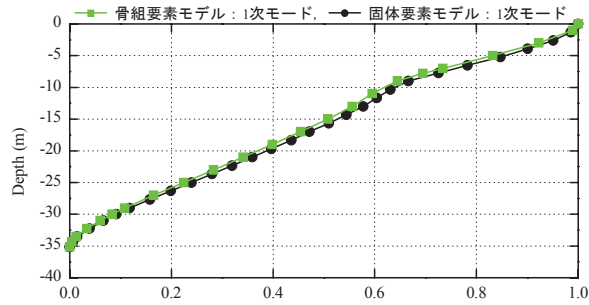


図-6 最低次固有振動モードの比較【新石狩大橋】

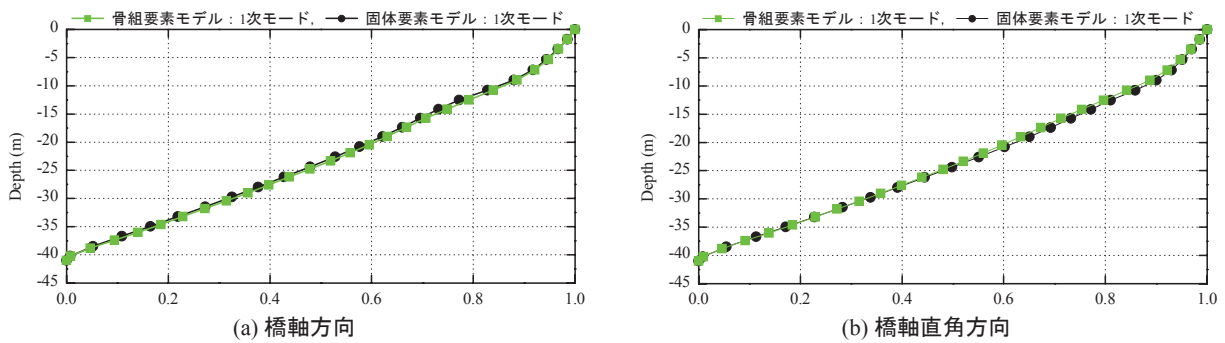


図-7 最低次固有振動モードの比較【石狩河口橋】

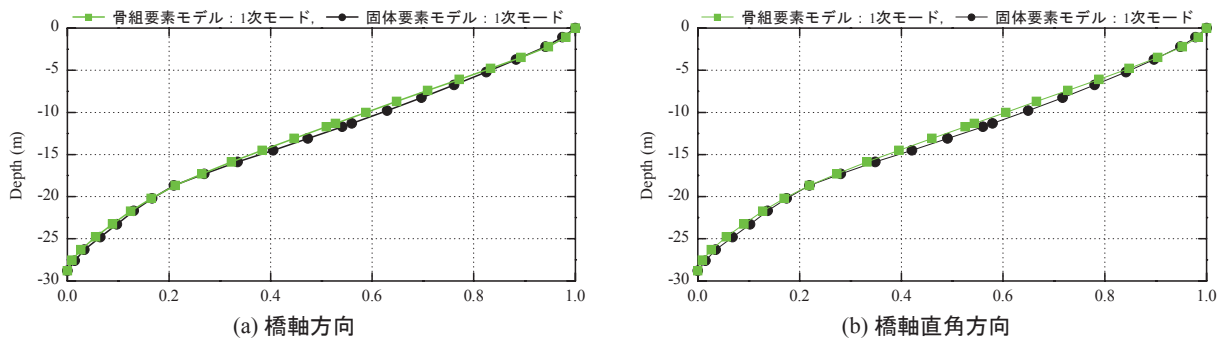


図-8 最低次固有振動モードの比較【十勝河口橋】

図-6～8には各橋梁の最低次固有振動モードを各解析モデルで比較して示している。図より、解析方向および解析モデルに関わらず、振動モード形状は周辺地盤のせん断変形を呈しており、地盤の水平

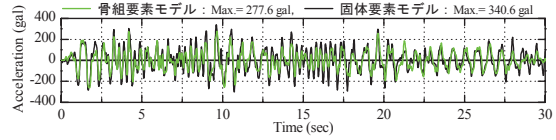
変位による影響が支配的であることが分かる。また、各モデルにおける固有振動モード形状を比較すると、一部で両者に若干の差異が見られるものの、その分布性状は概ね良く一致しているものと判断される。

(2) 地震応答解析結果

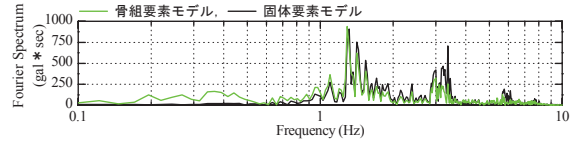
(a) フーチング天端における各種応答波形の比較

図-9～11には、各基礎形式に関する相対加速度、相対速度および相対変位に関する各種応答波形を骨組要素モデルと固体要素モデルで比較して示している。ここでは、紙面上の都合により、フーチングの天端節点に関する応答波形にのみ着目している。また、応答加速度波形に関しては、そのフーリエスペクトルも併せて示している。

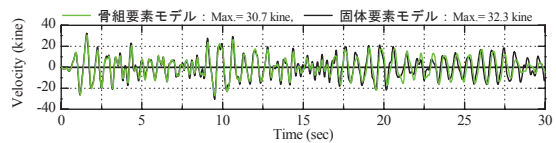
図-9 (新石狩大橋、鋼管杭の斜杭基礎) より、応答加速度波形に着目すると、最大加速度は固体要素モデルで340.6gal (発生時刻 $t=9.61$ 秒)、骨組要素モデルで277.6gal (発生時刻 $t=9.66$ 秒) であり、骨組要素モデルによる応答値が19%程度小さく評価されている。これは、骨組要素モデルでは3Hz近傍におけるフーリエスペクトルの振幅が固体要素モデルと比較して小さく評価されていることに起因するものと考えられる。しかしながら、応答波形性状に関しては両者で良く一致している。一方、応答速度波形に着目すると、最大速度は固体要素モデルで32.3kine (発生時刻 $t=1.58$ 秒)、骨組要素モデルで30.7kine (発生時刻 $t=1.59$ 秒) であり、応答波形性状



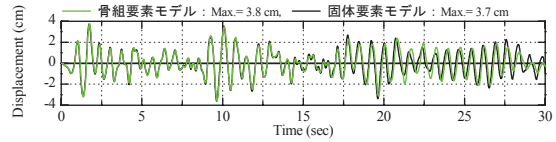
(a) 応答加速度波形



(b) 応答加速度波形のフーリエスペクトル

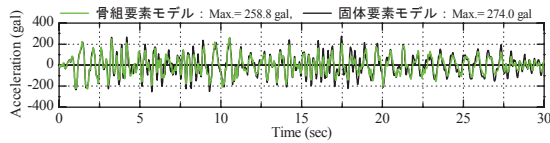


(c) 応答速度波形

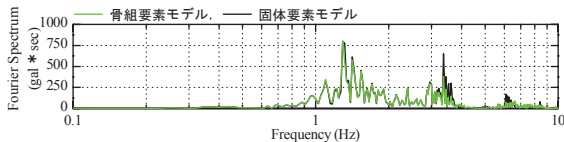


(d) 応答変位波形

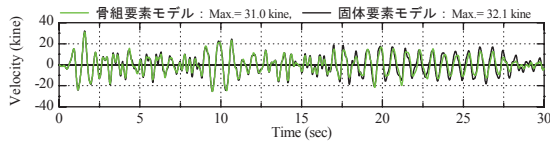
図-9 フーチング天端の応答波形の比較【新石狩大橋】



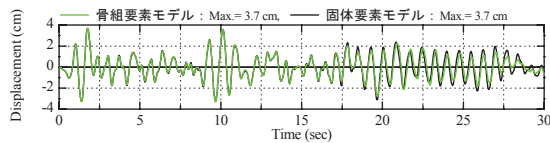
(a) 応答加速度波形



(b) 応答加速度波形のフーリエスペクトル

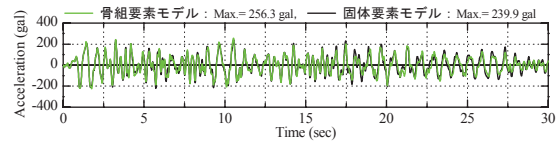


(c) 応答速度波形

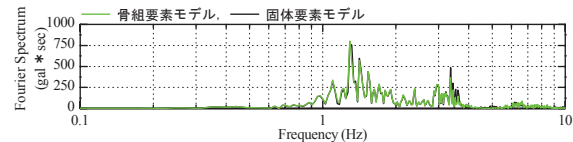


(d) 応答変位波形

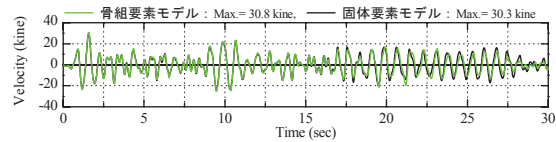
(1) 橋軸方向地震波入力時



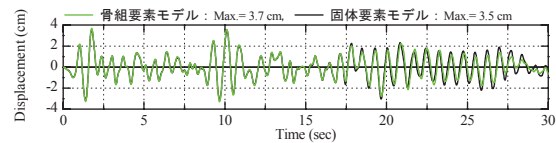
(a) 応答加速度波形



(b) 応答加速度波形のフーリエスペクトル



(c) 応答速度波形



(d) 応答変位波形

(2) 直角方向地震波入力時

図-10 フーチング天端の応答波形の比較【石狩河口橋】

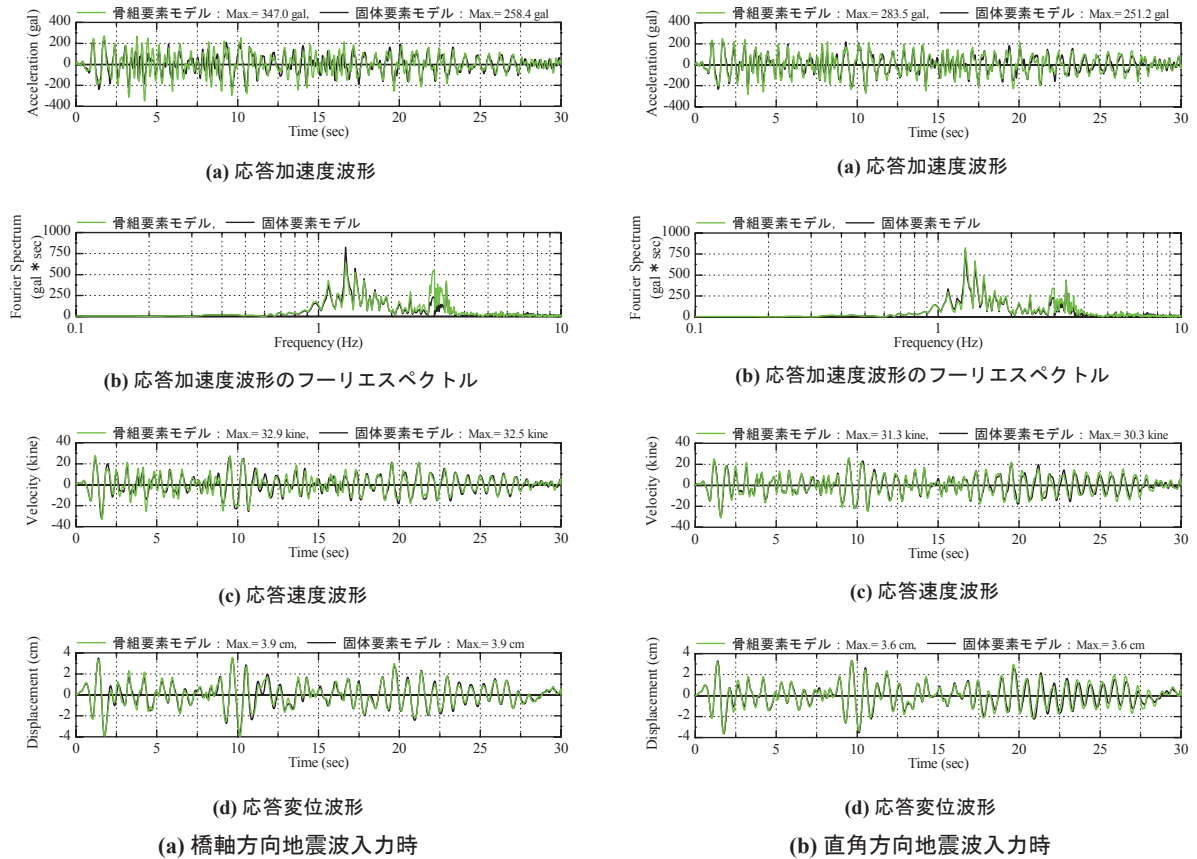


図-1-1 フーチング天端の応答波形の比較【十勝河口橋】

とともに両者は良く一致していることが分かる。

また、応答変位波形は、最大変位は固体要素モデルで3.7cm（発生時刻 $t=1.73$ 秒），骨組要素モデルで3.8cm（発生時刻 $t=1.75$ 秒）であり、応答速度波形と同様に最大応答値、応答波形性状ともに両者は精度良く一致している。これより、応答加速度波形に関しては両者で差異が見られるが、応答速度および応答変位波形に関しては、骨組要素モデルと固体要素モデルは比較的精度良く一致していることが分かる。

図-1-0（石狩河口橋，脚付き鋼管矢板基礎）より、応答加速度に着目すると、橋軸方向地震波入力時の最大加速度は固体要素モデルで274.0gal（発生時刻 $t=17.47$ 秒），骨組要素モデルで258.8gal（発生時刻 $t=10.53$ 秒），一方、直角方向地震波入力時には、それぞれ239.9gal（発生時刻 $t=10.54$ 秒），256.3gal（発生時刻 $t=10.53$ 秒）と、その差は5～6%であり両者は概ね良く一致している。応答波形に関しては、橋軸方向地震波入力時において全体的に骨組要素モデルが若干大きく評価される傾向にあるが、これは3Hz近傍のフーリエスペクトルの振幅が固体要素モデルと比較して小さいためと推察される。しかしながら、応答波形性状に関しては両者で良く一致しているものと判断される。

一方、応答速度および応答変位に関しては、いずれの地震波入力方向においても、最大応答速度は30kine程度、最大応答変位は3.7cm程度であり、最大応答値および応答波形性状ともに両者は良く一致しているものと判断される。

図-1-1（十勝河口橋，鋼管杭の群杭基礎）より、応答加速度波形に着目すると、橋軸方向地震波入力時の最大加速度は固体要素モデルで258.4gal（発生時刻 $t=10.54$ 秒），骨組要素モデルで347.0gal（発生時刻 $t=4.26$ 秒）であり、骨組要素モデルによる応答値が26%程度大きく評価されている。また、直角方向地震波入力時においても、それぞれ251.2gal（発生時刻 $t=10.52$ 秒），283.5gal（発生時刻 $t=3.26$ 秒）と橋軸方向地震波入力時と比較してその程度は小さいものの骨組要素モデルが大きく評価されている。応答波形性状に関しても、周期特性は概ね一致しているが、全体的に骨組要素モデルが大きく評価される傾向にある。一方、応答速度および応答変位に関しては、他の基礎形式と同様に、最大応答値および応答波形性状ともに両者は概ね良く一致している。

また、いずれの応答波形においても、橋軸方向地震波入力時は直角方向地震波入力時と比較して両者の整合性が低い。これは橋軸方向における上部構造

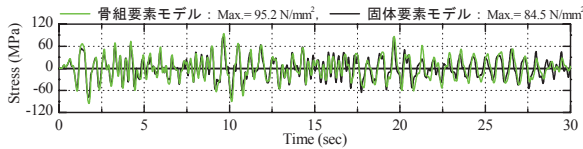
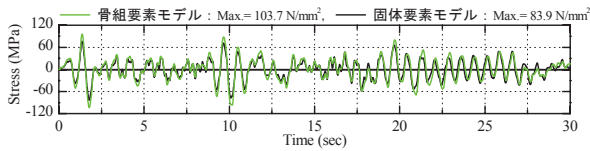
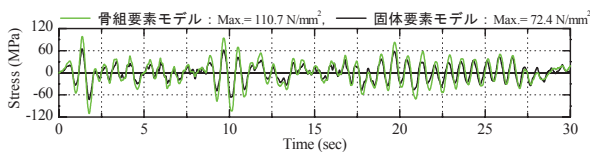


図-1 2 鋼管の軸方向応力波形の比較【新石狩大橋】

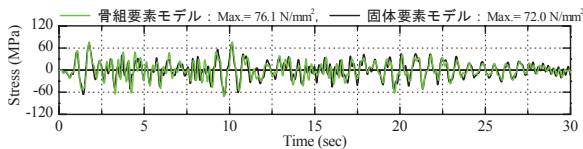


(a) 橋軸方向地震波入力時

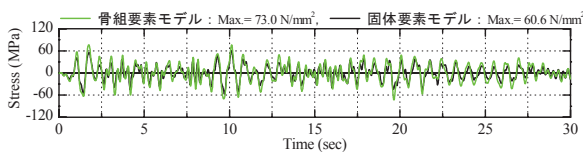


(b) 直角方向地震波入力時

図-1 3 鋼管の軸方向応力波形の比較【石狩河口橋】



(a) 橋軸方向地震波入力時



(b) 直角方向地震波入力時

図-1 4 鋼管の軸方向応力波形の比較【十勝河口橋】

質量（分担質量）が直角方向のそれと比較して2倍程度大きいことから（橋軸方向：6405.7t，直角方向：3042.7t），フーリエスペクトルからも推察されるように2次振動モードの影響を受けていることに起因するものと考えられる。しかしながら，固体要素モデルではその影響は小さく，いずれの地震波入力方向においても1次振動モードが卓越している。

以上より，いずれの基礎構造形式においても，応答加速度波形やそのフーリエスペクトルに関しては両者で若干の差異が見られるものの，応答速度および応答変位波形に関しては比較的精度良く一致することが明らかとなった。

(b) 鋼管杭の軸方向応力波形に関する比較

図-1 2～1 4には，各基礎形式に関する鋼管杭の軸方向（曲げ）応力度波形を骨組要素モデルと骨組要素モデルで比較して示している。ここで，着目した要素は杭体に最大曲げ応力が発生する部位とし，

新石狩大橋（斜杭基礎）および十勝河口橋（群杭基礎）は杭頭部の要素，石狩河口橋（脚付き鋼管矢板基礎）は杭下端の要素に着目している。

図より，いずれの基礎形式および地震波入力方向においても骨組要素モデルは固体要素モデルと比較して若干大きく評価されていることが分かる。しかしながら，その差は最大でも30%程度であり，応答波形性状に関しても両者は良く一致していることから，本解析モデルは杭体の発生応力度に関しても比較的精度良く再現可能であるものと判断される。

また，いずれの基礎形式においても，本解析における入力地震動に対しては降伏応力度には至っていないことが確認された。

5. まとめ

本研究では，基礎-地盤系を対象として，実務設計で一般的に用いられている集約バネモデルの精度を高めた骨組要素モデルの適用性について検証を行った。適用性検討は，3つの異なる基礎形式を対象として，別途実施した三次元有限要素解析（固体要素モデル）結果と比較する形で行った。

検討の結果，基礎構造を梁要素，周辺地盤を多質点系せん断バネで表現し，それらを相互作用バネを用いて連結させた連成系モデルを構築することで，三次元有限要素解析の線形地震応答を比較的精度良く再現可能であることが明らかとなった。

今後は，非線形応答の検証を実施するとともに，橋脚躯体や上部構造を含めた橋梁全体系（基礎-地盤-構造物系）モデルに対する検証も実施する予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり，室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻，構造力学研究室の吉澤佳展君には多大なる御支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV【下部構造編】，V【耐震設計編】，2002.3.
- 2) 土木学会：橋の動的耐震設計，2003.3.
- 3) 森 伸一郎：杭基礎構造物に対する質点ばね系モデルの提案とその実被害への適用，土木学会応用力学論文集，Vol.3，pp.609-620，2002.8.
- 4) 森，三浦，張，岸下，岩上，砂坂：杭基礎構造物の一斉地震応答解析，土木学会構造工学論文集，Vol.48A，pp.457-468，2002.3.
- 5) MIDAS Civil 2006 Manual，Ver.701，2006.
- 6) ABAQUS Analysis User's Manual，Ver.6.6，2006.

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

河川・港湾構造物

07.

RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃挙動に関する二次元骨組解析法の妥当性検討

コンクリート工学年次論文集

論文 RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃挙動に関する二次元骨組解析法の妥当性検討

牛渡裕二^{*1}・川瀬良司^{*2}・今野久志^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本検討では、RC製ロックシェッドにおける性能照査型設計法の確立を目的に、1/2縮尺RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験に対して、二次元骨組動的解析による再現を試みた。検討の結果、1) 二次元骨組動的解析を用いて、道路軸方向の有効長を考慮することで頂版部の応答変位は精度良く再現が可能となる。2) 各部材によって有効長が異なり、入力エネルギーの増加と反比例し有効長は小さくなる。3) 有効長を柱間隔として二次元骨組動的解析を用いて設計することで安全側の評価が可能となり、許容応力度設計法と比べ、より合理的な設計が可能となる。等が明らかになった。

キーワード: RC製ロックシェッド、性能照査型設計法、二次元骨組動的解析

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線における道路網には、落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設されている。その落石防護工の一つとしてRC製ロックシェッド(以後、ロックシェッド)が挙げられる(写真-1参照)。これらのロックシェッドは一般に落石対策便覧¹⁾に基づき、以下の要領で設計が行われてきた。すなわち、1) 設計対象となる落石の比高や斜面の状態から、落石衝突エネルギーを決定する。2) 決定された落石衝突エネルギーに対して、落石対策便覧で規定している衝撃力算定式を用いることにより最大衝撃力を決定する。3) この最大衝撃力を静的荷重に置き換え、二次元骨組静的解析により断面力を算定する。4) 求められた断面力に対して、許容応力度法を適用し、断面設計を行う。

上記設計法に対し、筆者らはロックシェッドの耐衝撃挙動を考慮した合理的な設計法を確立するために、実際のロックシェッドを用いた弾性範囲内での重錘落下衝撃実

験および数値解析的検討を実施し^{2),3)}、敷砂あるいは三層緩衝構造を設置した場合の耐衝撃挙動を詳細に把握している。また、これらの実験結果をもとに三次元衝撃応答解析を実施し、実挙動を考慮した設計法を提案しており、これらの成果は北海道開発局におけるロックシェッドの設計要領⁴⁾に取り入れられている。

一方、許容応力度法を用いた設計は、耐力的に過大でコスト高となる傾向があるため、近年、橋梁等の設計では従来の許容応力度法から性能照査型設計法に移行しつつあるのが現状である。ロックシェッドにおいても、同様に性能照査型設計法の確立が求められているところである。しかしながら、その設計は比較的簡易な設計法にしなければ、実務設計が困難になる。ロックシェッドの場合には、衝撃荷重を考慮した設計法が必要となるため、三次元弾塑性衝撃応答解析を基礎として、最終的に二次元解析への移行を図ることが望ましいと考えられる。二次元解析へ移行するためには、基礎となる三次元弾塑性衝撃応答解析の精度向上が必要となるが、緩衝工となる敷砂の構成則を一意に設定することが難しいなど、実挙動を詳細にモデル化するには緩衝工の構成則あるいは緩衝工を介した作用力についてのさらなる検討が必要である。

このような背景のもと、本研究ではロックシェッドの性能照査型設計法の確立に向けたアプローチの一つとして、実験で得られた重錘衝撃力が敷砂緩衝工を介してロックシェッドに作用する伝達衝撃力を設定し、二次元骨組モデルに入力して動的解析を実施した。さらに本解析結果を実験時挙動と比較し、今後の性能照査型設計法に基づいた設計手法への適応性について検討を行った。



写真-1 RC製ロックシェッドの一例

-
- *1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部次長 (正会員)
 - *2 (株) 構研エンジニアリング 取締役 博(工) (正会員)
 - *3 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 博(工) (正会員)
 - *4 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 ぐらし環境系領域 工博 (正会員)

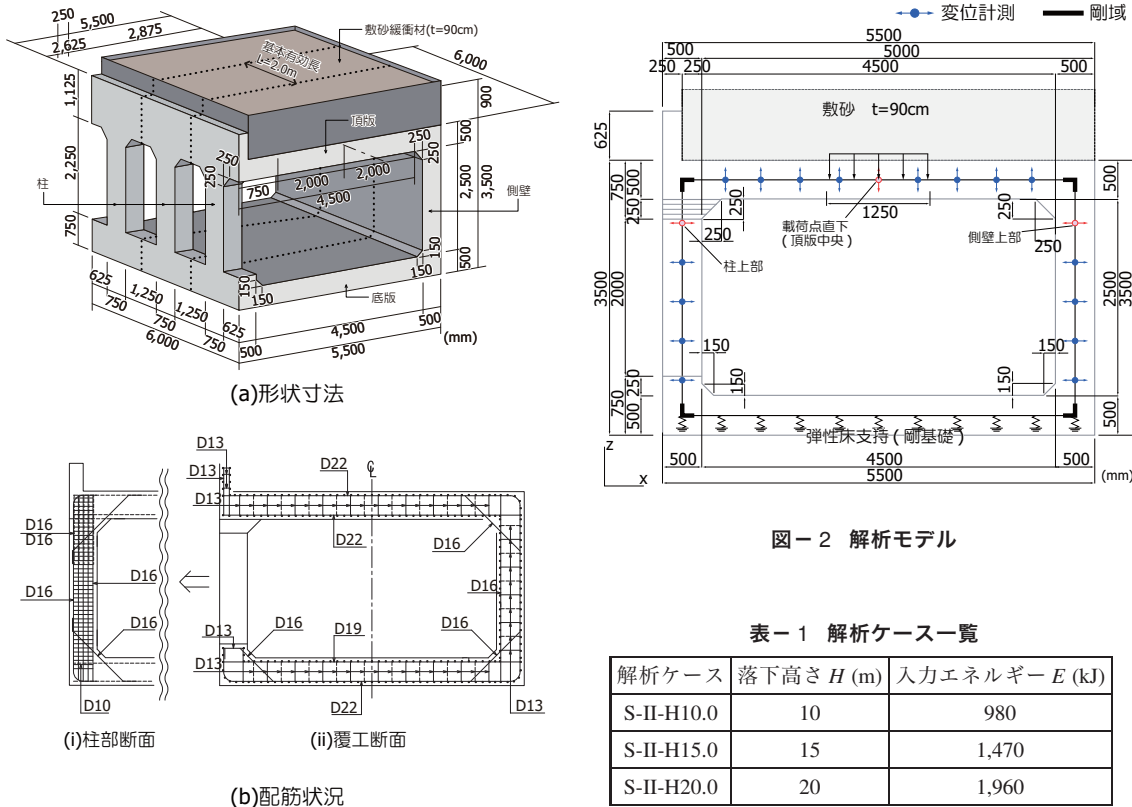


図-1 ロックシェッド模型の形状寸法および配筋状況

2. 検討条件

2.1 実験概要

一般的に、実RC製ロックシェッドは1ブロックが12 mの構造になっている。また、箱型断面を有しているが、左右非対称の柱部と側壁部、上下には頂版と底版による構造となっており、部材毎に剛性が異なる。このことから、本実験では、より実物大に近いロックシェッド模型(縮尺:1/2)として、頂版に対して45 kJの落石エネルギーに対応する断面を設計製作した(3.4にて後述)。敷砂緩衝工は、頂版上面に重錘径程度の $t=90\text{ cm}$ 厚さで設置している。

図-1(a)には、衝撃実験に使用したロックシェッド模型の形状寸法、(b)図にはその配筋状況を示している。ロックシェッドの断面形状は、頂版部材厚、側壁および柱部材厚が500 mm、内空幅4,500 mm×高さ2,500 mmとなっており、道路軸方向の1ブロック延長は6,000 mmである。頂版下面および上面の軸方向鉄筋にはD22を125 mm間隔で配置し、配筋筋は軸方向鉄筋の50%を目安に上面、下面共にD13を125 mm間隔で配置している。また、芯かぶりは75 mmとなっている。鉄筋の材質は全てSD345であり、降伏強度はD22が381~400 MPa、D13が378~397 MPa、コンクリートの圧縮強度は $f_c=28.3\text{ MPa}$ であった。

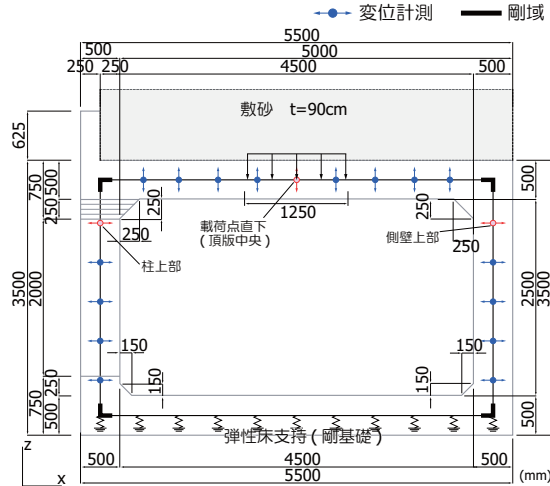


図-2 解析モデル

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	落下高さ H (m)	入力エネルギー E (kJ)
S-II-H10.0	10	980
S-II-H15.0	15	1,470
S-II-H20.0	20	1,960

実験は繰り返し載荷で行うこととし、重錘質量10,000 kgを、落下高さ $H=1.0\text{ m}$ 、 2.5 m 、 5.0 m 、 10 m 、 15 m 、 20 m 、 25 m で漸増させて実施した。ただし、落下高さ $H=25\text{ m}$ の際には、大きく破損することが予想されたため、変位計測は行わずに実験を実施している。

2.2 二次元骨組動的解析概要

表-1には、解析ケースの一覧を示している。本研究では、落下高さ $H=10\text{ m}$ 、 15 m 、 20 m の3ケースについて二次元骨組動的解析による検討を実施した。また、解析においては繰り返し載荷による供試体の損傷状態は考慮していない。

(1) 数値解析モデル

図-2に本数値解析に用いた解析モデル図を示す。骨組モデルは実験供試体の頂版・側壁・柱・底版コンクリート中央に配置するようモデル化している。部材の要素分割は、1要素長を各部材の有効厚程度とし、最小でも有効高の0.5倍程度になるように設定している。また、隅角部には、道路橋示方書に準拠し剛域を設定している。骨組モデルにはファイバー要素を使用し、各部材の断面寸法を設定している。ファイバー要素のセル分割については、図-3に示すようにセル要素の中心近傍に軸方向鉄筋が配置されるように設定している。断面設定の際には実験供試体延長6.0 mに対し、柱間隔(2.0 m)をモデル化し

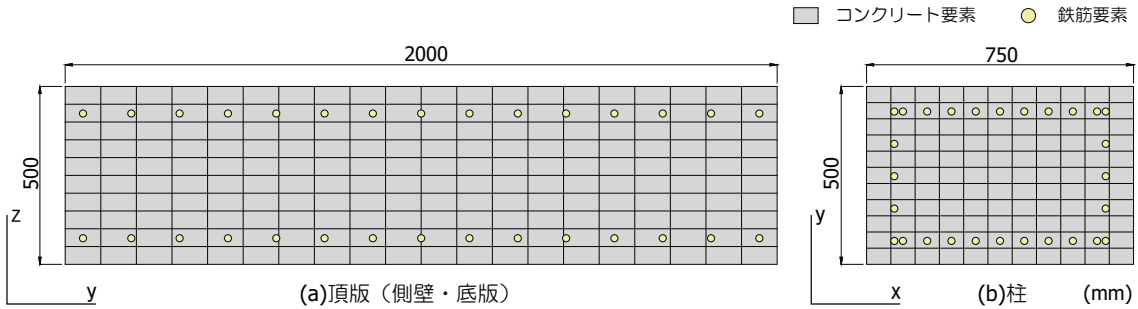
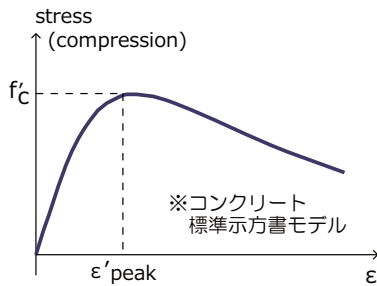
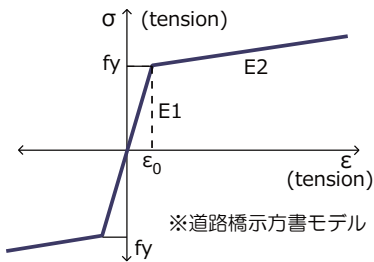


図-3 ファイバー要素断面のセル分割 (基本有効長)



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-4 材料物性モデル

ている。境界条件は底面を弾性床支持とし、圧縮方向のみバネを考慮している。ただし、剛基礎を模擬するため、バネ定数は十分に大きな値を入力している。頂版上の敷砂緩衝工の質量は要素に付加することで考慮している。

減衰定数は、質量比例と剛性比例を考慮するものとし、事前に本解析モデルを用いた固有振動解析を行い、鉛直方向最低次および2次の固有振動数までを考慮し $h = 10\%$ と設定している。なお、減衰定数の設定にあたり、異なる減衰定数を用いた事前解析を実施したところ、結果にほとんど差異が見られなかったことから、解析上の収束性に優れる $h = 10\%$ を減衰定数として採用した。

なお、骨組モデルの総節点数、総要素数はともに70である。また、本数値解析には MIDAS Civil 2009 Ver.7.4.0 を使用している。

(2) 材料物性モデル

図-4には、解析に用いた各材料物性モデルを示している。(a)、(b)図に、それぞれ、コンクリート要素および鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示しており、それぞれコンクリート標準示方書⁵⁾および道路橋示方書⁶⁾に則して設定している。なお、コンクリートの引張領域は考慮せず、コンクリート標準示方書に基づき、ピーク値を超えた場合の除荷・再載荷には、弾性剛性残存率を考慮することとした。

(3) 衝撃力入力モデル

図-5には、解析に用いた衝撃力波形を示している。入力波形は実験から得られた重錘衝撃力波形を簡易化し、載荷範囲にある節点に等分割して与えている。載荷範囲は敷砂に衝突する点を中心に重錘径で作用するものと仮定し、設定した(重錘径 $D = 125 \text{ cm}$)。なお、前述の通り、敷砂はその質量のみを頂版に付加しており、載荷荷重は直接頂版へ入力している。

(4) 有効長について

本論文では、有効長をパラメータとして検討を進めることとする。有効長は、立体構造物であるロックシェッドを平面骨組として計算する場合に、落石荷重により躯体に生じる曲げモーメントまたはせん断力が立体構造として計算した場合と等価になるように設定した平面骨組における道路軸方向の長さを示す。本解析では、有効長を求めるための基本有効長を、柱間隔 $L = 2.0 \text{ m}$ と設定している。

3. 衝撃実験結果と二次元骨組動的解析結果の比較

3.1 変位波形

図-6には、落下高さ $H = 15 \text{ m}$ の場合における載荷点直下(頂版中央)、柱上部および側壁上部の変位波形に関して、実験結果と有効長を変化させて行った解析結果を比較して示している。載荷点直下について見ると、解析結果の波形は、実験値に比べて若干早く立ち上がっているものの、第1波目から残留変位に至るまでほぼ同様の性

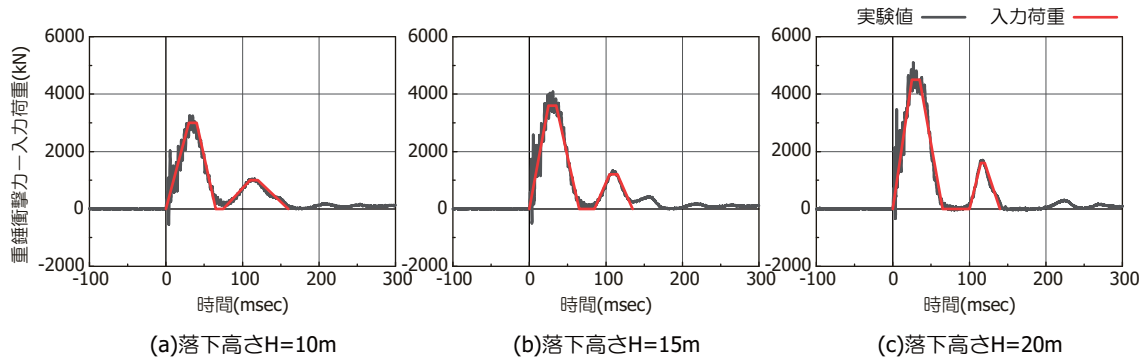


図-5 衝撃力入力モデル

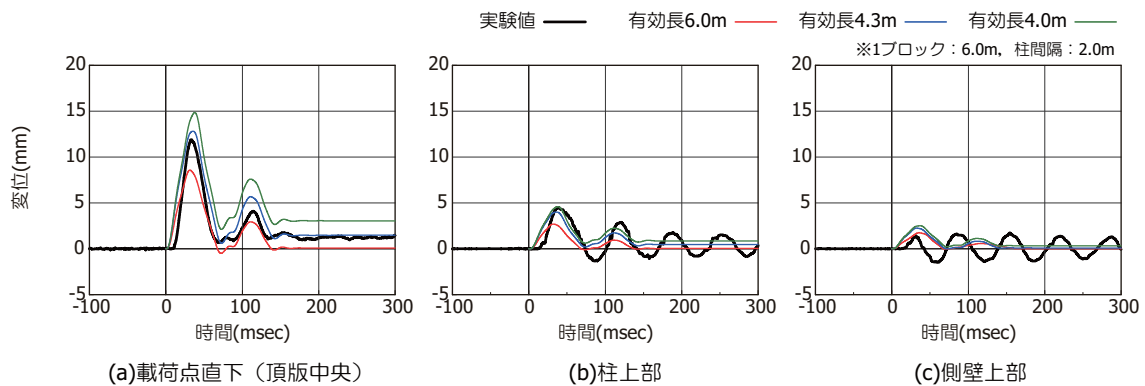


図-6 変位波形 (落下高さ $H = 15\text{ m}$)

状を示していることがわかる。最大変位および残留変位に着目すると、有効長が $L = 4.3\text{ m}$ の場合において、最大変位は実験結果が 11.9 mm に対して解析結果が 12.8 mm 、残留変位は、実験結果が 1.4 mm に対して解析結果が 1.5 mm となり、両者は概ね一致する結果となった。柱上部について見ると、実験結果では第1波目に最大値を示し、その後、減衰自由振動となっている。解析では第1波目の最大値までは概ね再現されているが、第2波以降は振動が収束し減衰自由振動は再現できていない。側壁上部については、実験結果では第2波目に最大値を示し、それ以降は柱上部と同様に減衰自由振動となっている。数値解析の場合には、第1波目に最大値に達し、解析結果は第2波以降は振動が収束し、柱上部と同様に減衰自由振動は再現できていない。一方、柱上部および側壁上部における最大変位および残留変位に関して、実験結果と解析結果を比較すると、柱上部については、有効長 $L = 4.0\text{ m}$ の場合に、最大変位は、実験結果が 4.5 mm に対して解析結果が 4.6 mm と同程度であり、残留変位についても減衰自由振動の振動中心近傍の値となりほぼ再現できていると判断される。側壁上部では、有効長 $L = 6.0\text{ m}$ とした場合に、最大変位は、実験結果が 1.7 mm に対して

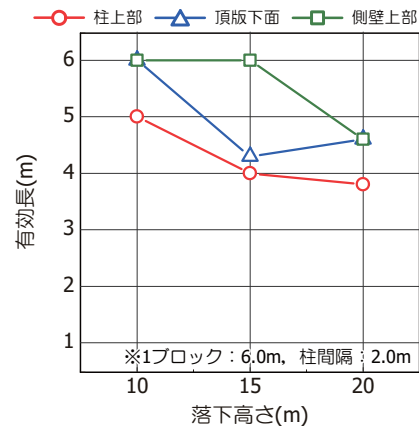


図-7 入力エネルギーと有効長の関係

解析結果が 1.6 mm と同程度、残留変位についても実験結果と同様に零となる結果が得られた。

3.2 入力エネルギーと有効長

図-7には、 $H = 10\text{ m}$ 、 15 m 、 20 m 落下時に着目して、載荷点直下(頂版下面中央)、柱上部および側壁上部における最大変位量を再現可能な有効長を二次元骨組を用い

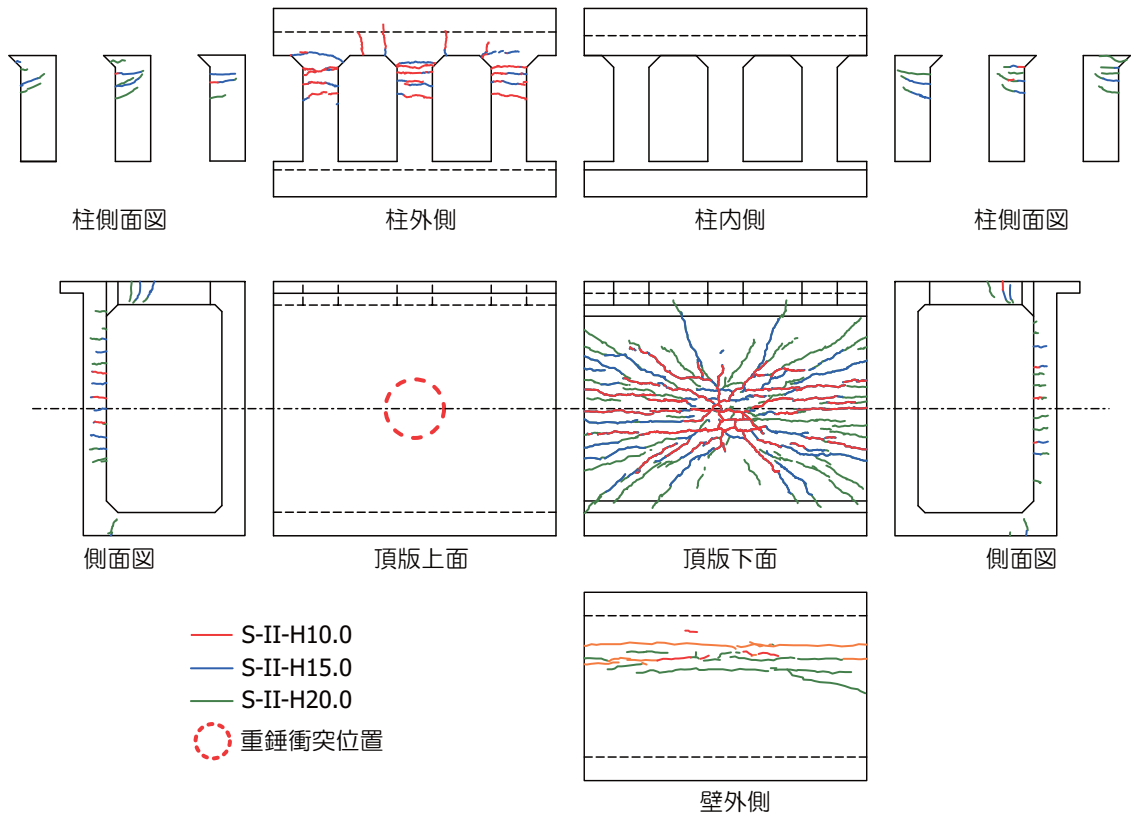


図-8 ひび割れ分布性状

表-2 鉄筋ひずみ最大応答値一覧

解析 ケース	頂版下面中央 ($\mu\epsilon$)	柱外側上端 ($\mu\epsilon$)	側壁外側上端 ($\mu\epsilon$)
S-II-H10.0	1,261 / 1,241	1,359 / 1,469	690 / 1,170
S-II-H15.0	1,806 / 1,947	2,204 / 1,825	1,206 / 1,283
S-II-H20.0	2,202 / 1,968	6,531 / 1,967	1,613 / 1,892

※ (実験結果 / 解析結果)

動的解析により算出し、落下高さの有効長との関係として示している。図より、落下高さの増加に対応して、有効長は小さくなる傾向を示すことが分かる。ただし、図-8に示されるひび割れ発生状況より、 $H = 20\text{ m}$ 落下の場合における頂版中央点に関しては、繰り返し载荷による損傷が進行し、剛性が低下したことで、発生した変位に比較して重錘衝撃力が小さく計測されたものと考えられることから、解析における有効長が過大に評価されたものと推察される。また、部材毎に有効長が異なる結果となっている。これは、部材毎に剛性が大きく異なることと、直接衝撃力を受ける部材と受けない部材とで局所応答と全体応答等による応答の差異が生じたことによるものと推察される。

終局状態に至ったと推察される $H = 20\text{ m}$ 落下時において、何れの部材においても有効長は柱間隔の 2.0 m より大きな値となっていることから、設計に際しては有効長 = 柱間隔とすることで安全側に評価可能であるものと考えられる。

3.3 鉄筋ひずみ

表-2には、鉄筋ひずみについて、载荷点直下、柱上部および側壁上部における実験結果と数値解析結果を比較して示している。なお、数値解析結果は、各部材での最大変位が実験結果と等しくなる時の有効長で解析を実施した結果である。载荷点直下である頂版下面中央に着目すると、 $H = 10\text{ m}$ および 15 m 落下時には、数値解析結果は実験結果と同程度の値が得られている。ただし、 $H = 20\text{ m}$ 落下時には、実験結果より小さな値となっている。柱上部に関しては、 $H = 10\text{ m}$ 落下時には、数値解析結果は実験結果とほぼ同程度であり、 $H = 15\text{ m}$ および 20 m 落下時には、実験結果より小さな値となっている。

側壁上部に関しては、数値解析結果は実験結果と同程度あるいは若干上回る値を示している。数値解析結果が実験結果より小さな値となるケースに着目し、図-8に示されるひび割れの発生状況と比較すると、何れのケー

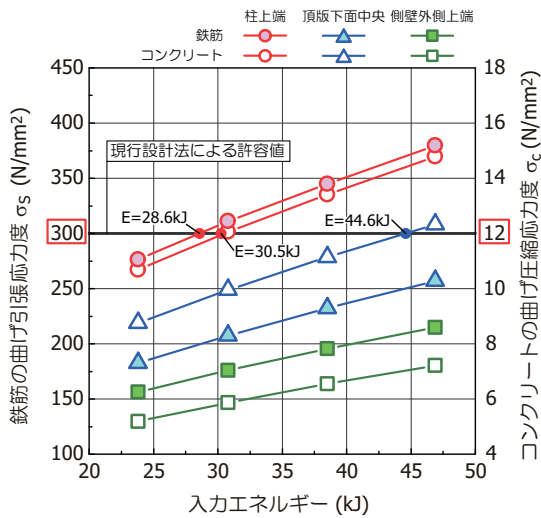


図-9 許容応力度設計法による解析結果

スにおいても、前述したように、繰り返し载荷での部材損傷により剛性が低下したことで、有効長が過大評価されたため鉄筋ひずみも小さな値になったものと考えられる。以上より、損傷を受けていない場合においては、本解析手法を用いることで、鉄筋のひずみにおいても大略評価可能となり、従って部材断面設計も可能であるものと判断される。

3.4 従来設計法で求めた耐力との比較

図-9には、従来設計法で求めた本模型の耐力（入力エネルギー）計算結果を示す。ここでは、まえがきに述べたとおり、落石対策便覧に準拠し1ブロックに1個の落石荷重を考慮し二次元骨組静的解析により算出した断面力を用いて許容応力度法によって算出している。この際の有効長は柱間隔としている。図より、本実験で用いた1/2縮尺RC製ロックシェッド模型における耐力は、入力エネルギーで示すと、柱部が許容値を超過する値がE=28.6kJ、頂版部でE=44.6kJとなった。表-2および図-8から、本模型の終局限界耐力をH=15m~20m落下時と考えると、この時の入力エネルギーEは1,470~1,960kJとなり、従来設計法は、30~40倍以上の保守的な設計となっていることが分かる。

以上より、本解析手法を用いて有効長を柱間隔とすることで従来設計法と比べて、より合理的な設計が可能になるものと推察される。

4. まとめ

本検討ではロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた基礎資料を得ることを目的に、実際のロックシェッドの1/2程度のモデルに対し、落石を模擬した重錘落下衝撃実験を実施した。また、有効長を変化させた二次元骨組動的解析を実施し、実験から得られた重錘

衝撃力を等分布荷重として簡易に入力することにより、変位波形や最大変位、残留変位などの挙動の整合性や鉄筋ひずみについて実験結果と比較検討を行った。更に、従来設計法である許容応力度法を用いて求めた耐力（入力エネルギー）と本解析を比較した。検討結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) 二次元骨組動的解析を用いて、有効長を考慮することで頂版部の応答変位は精度良く再現可能となる。ただし、側壁および柱の減衰自由振動は再現できなかった。
- (2) 各部材によって有効長は異なり、入力エネルギーが増加すると有効長は小さくなる傾向を示す。
- (3) 本模型の終局限界耐力は、従来までの設計法（許容応力度法）で求めた耐力（入力エネルギー）に対して30~40倍の安全率を有している。
- (4) 二次元骨組動的解析を用いて、有効長を柱間隔とすることで安全側の評価は可能となり、許容応力度設計法と比べ、より合理的な設計が可能となる。

本検討においては、ロックシェッド模型への重錘落下実験に対し、実験から得られた重錘衝撃力波形を作用荷重として、簡易に作用させることで数値解析を実施した。破壊性状が曲げ破壊型の場合においては、载荷点直下における数値解析結果は、比較的精度良く実験結果を再現できることが明らかになった。一方、柱および側壁については再現性が低いことも明らかとなった。今後は、ロックシェッドの合理的な性能照査型設計法の確立に向けて、三次元衝撃応答解析を用いた検討を進めると共に、より簡易な解析モデルを用いた場合に対して、有効長の決定方法や支持条件、モデル化等に関する検討が必要であるものと考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) 岸 徳光，中野 修，松岡健一，菅田紀之：RC覆工の衝撃応答解析手法の適用性に関する実証的検討，土木学会論文集，第483号，pp97-106，1994.1
- 3) 岸 徳光，佐藤昌志，今野久志：敷砂や三層緩衝構造を設置した場合の柱式RC覆道の衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1773-1782，1998.3
- 4) (社)北海道開発技術センター：道路防災工調査設計要領（案）落石対策編，2001.3.
- 5) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007.3.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2002.3.

