

分散載荷実験システムによる統合化耐震性能評価法に関する研究 (その1)

—実験システムの構築—

玉井宏章* ・高松隆夫*
五十嵐秀一** ・山西央朗***

(平成17年9月9日受理)

Distributed Loading System for Collaborative Seismic Performance Evaluation on Overall Buildings (Part 1)

—Outline of Test System—

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU,
Hideichi IGARASHI and Teruaki YAMANISHI

(Received Sep. 9, 2005)

Abstract

Tada and Kuwahara proposed a scheme for Internet-based structural analysis in which many researchers worldwide can collaborate and unify their different programs and structural models.

This paper first introduces the structural loading system of an exposed column-base. This loading system enables us to simulate the variation of rotational stiffness and bending moment carrying capacity under varying axial force. Hence, the technique of Internet-based structural analysis is used to perform the collaborated pseudo dynamic test on a building frame with an exposed column-base subjected to vertical and horizontal forces. The results show the simplicity of the collaboration producers, the stable transfer of information between programs and loading system, and the overall complicated resisting behavior of a canti-lever with semi-rigidly-connected column-bases.

Key Words: pseudo dynamic test, internet-based collaboration, numerical analysis, column-base, semi-rigid connection

1. はじめに

「耐震設計における設計物理諸量の基準の抛り所はいつたどこにあるのだろうか?」という問に対して、現在、整備の進んでいる兵庫耐震研究センターの世界最大の大型

型振動台で、実大の鉄骨建物を倒壊させ、具体的にどのくらいの余力を付与すべきかの検討が行われつつある。

建物を倒壊させるためには、振動台の性能として、巨大な入力エネルギーとストロークが要求されるため、実大でも、小型サイズのものしか検討できないケースが多い¹⁾。

* 広島工業大学工学部建設工学科

** 理研精機株式会社技術部

*** 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

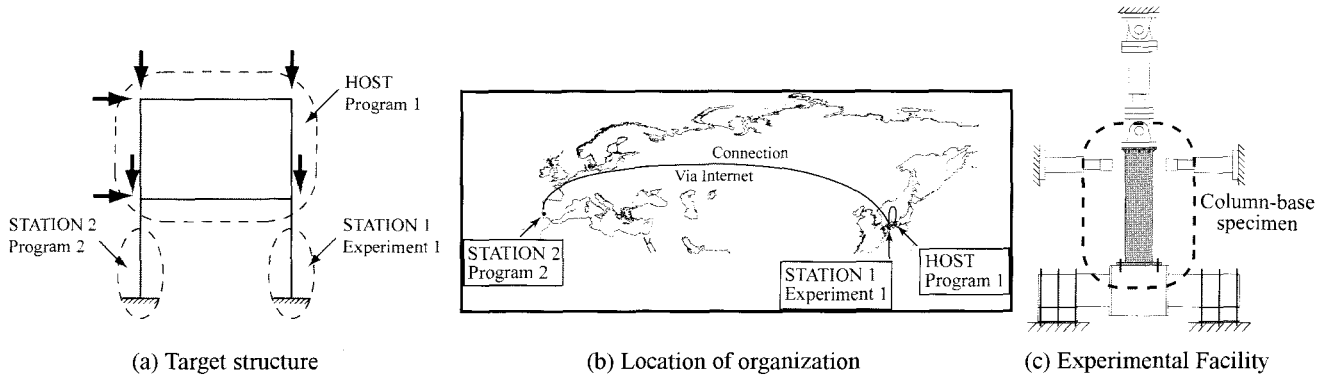


Fig.1 統合化実験，分散型実験の概念

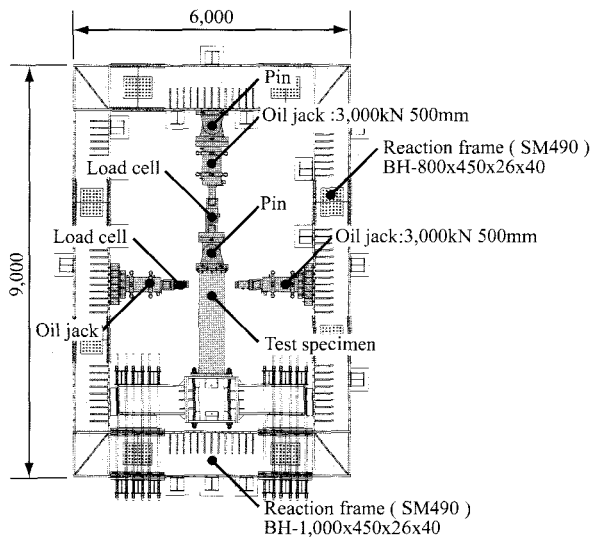


Fig.2 柱脚載荷システム

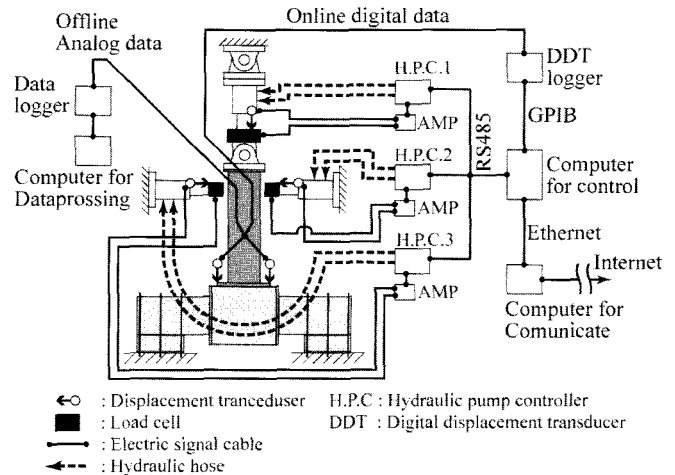


Fig.3 制御システムの構成

一方、振動方程式、特に慣性力の効果や建築構造物、中でも、数値モデルで良好に表現できる部分は数値シミュレーションを、一方モデル化が困難ないしは、破壊が危惧される部分については実験を行って、それらを組み合わせて建物全体の実地震応答挙動を検討する、仮動的実験が提案されている。この方法によれば振動台実験方法と較べ大型の構造物も比較的容易に取り扱うことが可能となる^{2),3)}。

また、多田、桑原ら^{4),5)}は、解析手法において、画期的な方法を提唱した。世界各地に点在する、ある構造部分については詳細かつ精密な解析プログラムを異種 OS、異種言語を用いていても、容易に接続でき、建物全体の挙動を解析できる『統合化解析手法』を提案した。

更に、広島工業大学に高性能構造システム開発センターが設置され、比較的規模が大きく高精度な油圧系の実大部分構造加力装置が 2005 年度に配備・運用が開始された。

本研究は、上述の背景をもとに、方法としては、この実大部分構造加力装置を用いて、部分構造法によるオンライン実地震応答シミュレータを構築するとともに、インターネットを介して異種構造解析プログラム/異種構造実験システムを容易に接続できる分散型実験の接続法(インターフェイス)を併せて開発する。

この部分構造法によるオンライン実地震応答シミュレータとインターネットを用いた分散型実験の接続法を融合すれば、国内外の研究者と分散型実験が可能となり、それらの研究者とは建築構造学の知見、特に、部材相互の関連や作用の影響に関する知見が共有できるので、複雑な構造挙動の解明が容易になる^{6)~8)}。この遠隔地にいる国内外の研究者が協力・強調して、対象とする建物の部分構造の解析と実験を相互作用を考慮して行い、個々の部分構造の挙動から、各研究者の専門知識を駆使して、建物全体の耐震性能を明らかにする評価方法を、本研究では、統合化評価法と呼ぶことにする。本論文では、この統合化評価を目標とした実験システムの構築及び整備結果について述べる。

2. 分散型実験システムの概要

2.1 システム構成

分散型実験を利用した Pushover 実験を考える。Fig.1(a)の例題を実験対象にする。この構造物を仮想的に 2 層フレームと左右の柱脚付柱の 3 つの部分に分割する。梁、柱及びパネルの特性を詳細に解析できる Program 1、柱脚の特性を詳細に解析できる Program 2、更に柱脚の復元力を実験により得られる Experiment 1 がそれぞれ Fig.1(b)

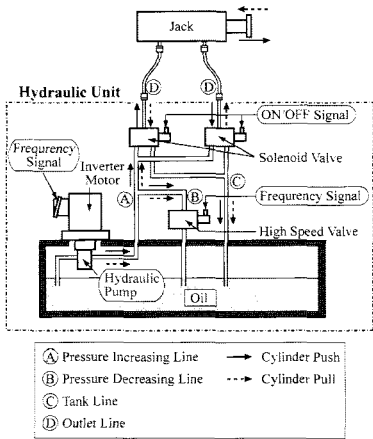


Fig.4 油圧ポンプユニットの概念

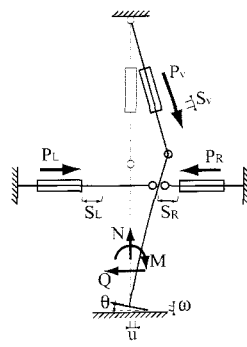


Fig.5 計測諸量の模式図

のように遠隔地に存在する研究者が所有しているとする。
柱脚は上層部から伝達される軸力により、抵抗しうる曲げモーメント値が大きく変動する。2層及び1層の層間変位は、柱脚の固定度によって大きく変化する。従って、それぞれの構造部材の特性を追跡しうる Program 1, 2 及び Experiment 1 がそれぞれの接続情報を共有しあえば、柱脚と上部構造物との相互作用の効果を考慮して、建物全体の挙動を調べることができる。

本分散実験システムではインターネットを介して、これらを接続し、解析・実験を行う方法である。

2.2 実験装置

分散実験の有効性を示すのに構築した、実大柱脚載荷システムの概要を以下に示す。

Fig.2 に載荷システムを示す。外法寸法で 9,000mmx6,000mm の口型反力フレーム (BH-1, 000x450x26x40, BH-800x450x26x40, SM490) にストローク 500mm, 載荷能力 ± 3,000kN の複胴式油圧ジャッキが 3 台設置されている。

□ -550x22, (BCR295) の角型鋼管柱に PL-900x900x60 (SM490) のベースプレートが溶接された露出柱脚付・柱が鋼製基礎に 4 本の転造ネジアンカーボルト (M42, ARB400) で締結された実大試験体を、ゲビンデで反力フレームに固定している。鉛直力を作用させるジャッキが、柱軸線上に、ピンを介して、接続され、水平力を作用させるジャッキが左右 2 本、ベースプレート下端から 2,015mm の位置に柱軸直交方向に圧縮力のみ作用するように設置している。この載荷システムの 3 本のジャッキを載荷制御と変位制御ストローク制御とを切替えながら、互いに連動させて試験を行う。

Fig.3 には、制御システムの構成を Fig.4 には油圧ポンプユニットの概要をそれぞれ、示す。ジャッキ先端に取り付けられたロードセル (容量 3,000kN) とピストン先端

と端部との間の相対変位ストロークをデジタル変位計 (最小分解性能 1μm) から、動ひずみ増幅器とパルスカウンターを介して、それぞれのジャッキ毎の油圧ユニットコントローラーに接続している。油圧ユニットコントローラーは、10ms の時間間隔で、荷重 / 変位ストローク制御 (油圧, 減圧弁, 押し切替弁の制御) を行っている。

独立した 3 台の油圧ユニットコントローラーは、RS485 通信回線で、制御用コンピュータと接続されている。試験体の変位 (ここではベースプレート回転角) でも制御しよう、この変位を調べるデジタル変位計が、パルスカウンターを介して、GPIB 通信回路で、制御用コンピュータは、イーサネット回線でインターネットで接続されており、ソケット通信プログラムを介して全世界の研究者、研究機関と、分散型実験を実施することができる。

試験体の詳細な計測データは、これらとは別系統で収録される。計測諸量の模式図を Fig.5 に示す。

3. 載荷システムの位置決め方法

分散型実験では、指示された荷重ならびに変位の状態に正確に一致する加力を行い、それに対応する各応答を求める必要がある。

加力治具にガタやクリアランスがあると指示制御量と実制御量との差、いわゆる位置決め誤差は大きくなり、制御に要する時間も増大する。また本実験装置のように多自由度制御は各制御を同期させ同時に制御を完了させる、いわゆる同時到達性を確保する必要もある。

また、不可避の位置決め誤差を定量化して、それらの誤差を修正、補正して、各応答の信頼性を保つ必要がある。本節では、これらの加力方法に関する課題の解決方法を示す。

3.1 水平加力方式について(加力治具, クリアランスの除去)

柱に水平力を作用させる左右 2 本のジャッキは、1 本は一定圧縮力の荷重制御、もう 1 本は目標のベースプレートの回転角を生じさせるような変位を強制するストローク制御を行う。Fig.6 にこの制御の概念図を示す。

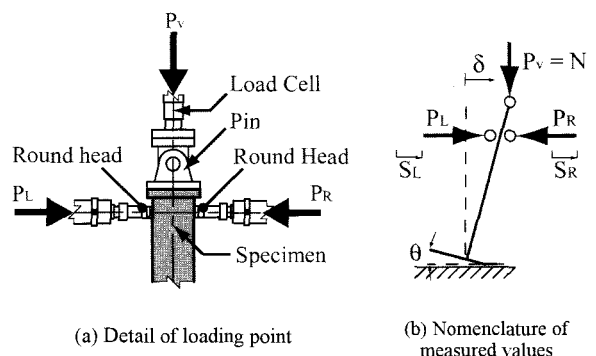


Fig.6 試験体加力点近傍の詳細

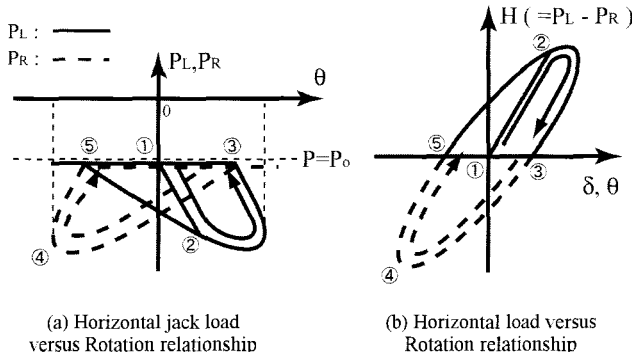


Fig.7 水平加力のジャッキの制御法

Fig.7に、この制御の結果得られる代表的な左右ジャッキの圧縮力、 (P_L, P_R) とベースプレート回転角 θ 及び水平力 H と θ の関係を模式的に示す。

Fig.7のように、まず、初期圧縮力 \bar{P}_0 で左右ジャッキから柱頭を荷重制御で挟む

$$P_L = P_R = \bar{P}_0 \quad (1)$$

ここに、 P_L, P_R は左右ジャッキの圧縮力である。

柱に作用する水平力 H は次式で求まる。

$$H = P_L - P_R \quad (2)$$

Fig.7からわかるように、左右ジャッキの制御分担は、次式で分類できる。

$H \geq 0$ 、または、 $P_L \geq \bar{P}_0$ のとき

左側ジャッキはストローク制御 ($S_L = \bar{S}_L$)

右側ジャッキは荷重制御 ($P_R = \bar{P}_0$)

$H \leq 0$ 又は、 $P_R \geq \bar{P}_0$ のとき

左側ジャッキは荷重制御 ($P_L = \bar{P}_0$)

右側ジャッキはストローク制御 ($S_R = \bar{S}_R$)

左右ジャッキの制御の切換えは、次式で判定する。

$$H = 0 \text{ 又は } P_L = P_R = \bar{P}_0 \quad (3)$$

$\Delta\theta \geq 0$ のとき左側ジャッキはストローク制御

右側ジャッキは荷重制御

$\Delta\theta \leq 0$ のとき左側ジャッキは荷重制御

右側ジャッキはストローク制御

一般に加力治具はガタ・クリアランスが生じ、また振動では、正負をクロスする2自由度でかつ正負方向の载荷をする。

応答が非常に多いので、このゼロクロス点で制御に時間がかかったり位置決め精度が劣下する傾向にあるが、この方法によれば、水平方向加力についてはガタ・クリアランスは完全に除去できるので、良好な位置決め精度が確保できる。

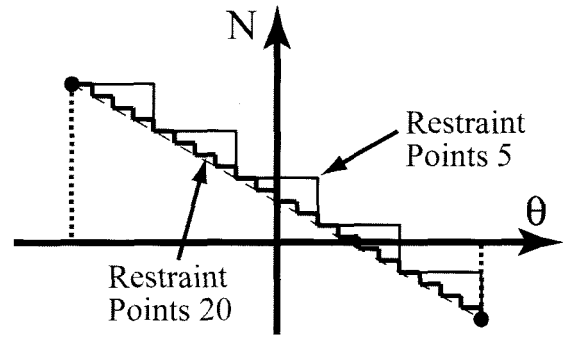


Fig.8 増分量の細分化と同時到達性

3.2 2自由度の载荷方法について (同時到達の確保)

多自由度の加力が作用する場合、試験体の耐荷力等の構造特性は、その組み合わせにより大きく変化する。したがって、これら多自由度の加力試験については、目標となる加力状態に、各自由度について同時に到達させることが望ましい。本試験体では、軸力、 N とベースプレート回転角、 θ の2自由度の载荷制御を取り扱う。軸力、 N と鉛直ジャッキの荷重、 P_V 及びベースプレート回転角、 θ と水平ジャッキのストローク、 S_L の間に次の関係が成立したとする。

$$m_N = \frac{\Delta P_V}{\Delta N}, m_\theta = \frac{\Delta S_L}{\Delta \theta} \quad (4.a,b)$$

ここに、 $\Delta(\)$ は各増分量を示している。

$\Delta\theta, \Delta N$ の増分量を出力し、各自由度を同時に到達させるためには、 S_L 及び P_V の速度を次式のように設定すれば良い。

$$\dot{S}_L = v \quad (5.a)$$

$$\dot{P}_V = \frac{m_N}{m_\theta} \cdot \frac{\Delta N}{\Delta \theta} \cdot v \quad (5.b)$$

ここに、 v は定数であり実験計測所要時間及び加圧ポンプ性能等を統合的に判断して定められる。

Fig.8に N と θ とを制御した時の関係を同時に線形関係にあるとして模式的に示す。(5.a,b)式の関係が大きく乱れた場合、例えば、 N と θ とで別々の時刻に制御を行った結果の例を図に示している。

2者の関係を拘束する点数、すなわち増分量を細かくするにつれ、 N と θ の関係は階段状から直線状に近づくことが判る。したがって、2軸载荷を良好に実施するには、増分を細分化することが最も効果がある。本節で示した方法は、1つの階段状のステップをより直線状に近づける工夫といえる。

3.3 制御の完了条件

制御の終了条件は次式とする。

$$e_\theta \geq -\overline{e_\theta} \quad (6.a)$$

$$e_N \geq -\overline{e_N} \quad (6.b)$$

$$\text{ここに } e_\theta = \text{sgn}(\Delta\theta) \cdot (\theta_{fin} - \theta_{obj}) \quad (7.a)$$

$$e_N = \text{sgn}(\Delta N) \cdot (N_{fin} - N_{obj}) \quad (7.b)$$

θ_{fin} , N_{fin} は、制御後のベースプレート回転角及び軸力、
 θ_{obj} , N_{obj} は、目標とするベースプレート回転角及び軸力、
 $\Delta\theta$, ΔN は、ベースプレート回転角及び軸力の増分
 であり、 $\overline{e_\theta}$, $\overline{e_N}$ は、事前に求めたベースプレート回転角
 及び軸力に関するオーバーシュート量の平均予測値であ
 る。

3.4 位置決め誤差の補正

自由度、多自由度に拘らず、加力装置の位置決めには
 誤差が生じてしまう。この誤差は、系統的に (7) 式で示
 したオーバーシュート量が正の値となる場合（通常はオー
 ーシュートと呼ぶ）は、真値と較べ応答値は小さめに、
 反対に、負の値となる場合（アンダーシュートという）は
 大きめとなる。したがって、正確な応答値を求めるため
 にはこの誤差を補正しておく必要がある。

この解析方法には、1) 運動方程式の時間刻みの位置決
 めを完了した位置に見合うように修正する方法と、2) 実
 験で求める復元力を内挿式で表現し、目標位置に対応す
 る復元力を予測する方法の2通りが考えられる。

本研究では、2) の方法を採用する。この概念を Fig.9
 に示す。

いま、状態 Ω_1 , (M_1, N_1, θ_1), 状態 Ω_2 , (M_2, N_2, θ_2) と
 いう2つの組の実験データが得られ、状態 Ω_2 からの増分
 が与えられ、増分 ($\Delta N, \Delta\theta$) をもとに実験した結果、
 位置決め誤差を含む状態 Ω_3 , (M_3, N_3, θ_3) が得られたと
 する。

いま、増分後の状態 Ω_n すなわち、($M_n, N_n=N_2+\Delta N, \theta_n=\theta_2+\Delta\theta$)
 の組を求めることを考える。曲げモーメント M は、次式
 の関数で表される。

$$M = f(\theta, N) \quad (8.a)$$

$$= f(s) \quad (8.b)$$

ここに、

$$s = \sqrt{(\theta - \theta_1)^2 + (N - N_1)^2} \quad (8.c)$$

この状態 $\Omega_1 \sim \Omega_3$ の値の組から、負荷・除荷を判定し、
 M_n を次式のように求める。

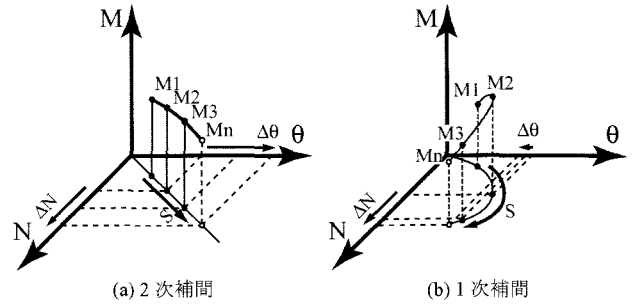


Fig.9 位置決め誤差の補間法による補正

$$(M_2 - M_1) \cdot (M_3 - M_2) + (N_2 - N_1) \cdot (N_3 - N_2) \\ + (\theta_2 - \theta_1) \cdot (\theta_3 - \theta_2) > 0$$

のとき (負荷時)

$$M_n = \frac{(S_n - S_2) \cdot (S_n - S_3)}{(S_1 - S_2) \cdot (S_1 - S_3)} \cdot M_1 \\ + \frac{(S_n - S_1) \cdot (S_n - S_2)}{(S_3 - S_1) \cdot (S_3 - S_2)} \cdot M_2 \\ + \frac{(S_n - S_1) \cdot (S_n - S_3)}{(S_3 - S_2) \cdot (S_3 - S_2)} \cdot M_3 \quad (9.a)$$

$$(M_2 - M_1) \cdot (M_3 - M_2) + (N_2 - N_1) \cdot (N_3 - N_2) \\ + (\theta_2 - \theta_1) \cdot (\theta_3 - \theta_2) \leq 0$$

のとき (除荷時)

$$M_n = \frac{S_n - S_3}{S_2 - S_3} \cdot M_2 + \frac{S_n - S_2}{S_3 - S_2} \cdot M_3 \quad (9.b)$$

ここに、

$$S_i = \sqrt{(\theta_i - \theta_1)^2 + (N_i - N_1)^2}, \quad i = (1 \sim 3, n) \quad (9.c)$$

本式は、M-N- θ 空間での加力組み合わせ経路近傍の
 実験データ値を用い、加力経路を変数とした1・2次内挿
 関数により復元力を補間予測した式となっている。

4. 接続通信法について

分散実験システムでは、遠隔地にある異種構造解析プロ
 グラム及び実験システムと、接続・通信する仕組みが必要
 となる。

特に、長時間の接続で通信障害が生じないプロトコルを
 採用し、ファイヤーウォール等で保護された研究機関とも、
 通信・接続を可能にする工夫が必要である。

更には、異種構造解析プログラム、実験システムとも接
 続できるように、接続条件をなるべく緩和する必要もある。

本節では、これら接続、通信方法における問題の解決方法
 を示す。

Table1 例題建物の各部材の断面性能

Section of member	A mm ²	I x 10 ⁵ mm ⁴	Z_p x 10 ³ mm ³	σ_y N/mm ²
C1 □-300x12	13450	1830	1440	390
C2 □-250x9	8467	809	759	337
G1 H-350x175x7x11	6314	1360	868	328
G2 H-348x124x5x8	3268	354	340	340

Cross sectional area, A Moment of inertia, I , Plastic modulus, Z_p
 Young's modulus, $E = 205 \text{ kN/mm}^2$,
 Tangent modulus after yielding, $E_t = 0.0 \text{ kN/mm}^2$

Table2 例題建物の露出柱脚の構造特性

A_L, A_R (mm ²)	l_L, l_R (mm)	d_c (mm)	d_l (mm)
760	1067	150	150
σ_{y1} (N/mm ²)	σ_{y2} (N/mm ²)	E_{t1} (kN/mm ²)	E_{t2} (kN/mm ²)
249	400	2.05	0

σ_{y1}, σ_{y2} : Stress at first and second yielding
 E_{t1}, E_{t2} : Tangent modulus after first and second yielding
 young's modulus, $E=205 \text{ kN/mm}^2$
 Rotational stiffness modification coefficient, $R=2.0$

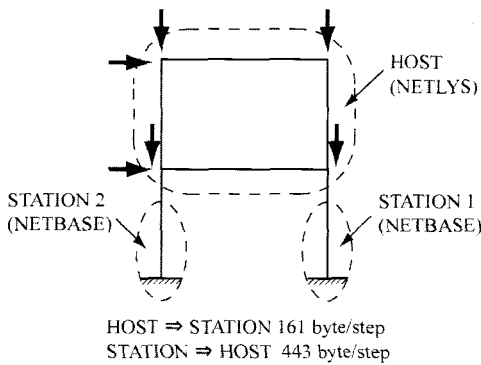
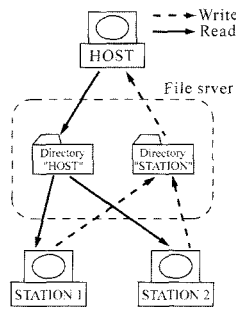
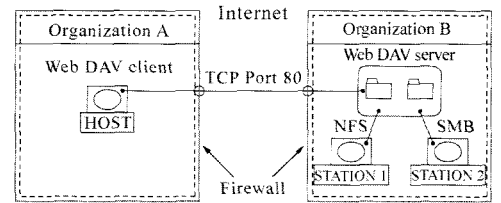


Fig.10 解析対象建物とHOST, STATIONの接続状況

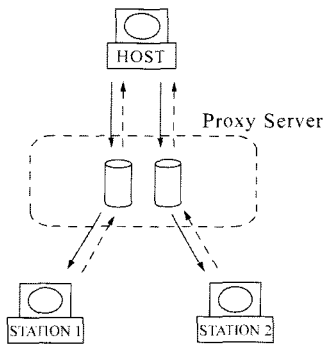


(a) Dataの流れ

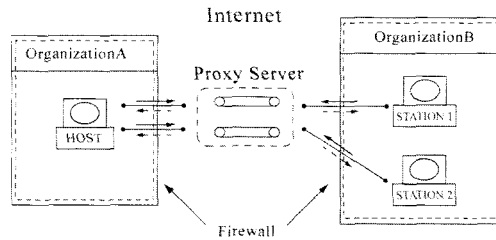


(b) Firewall, Web DAVサーバーとHOST, STATIONの位置

Fig.11 Webファイルサーバーを使ったデータ交換方法



(a) Dataの流れ



(b) Firewall, Proxy serverとHOST, STATIONの位置

Fig.12 Proxyサーバーを通ったソケット通信法

4.1 通信・データ交換方法

Fig.10の2層1スパン平面架構を解析対象とし、2階部分はHOSTプログラム, NETLYSを、1階左右の柱部分はSTATIONプログラム, NETBASEを2つ利用して、統合化解析を行うこととする。

互いのプログラムでは境界自由度として、水平・鉛直変位と回転の3自由度が接続される。

HOSTからSTATIONへのデータ量は1ステップ161Bytes, STATIONからHOSTへのデータ量は1ステップ443Bytesである。HOSTからは目標変位値が、STATIONからは境界自由度の瞬間剛性と目標変位に対応する反力値が送信される。

このHOSTとSTATIONのデータ交換法として文献^{7,8)}

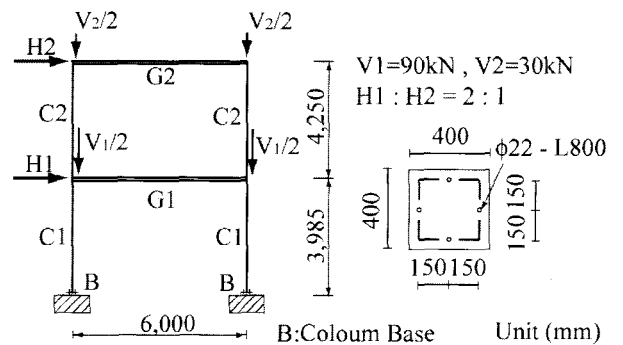


Fig.13 例題建物の詳細

Table3 通信テストケースの概要

Test No.	HIT Program	Connection Site Program
1	Proxy, NETBASE	NETLYS
2	Proxy, NETBASE	NETLYS
3	Proxy	NETLYS, NETBASE
4	Web DAV, NETBASE	NETLYS, Webdrive

HIT:Hiroshima, OSK:Osaka, LIS:Lisbon
 WAR:Warsaw, MOS:Moscow, NOV:Novgorod
 SIB: siberia, FLYNET: Boeing FLYNET 737-300

Table5 試験体の素材特性

Member of specimen	Material	E (kN/mm^2)	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	σ_y / σ_u	ϵ_f (%)
Column	BCR295	205	295	490	0.60	-
Base plate	SS490	205	325	490	0.66	-
Anchor bolt	ABR400B	205	298	446	0.67	34

E : Young's modulus σ_y : Yield stress σ_u : Tensile strength ϵ_f : Elongation

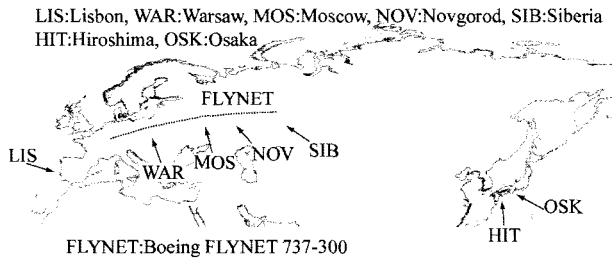


Fig.14 統合化解析を行った通信接続位置

では, Fig.11 に示す方法を採用した。

この方法は, データは HOST と STATION とで共通するファイルサーバーにファイルとして Read, Write する方法で, 各研究機関において, ファイヤーウォールを通過しうる Home Page 提供用のポートのみを使用する Web DAV ファイルサーバーを利用している⁷⁾。

この方法は, プログラム作成上, 通信部分はファイル入出力文のみなので非常に簡略である反面, WebDAV ファイルサーバーの入出力に時間がかかり通信エラーも危惧された。

本研究では, この問題点を解決するため Fig.12 に示すような直接ソケット通信を行うこととし, 各研究機関のファイヤーウォール対策には, 代理サーバー (Proxy サーバー) を利用した。すなわち, 研究機関の外から内への通信は拒否されるが, 内から外への通信は通過できるというファイヤーウォールの性質を利用し, 各通信の要求を待ち受け接続後は 2 つの通信を結びつける Proxy サーバーを, ファイヤーウォールの外に設置した。

これにより, インターネットを利用した比較的高速度な通信が, ファイヤーウォールの有無に拘わらず実行できる。

4.2 通信方法の妥当性の検証

Fig.13 に示す例題建物について, Fig.10 の 3 つのプロ

Table4 統合化解析に要した通信時間

Test No.	Method	Total step	Connect for			
			HIT	OSK	FLYNET	LIS
1	Socket	276	12s	1m28s	7m8s	15m11s
	Newmark			(WAR)		
2	Socket	500	22s	1m54s	12m7s	24m24s
	O.S.			(MOS)		
3	Socket	500	37s	3m20s	23m40s	43m37s
	O.S.			(NOV)		
4	WebDAV	500	17m16s	-	× * 2m20s/step ×	
	O.S.			(SIB)	* 2m20s/step	

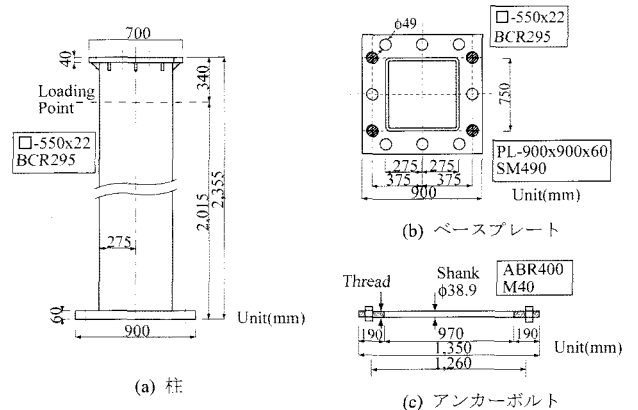


Fig.15 試験体の形状・寸法

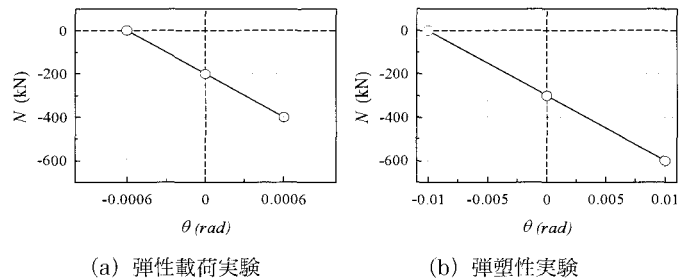


Fig.16 加カプログラム

グラムによる統合化を行い, 前節で示した 2 種の接続通信方法の通信安定性と通信速度の検証を行った。

例題建物の柱・梁の断面性能及び, 露出柱脚の構造特性を Table 1 及び 2 に示す。

通信テストは, Table 3 に示す 4 ケースとしケース 1 ~ 3 は Proxy サーバーとソケット通信とを利用して, 各プログラムの位置を変化させ, ケース 4 は WebDAV ファイルシステムを利用したものである。

Fig.14 に示す広島 (HIT) との通信接続位置は, 大阪 (OSK), リスボン (LIS) と Boeing737-300 の航空機中から FLYNET を使ってワルシャワ上空 (WAR), モスクワ上空 (MOS), ノブゴロド上空 (NOV), シベリア上空 (SIB) とした。

Table 4 に解析終了までの所要時間を示す。この結果から WebDAV ファイルシステムを利用する方法は, 時間が

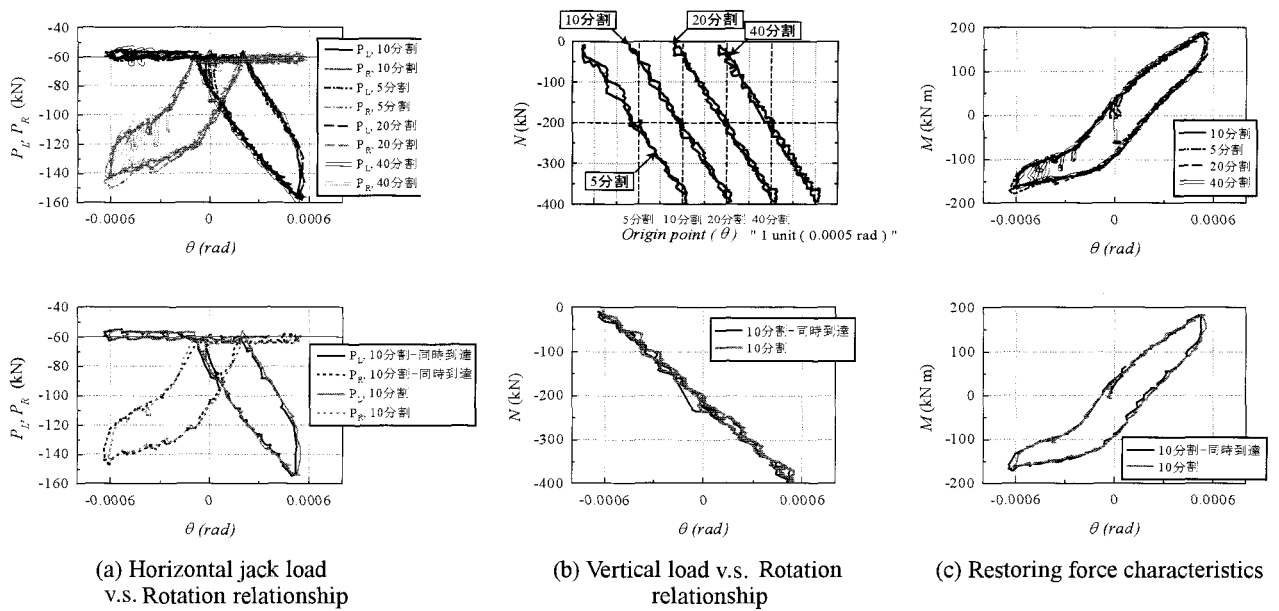


Fig.17 拘束点数と同時到達性の関係（弾性試験結果）

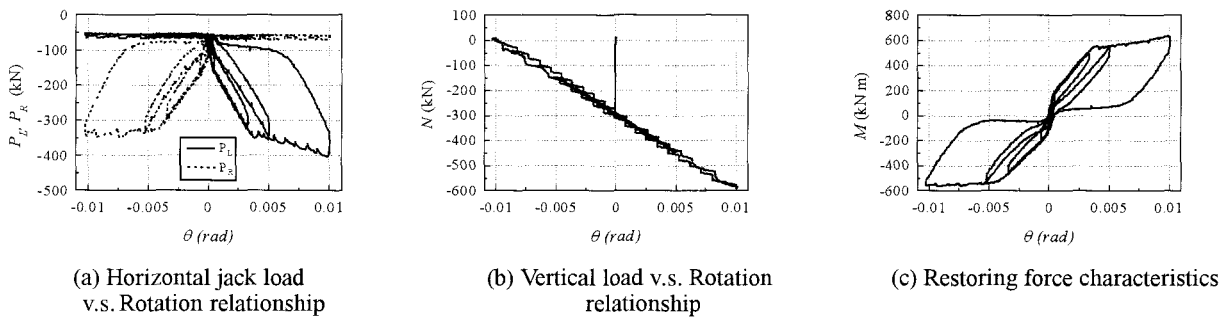


Fig.18 弾塑性载荷下の制御状態

かかること、また、通信障害も生じる反面、ソケット通信と Proxy サーバーを利用する方法はリスボンから1ステップに要する通信時間は3秒と短く、障害も生じないことがわかる。

これにより、インターネットを利用する全世界から本载荷システムへの通信接続が可能であることが明らかとなった。

5. 静的加力性能の検証

構築した分散実験システムの静的加力時における加力性能の検証を行った。

対象は、実大露出柱脚付片持柱とし、変動軸力、ベースプレート回転角を一定とする弾性試験と弾塑性試験を取り扱う。

5.1 試験体

用いた試験体を Fig.15 に示す。

試験体は、□ -550x22 (BCR295) の角形鋼管柱に PL-900x900x60 (SM490) のベースプレートを溶接し、図

中ベースプレートの斜線の円の位置で4本の転造ネジアンカーボルト (M42, ABR400) で、鋼製基礎と締結した露出柱付片持柱である。尚、ナット間の距離は1,260mmである。これら試験体の素材特性を Table 5 に示す。

5.2 計測方法、加力プログラムと制御条件

計測は、荷重については、左右水平ジャッキの圧縮力、 P_L 、 P_R 、鉛直ジャッキの圧縮力、 P_V 、ベースプレート位置での軸力、 N 、せん断力、 Q 、及び曲げモーメント、 M 、についてまた変位については鉛直、左右水平ジャッキのストローク、 S_V 、 S_L 、 S_R 、及び、ベースプレート中央点の鉛直変位、 ω 、変位すべり変位、 u 及びベースプレート回転角、 θ について行った。

計測諸量は、Fig.5 にまとめて示している。

加力プログラムを Fig.16 に示す。

θ と N とを Fig.16 に示すように線形関係とした変動軸力、一定ベースプレート回転角振幅 0.001rad として3サイクル繰り返す弾性試験 θ と N との関係は、弾性試験

と同様とし θ の振幅を 0.001rad ~ 0.01rad まで漸増し、0.01rad で 2 回繰り返す弾塑性実験の 2 種類とした。

弾性実験では、3.2 節の同時到達制御を行わず振幅間を 5, 10, 20, 40 分割した位置で指示を与えた場合と、この分割を 10 分割とし、同時到達制御を行ったもの及び行わなかったものの 2 ケースについて、弾塑性試験ではこの分割を 10 分割とした。

制御条件は、水平ロードセルの初期圧縮力 \overline{P}_0 は 60kN、ベースプレート回転角及び軸力に関するオーバーシュート量の平均値はそれぞれ、 $\overline{e}_N = 5\text{kN}$ 、 $\overline{e}_\theta = 5.0 \times 10^{-5} \text{ rad}$ とし、また、基準ストローク速度 v は 0.08 mm/s とした。

Fig.17.18 には、弾性試験及び弾塑性試験の結果を (a) 左右水平ジャッキの圧縮力 P_L 、 P_R とベースプレート回転角、 θ との関係、(b) ベースプレート位置の軸力 N と θ との関係、(c) ベースプレート位置の曲げモーメント M と θ との関係に分けて示している。尚、弾性試験の結果は、全てを重ねて記載すると見にくくなるので、1 サイクル分のデータのみを示している。更に、(b) においては、分割数毎のデータを回転角を 0.0005 (rad) ピッチで水平移動して示している。

この図から、水平加力システムはベースプレート回転角の正負が変わる点で各水平ジャッキの制御が交互に荷重・変位制御にスムーズに切り替わり、柱軸力 N と θ との関係は、同時到達制御条件で、各ジャッキのストローク速度を調整すれば、ほぼ同時に目標に到達させることができる。

また、この条件を用いなくても、両者の関係を拘束する分割点を設ければ十分に満足すること、更に、弾塑性領域において、柱脚の曲げモーメント M と θ との関係は複雑な関係を示すものの、非常に安定した制御が可能であることがわかる。

更に、拘束点を増加させることで、より精度の高い制御を行えることが分かる。しかしながら、拘束点を過密に取りすぎると、40 分割の試験のようにインテグレーションを起し、安定した挙動を示さなくなる。

これらの実験全般の加力誤差は、軸力下で 5kN 以下、ベースプレート回転角で、 $5.0 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 以下であった。

6. ま と め

異種構造解析プログラムや実験システムを統合化し、建築構造物の耐震性能を詳細に調べるための分散載荷システムを構築し、その加力制御能力の検討を行った。得られた知見は以下のように要約できる。

1) ソケット通信と Proxy サーバーによる通信方法を採用すれば、インターネットに接続された全世界の研究機関と分散実験が行える。この時、ファイアウォールでネットワークが保護されていても障害はない。

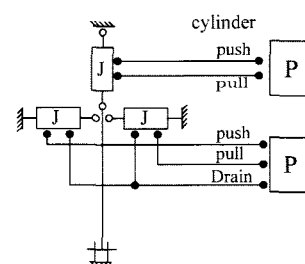
- 2) 本実験システムは、実大規模の露出柱脚の弾塑性試験が可能な能力を有する。
- 3) 本水平加力方法によれば、正負交番時の加力治具のガタは防止され、高速かつ安定した水平加力が出る。
- 4) 同時到達制御条件を用いれば、柱軸力 N とベースプレート回転角 θ をほぼ同時に少数の拘束点下で到達させることができる。
- 5) 本論文で示した制御方法によれば、軸力で 5kN 以下、ベースプレート回転角で $5.0 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 以下程度に抑えられる。今後、本システムを用いて、分散実験特に自由度系の片持柱及び 5 層スパン鉄骨架構の仮動的実験を行う予定である。

付録 1 油圧系の配管方法の考察

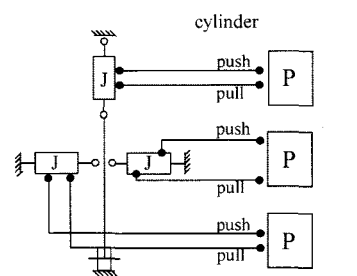
3 節で示したように本載荷システムでは、水平加力に 2 本のジャッキを用いるが油圧ユニットコントローラーには押しと引きの 2 本の油圧配管があるため、Fig. A(a) のように 1 台の油圧ユニットを用いることにより水平載荷を行うことができる。

油圧ユニットの押し側と引き側の配管を両ジャッキの押し側に接続し、引き側をまとめて油圧ユニットのオイルタンクにもどす配管としている。

この方法で、油圧ユニットを 1 台減らすことができる。しかしながら、常時接触圧を確保できないため除荷後、油圧ユニットからの圧力が作用するまでの間シリンダーヘッドと試験体の間に隙間が生じる。このため再接触時に試験体が大きく変位して位置決め誤差を十分に抑えることができない。



(a) 2 controllers



J : Oil jack
P : Pump controller

(b) 3 controllers

Fig.A 油圧系の配管方法

従って本載荷システムでは、Fig. A (b) の配管方法を採用している。

謝 辞

本研究は、平成 17 年度 実大三次元震動破壊実験施設 (E-ディフェンス) を活用した構造物の耐震性に関する国内外共同モデル研究 鉄骨建物実験研究「統合化評価法のための部分構造分散載荷システムの構築 (研究代表者: 玉井宏章)」, 並びに広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者: 高松隆夫教授) のプロジェクト研究の一環として実施しました。また、フルサト工業株式会社より転造ねじアンカーボルトを提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) M.Nakashima, T.Akagawa, H.Igarashi: Pseudodynamic testing using Conventional testing devices, *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol.24, pp.1409-1422, 1995.
- 2) 玉井宏章, 近藤一夫, 花井正実: オンラインコンピュータ制御によるブレース制振装置付中高層架構建築の実地震応答実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 423 号, pp.113-125, 1991.
- 3) 玉井宏章, 居田貴史, 金澤寛, 近藤一夫, 花井正実, 藤波健剛: K 型制振ブレース付多層架構の実地震応答実験, (その 1) 実地震応答実験法の概要とその精度, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.2743-2748, 1998
- 4) 多田元英, 桑原進: インターネットで異種プログラムを統合した構造解析システムの基本考察, 日本建築学会構造系論文集, No.580, pp.113-120, 2004.6.
- 5) Motohide Tada and Susumu Kuwahara: Internet-Based Collaboration in Structural Elasto-Plastic Numerical Analysis (Part 1 Scheme and Analysis of Braced Structures), *International Symposium on Network and Center-Based Research for Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering*, pp.525-530, 2004.7.
- 6) Katsuki Ohgami and Motohide Tada: Internet-Based Collaboration in Structural Elasto-Plastic Numerical Analysis (Part 2 Analysis of Portal Frames Including Local Buckling), *International Symposium on Network and Center-Based Research for Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering*, pp.531-536, 2004.7.
- 7) Hiroyuki Tamai and Motohide Tada: Internet-Based Collaboration in Structural Elasto-Plastic Numerical Analysis (Part 3 Analysis of Exposed Column-Base), *International Symposium on Network and Center-Based Research for Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering*, pp.537-542, 2004.7.
- 8) 多田元英, 玉井宏章, 吉村真人: 露出柱脚と剛性梁部材の解析プログラムを統合した剛骨組の弾塑性解析コラボレーション, 鋼構造論文集, 第 12 巻, 第 47 号 pp.43-55, 2005.9.
- 9) 益尾潔, 石川雅一: インバータモータ駆動自動制御静的加力システムの開発, GBRC, pp.24-30, 1981.1.
- 10) 五十嵐秀一: 自動制御静的加力装置と構造実験への応用, 油空圧技術, pp.29-35, 1992.9.