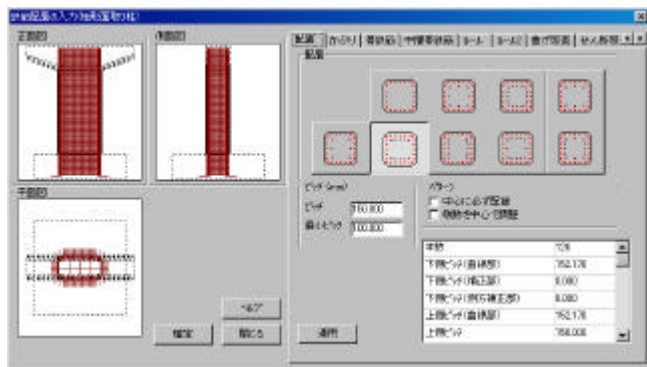


UC-win/RC & UC-win/WCOMD 連動機能による RC 橋脚の耐震性能照査例

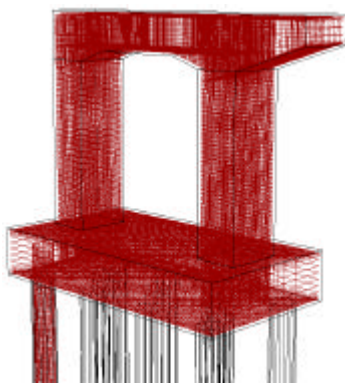
1. はじめに

UC-win/RC 概要：ラーメン橋脚、張り出し式・壁式橋脚、逆T式・重力式橋台、2連・1連BOX、逆T式・L型擁壁の直接基礎、杭基礎をサポート。杭基礎保有耐力、ラーメン橋脚面内保有耐力照査が行え、震度法から保有耐力法までの詳細設計が可能です。高速な3D表示、快適なレスポンスを最大限に追求。構造物モデルのソリッド表示、配筋状態のワイヤーステール表示、プロジェクト全体の3次元表示が可能。3面図、配筋断面図も詳細出力が可能です。

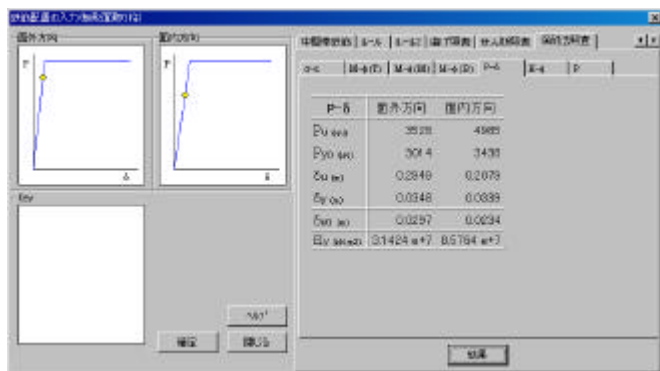
UC-win/WCOMD 概要：東京大学コンクリート研究室で開発された、有限要素法（FEM）による鉄筋コンクリート構造物の2次元非線形動的解析/静的解析の解析プログラムWCOMDを、フォーラムエイトが製品化。コンクリートに関する数多くの実験と理論的検証で得られた結果に基づいた精度の高い構成則を用いています。この構成則は日本だけでなく海外においても非常に高い評価を得ており、ひび割れを生じた様々な鉄筋コンクリート構造物の2次元非線形動的解析/静的解析を精度良く行うことが可能です。また、非常に操作性のよいメッシュジェネレータ UC-win/Mesh を備えています。



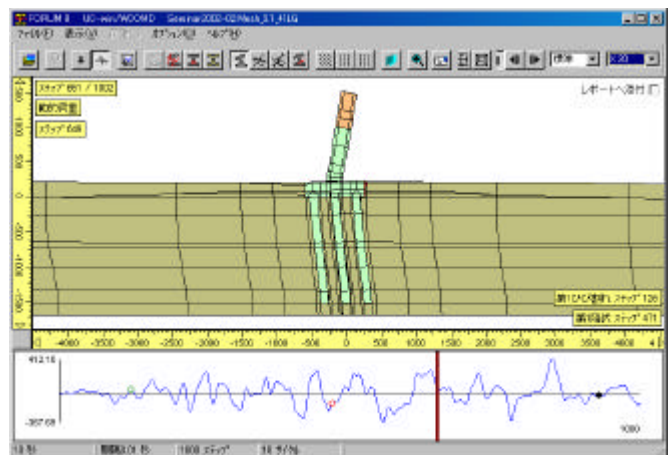
配筋入力画面



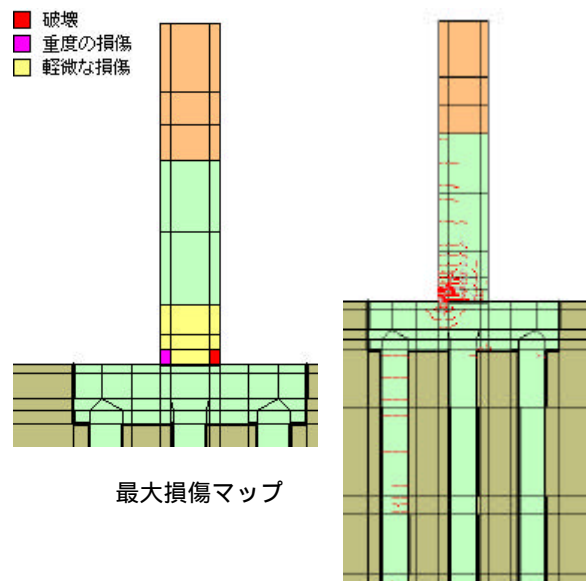
橋脚形状の配筋状態のワイヤーステール表示



水平力 - 水平変位 (道路橋示方書 V 耐震設計編準拠)



変位図アニメーション



最大損傷マップ

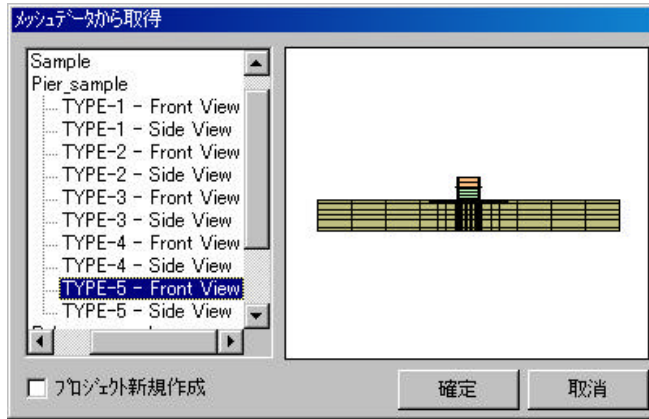
ひび割れ図 (アニメーション可)

2. 連動の仕様について

1) UC-win/RC から連動可能なモデル

- ・単柱橋脚[Pier]・・・橋軸方向および橋軸直角
- ・ラーメン橋脚[Rahmen]・・・橋軸直角のみ

の2種である。ただし、杭・地盤を含むモデルはこれも連動する。(橋軸方向=面外= Side View、橋軸直角方向=面内= Front View)



UC-win/Mesh のインポート画面

2) 連動により作成されるメッシュデータの仕様(抜粋) 詳しくはUC-win/RC のヘルプを参照。また、連動しないもの(下線で示したもの)はUC-win/Mesh で編集の必要がある。

A. 上部工

- ・弾性要素でモデル化
- ・重量は橋脚が受け持つ死荷重(D)から決定
(「上部工反力の入力」で入力)
- ・要素の高さは慣性力作用位置により決定
(「上部工反力の入力」で入力)

B. 支承

- ・完全固定条件
- ・ラーメン橋脚は荷重載荷位置を考慮
(上部工反力の入力)

C. 柱高さの要素分割

- ・道路橋示方書耐震設計編の塑性ヒンジ長 L_p を用いて、単柱橋脚は柱基部、ラーメン橋脚は柱上下端部の L_p 分を2分割
- ・その隣接要素の長さは L_p (L_p は自動計算)

D. 柱幅の要素分割

柱の断面形状は矩形・面取り・円形・八角形・小判の形状があり、

- ・橋軸方向：矩形・面取りは3分割、他5分割
- ・橋軸直角方向：矩形は3分割、他5分割

また、柱最外縁部分の要素の幅は

- ・1段配筋；かぶり+ ・かぶり
- ・2段配筋；かぶり+ 離れ+ ・かぶり
(: 任意 使用材料および設計条件・・・デフォルト値推奨)

E. 柱のオーバーラッピング

- ・中間帯鉄筋がない場合、無筋コンクリートとRC要素をオーバーラッピングする

F. 地層

- ・杭と地層を入力すると、杭・地盤を含めたメッシュデータを作成
- ・直接基礎 (=杭の入力なし) の時は、地盤のメッシュデータは作成されず、フーチング底面を固定とする
- ・杭先端までの地層を平行層でモデル化
- ・地盤底面は固定条件
- ・地盤幅は \times 杭長
(「使用材料および設計条件」で入力
杭長 「形状寸法の入力」で入力)
- ・動的解析に必要な地盤の側方境界(地盤オーバーラッピングによる)を自動で生成
- ・連動で使用する土質データは、N値、土質、飽和単位体積重量 γ_{sa} [地下水位以深]、湿潤単位体積重量 γ_t [地下水位以浅]、地下水位(地層の入力：データ1)
- ・地盤の奥行きはフーチングの奥行きと同じ

G. 杭

- ・杭先端の支持条件は固定条件
- ・杭の鉄筋比は連動しない
- ・杭 - フーチング間の RC ジョイントの特性(鉄筋比・鉄筋径・定着長)は連動しない
- ・杭種が場所打ち杭以外の場合は、弾性要素でモデル化
- ・杭 - 地盤間のユニバーサルジョイントは自動作成されない

H. その他注意点

- ・UC-win/Mesh のメッシュ設定はデフォルトでは基本モード
- ・UC-win/Mesh でRC要素の編集では、鉄筋比と有効鉄筋比があるが、デフォルトでは鉄筋比 = 有効鉄筋比としている
- ・上部工死荷重と慣性力に寄与する上部工重量が異なる場合は、上部工の弾性要素の厚さを変更して

慣性力に寄与する上部工重量になるようにし、不足する死荷重分は、UC-win/WCOMD 解析時に静的荷重により導入すること

- ・矩形断面の場合、壁式あるいはそれに近い形状橋脚の時、4 分割以上に変更すること。橋軸直角方向 (=面内=Front View) のデフォルトの分割数 (3 分割) は精度不足の場合がある。
- ・UC-win/WCOMD の解析で使用する応力ひずみ曲線を、道路橋示方書耐震設計編のそれに近づけるには、UC-win/Mesh のメッシュ設定をアドバンスモードとし、UC-win/Mesh で定義する f_c' および $peak$ を、道路橋示方書の cc および cc と同じにするとよい。
- ・壁式橋脚、あるいはそれに近い形状の橋脚の場合 UC-win/Mesh のメッシュ設定をアドバンスモードとし、中間帯鉄筋が定義されている (オーバーラッピングしている) RC 要素の引張硬化 / 軟化係数を 2.0 程度 (無筋要素により近い) にしたほうがよい。これは、断面が比較的大きくなると、柱内部ではほぼ無筋状態に近いためである。
- ・フーチング部分において、柱主鉄筋定着部分の鉄筋比が自動で定義されない。従って、柱 - フーチング付近で大きな損傷が発生する場合は、定着鉄筋分の鉄筋比をフーチングに定義したほうがよい。
- ・杭先端の条件は固定としてるが、フーチングの回転をふくめて橋脚の水平変位を正しく表したい場合は、UC-win/Mesh にて杭先端に地層を追加し、地盤要素で杭先端を支持させるほうがよい。

3. UC-win/WCOMD による非線形動的解析

1) 対象モデル

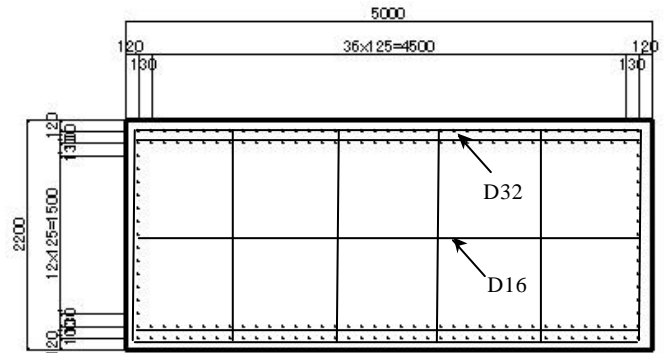
次に示す、「道路橋の耐震設計に関する資料平成 9 年 3 月」記載の RC 橋脚 P1 を対象とする。ただし、支承条件は固定条件として動的解析を行なった。

- ・重要度 : B 種
(許容塑性率の算出に用いる安全係数 $=3.0$ [タイプ I] 1.5 [タイプ II])
- ・地域区分 : A 地域 (地域係数 $C_z=1.0$)
- ・橋脚 : T 型橋脚
- ・基礎 : 場所打ち杭
- ・使用材料 : 橋脚 : $ck=21N/mm^2$, SD295
フーチング : $ck=21N/mm^2$, SD295

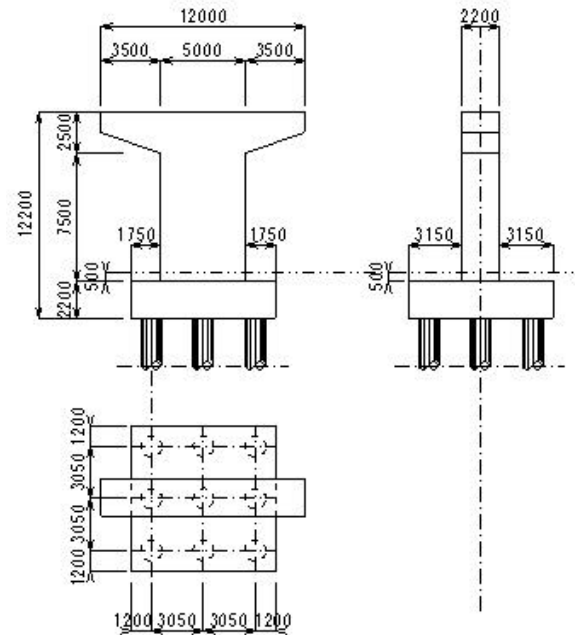
杭 : $ck=24N/mm^2$, SD295

・地盤条件 : II 種地盤

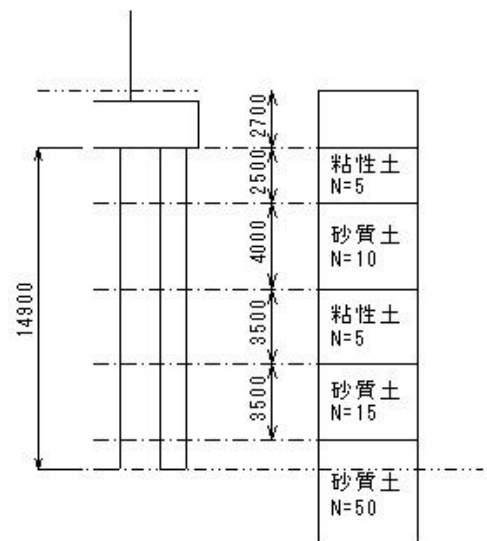
橋に影響の与える液状化は生じない



柱断面主鉄筋配筋図

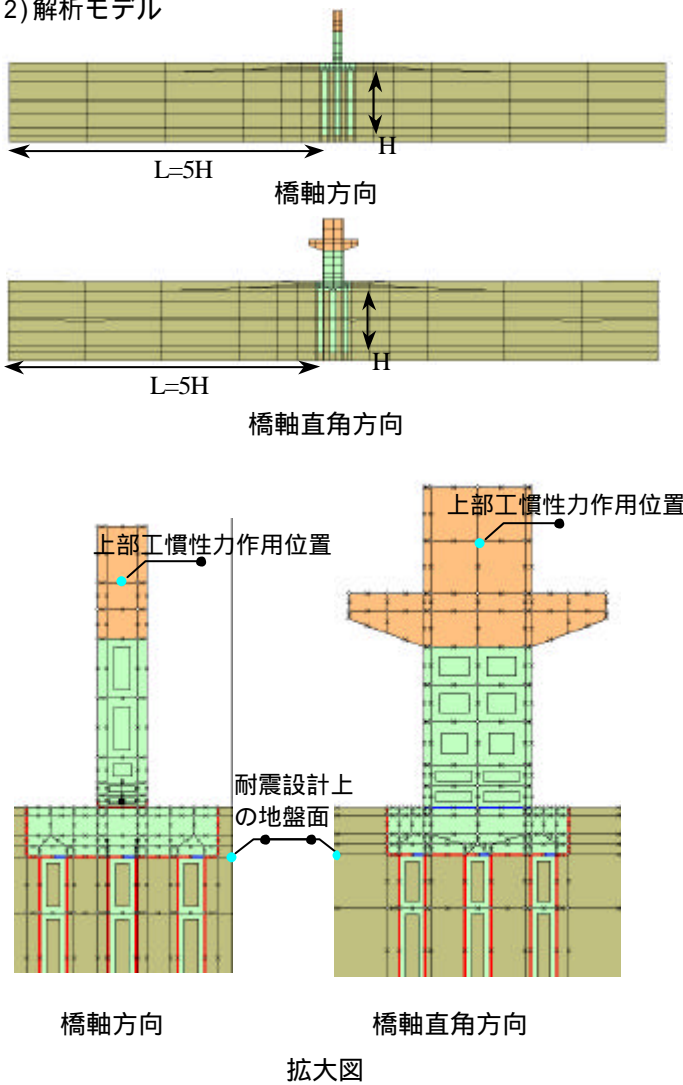


橋脚一般図



土質柱状図

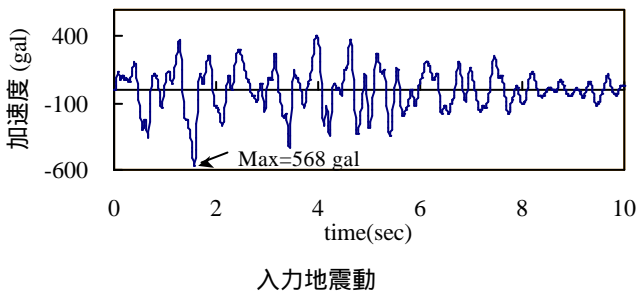
2) 解析モデル



3) 入力地震動

本来ならばタイプ I 地震動、タイプ II 地震動、両方について行なうべきであるが、この例ではタイプ II 地震動に対してのみ行った結果を示す。

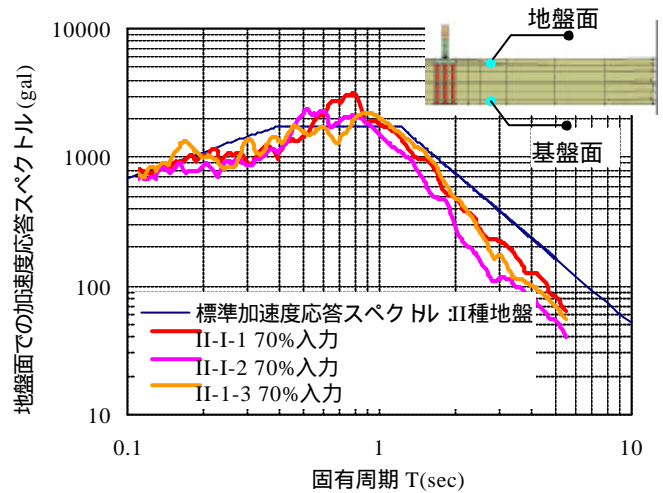
「道路橋の耐震設計に関する資料平成 9 年 3 月」記載の II-I-1 波形（10 秒間）の振幅を 70% にした波形を入力地震動とした。



注意：基盤からモデル化した解析モデルの入力地震動は、基盤（解放基盤が一般的）で定義される波形を使用する必要がある。一方、「道路橋の耐震設計に関する資料平成 9 年 3 月」記載の“時刻歴応答解析に用いる標準地震入力例”は、地表面付近での観

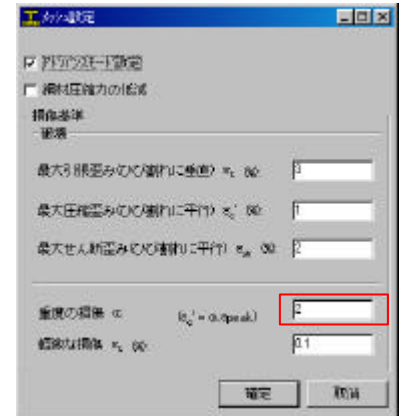
測波形を振幅調整した波形である為、基盤からモデル化した場合の入力地震動としては、通常そのまま使用することはできない。

この事例では、基盤波形が入手できない場合の対処事例として、最も硬質な I 種地盤で定義される地震動を、基盤の地震動と考えることにした。そして、基盤に I 種地盤の地震動を入力した際、耐震設計上の地盤面での加速度応答スペクトルが、対象地盤種別での設計スペクトルと同程度になるように、入力地震動の加速度を調節している。



4) 破壊・損傷基準の設定

次式の により、重度の損傷基準（圧縮最大ひずみ）を定めた。



$$c' = \begin{cases} 1 & (\text{タイプ I 地震動}) \\ 2 & (\text{タイプ II 地震動}) \end{cases}$$

上記、重度の損傷基準に達した時の損傷状態は、道路橋示方書が想定する B 種の橋の許容変位時の損傷状態「被りコンクリートが大きく剥落する前の状態」（目標とする耐震性能）と考え、これを UC-win/WCOMD における照査条件とした（参考資料-1 参照）。

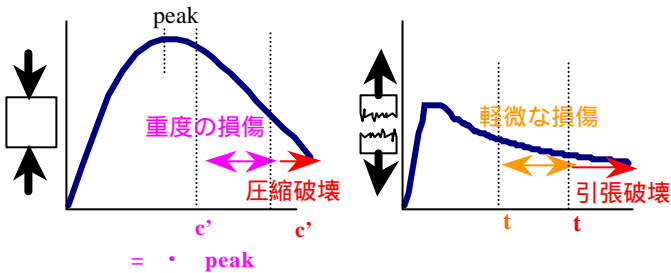
従って、橋脚の耐震性能が満足される照査条件は次表ようになる。

表 - B 種の橋に対する照査条件

地震動タイプ	(道示 V)許容塑性率の算出に用いる安全係数	照査条件
タイプ I	3.0	重度の損傷無 鉄筋降伏は許容 残留変位は許容残留変位以内
タイプ II	1.5	

破壊・損傷基準について

重度の損傷は圧縮ひずみによって、軽微な損傷はひび割れ面に鉛直な引張ひずみによって決定される。破壊基準はデフォルト値 ($t=3\%$ 、 $c'=1\%$ 、 $sh=2\%$) を使用するが、これは破壊の基準値であり照査には影響しない。



圧縮応力 - ひずみ曲線

引張応力 - ひずみ曲線

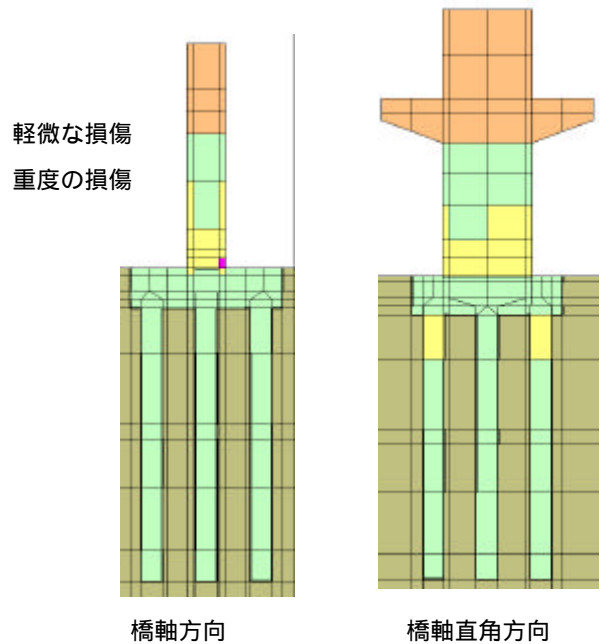
5) 動的解析による照査結果と設計変更

橋軸方向は重度の損傷が発生したが、橋軸直角方は、損傷は生じなかった。また、残留変位については許容残留変位 (橋脚基部から上部工慣性力作用位置までの高さの 1/100 10cm) を十分下回っている。

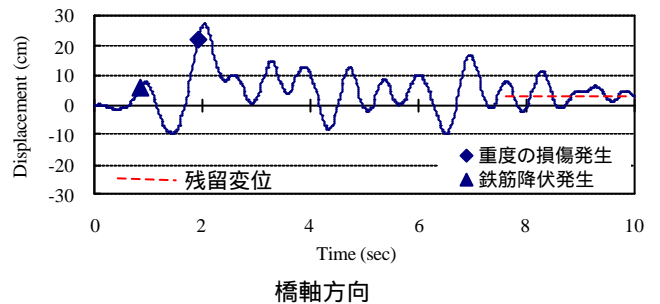
照査結果をまとめると以下ようになる。

表 照査結果-1

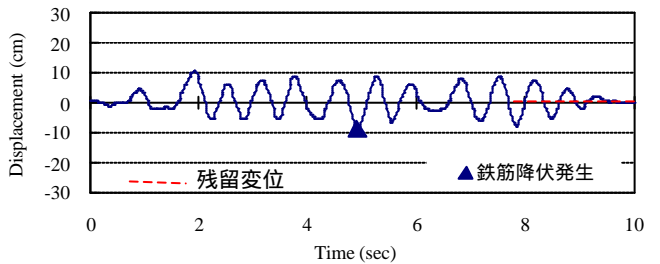
地震動タイプ	損傷状態	照査結果
タイプ II	橋軸 重度の損傷 鉄筋降伏 残留変位 < 許容残留変位	N.G.
	橋軸直角 軽微な損傷 鉄筋降伏 残留変位 < 許容残留変位	O.K.



(a) 最大損傷マップ



橋軸方向



橋軸直角方向

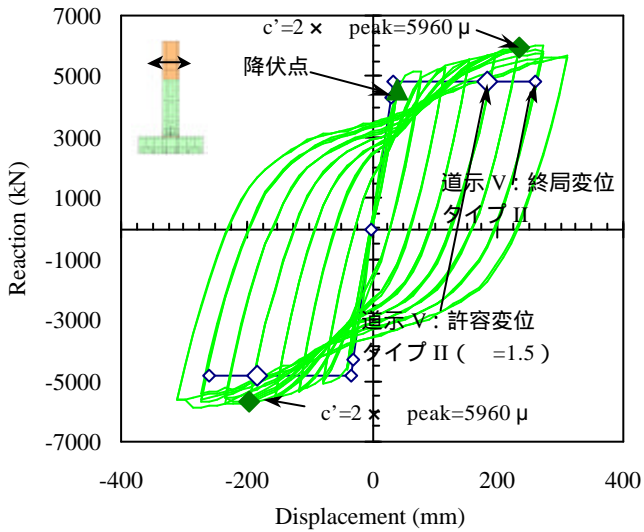
(b) 橋脚躯体の水平変位

橋脚躯体の水平変位・・・上部工慣性力作用位置の水平変位と橋脚基部における水平変位の差 = 相対変位を示す

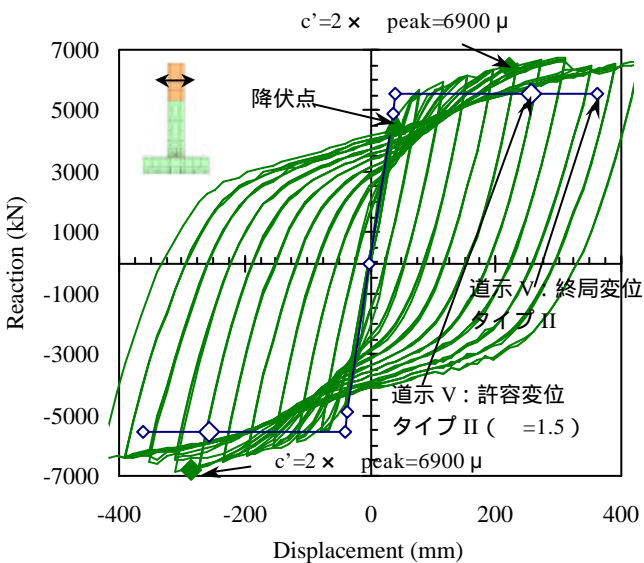
動的解析結果

従って、橋脚の設計基準強度、鉄筋降伏強度、横拘束鉄筋径を変更する ($c_k=21$ 24N/mm^2 、SD295 SD345、D16 D19)。道路橋示方書耐震設計編に従って最大圧縮応力時ひずみ ϵ_{cc} 、横拘束筋で拘束されたコンクリートの圧縮強度 σ_{cc} を再計算すると次のようになる。

$\sigma_{cc} (= \sigma_{peak})$;
 橋軸方向: 2980μ 3450μ
 橋軸直角方向: 3120μ 3647μ
 $\sigma_{cc} (= f_c')$;
 橋軸方向: 22.19N/mm^2 26.00N/mm^2
 橋軸直角方向: 22.35N/mm^2 26.28N/mm^2



設計変更前の水平力 - 水平変位関係 (橋軸方向)

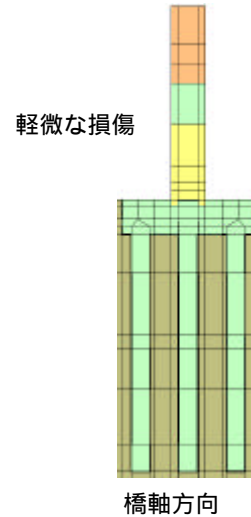


設計変更後の水平力 - 水平変位関係 (橋軸方向)

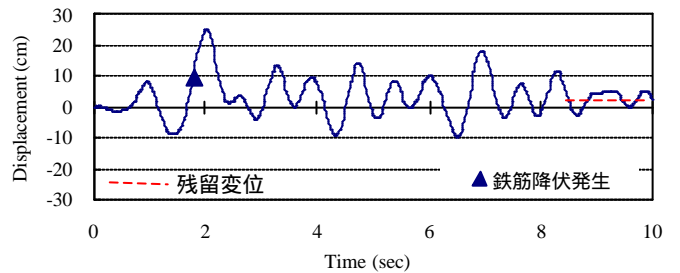
6) 設計変更後の照査結果

ここでは橋軸方向のみの照査結果を示す。

メッシュデータは、柱のコンクリート材料 (Concrete Plate1) の圧縮強度 f_c' 、圧縮ピークひずみ ϵ_{peak} 、鉄筋材料 (Steel Plate 1,2) の降伏強度 f_y 、そして柱の鉄筋比 P_x を変更した。



(a) 最大損傷マップ



橋軸方向

(b) 橋脚躯体の水平変位

設計変更後の動的解析結果

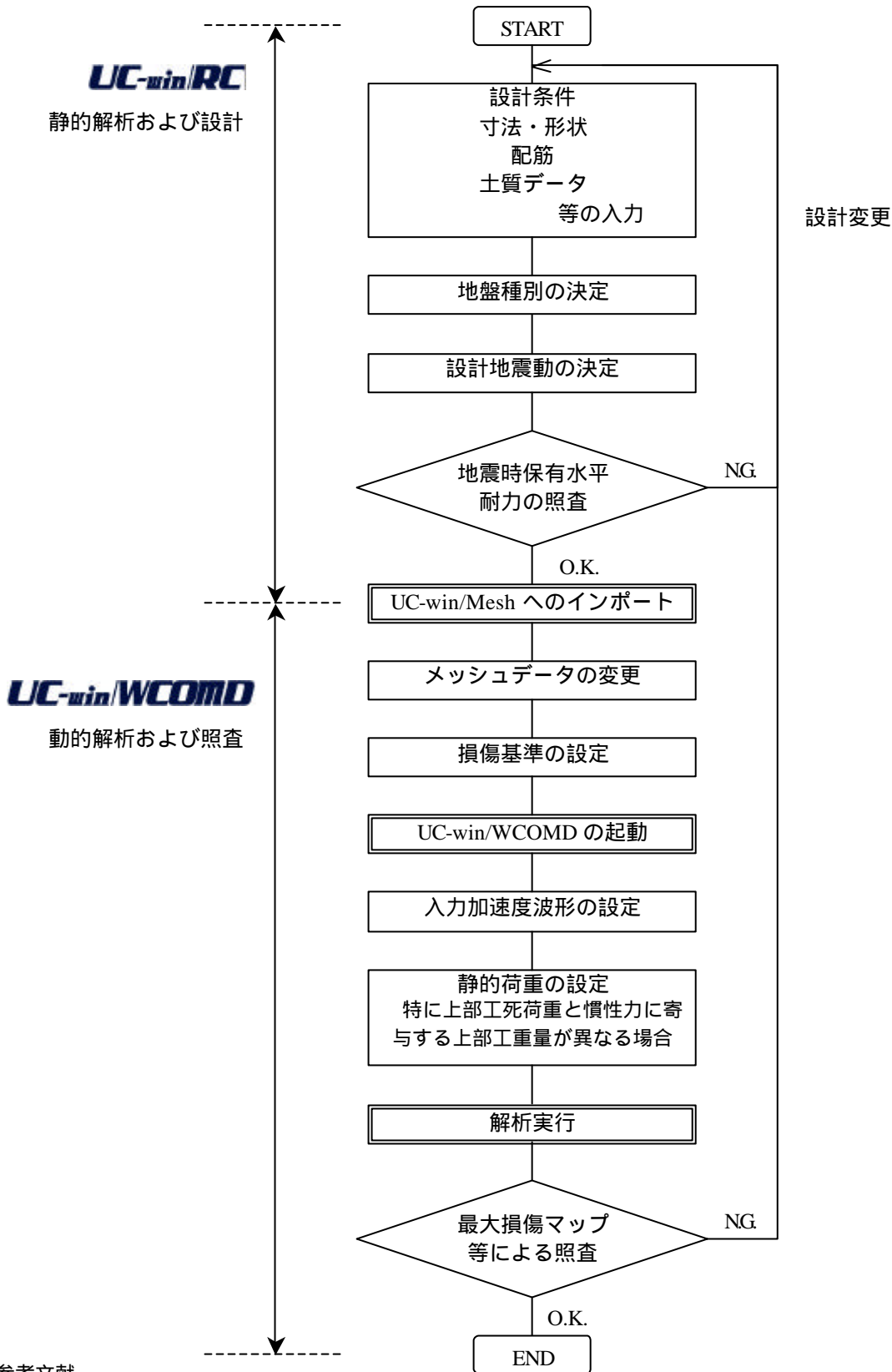
表 照査結果-2

地震動タイプ	損傷状態		照査結果
タイプ II	橋軸	重度の損傷無 鉄筋降伏 残留変位 < 許容残留変位	O.K.
	橋軸直角	省略	省略

設計変更により、重度の損傷は発生せず、残留変位も許容残留変位に収まった。よって、照査条件を満足し目標とする耐震性能が確保されたことになる。

UC-win/RC から UC-win/WCOMD への連動の流れ

<地震時保有水平耐力法による耐震設計およびその照査>



参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編 平成 8 年 12 月
- 2) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 平成 9 年 3 月
- 3) 土木学会編：動的解析の方法、動的解析と耐震設計、第 2 巻、技報堂出版、1989.7
- 4) J.P.ウォルフ著、動的解析研究会訳：構造物と地盤の動的相互作用解析 - 時間領域処理法 -、鹿島出版会、1996.10

参考資料 - 1

道路橋示方書耐震設計編の水平力 - 水平変位関係と UC-win/WCOMD 正負交番載荷解析結果の比較

注意：道路橋示方書耐震設計編で定める水平力 - 水平変位関係は、同一変位を複数回繰り返し漸増させる正負交番繰り返し実験の骨格曲線（包絡線）を表すものである（タイプ I 地震動は 10 回繰り返し、タイプ II 地震動は 1 ~ 3 回繰り返しの実験による）。従って、UC-win-WCOMD で正負交番繰り返し載荷を行い、水平力 - 水平変位関係を比較した（設計変更前の断面）。

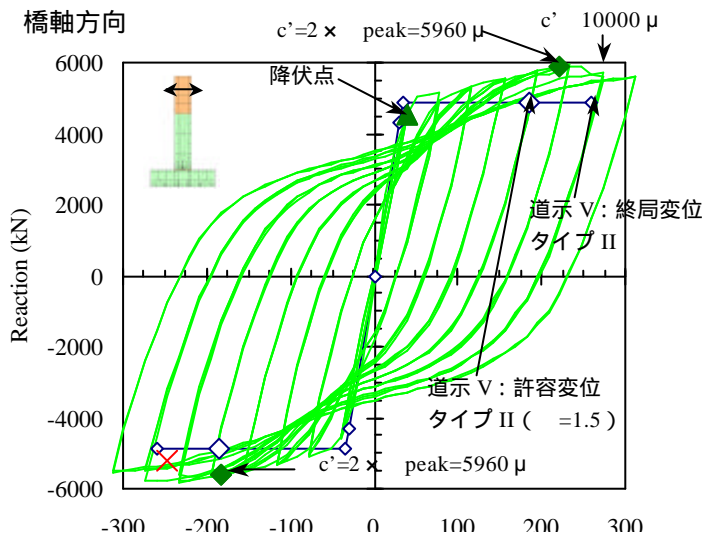
UC-win/WCOMD の最大圧縮ひずみ c' と、道路橋示方書耐震設計編における「B 種の橋」の許容変位の関係は、ほぼ以下のようになる。

タイプ II 地震動 : $c' = 2 \times \text{peak}$

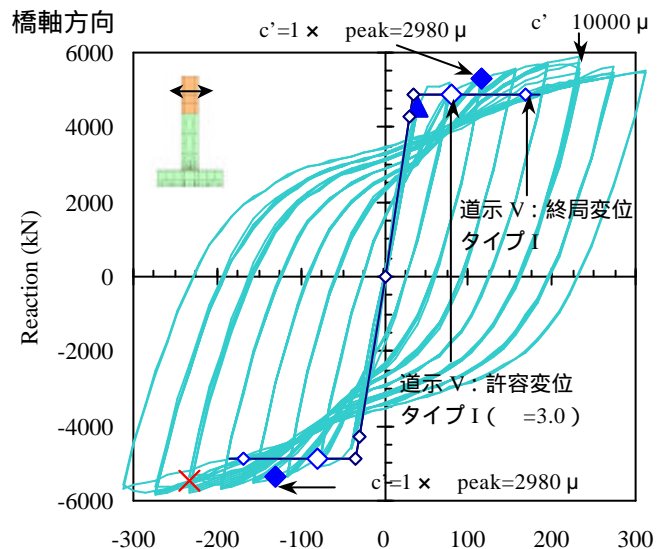
タイプ I 地震動 : $c' = 1 \times \text{peak}$

また、道路橋示方書では終局状態を「最大耐力付近で安定していた水平耐力が低下しはじめる点」としている。3 回繰り返し載荷の橋軸方向については、WCOMD の水平耐力が低下し始める変位と、道路橋示方書の終局変位がほぼ一致し、さらにデフォルトの破壊基準（ $t=3\%$ 、 $c'=1\%$ 、 $sh=2\%$ ）による破壊点は、ほぼこの終局状態に対応する。

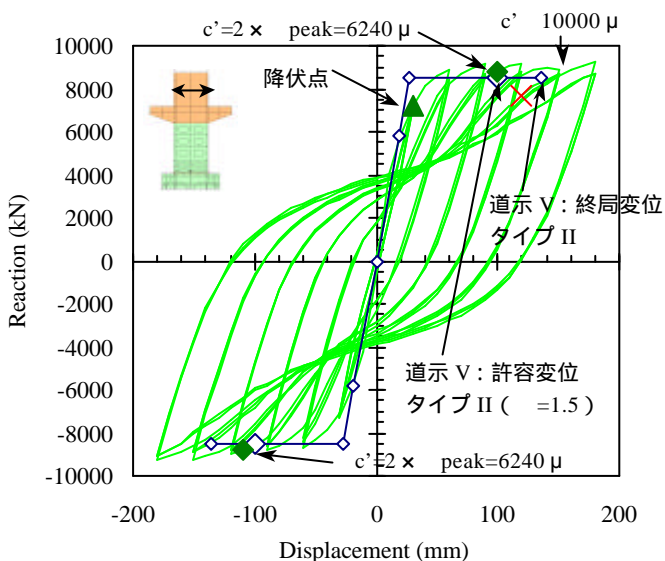
3 回繰り返し



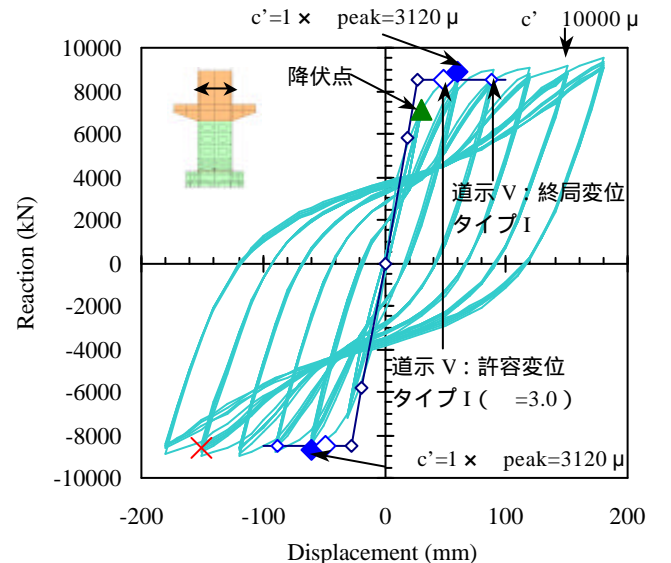
6 回繰り返し（厳密には 10 回繰り返しがよいが、多く載荷しても、解析上の損傷はほとんど進行しないため 6 回とした）



橋軸直角方向



橋軸直角方向



「x」で示した点はデフォルトの破壊基準による破壊点

参考資料 - 2

解放基盤面で定義された地震動を使用した動的解析の方法

鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設（平成 11 年 10 月）や、土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）（平成 13 年 9 月）では、表層地盤の応答が構造物の応答に与える影響が大きいとし、表層地盤の応答計算を行い、その地震動を構造物に入力して構造物の応答を求めることを原則としている。

地盤の応答解析には、解放基盤面で定義される地震動を使用することが多い。この解放基盤面で定義された地震動を入力波として表層地盤モデルの動的解析を行なうには、表層地盤と基盤の間に波動エネルギーを吸収できるような仮想境界を定義する必要がある。UC-win/WCOMD では、ユニバーサルジョイントを表層地盤と基盤の間に定義することにより、「粘性境界」をモデル化して反射波を防ぐ仮想境界を表現する。

一般に、粘性境界（Viscous boundary）は、次式で与えられる応力を与えるものである。

$$\begin{aligned} &= \rho \cdot V_s \cdot \dot{u}_s \\ &= \rho \cdot V_p \cdot \dot{u}_n \end{aligned}$$

、 ρ : せん断応力、鉛直応力
 ρ : 密度

V_s, V_p : S 波速度、P 波速度
 \dot{u}_s, \dot{u}_n : 境界面の接線・鉛直方向の速度

一方、UC-winWCOMD のユニバーサルジョイントにおける応力は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} &= K_s \cdot u_s + \mu_s \cdot \dot{u}_s \\ &= K_n \cdot u_n + \mu_n \cdot \dot{u}_n \end{aligned}$$

μ_s : せん断粘性減衰係数 (kgf/cm³・sec)
 μ_n : 粘性減衰係数 (kgf/cm³・sec)

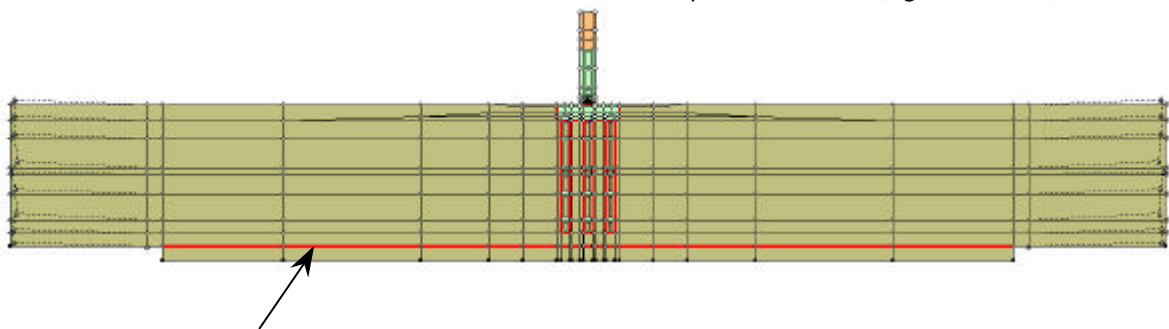
従って、剛性を表す K_s, K_n を 0 とし、粘性項のみを持つように定義すればよい。よって、粘性境界として使用する場合、せん断粘性減衰係数および粘性減衰係数は次のように求めればよい。

$$\begin{aligned} \mu_s &= \rho \cdot V_s = (\gamma / g) \cdot V_s \\ \mu_n &= \rho \cdot V_p = (\gamma / g) \cdot V_p \end{aligned}$$

γ : 単位体積重量 (kgf / cm³)
 g : 重力加速度 (=980.665cm/sec²)
 V_s, V_p : S 波速度、P 波速度 (cm/sec)
 $V_p = \sqrt{2} \cdot V_s$ ($\nu = 0.45$ の場合)

例)

$$\begin{aligned} &= 19\text{kN/m}^3 \quad (= 0.0019375\text{kgf/cm}^3), \quad V_s = 300\text{m/sec} \\ & (= 30000\text{cm/sec}), \quad \nu = 0.45 \text{ の場合、} \\ \mu_s &= (0.0019375 / 980.665) \cdot 30000 \\ &= 0.05927 \text{ (kgf } \cdot \text{ sec / cm}^3 \text{)} \\ \mu_p &= 0.08382 \text{ (kgf } \cdot \text{ sec / cm}^3 \text{)} \end{aligned}$$



ユニバーサルジョイント	
せん断剛性(閉合時) (N/mm ² /mm):	0.000
接触剛性(閉合時) (KN/mm ² /mm):	99.000
せん断剛性(開口時) (N/mm ² /mm):	0.000
接触剛性(開口時) (KN/mm ² /mm):	0.000
せん断粘性減衰:	0.05927
粘性減衰:	0.08382

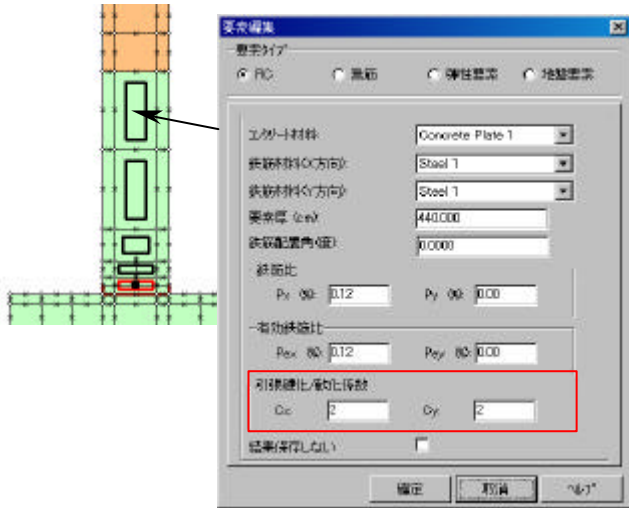
接線方向の剛性（値が大きいと滑りにくい）
鉛直方向の剛性（値が大きいとめりこみにくい）
接線方向の剛性（値が大きいと滑りにくい）
鉛直方向の剛性（値が大きいと開きにくい）
せん断粘性減衰係数（ Ver.1.01.08 では [kgf ・ sec / cm³] ）
粘性減衰係数（ Ver.1.01.08 では [kgf ・ sec / cm³] ）

次期バージョンで、粘性減衰係数・せん断粘性減衰係数の単位を工学単位 [kgf ・ sec / cm³] から SI 単位 [N ・ sec / mm³] に変更予定。

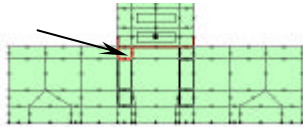
参考資料 - 3

メッシュデータの変更点について

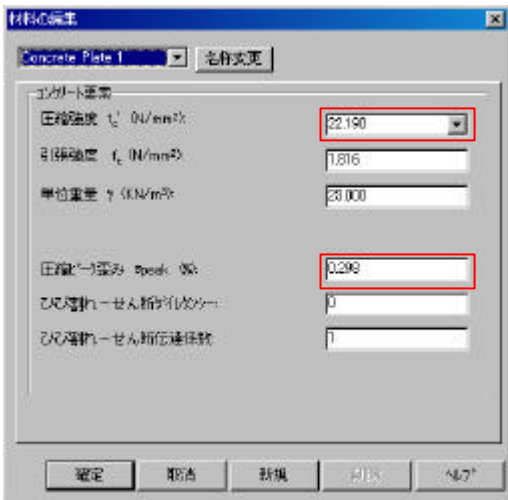
1. 柱内部はほとんど無筋領域のため、オーバーラッピング部分の引張硬化/軟化係数を 0.4 から 2.0 に変更。従ってアドバンスモードを使用。



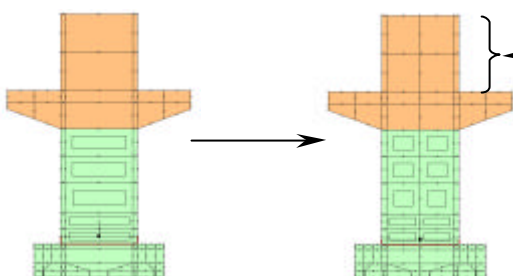
2. フーチング内に柱主鉄筋定着部分の鉄筋比を加算。



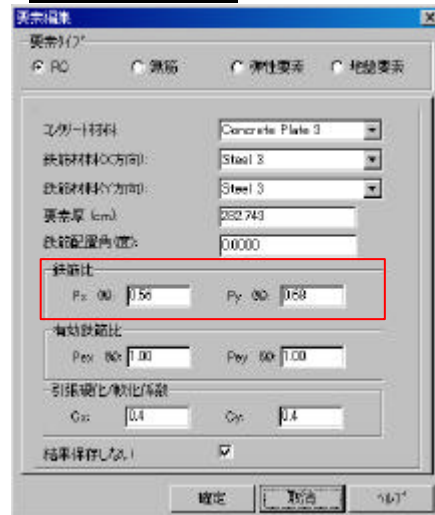
3. 道示 V から得られる cc を peak に、同様に cc を fc'に入力。



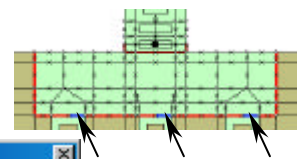
4. 矩形断面の柱幅分割は標準では 3 分割だが、橋軸直角方向のモデルについては壁に近い形状であり、精度的に不十分な場合があるので 4 分割に変更。



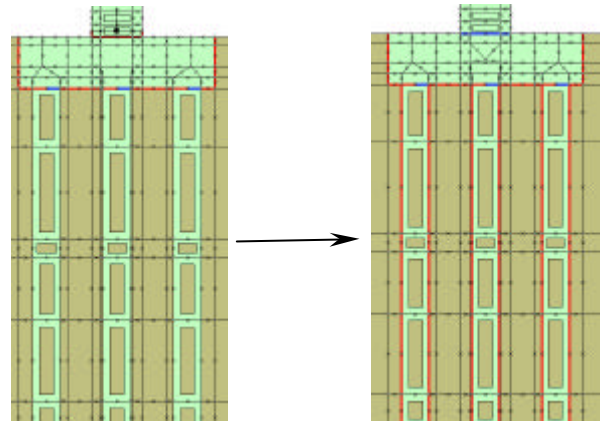
5. 杭の鉄筋比を入力



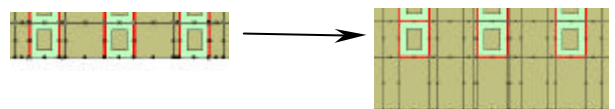
6. 杭 - フーチング間の RC ジョイントの鉄筋径・鉄筋比・定着長を入力



7. 杭 - 地盤間にユニバーサルジョイントを設定



8. 杭先端の支持条件を修正



9. 上部工重量を表現する弾性要素の厚さを調整して、慣性力に寄与する上部工重量になるよう変更 (例: 死荷重 6963kN 負担上部工重量 3864kN)