

「TAKEDA モデル」と「D-Tri-4」に関する補足資料 － 『D-Tri モデル追加オプション』－ 「TAKEDA モデル」の利用の薦め－

地震応答解析プログラム『SS21/DynamicPRO』および『SS21/SuperDynamicPRO』にはRC構造系の履歴モデルとして「D-Tri-4」モデルが搭載されており，これは両プログラムの発売以来，慣用的にTAKEDA¹⁾モデルとして用いられてきたと思われます。一方，その後に発売のオプションプログラム『SS21/DynamicPRO D-Tri モデル追加オプション』によって，「TAKEDA モデル」を含むいくつかのDegrading-Tri-Linearモデルが新たに選択できるようになりました。

本資料では，プログラム利用者の理解と判断に役立てるよう，プログラムに標準搭載の「D-Tri-4」とオプションの「TAKEDA モデル」の履歴法則（仕様）の違いやサンプルを用いた両モデルによる解析結果を示しながら補足説明を行います。

以後，「TAKEDA モデル」（括弧付き）はプログラムに搭載の，単にTAKEDA モデル（括弧なし）は論文¹⁾に準拠した一般のモデル名を指します。またプログラム名は簡略して記します。

■ TAKEDA モデル¹⁾の概要

TAKEDA モデル¹⁾の履歴法則の概要は『D-Tri モデル追加オプション』の説明書に記していますが，以下に再掲します。

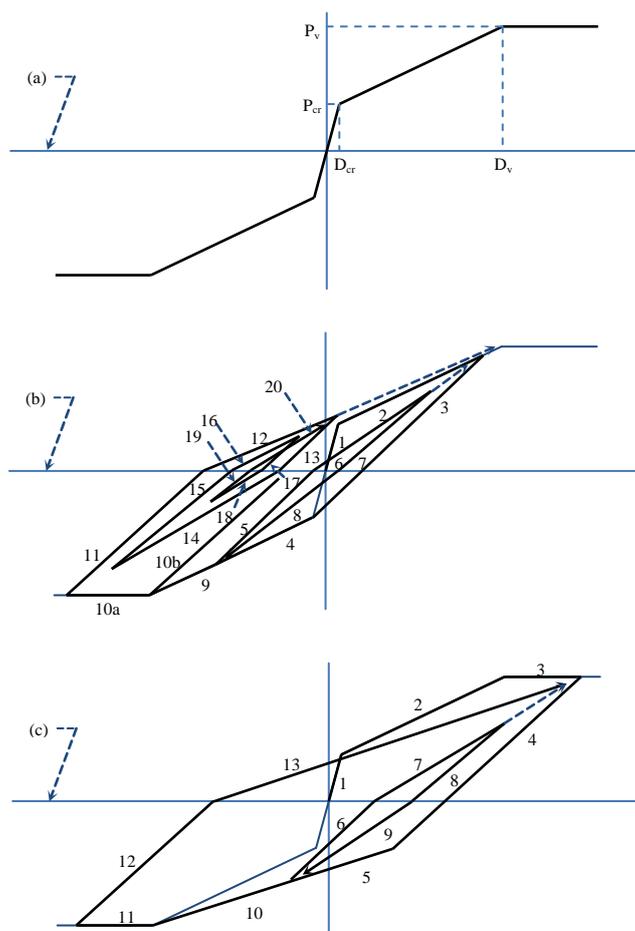


図1 TAKEDA モデルの荷重-変位関係¹⁾

表 1 TAKEDA モデルの概要『D-Tri モデル追加オプション』説明書より

TAKEDA モデル¹⁾において、ひび割れ点 (D_{cr}, P_{cr}) を超え、降伏点 (D_y, P_y) を超えない範囲での履歴は、除荷点 (D, P) から剛性 $K_e = (|P| + P_{cr}) / (|D| + D_{cr})$ で荷重=0 (載荷方向の経験最大点または経験最小点がひび割れ点を超えていない場合は P_{cr} または $-P_{cr}$) をめざし (図 1(b)-3,5,10b), 荷重=0 を超えると載荷方向の経験最大点または経験最小点 (ひび割れ点を超えていない場合はひび割れ点) をめざす (図 1(b)-6) バイリニア型ループとなる。ここで、除荷時剛性 K_e は除荷点の絶対値最大が更新されるまで保持される。降伏点 (D_y, P_y) を超えた後の履歴は、除荷点 (D, P) から剛性 $K_r = K_y (D_y / |D|)^{0.4}$ で荷重=0 (載荷方向の経験最大点または経験最小点がひび割れ点を超えていない場合は P_{cr} または $-P_{cr}$) をめざし (図 1(b)-11, (c)-4,12), 荷重=0 を超えると載荷方向の経験最大点または経験最小点 (降伏点を超えていない場合は降伏点) をめざす (図 1(b)-12, (c)-13) バイリニア型ループとなる。ここに、 $K_y = (P_y + P_{cr}) / (D_y + D_{cr})$ である。

このバイリニア型ループで荷重=0 を超え載荷方向の経験最大点または経験最小点をめざしている途中で除荷が発生 (図 1(b)-7,13, (c)-8) した場合は、めざしていた経験最大点または経験最小点から生じた除荷時剛性の 70% の剛性で荷重=0 をめざし、荷重=0 を超えると載荷方向の経験最大点または経験最小点をめざす (図 1(b)-8,14, (c)-9) バイリニア型の (1 次) の内部ループとなる。ただし、1 次の内部ループにおいて経験最大点または経験最小点をめざしている途中からさらに除荷が発生 (図 1(b)-15,17,19) した場合の 2 次以降の内部ループでは、荷重=0 を超えると 1 次の内部ループの生起点をめざし (図 1(b)-16,18,20), それを経て載荷方向の経験最大点または経験最小点をめざす折れ線に復帰する。

■ 「TAKEDA モデル」と「D-Tri-4」の相違点

「TAKEDA モデル」は、図 1 および表 1 に示した TAKEDA モデルの履歴法則のすべてに対応したのものになっています。ここで、表 1 の説明中の $K_r = K_y (D_y / |D|)^{0.4}$ の指数値 0.4 および“除荷時剛性の 70% の剛性”の数値 70% (=0.7) は適切な範囲で変更可能です。

一方、「D-Tri-4」は、同じく TAKEDA モデルの履歴法則のうち、“除荷時剛性の 70% の剛性”のみが反映されておらず、100%として処理していることを除いて、「TAKEDA モデル」と同じです。また「D-Tri-4」も指数値 0.4 は適切な範囲で変更可能です。

ただし、一般に除荷時剛性が低減される「TAKEDA モデル」に必要な履歴の調整機能によって、低減させない (100%の) とした場合でも「D-Tri-4」とは結果が微妙に異なることがあります (『D-Tri モデル追加オプション』の説明書に例示)。

ここで、「D-Tri-4」において“除荷時剛性の 70% の剛性”を適用外とした背景は以下によります。

- ① 質点系モデルの場合の復元力特性は層の荷重-変形関係から設定されるため、TAKEDA モデルが検討された試験体の荷重-変形関係のように整形的でなく、骨格曲線の形状によっては、“70%”を考慮すると履歴が異常あるいは不自然になることも少なくないため (後述)
- ② 建築学会近畿支部 RC 構造部会²⁾で検討された各社 (建設会社, 設計事務所, ソフト開発会社) の TAKEDA モデルの履歴法則は細部で異なっていた²⁾こと、また当報告書²⁾において、株式会社大林組で用いられていた TAKEDA モデルも“70%”は採用されておらず、その理由に、実際の応答結果に影響が少なかったため簡素化した²⁾とあること
- ③ 弊社が TAKEDA モデルとして「D-Tri-4」を提出した比較研究²⁾³⁾において、同条件下での各社の解析結果に特筆すべき差異が認められなかった³⁾こと

■ 除荷時剛性の 70%の適用有無による履歴ループの違い

下図は、論文¹⁾に掲載の履歴ループ図に倣い、「TAKEDA モデル」と「D-Tri-4」における荷重-変形関係図を示したものです。「TAKEDA モデル」はその履歴法則どおり、2 次的に生じる履歴ループ（骨格曲線から除荷され構成される履歴ループの途中で除荷されて生じる履歴ループ）の除荷時剛性が低減され、履歴エネルギーが抑制されていることがわかります。一方、「D-Tri-4」では 2 次的履歴ループの除荷時剛性が 1 サイクル前の除荷時剛性に等しく、やや履歴エネルギーを大きく評価しています。

この特性の違いは少なからず応答結果に影響を及ぼすと考えられるのに対し、前掲の報告²⁾で“応答結果に影響が少なかった”とあるのは、おそらく当時の検討用地震波は EL CENTRO NS や TAFT EW のような比較的継続時間が短く、また振動的でなく衝撃的に最大応答が発生することが多かったため、本特性による応答の違いが顕在化しなかったものと思われま

す。しかし、最近では設計用地震動の継続時間を十分長くし、連動して破壊する海溝型地震が想定されるようになり、累積吸収エネルギーが最大応答や損傷に影響を及ぼすことが多くなり、かつてのように無視できなくなってきたものと考えます。次節では、この特性の違いによる応答を、古くから慣用されてきた標準 3 波と 120 秒の継続時間を有する告示波による解析例で示します。

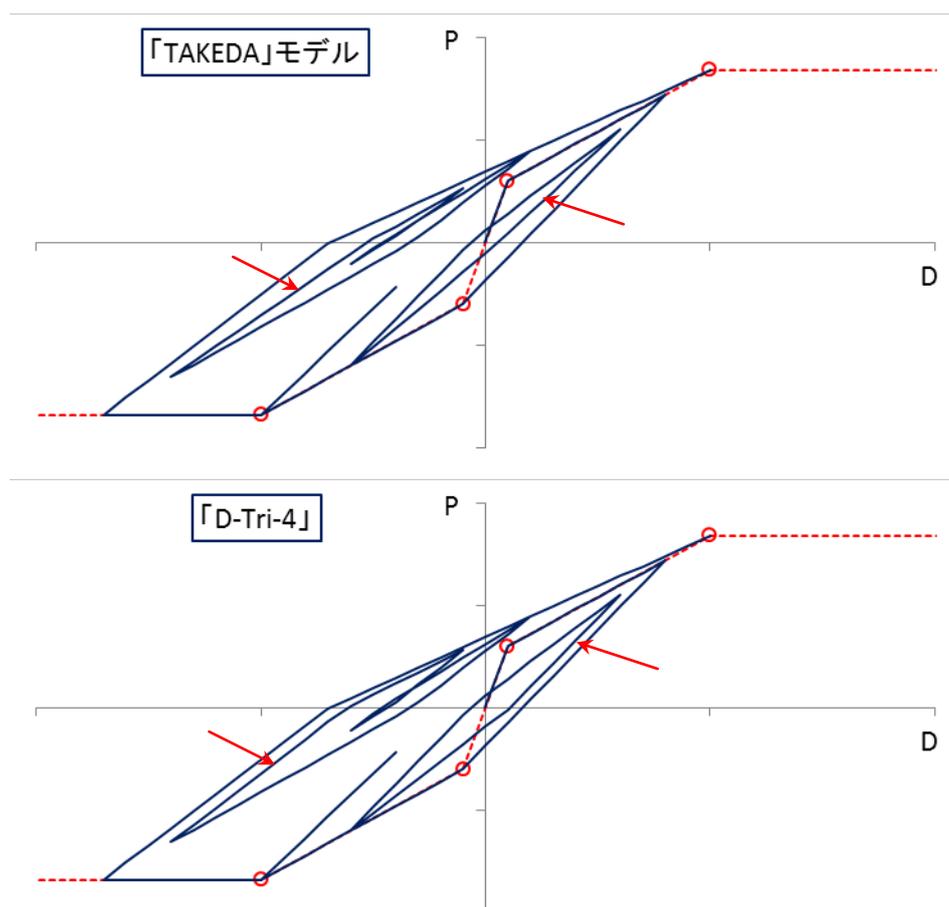
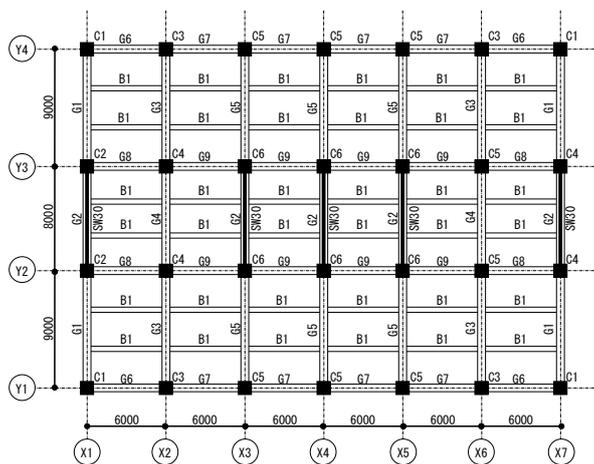


図 2 「TAKEDA モデル」と「D-Tri-4」

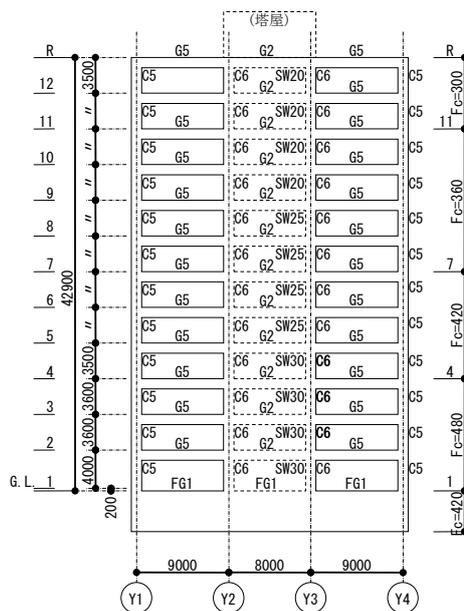
上図の「TAKEDA モデル」において“70%”を適用すると内部ループが消滅し線形となるため、ここではあえて“90%”として狭まった内部ループを図示している。したがって本来はさらに履歴ループの面積が消滅するイメージとなる。

■建物モデル

建物データは、弊社技術資料の「『SS21/DynamicPRO』を用いた地震応答解析の入力データと解析結果」⁴⁾での12階建てRC造建物⁵⁾とします。モデルの詳細および解析条件は技術資料のとおりです。本解析はX方向の純ラーメン方向を対象とし、履歴モデルは「TAKEDAモデル」および「D-Tri-4」の2ケースとします（下図軸組図はY方向ですが）。



(a) 基準階伏図



(b) X3 軸組図

図3 基準階伏図とX3軸組図⁵⁾

表2 固有周期と固有円振動数 (X方向, 弾性時)

	固有周期(s)	固有円振動数(rad./s)
1次	0.7710	8.1497
2次	0.2816	22.3108
3次	0.1728	36.3691

■標準 3 波の場合

標準 3 波⁶⁾として、EL CENTRO 1940 NS, TAFT 1952 EW, HACHINOHE 1968 NS (いずれも最大速度を 50cm/s に基準化) を用います。また参考として、衝撃型地震波の JMA 神戸 1995 NS⁷⁾の振幅を 1/2 とした波形も加えます。

以下に最大加速度, 層間変形角, 層せん断力係数の各図および 6 階の応答履歴ループを示します。

表 3 標準 3 波 (および JMA 神戸 NS ; 50%) での最大応答値

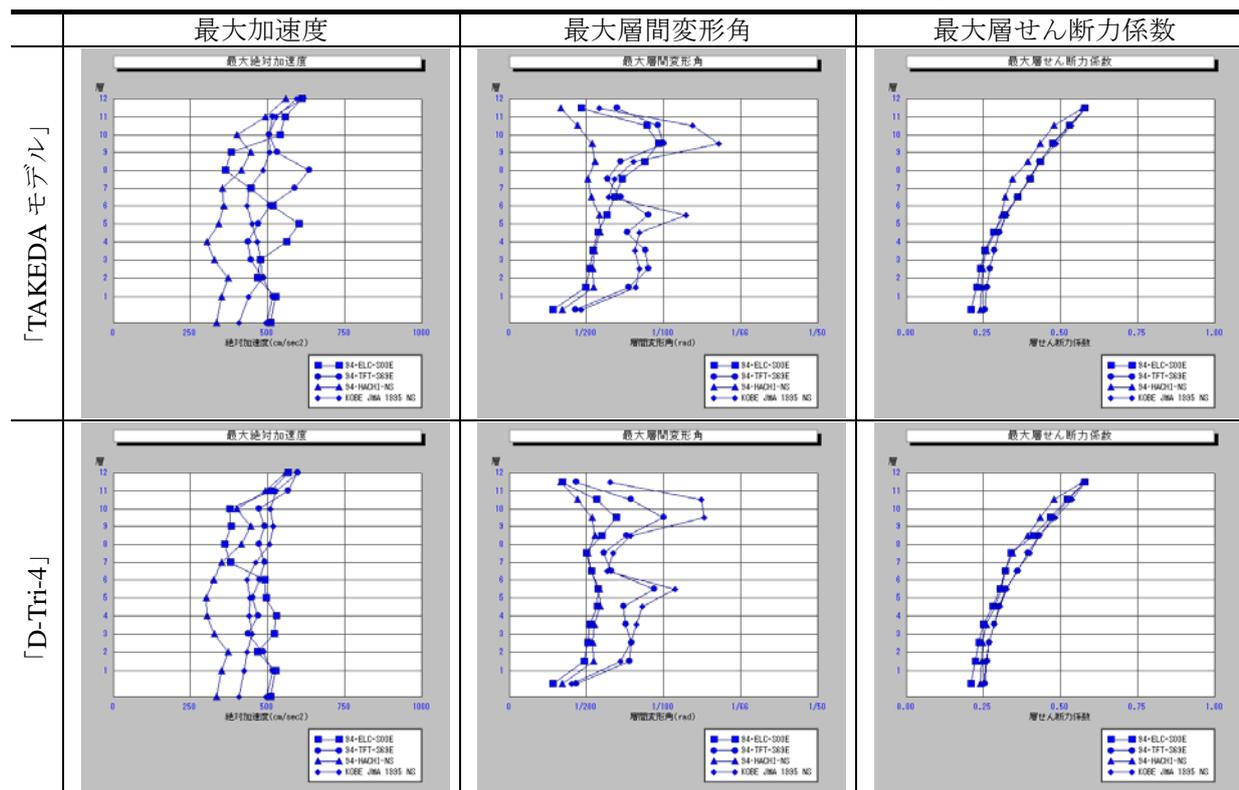


表 4 TAFT EW での 6 階応答履歴ループ



■ 告示波の場合

告示波として開放工学的基盤での告示スペクトル⁸⁾に適合した波形（位相分布に，八戸 EW，JMA 神戸 NS，乱数を用いた 3 波，いずれも継続時間は 120 秒）を用います。

以下に最大加速度，層間変形角，層せん断力係数の各図および 6 階の応答履歴ループを示します。

表 5 告示波での最大応答値

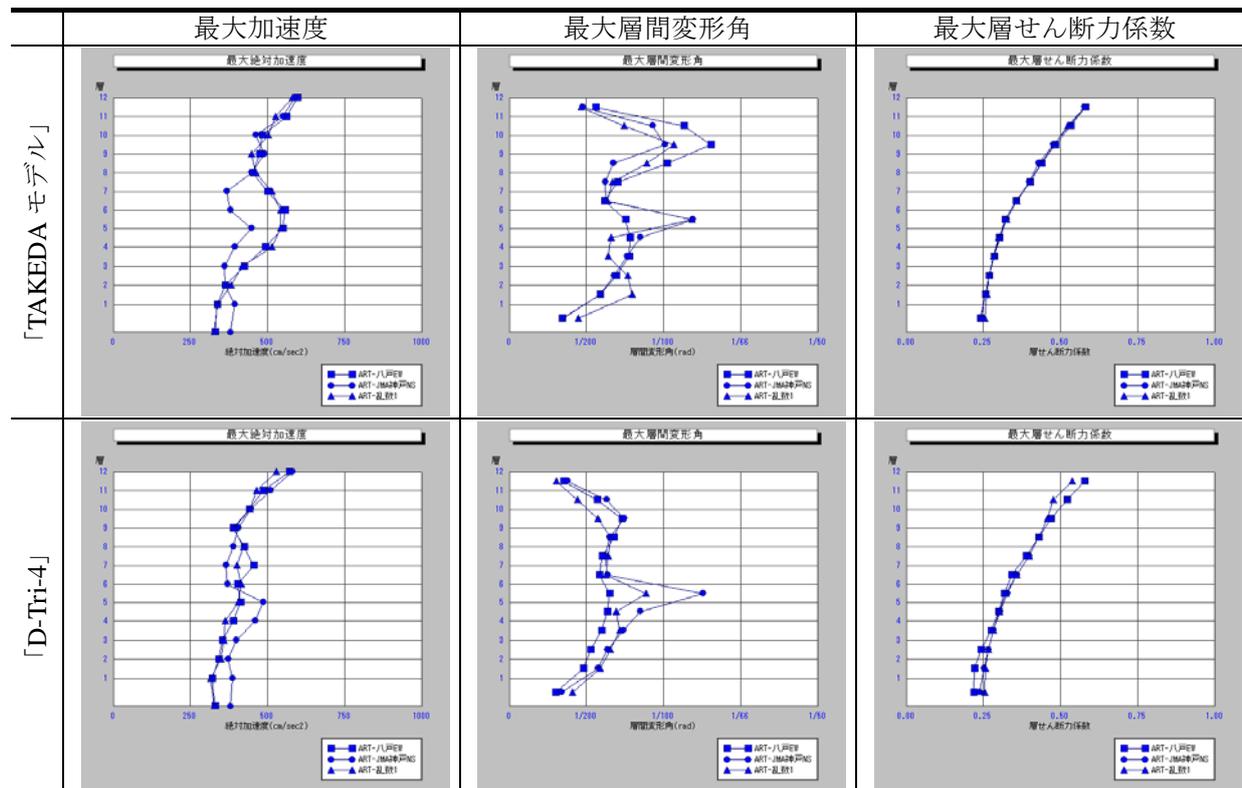
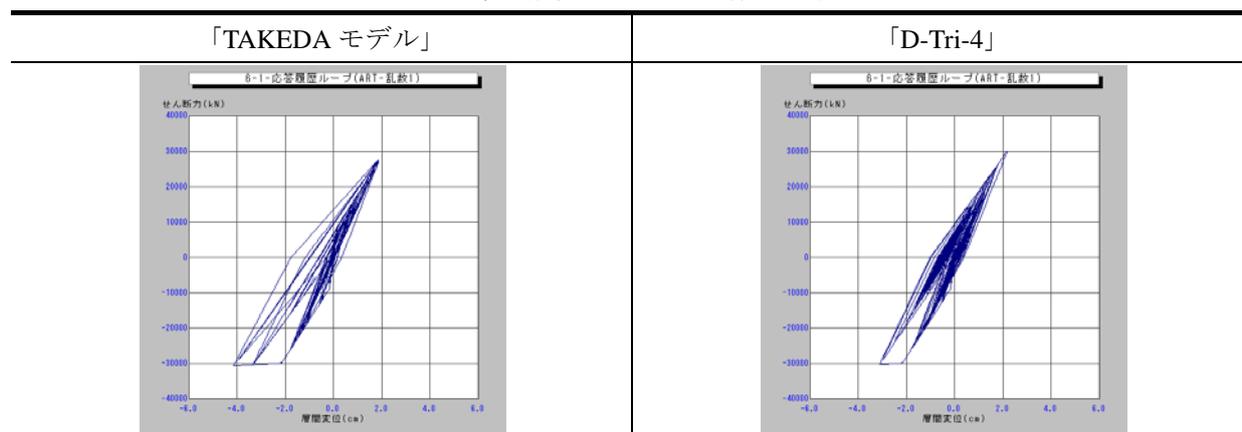


表 6 告示波；乱数位相波 での 6 階応答履歴ループ



■消費エネルギーの比較

標準波 3 波および告示波 3 波のうち TAFT EW と乱数位相波について、「TAKEDA モデル」および「D-Tri-4」とした場合の消費エネルギーの比較を以下に示します。

標準 3 波の TAFT EW では累積歪エネルギーの最終値は「D-Tri-4」の方が大きいものの最大応答が生じた 7～11 秒においてはほぼ同等の消費エネルギー量のため最大応答に大きな差異がなかったことを、一方の告示波乱数位相波では累積歪エネルギーの最終値のほか最大応答が生じた 35～40 秒でも「TAKEDA モデル」の消費エネルギー量が小さいため最大応答が大きくなったことを示しています。

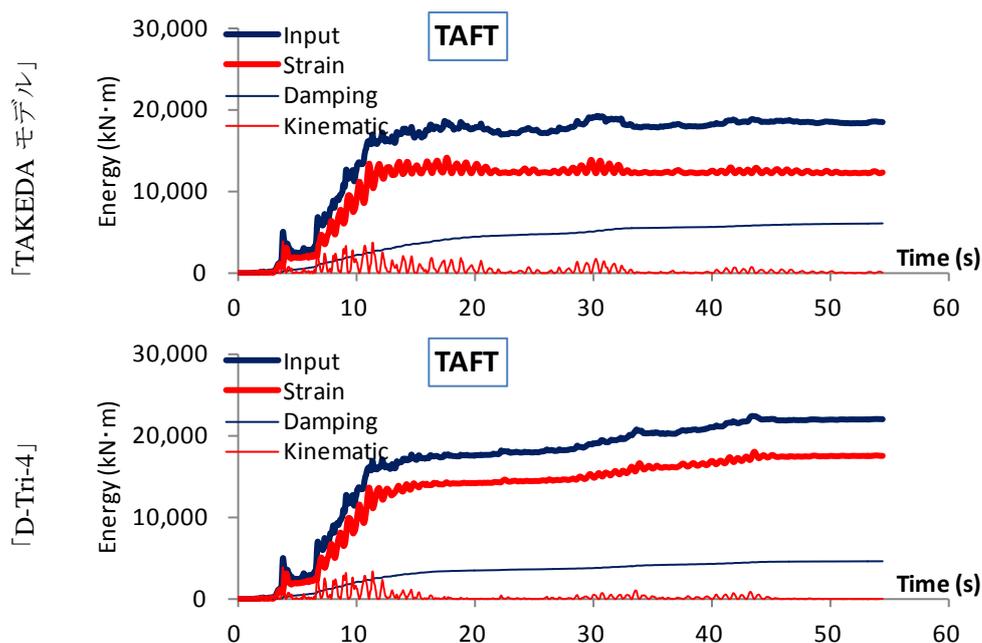


図 4 TAFT EW における消費エネルギー

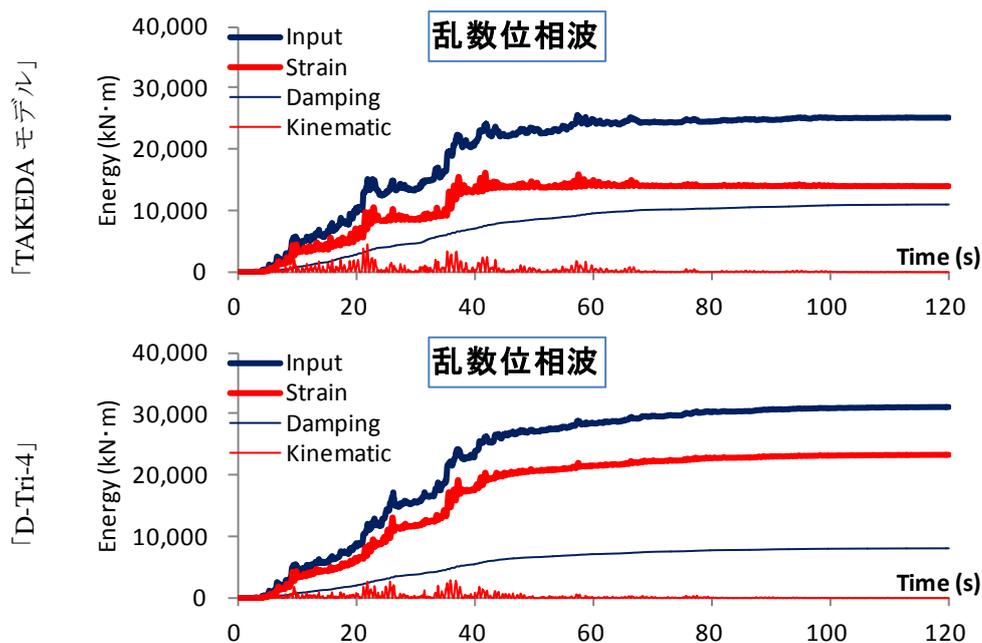


図 5 乱数位相波における消費エネルギー

■考察とまとめ

質点系地震応答解析プログラム『DynamicPRO』『SuperDynamicPRO』に標準搭載されている RC 構造系の履歴モデル「D-Tri-4」と『D-Tri モデル追加オプション』で付加される履歴モデル「TAKEDA モデル」の相違点を述べ、例題による解析で結果の違いを示しました。

「TAKEDA モデル」は TAKEDA モデルの履歴法則をすべて適用していますが、「D-Tri-4」は履歴法則のうち、2 次的内部ループの除荷時剛性に乗じる係数“70%”が適用されていません。しかし、これまで「D-Tri-4」が TAKEDA モデルとして慣用されてきた（と思われる）のは、各社プログラムによる結果の比較研究などをはじめ、ごく細部な履歴法則の割愛が必ずしも否定的に捉えられてこなかったことと、当時対象とされた標準 3 波などの地震波では“70%”の適用有無による違いが顕在化しなかったことが主に背景にあったと思われます。

一方、告示波をはじめ、最近の設計用入力地震動の動向でもある長継続時間地震動や連動破壊するような海溝型地震を想定した場合、“70%”の適用有無により履歴吸収エネルギーが異なり、適用の有無により最大応答の評価に影響を及ぼすことが考えられます。

この“70%”の適用有無が与える最大応答の違いを確認するために、さほど影響を及ぼさないと思われる衝撃型地震波である標準 3 波と、比較的影を及ぼすと思われる継続時間 120 秒の告示波による比較解析を行なったところ、上記予測のとおり、標準 3 波（および参考の JMA 神戸 NS も含めて）のような衝撃的な地震波では比較的影響は少なく（EL CENTRO NS は上層部で応答がやや大きくなったが）、告示波のように継続時間が長く振動的な地震波においては建物上層部で大きな応答の励起が認められました。

告示波に加え、最近では長周期地震動、長継続時間地震動などによる耐震安全検証も視野に含まれ始めたことを考えると、RC 構造系の履歴モデルの TAKEDA モデルに対応するものとして、『D-Tri モデル追加オプション』で付加される「TAKEDA モデル」の適用を推奨いたします。

■参考文献

- 1) Takeda, Sozen, Nielsen : Reinforced Concrete Response To Simulated Earthquake, ASCE, 1907.12
- 2) 日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能に関する最近の話題，2000.5
- 3) 辻幸二，山口圭介，深野慶，窪田敏行：耐震性能評価用の各種解析プログラムによる RC 造建物の地震応答解析結果の比較，日本建築学会構造系論文集 第 550 号，2001.12
- 4) ユニオンシステム：<http://www.unions.co.jp/dqs/dynamic/files/40.pdf>
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，丸善，2001.9
- 6) 建築性能基準推進協会：<https://www.seinokyo.jp/jsh/top/>
- 7) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>
- 8) 国土交通省建築研究所：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景，ぎょうせい，2001.3

参考 『DynamicPRO』 初期剛性・復元力特性入力データと「TAKEDA モデル」入力データの連動

質点系地震応答解析プログラム『DynamicPRO』では、入力操作の簡便性を図るため、初期剛性データ（「初期バネ定数」「曲げ剛性・初期せん断剛性」と「復元力特性データ」）に入力あるいは設定されているデータは、そのまま「TAKEDA モデル」（をはじめ他の D-Tri モデル）のデータに連動するようにしています。また等価曲げせん断モデルではせん断剛性としてデータが連動されます。

①通常のモデル（例えば「D-Tri-4」）としてデータを入力または設定

要素	初期バネ定数(kN/cm)	要素の時刻歴応答値
12-1	32230.61	残す
11-1	35849.44	残す
10-1		
9-1		
8-1		
7-1		
6-1		
5-1		
4-1		
3-1		
2-1		
1-1		

②「TAKEDA モデル」として定義
(図は最上階の指定を下階にコピーしている)

要素	初期バネ定数(kN/cm)	要素の時刻歴応答値
12-1	TAKEDAモデル	残す
11-1	35849.44	残す
10-1	40728.23	残す
9-1	43856.71	残す
8-1	48598.20	
7-1	50598.46	
6-1	52898.91	
5-1	55059.06	
4-1	59402.72	
3-1	65136.15	
2-1	67784.72	
1-1	74115.57	

③「TAKEDA モデル」の入力データに初期剛性や復元力特性データが連動

要素	初期剛性(kN/cm)	塑性率の基点(cm)	折れ点荷重1(kN)	剛性低下率1
12-1	32230.61	第2折れ点	3958.43	0.17380
11-1	35849.44	第2折れ点	5839.18	0.16729
10-1	40728.23	第2折れ点	6789.25	0.16521
9-1	43856.71	第2折れ点	7759.45	0.17797
8-1	48598.20	第2折れ点	8432.68	0.18970
7-1	50598.46	第2折れ点	8837.19	0.19777
6-1	52898.91	第2折れ点	8918.27	0.20032
5-1	55059.06	第2折れ点	9516.46	0.20332
4-1	59402.72	第2折れ点	10180.94	0.19662
3-1	65136.15	第2折れ点	10946.11	0.19065
2-1	67784.72	第2折れ点	11944.80	0.19873
1-1	74115.57	第2折れ点	14981.77	0.20065

以上

(2014/08/26 山崎久雄)