

1 4 サブアセンブリッジの過大な変形によって誘発される骨組の全体的崩壊挙動

京大 中村恒善 京工大 石田修三 大阪産大○太田 修

1. 序

鋼構造重層骨組の弾塑性安定に関する近年の研究では、重力場での漸増横力載荷の場合を扱ったものが多く[1]、また、鉛直載荷のみを対象とする場合でも、漸増比例載荷を前提とした固有値解析・応答解析[1]の例はしばしば見受けられるが、局部的過荷重の漸増載荷に対する崩壊過程を対象とした研究は皆無である。特に歪硬化及び幾何非線形を考慮に入れると局部的過荷重を漸増した場合には、複雑な変形移行現象や複数の崩壊型の連成により、従来よく知られた鉛直荷重時のSway崩壊とは異なった挙動が予想される。例えば、ガス爆発、建設時の特殊事情、用途変更等によって、構造物の一部に計画外の異常荷重が作用することは実際に起こり得る事象であり、その時は破局の事態を招く恐れがある。従って異常荷重に対する構造物の崩壊挙動の研究は防災工学上重要な課題の一つであると思われる。筆者等は、1974年に6層張間の靱性骨組について、下層部の梁にかかる鉛直荷重の異常な増大が、その梁に過大な変形を生ぜしめるに止まらず、その張間を全層に渡って崩壊せしめた例[2]を示したことがある。また、最近入手した文献[3]でも非靱性的建築構造について、ガス爆発、爆撃、自動車の衝突等によるProgressive collapseの危険性を論じており、異常荷重に対する研究の必要性が指摘されている。耐震設計を施された重層骨組は概して水平力に対しては全体的靱性が保証されているが、前述の鉛直方向の異常荷重に対しては現状では必ずしも靱性的であるとは保証できない。剪断壁に水平力をもたせるべく設計された鉄骨高層骨組のブレースなし骨組は概して断面が小さく、鉛直方向の異常荷重に対する「ゆとり」は明確ではない。弾塑性安定の見地から鉛直過荷重に対する挙動を解明していく必要がある。

この研究の目的は、重層鉄骨骨組が局部的漸増鉛直荷重を載荷されたとき、載荷点近傍の過大な変形が如何にして骨組全体の崩壊に結びつくか、どのような新しい崩壊過程が存在し得るかを明らかにし、骨組に関する弾塑性安定問題の新しい側面を見出すことにある。ここでは、代表的な三つの骨組モデルを選び、筆者等が開発した複合非線形有限要素法[4~6]を利用してそれらの崩壊過程を詳しく解析した。その結果、局部的鉛直荷重がサブアセンブリッジに過大な変形を生ぜしめ、全体架構はその変形の進行に伴う変形モードの複雑な遷移過程を経て全体崩壊に至ることをつきとめ、少なくとも今まで知られていない三種類の基本的崩壊過程と一つの複合崩壊過程の存在を明らかにした。また、これらの架構が局部的鉛直荷重に対してもつ「ゆとり」についても若干の知見を得た。

2. 複合非線形解析法

この解析では問題の性格上、歪硬化と幾何非線形の影響が適確に把握されねばならないため、複合理論に基づいて筆者等が開発した大たわみ弾塑性解析法[4~6]を用いた。この方法は多部材よりなる平面骨組の静的及び動的崩壊挙動を、低コスト・高精度で追跡することを目的とした数値解析法である。この方法を用いるに際し、次のような仮定を設けた。(1)平面骨組の面内解析で通常仮定される事柄はここでも仮定する。(2)部材を理想サンドイッチ断面の短い棒要素の集合と考える。(3)要素の名フラン

3. モデル骨組と載荷条件

FIG.1 MODEL FRAMES

4. 構成法則について

Figure 1 is a schematic diagram of the test specimen, a 5-story frame structure. The dimensions and loads are as follows:

- Dimensions:**
 - Total height: 2300 cm
 - Floor-to-floor height: 380 cm
 - Total width: 2100 cm
 - Column-to-column width: 375 cm
- Loads:**
 - Vertical loads: V_1 and V_2 (in tons) are applied at the top.
 - Horizontal loads: P_A (in tons) are applied at the base.
- Structural Labels:**
 - The structure is labeled "plastic" and "elastic recovered".

Fig.1に示す7ケースの応答解析を行った結果、それらは次に示す三種の基本的崩壊型と、基本的崩壊型の二つが結合した複

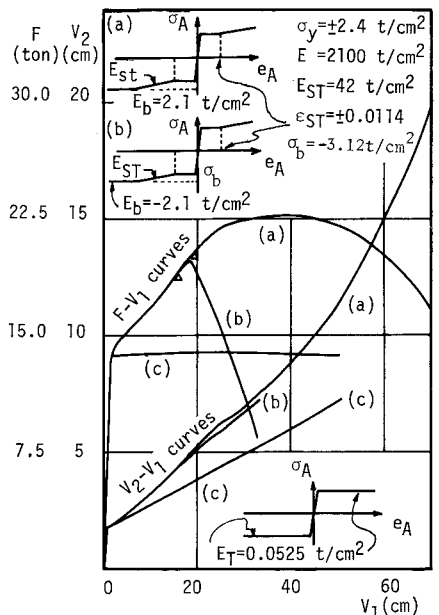


FIG.3 LOAD-DISPLACEMENT CURVE AND
DISPLACEMENT-DISPLACEMENT CURVES
(MODEL A)

目的の崩壊型に分類されることがわかった。基本崩壊形式としては、(1)Swayによって崩壊するもの(Waist-induced sway 型崩壊)、(2)特定の層が押し潰れて崩壊するもの(Crush-down型崩壊)、(3)外層外張間架構で外張間が一斉に崩壊するもの(連層片持梁型崩壊)である。これらのすべてはサブアセンブリブリッジの大変形に誘発されて起こる崩壊であり、(1)についてはその意味で通常のSway崩壊とは異なるものである。複合崩壊形式は、Bay毎のswayが複合したものである。最初にサブアセンブリブリッジの劣化について述べ、しる後、各崩壊型別にその崩壊の生成過程を述べる。

5-1 サブアセンブリブリッジの大変形について

この研究で扱った崩壊は、例外なくまず局部載荷梁のケーブル的変形によるサブアセンブリブリッジの大変形から誘発されたものである。サブアセンブリブリッジは次の劣化過程をたどる。(1)局所載荷梁の単純塑性理論で予測されるような塑性変形がまず進行する。(2)次に完全固定梁の固定端水平反力と同様の効果で梁のケーブル的変形と共に外柱が引き込まれることになる。(3)付加荷重の増大に伴って、上の傾向は更に強くなり、引き込み作用をうける上下層柱の「く」の字変形が大きくなり、柱軸力によるP- Δ モーメントはそれに伴って付加され、サブアセンブリブリッジ全体の劣化が促進される。

5-2 局所載荷梁のケーブル的変形に誘発されるWaist-induced sway 型崩壊

従来がよく知られたSway崩壊とせや異なるSway崩壊がB骨組について検出された。Fig.4はその最終的なSway崩壊型の状況を示す図である。崩壊型の生成過程は次の通りである。(1)最大耐力点近くまではサブアセンブリブリッジの劣化が対称的に進行する。このことはFig.5の V_2 - V_1 曲線におけるB1-left side曲線とB1-right曲線の偏差が顕著になる点及び V_3 - V_1 曲線の立ち上がり点の V_1 値に対する R - V_1 曲線の縦軸 R の高さをみればわかる。即ち頂部の左右端が横移動なく等しく沈下していることからわかる。同様なことはFig.6からも明瞭である。(2)その後急激に変形の対称性が崩れ、対応して2層目左右柱の曲げモーメントの偏差もFig.6に示すように急増し、その層があたかも層機構に連したかのような形のSway崩壊が生じる。このSway崩壊は特にサブア
センブリブリッジの劣化に追従するものであり、
後述の5-5節に述べるように微小変形理論

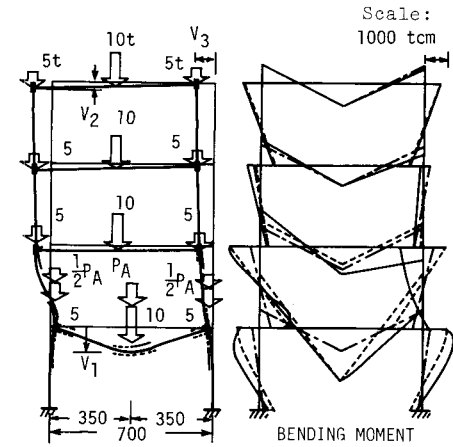


FIG.4 WAIST-INDUCED SWAY TYPE COLLAPSE (MODEL B1)

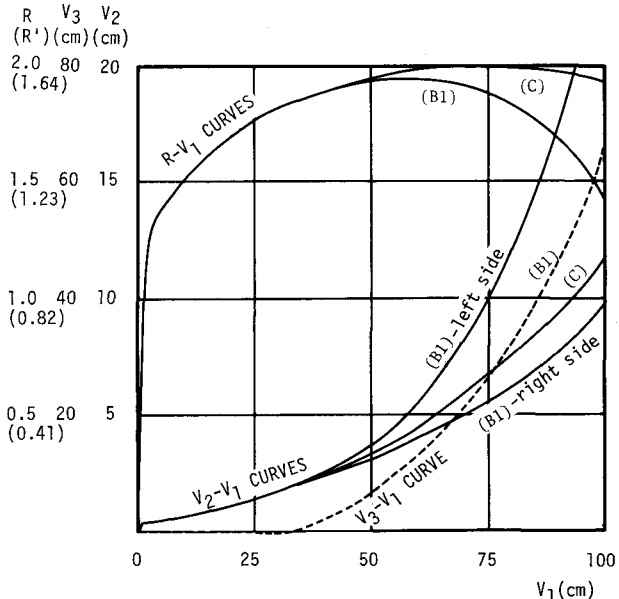


FIG.5 LOAD-DISPLACEMENT CURVES AND DISPLACEMENT-DISPLACEMENT CURVES (MODEL B1, MODEL C)

での Sway 崩壊荷重とは異なる荷重レベルで生じるものである。

5-3 局所載荷梁のケーブル的変形に誘発される対称な Crush-down 型崩壊

対称骨組が対称な鉛直荷重及び付加局所鉛直荷重を受ける場合で sway に対する拘束があると、下層のサブアセンブリリッジ自体の対称的な圧潰によって崩壊に至る。C モデルを用いてその挙動を調べた結果を Fig. 5, 6, 7 に示す。サブアセンブリリッジより上層部は力の再配分を受けることなく単に剛体的な沈下を続けるのみであった。

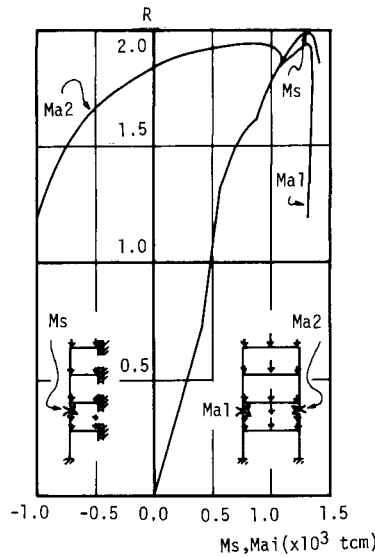


FIG. 6 COMPARISON OF LOAD-BM CURVES OF CRUSH-DOWN AND SWAY PROCESSES

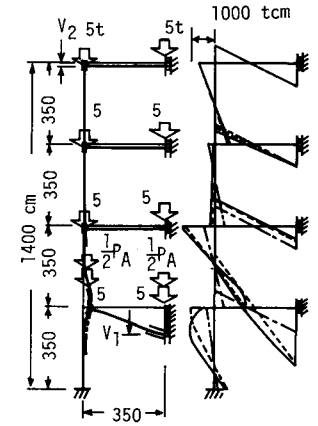


FIG. 7 CRUSH DOWN TYPE COLLAPSE (MODEL C)

5-4 外張間の、局所載荷梁のケーブル的変形に誘発される連層片持梁型崩壊

A モデル (Fig. 2) 及び D1 モデル (Fig. 8) は、外張間 1 階床梁の過大な変形に始まってその張間全体が崩壊するに至る崩壊型を呈する。ここでは、代表的に D1 モデルについてその崩壊型の生成過程を、Fig. 9, Fig. 10 を参照して述べる。(1) 前述のサブアセンブリリッジの劣化により逆「く」の字形に曲った柱 (Fig. 8) は、支持能力を減少し、(2) その張間の鉛直荷重は上層部の梁によって片持支持されるようになる。このことは Fig. 10 のように 2 階 3 階梁の右端の剪断力が増加しつづけていることから確認される。(3) 付加鉛直荷重の増大に伴ってせがてこれらの片持支持機構はその固定端に連鎖的に曲げ降伏を生じ、支持力は限界に達し、Bay 全体が崩落するような変形を示す。この様に、複数スパンをもつ重層骨組の外張間を支える各層の梁が下層部外柱の支持能力喪失により連鎖的に崩落する崩壊形式を連層片持梁型崩壊と呼ぶことにす

る。

5-5 局所載荷梁のケーブル的変形に誘発される Sway-sway 型複合崩壊

D2 モデルは非対称な複数局所付加鉛直載荷の場合を代表するものであり、前述の Waist-induced sway 崩壊とは異質の崩壊過程をたど

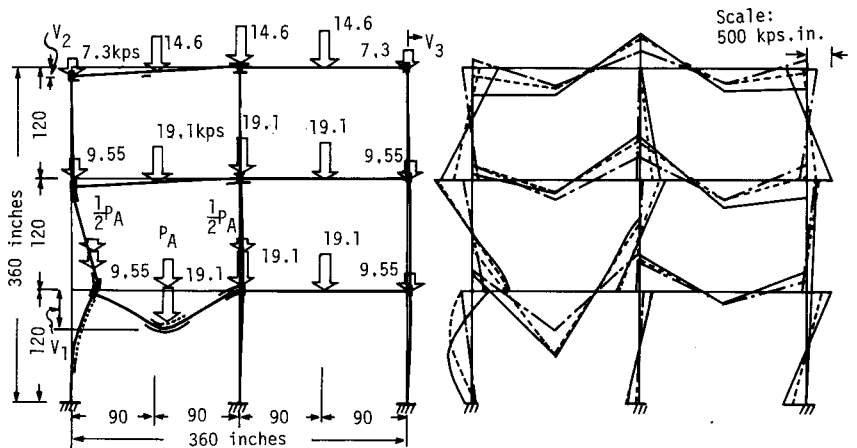


FIG. 8 PARALLEL CANTILEVER TYPE COLLAPSE (MODEL D1)

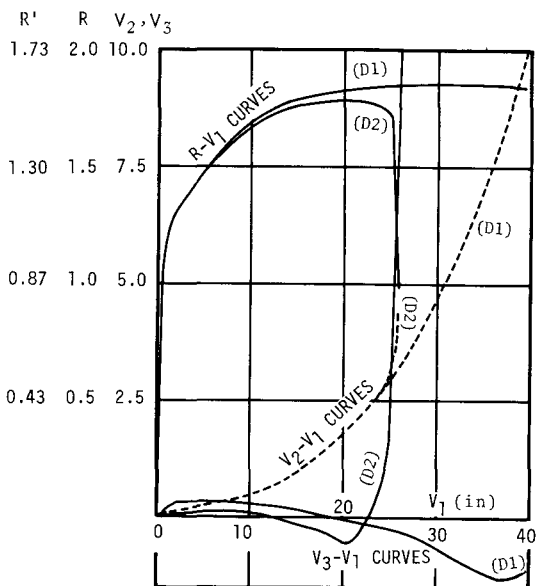


FIG.9 LOAD-DISPLACEMENT CURVES AND DISPLACEMENT-DISPLACEMENT CURVES (MODEL D1)

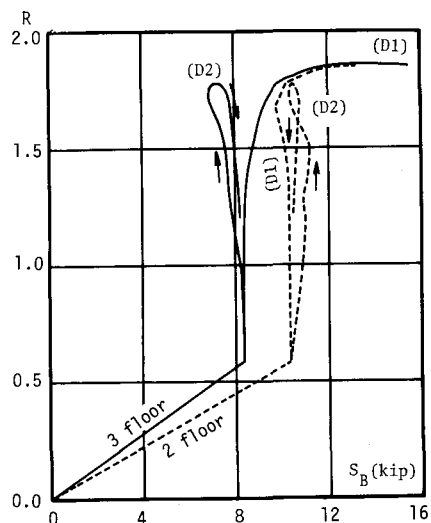


FIG.10 LOAD-SHEAR FORCE CURVES (MODEL D1, MODEL D2)

る。即ち、(1)二つの局所載荷梁で、それぞれ単純塑性理論で予想されるような塑性変形が進行し(Fig.11)
(2)左側の局所載荷梁の周辺に5-1節で述べたと同様のサブアセンブリ劣化が進行する(Fig.11)。
(3)その際その直上の梁には、せがて圧縮力が作用し、中柱この節点を右方向に押し(Fig.12におけるD2モデルのR-H_{BR}曲線参照)。(4)右載荷梁の局所鉛直荷重も増加し続けるので、ここでもケーブル作用が生じ、せがて引張力が作用し始める(D2モデルのR-H_{BR}曲線参照)。(5)このような左からの圧縮と右からの引張の累加により、その節点は右へ移動し続けP-Δ効果を誘発する。(6)そのP-Δモーメントの増大により最下層が層機構に類似した運動を起こし、急激に崩壊に向かう(Fig.9)。

異なる梁間に属する二つの付加載荷梁のケーブル作用の連成によって生じたこのような Sway崩壊を特に Sway-sway 崩壊と呼ぶことにする。Sway-sway 崩壊と対比するために、D3モデルの挙動を調べ、Fig.12に示しておいた。D3モデルの場合には梁の塑性化によるサブアセンブリ劣化は起こらず、微小変形理論での Sway 崩壊と同質の挙動を示す。従ってその最大鉛直載荷能力は比較的高く、それに反してD2モデルの能力は、その半分程度しかないことがわかる。

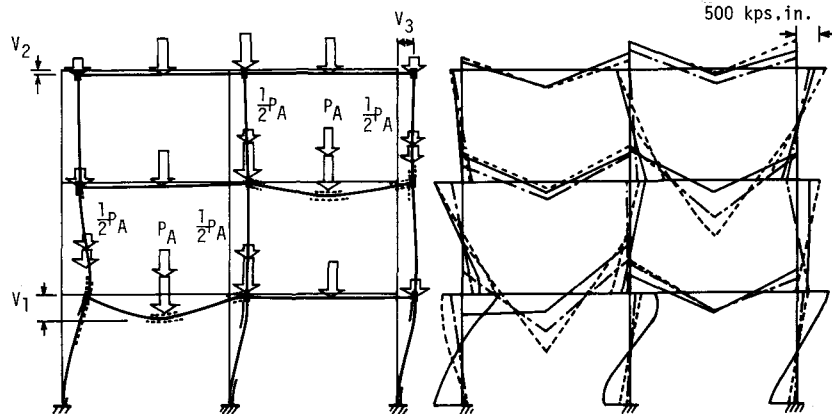


FIG.11 COMBINED SWAY-SWAY TYPE COLLAPSE (MODEL D2)

6. Waist-induced sway型崩壊とCrush-down型崩壊の比較

ここでは参考のために、B1モデルとCモデルについて挙動の比較を行うためFig.5とFig.6を示しておいた。Fig.6はB1モデルの左右2階柱の柱頭部曲げモーメント M_{a1} , M_{a2} の変化と、Cモデルの対応する曲げモーメント M_s を載荷全鉛直荷重の設計用過荷重に対する比 R に関して示した図である。B1モデルの曲線は、ある R 値まではCモデルの曲線と殆んど一致しており、その R 値であたかも分岐点を通じたかの如くに枝分れしている。従ってB1モデルの曲線はほぼ対称な壊モードからの分岐後分枝を表わしていると思われる。

7. 結語

以上の解析結果を要約すると次のようになる。

(1) 表題のように大たわみを経由して生じる崩壊過程の追跡には幾何学的非線形と歪硬化の効果を共に考慮した複合非線形解析に基づく必要がある。

(2) 筆者等の開発による複合非線形数値解析法を用いて、局所的漸増鉛直荷重に対する一連のモデル骨組の崩壊過程を追跡した結果、今までに知られていなかった四つの崩壊過程、即ち、Waist-induced sway型崩壊、Crush-down型崩壊、連層片持梁型崩壊、Sway-sway型崩壊を見出した。これらは全て局所載荷梁のケーブル作用に起因するサブアセンブリの大変形に基づくものであることが明らかになった。

(3) 鉛直過荷重が節点のみに作用させられるときのSway崩壊荷重係数に比べると、本論の結果のようにWaist-induced sway型崩壊荷重係数は著しく低いことがわかった。

(4) 局所鉛直荷重を受けてサブアセンブリの大変形を経験する層層骨組が崩壊に対して保有する「ゆとり」を、過荷重時設計用鉛直荷重に対する崩壊荷重の比で表わすものとすれば、「ゆとり」のオーダーは1.8～2.0の程度であった。

参 考 文 献

- [1] 日本鋼構造協会技術委員会安全分科会座屈小委員会ラマンの弾塑性安定問題,「ラマンの弾塑性安定特集」,JSSC, Vol.3, No.17, 1-49, 1967. 同 鋼構造骨組の終局耐力に関する特別研究グループ,「特集/鋼構造骨組の終局耐力に関する研究」,JSSC, Vol.6, No.55, 13-55, 1970.
Tanabashi, R., Kaneda, K., Nakamura Tsuneyoshi and Ishida, S. "To the final state of rectangular frames", Proc. 4WCEE, Chile, A4-179-194, 1969.
- [2] Nakamura Tsuneyoshi, Ishida, S. and Ohta, O. "Collapse behavior and imperfection sensitivity of minimum weight plastic frames, Abstract presented at 1974 Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, Struct., 753-754, 1974.
- [3] Leyendecker, E.V. and Ellingwood, B.R. "Design methods for reducing the risk of progressive collapse in buildings". National Bureau of Standards Building Science Series 98, 1977.
- [4] Tanabashi, R., Nakamura Tsuneyoshi and Ishida, S. "Gravity effect on the catastrophic dynamic response of strain-hardening multi-story frames". Proc. 5WCEE, Rome, Italy, 2, 2140-2151, 1974.
- [5] Yokoo, Y., Nakamura Tsuneyoshi, Ishida, S. and Nakamura Takashi, "Cyclic load-deflection curves of multi-story strain-hardening frames subjected to dead and repeated alternating lateral loads, Preliminary Report of IABSE symp. on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads Lisbon, 81-87, 1973.
- [6] 中村恒善, 石田修三,「弾塑性骨組の静的及び動的大たわみ解析」, 骨組構造解析法要覧, 9章, 185-210, 1975.

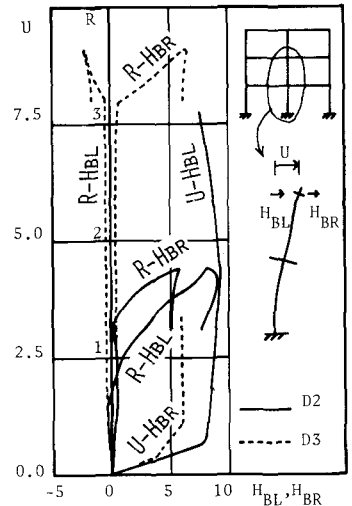


FIG.12

COMPARISON OF COUPLING EFFECTS OF TWO DETERIORATED SUBASSEMBLAGES IN TERMS OF THE INTERACTING BEAM AXIAL FORCES

- [7] 渡部 丹, 「新耐震設計法(案)」, 日本地震工学会ニュース, No.37, 8-25, 1977.
- [8] Driscoll, Jr. G.C. 他原著, 寺崎恒正他共訳, 武藤 有監修, 「高層骨組の塑性設計」, 鹿島出版会, 第4章, 323, 1968.
- [9] Tanabashi, R., Yokoo, Y., Wakabayashi, M., Tsuneyoshi Nakamura, Kunieda, H., Matsunaga, H. and Kubota, T. " Load-deflection behaviors and plastic fatigue of wide-flange beams subjected to alternative plastic bending, I Experimental investigation", Trans.A.I.J. No. 175, 17-29, 1970.
- [10] Tanabashi, R., Yokoo, Y., Wakabayashi, M., Tsuneyoshi Nakamura and Kunieda, H. "Deformation history dependent inelastic stability of columns subjected to combined alternating loading", Proc.1971 RILEM International Symposium on Experimental Analysis of Instability Problems on Reduced and Full-scale Models, Vol.III, 275-295, 1971.
- [11] 加藤 勉, 秋山 宏, 井上 景彦, 「中心圧縮柱の座屈後の挙動」, 日本建築学会論文報告集, 第229号, 67-76, 1975.
- [12] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. " THEORY OF ELASTIC STABILITY." McGraw-Hill, 66, 1961.

P_1, P_2 (ton)

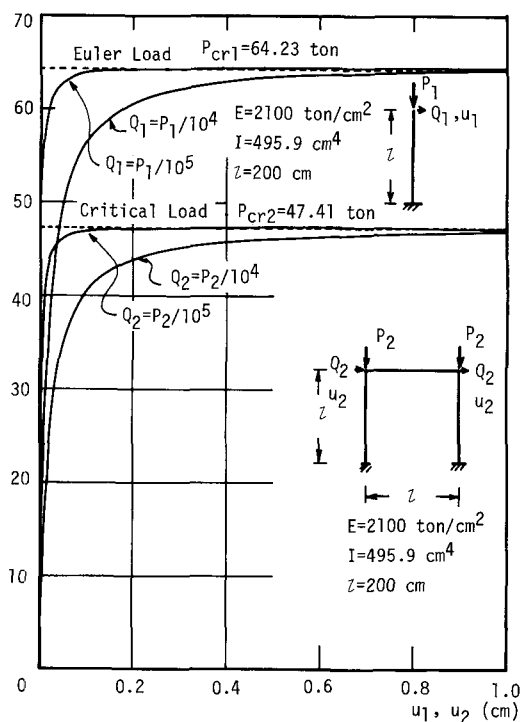


FIG.13

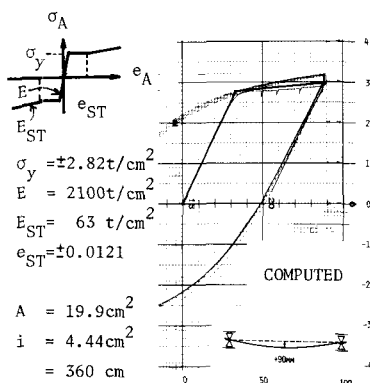


FIG.14

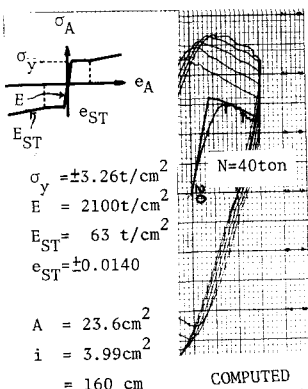


FIG.15

付 録 数値解析法の精度検証例

筆者等の方法による数値解と理論解との照合を行うためFig.13に長柱と門型ラーメンの弾性座屈[12]の例を示した。又、実験との照合を行うためFig.14, Fig.15にそれぞれ梁[9], 梁柱[10]の定軸圧下の横力載荷試験結果[9]を、同じくFig.16に加藤等による短柱の座屈後挙動の実験例[11]を引用し、それぞれについて対応する数値解を示しておいた。

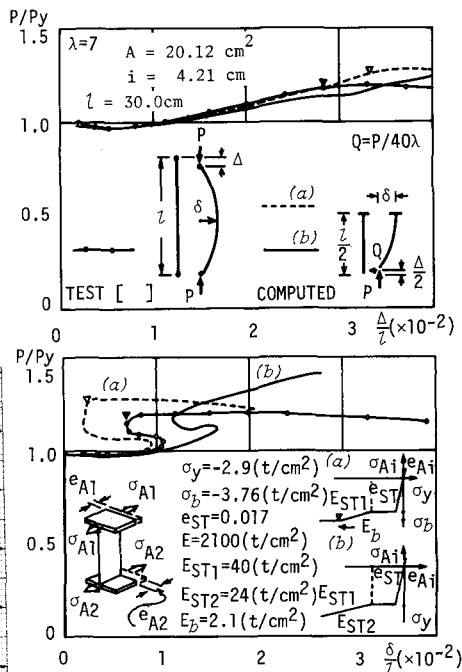


FIG.16

OVERALL COLLAPSE OF MULTI-STORY FRAMES
INDUCED BY THE LARGE DEFORMATION OF SUBASSEMBLAGES

By Tsuneyoshi NAKAMURA^{*}, Shuzo ISHIDA^{**} and Osamu OHTA^{***}

Abnormal vertical loads may happen to be applied on some beams of a multi-story frame in addition to their design gravity loads, due to circumstances during erection, gas-related explosion, changes of building uses, etc.

In accordance with the simple plastic theory, the damage may seem to be restricted only to the overloaded beams. Such is not the case in strain-hardening frames. Due to the restraints of the surrounding members, a cable action would be developed as an abnormally loaded beam is deformed greatly. So far as the restraints of the adjacent slabs and orthogonal beams are negligibly small, its reaction will then cause a Δ -type deflection in the adjacent columns. If the abnormal vertical load were further increased, the deterioration of the sub-assembly due to the so-called $P\Delta$ -effect would reach a critical state and the whole bay or story to which the beam belongs would then collapse.

In this paper, three different collapse processes and a combined collapse process have been discovered through numerical analysis on model frames:

- (1) PARALLEL CANTILEVER TYPE If the sway deflection is restrained by the remaining bays, the beam above the deteriorated subassembly must act as parallel cantilevers for supporting all the gravity loads thereupon and the whole bay would eventually collapse.
- (2) WAIST-INDUCED SWAY TYPE The cable action of an abnormally loaded beam in a single-bay frame will first cause a waist-type deflection and subsequently induce a sway deflection. The load level may in some cases be far below the level defined by the eigenvalue of a corresponding linearized problem.
- (3) CRUSH-DOWN TYPE If the sway displacements of all the stories in a single-bay frame are restrained, the deteriorated subassembly will eventually be crushed.
- (4) COMBINED SWAY-SWAY TYPE The cable action in one deteriorated subassembly of a two-bay frame may be coupled unfavorably with that in the other subassembly and induce a sway collapse also at a lower load level than that defined by the eigen-value.

* Associate Professor of Architecture, Kyoto University

** Associate Professor of Architecture, Kyoto Technical University

*** Associate Professor of Civil Engineering, Osaka Industrial University