日本建築学会・情報システム技術委員会
第12回情報システム利用技術シンポジウム 1989

多層多スパン鉄筋コンクリート平面骨組模型の弾塑性解析

○坂田弘安[1]　和田 章[2]

1．序論

筆者等は、鉄筋コンクリート骨組の力学的挙動を正確に把握するために、スパン数をパラメータとして、4層1スパン（FR1）、4層3スパン（FR3）、4層7スパン（FR7）の縮小モデルを用いたはり降伏形多層多スパン鉄筋コンクリート平面骨組模型の一方向水平加力実験を行った[1]。

実験により実現象をとらえ、種々の結論を得ることができたが、塑性化した不静定骨組の柱のせん断力分担、はりの軸力分布等を実験から調べるのには限界がある。これに対し、弾塑性解析によると任意の状態の任意の場所の応力状態等を調べることができる。またparametric studyも実験に比較し簡単である。近年のコンピュータの大型化、高速化は目覚ましく、鉄筋コンクリート構造の架構全体について接合部パネルのせん断変形、鉄筋の付着すべりを考慮した弾塑性解析を行うことも可能となった。本論では、この弾塑性解析法[2]を用いて、一方向水平力を受ける3試験体の解析を行い、実験では得られない応力分布等を求め、骨組の力学的挙動に関して考察を行う。数値解析には、スーパーコンピュータを用い、その結果はグラフィックディスプレイにより変形状態、鉄筋・コンクリートの応力状態を分りやすく表現する。

2．解析方法

接合部パネルのせん断変形、鉄筋の付着すべりを考慮した分割要素法による鉄筋コンクリート骨組の弾塑性解析法を用いる。解析法の詳細な説明は文献2)に述べてあるので省略する。

3．解析に用いたモデルと材料の力学的性質

3.1 解析モデル

実験に用いた試験体の断面および寸法は文献1)に示してあるので省略する。解析モデルおよび要素分割図を図－1に示す。パネル間の柱・はり部材は各々材軸方向に20分割、5階柱は10分割、左右に張り出している片持ちばりは5分割した。各解析モデルの全体自由度は、FR1で3722、FR3で7724、FR7で15700自由度となった。接合部パネルの剛性を求める際には、柱せいおよびはり主筋で囲まれた大きさを考え、厚さは柱幅とはり幅の平均とした（体積V）。柱・はりの材端にひび割れが生じることを考慮して解析においてはパネルの大きさを、柱せいおよびはりせいとし、接合部パネルの体積がVになる様に厚さを決定した。各々の柱の1階柱脚を固定とし、主筋の定着性状を考慮するために柱脚下に節点移動、回転およびせん断変形の全てを拘束し、鉄筋の付着すべりのみを許したパネルを設けた。この柱脚下のパネル内の付着剛性は常に弾性とした。加力方法は、実験と同様に各柱の5階柱頭に鉛直方向力1400kgを与え、節点間の外力分布を一定に保ったまま変位制御を行う文献3)の方法により、一方向水平力を図－1に示すような割合で左向きに作用させた。

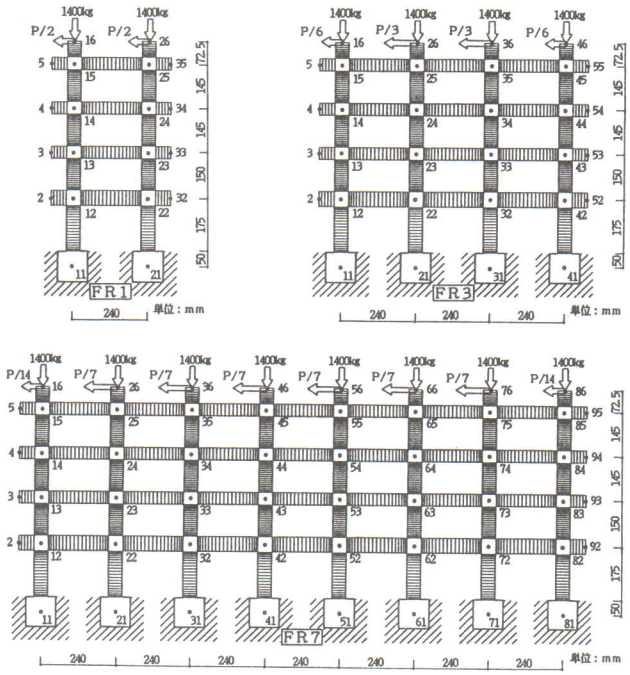
3.2 解析に用いた材料の力学的性質

解析に用いた諸定数を付着応力－すべり関係(図－2)、コンクリートの応力－ひずみ関係(図－3)、鉄筋の応力－ひずみ関係(図－4)および接合部パネルの応力－ひずみ関係(図－5)に対応させて表－1に示す。コンクリート圧縮強度、鉄筋降伏応力度等の数値は素材試験による値を用い、主筋の付着に関する値は村山ら[4]の行った付着試験結果を参考にした。

4．解析結果

4.1 水平力－水平変位関係

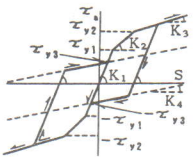
図－6に水平力と左端5階柱はり接合部位置での水平変位の関係を実験結果と比較して示す。枠上の（ ）内の数値は、1階柱脚から5階柱はり接合部中心までの高さ＝615mmに対する変形角（以降、全体変形角と称す）である。太実線が解析値を、細実線が実験値を示している。また、図中の略算1，略算2で示した破線は、はり端および1階柱脚に塑性ヒンジを仮定した略算モデルより仮想仕事法により求めた水平耐力に、P－Δ効果を考慮したものである。この破線を求める際には、柱の水平変位を全て等しいとし、（鉛直力）×（1階柱脚からの水平変位）／（1階柱脚からの高さ）の式を用いた。略算1は、はりの曲げ終局強度として軸力ゼロとして求めた値を用いた水平耐力である。略算2は、2階はりの曲げ終局強度だけを圧縮軸力が作用するとしてその断面の保ち得る最大曲げモーメントとし、3階以上のはりに対しては軸力ゼロとして求めた値を用いて求めた水平耐力である。



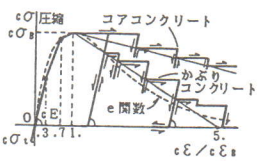
図－1　解析モデル

表－1 解析に用いた諸定数

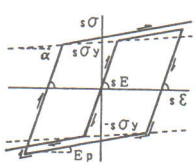
FR1	
${}_cE=218.0\ t/cm^2$	${}_c\varepsilon_B=0.0035$
${}_c\sigma_B=409.0\ kg/cm^2$	
FR3	
${}_cE=226.0\ t/cm^2$	${}_c\varepsilon_B=0.0037$
${}_c\sigma_B=430.0\ kg/cm^2$	
FR7	
${}_cE=234.0\ t/cm^2$	${}_c\varepsilon_B=0.0039$
${}_c\sigma_B=451.0\ kg/cm^2$	
FR1，FR3，FR7に共通	
${}_sE=2100.\ t/cm^2$	$\alpha=10.5\ t/cm^2$
$E_p=21.\ t/cm^2$	${}_s\sigma_y=3236.\ kg/cm^2$
$K_1=3.5(11.4)\ t/cm^3$	$G_1=60.\ t/cm^2$
$K_2=0.6(2.2)\ t/cm^3$	$G_2=48.\ t/cm^2$
$K_3=0.01(0.16)\ t/cm^3$	$G_3=12.\ t/cm^2$
$K_4=0.01(0.05)\ t/cm^3$	$\gamma_{y1}=0.00043$
$\tau_{y1}=40.0\ kg/cm^2$	$\gamma_{y2}=0.00247$
$\tau_{y2}=5.0\ kg/cm^2$	( )内は接合部パネル用



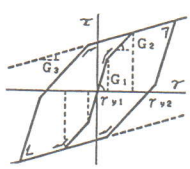
図－2　付着応力－すべり関係



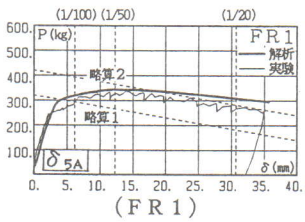
図－3　コンクリートの応力－ひずみ関係



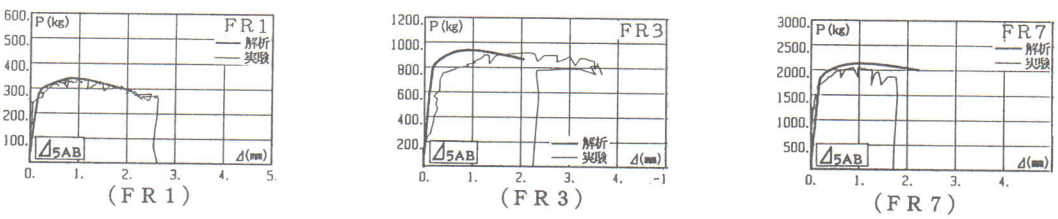
図－4　鉄筋の応力－ひずみ関係



図－5　接合部パネルの応力－ひずみ関係



図－6　水平力－左端5階柱はり接合部位置における水平変位関係



図－7　水平力－左端2階はりの軸方向変位関係

各試験体とも解析値の方が実験値をやや上回っているものの、両者はよい対応を示している。解析値を略算値と比較すると、実験値同様、各試験体とも略算２とほぼ同じ耐力を示している。

4.2 水平力－はりの軸方向変位関係

曲げ降伏するはりは軸方向に伸びるが[1)]、この現象は解析によっても現れている。図－７に水平力と左端２階はりの軸方向変位の関係を実験結果と比較して示す。図－６と同様に太実線が解析値を、細実線が実験値を示している。

曲げひび割れ発生後から伸び始め、降伏耐力以降伸び方が大きくなっている。はり端部の圧壊の影響が大きかったＦＲ３を除いて実験と解析は、ほぼよい対応を示している。

4.3 応力状態

両端柱の全体変形角の平均が1/20のときの曲げモーメント図を図－８に示す。図中（)内の数値はせん断力を表している。このせん断力は、柱頭・柱脚のモーメントの勾配から求めた。これは、柱の負担している力の水平成分ではなく、鉛直力によるＰ－Δ効果の影響を受けているので、各層のせん断力の総和は、部材角の大きな上階ほど大きい。

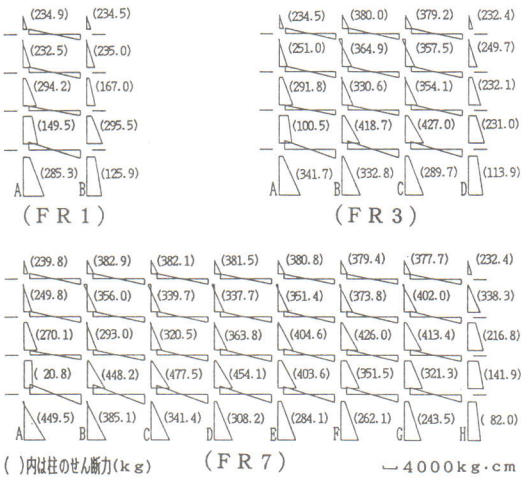
全試験体とも両端部の柱を見ると右端２階柱および左端１階柱のせん断力の割合が大きく、左端２階柱および右端１階柱のせん断力の割合が小さくなっている。これは左右端の柱の軸力の違いによる曲げ耐力の違いおよび２階はりが拡がるために生じる柱への付加せん断力が大きいことによる。

この二つの影響は簡単には分離できないが、解析結果を用いて具体的に検討する。１階柱脚モーメントの比は、左柱から　ＦＲ１(1.17, 0.83)、　ＦＲ３(1.17, 1.02, 1.00, 0.81)、ＦＲ７(1.20, 1.05, 1.04, 1.03, 1.02, 0.98, 0.95, 0.73)、１階柱のせん断力の比は左柱から、ＦＲ１(1.39, 0.61)、ＦＲ３(1.27, 1.23, 1.07, 0.42)、　ＦＲ７(1.53, 1.31, 1.16, 1.05, 0.96, 0.89, 0.83, 0.28)となっている。柱の軸力による影響は１階柱脚の曲げモーメントの差に現れているもののこれは、せん断力の差に比べると小さいことが分る。

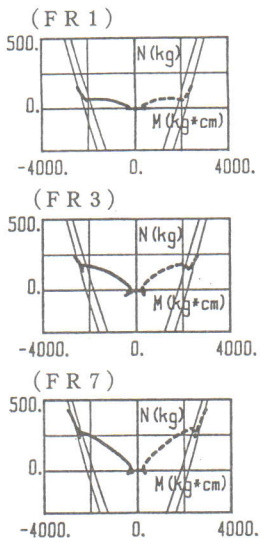
4.4 部材端曲げモーメント－軸力関係

図－９に最も左側のスパンの２階はりに関してはり端の曲げモーメントとはりに生じた軸力の軌跡を示す。実線が左端、破線が右端を示している。ここに細実線で示している相関曲線は、鉄筋のひずみ効果を考慮しないものとしたものの二つを示している。軸力は、はりに圧縮力が生じる時を正で示してあり、曲げモーメントは、下端引張を正としている。

軸力の発生により、はり端部のモーメントは、鉄筋のひずみ効果を考慮して求めた降伏曲線に沿って圧縮軸力が変動し、曲げモーメントも変化している。しかし、軸力がゼロのときの曲げモーメントより大きな曲げモーメントを示しており、これにより図－６において耐力上昇が見られたことを説明できる。



図－８　全体変形角1/20のときの応力状態



図－９　はり端曲げモーメント－軸力関係

4.5 ＣＧによる応力分布図

両端柱の平均全体変形角が1/200 および1/20でのＣＧによる応力分布図・変形状態図および実験の最終状態を写真－１に示す。解析結果は、モードの違いを分かりやすくするために、５階柱はり接合部位置での平均水平変位が等しくなるように変形のみ20倍または２倍に誇張してある。コンクリート・鉄筋ともに圧縮は赤色で示す。コンクリートは、応力の小さな部分を灰色で示し、鉄筋は引張を青色で、応力の小さな部分を黄色で示す。

はりには、対角線上に圧縮力が伝達している様子がよく分る。変形角が大きくなると、鉄筋の引張降伏長さが拡大する様子や、柱およびはりの軸力が変動する様子等がよく分る。特に、２階はりでは左側ほど赤色が多く、左側ほど圧縮力が大きいことが分る。各試験体とも1/20では柱の変形モードはその位置により異なっており、解析結果と実験最終状態の写真とは非常に近い変形モードを示している。ＦＲ１は、どちらの柱も２階柱はり接合部位置で折れ曲る変形モードを示しているが、左柱の方が変形が大きくなっている。ＦＲ３，ＦＲ７では２階柱はり接合部位置において左側の柱ほど直線に近い変形を生じ、右側の柱は２階はり位置で『逆くの字』に曲がっていることが分る。

両端柱の平均全体変形角が1/20におけるＦＲ７の両端柱２階はり付近の拡大図を写真－２に示す。上述したような左端柱と右端柱の変形モードの違いがよく分る。右端柱１階は、柱頭の水平変位が小さく、等曲げに近い状態になっている。このため、この柱の右側には、柱脚から柱頭までひび割れ(応力ゼロ)がはいり、右側の鉄筋は柱全長に渡り青色(引張)になっている。この青色は、２階接合部パネルを通って２階柱にまで続いている。また１階、２階の柱脚左側は赤色(圧縮)になっている。これに対し、左端柱では、右側の鉄筋の青色は１階柱脚付近に集中している。また柱のコンクリートの赤色も１階柱脚に集中している。これは、左端柱が１階柱脚を中心に直線的に変形しており、右端柱が２階接合部位置で『逆くの字』に折れ曲がる変形モードを示していることに対応している。右端のはりに比べ左端のはりの方が、赤色の面積が大きく圧縮力が大きいことが分る。

５．結論

接合部パネルのせん断変形、鉄筋の付着すべりを考慮した分割要素法による鉄筋コンクリート骨組の弾塑性解析法を用いて、多層多スパン鉄筋コンクリート平面骨組の解析、考察の結果、以下の結論を得た。

1) 本解析結果は、実験結果をほぼ説明していると考えられ曲げ降伏するはりの軸方向変形拘束効果を考慮した多層多スパン鉄筋コンクリート平面骨組の挙動を表すことができる。
2) ＦＲ１，ＦＲ３，ＦＲ７とも、２階はりの曲げ終局強度をその断面の保ち得る最大曲げモーメントとし、３階以上のはりに対しては軸力０として求めた曲げ終局強度を用いて求めた水平耐力とほぼ同等の耐力を発揮したが、これは圧縮軸力によるはりの曲げ耐力上昇のためであることが解析により明らかになった。
3) ＣＧを用いた図形出力は、構造物内の応力状態、変形の様子など構造物の力学的挙動を把握する上で非常に有効である。

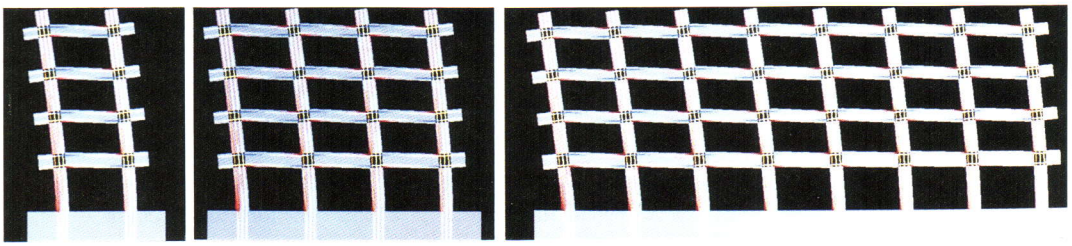
謝辞

東京職業訓練短期大学校長・東京工業大学名誉教授・黒正清治博士、東京工業大学助教授・林　静雄博士には日頃有益な御指導を戴いています。心より感謝の意を表します。ＣＧによる応力分布図の作成には、東京工業大学学生・大谷晃弘君作成のプログラムを使用しました。記して御礼申し上げます。研究費の一部に文部省科学研究費を使用しました。計算は、東京工業大学総合情報処理センター内のＥＴＡ[10]で行いました。関係者各位に御礼申し上げます。

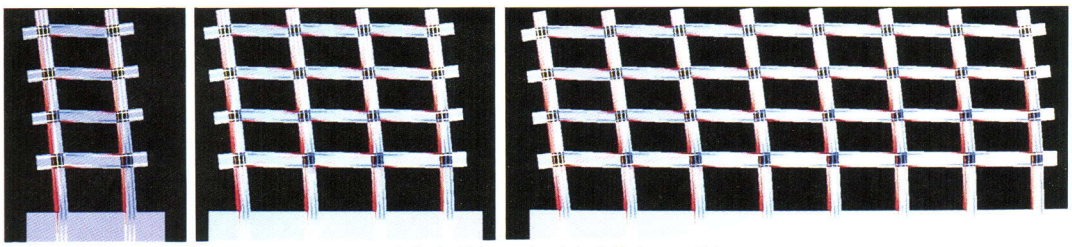
参考文献

1) 坂田弘安，和田　章：多層多スパン鉄筋コンクリート平面骨組模型の実験　曲げ降伏するはりの軸方向伸びを考慮した鉄筋コンクリート平面骨組の弾塑性性状に関する研究（第１報），日本建築学会構造系論文報告集，第403号，pp.45～55，1989年9月
2) 坂田弘安，和田　章，林　静雄，黒正清治：接合部パネルのせん断変形、鉄筋の付着すべりを考慮した分割要素法による鉄筋コンクリート骨組の弾塑性解析法，日本建築学会構造系論文報告集，第386号，pp.24～35，1988年4月
3) 須藤福三，和田　章：複数の荷重を受ける構造物の不安定領域を含んだ非線形解析法について，日本鋼構造協会第11回大会研究集会マトリックス解析法研究発表論文集，pp.217～222，1977年
4) 村山八州雄，野田　進：ＲＣ構造物の縮小実験に関する基礎的研究，鹿島建設技術研究所年報，第30号，pp.31～40，1982年7月

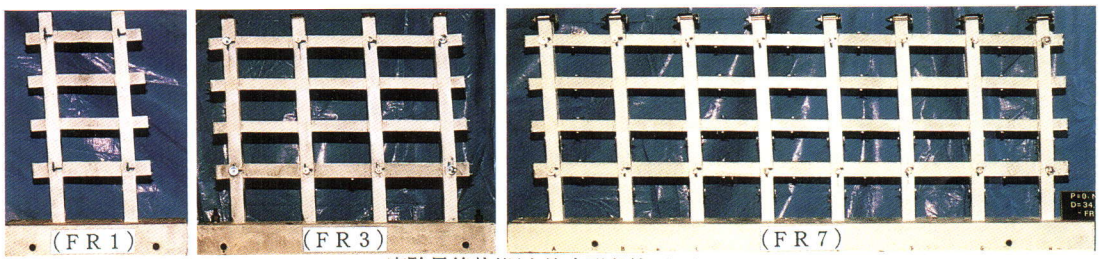
1　東京工業大学助手　　2　東京工業大学助教授・工博



全体変形角：1/200(変形倍率：20倍)

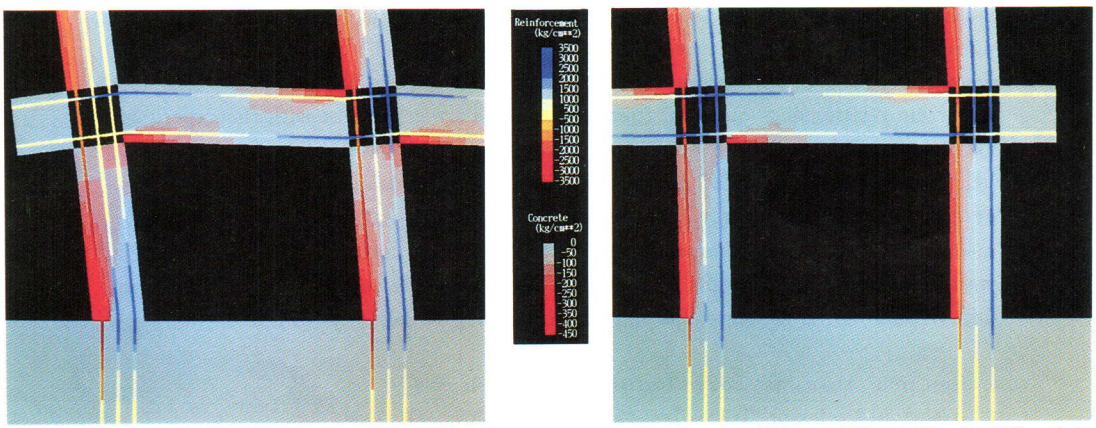


全体変形角：1/20(変形倍率：２倍)



実験最終状態(全体変形角約1/20)

写真－１　ＣＧによる応力分布図、変形状態図および実験最終状態



写真－２．ａ　ＦＲ７、１階の左端スパン部分の拡大

写真－２．ｂ　ＦＲ７、１階の右端スパン部分の拡大

写真－２　応力分布および変形状態の拡大図(全体変形角：1/20，変形倍率：２倍)

NONLINEAR ANALYSIS ON MULTI-STORY MULTI-SPAN REINFORCED CONCRETE ONE-TWENTIETH SCALE MODEL FRAMES

Hiroyasu SAKATA[1]
Akira WADA[2]

It is well known that a reinforced concrete beam will elongate in the axial direction when the beam begins to yield in bending. If this phenomenon occurs throughout all the spans, the horizontal length of the building will incease as a whole. Due to spreading out of the columns, the elongation in the horizontal direction is restrained to some extent. Taking into account this phenomenon, the beam tending to yield is considered to be subject to compressive forces from the surrounding beams and columns.

Monotonic loading experiments of three types of multi-story multi-span reinforced concrete frame (FR1,FR3,FR7) are performed to consider the effect of axial restriction of beam deformation. All of the specimens are four stories high. Specimen FR1, FR3 and FR7 has single span, three spans and seven spans respectively.

In these experiments, we get experimental results of the three scaled of multi-story, multi-span reinforced concrete frame in consideration of the effect of axial elongation in bending yield beams.

For the purpose of clarifying the mechanical behaviors of the reinforced concrete frames, further informations such as the distributions of shear force of columns, the axial forces of beams are required. These data can not be obtained directly from the experiment, therefore nonlinear analysis are performed here to make up for the insufficiency.

In this paper, finite segment method for reinforced concrete frame with consideration of axial and bending deformation of beams and columns, shear deformations of beam-column joints and bond-slip effort of steel m-column joint bars in concrete is used for analyzing the three experimented frames. The non-linear method used in this paper is the incremental method, also referred to as the initial stress method, which has developed on a basis of the stationary principle of incremental potential energy. An idealized model for FR1, FR3, FR7 has 3722, 7724, 15700 degrees respectively. We use the super computer ETA^{10} for analyses. The load deflection relationships obtained from this analysis are coincident with the experimental results. The analytical results provided us more detailed informations such as bending moments, shear forces and axial forces of all members and the crack propagations and deformation appearances at any load step. And we can understand why maximum load of these frames is greater than one calculated by method of virtual work. We show the diagrams of stress distribution by the computer graphics system. The CG animation greatly helps your understanding of behaviors of frames.

1 Research Associate, Tokyo Institute of Technology
2 Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.