

論文 鉄筋コンクリート2層ラーメンにおける地震応答の動的映像化実験

柳井修司*¹・山口隆裕*²・池田尚治*³

要旨：準動的載荷システムにビデオによる動的映像記録化のシステムを導入する実験システムを適用して、鉄筋コンクリート2層ラーメンを対象として実験を行った。本システムにより、振動台実験を行うことなく鉄筋コンクリート2層ラーメン構造の地震時の動的応答挙動を視覚的に生起することができた。この手法により得られた映像は、地震作用中の部材のひび割れの開閉や塑性変形等の動的応答挙動の詳細な評価に有用であり、また、鉄筋コンクリート2層ラーメン構造の耐震性の向上を図るための極めて有力な手法であることが明らかとなった。

キーワード：RC2層ラーメン、準動的載荷実験、動的映像記録化システム

1. はじめに

計算機による応答解析と加力装置による載荷実験とを同時に進行させ、構造物の地震応答を時系列で連続的に再現させる準動的載荷実験は、オンライン実験などとも呼ばれ、振動台実験を行うことなく、構造物の地震時の応答挙動を静的な状態で実験する方法である。著者らは、この伸ばされた時間スケールに対して視覚上、実時間スケールで応答挙動を生起するための方法として、準動的載荷システムにビデオによる動的映像記録化システムを組み入れる方法を既に開発し、鉄筋コンクリート（以下、RCと記す）部材の地震時の応答挙動を評価してきた[1][2]。

本研究は、改良を加えた動的映像記録化システムを導入した面内水平方向2自由度準動的載荷システムを用いて、RC2層ラーメンを対象とした地震応答の動的映像化実験を行い、RC2層ラーメン構造の耐震性能を評価しようとするものである。

2. 動的映像記録化システム

2.1 システムの概念

準動的載荷実験においては、構造物の地震応答挙動は地盤を固定した座標系として生起され、観測者は地盤と一緒に運動を行っている状態であり、構造物の変形やひび割れの発生状況などの観測において、振動台実験に比べて極めて有利である。準動的載荷実験では、コンピュータによって計算された応答変位量を供試体に強制変位として与え、その時の供試体の復元力を用いて、次のステップの振動方程式を解き、載荷実験を繰り返す。本システムは、この準動的載荷実験の任意のステップ毎に、ビデオによって静止状態の部材を微小時間撮影し、実験終了後、記録された静止画を連続的に再生することにより、供試体の地震時の応答挙動を任意の時間スケールで再現するものである。当然のことながら、各ステップ毎の静止画の撮影時間とビデオテープの再生速度の調整により、供試体の挙動を実時間に忠実に再現することができるとともに、スローモー

* 1 横浜国立大学大学院 計画建設学専攻 (正会員)

* 2 横浜国立大学助手 工学部建設学科 (正会員)

* 3 横浜国立大学教授 工学部建設学科 (正会員)

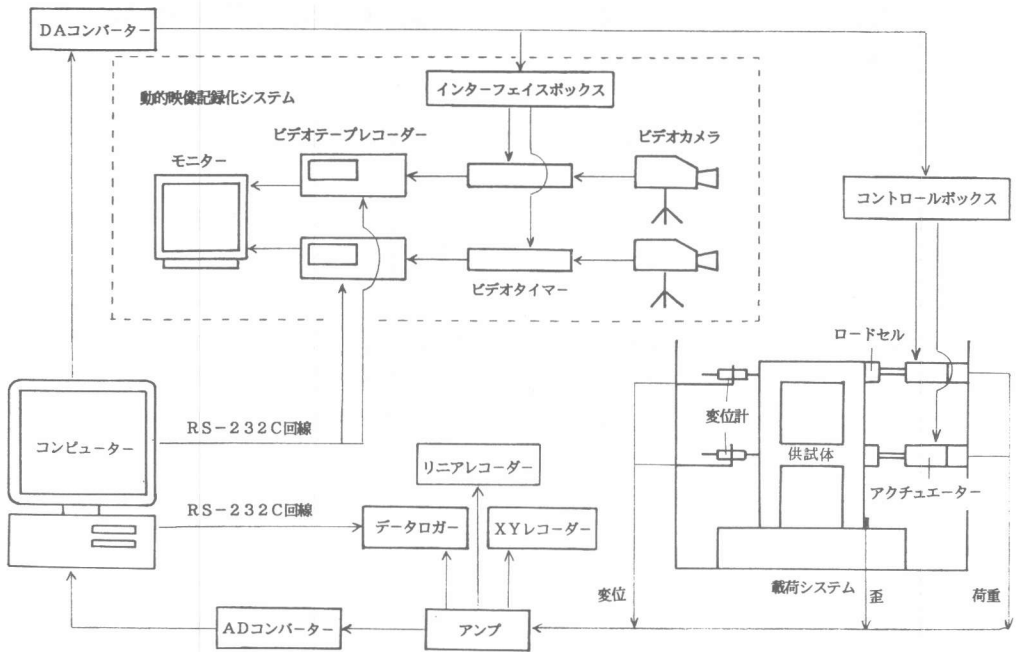


図-1 動的映像記録化システムを組み込んだ準動的載荷システムの構成

ション再生により、地震波の生起時刻に即して、供試体の被災状況の観察を何度でも詳細に行うことができる。また、本システムは2台のビデオカメラを制御できるので、実験の目的に応じて、着目する箇所を局部的に撮影することも可能であり、本システムの汎用性は高いと考えられる。

2. 2 制御システム

図-1に動的映像記録化システムを組み込んだ準動的載荷実験のシステムの構成を示す。準動的載荷システムによって、供試体の載荷点が所定の目標変位に達した時点で本システムが作動する。新しく導入したビデオデッキは、最小録画フレーム数が1フレームから制御でき、準動的載荷実験の任意のステップで任意のフレーム数の録画が可能となっている。デッキの制御はコンピュータからRS-232C回線を介して、直接コマンドを送信することにより行い、予めビデオテープにインサートしておいたタイムコードに録画開始点と録画終了点を指定することにより、任意のフレーム数で記録することができる。

ビデオタイマーは、ビデオカメラからの映像の中に地震の生起時刻を表示するために使用しており、電圧信号によりタイマーの作動と停止を制御し、その作動時間は精度を考慮して、コンピュータに実装したタイマーカウンターボードにより行っており、任意に設定できるようになっている。

3. 実験概要

3. 1 試験供試体

供試体の形状を図-2に、使用した材料の力学的特性を表-1に示す。供試体は、RC橋脚を模擬し、部材断面の図心を結ぶ軸線におけるスパン比1、剛比1の基本的な2層1スパンの門形ラーメンである。なお、第1層柱部の軸線長はフーチング上面からとした。供試体には、早期な

せん断破壊が生じないように、必要十分なフープ筋を断面の有効高さ（ d ）の $1/2$ 以下の間隔で配置した。フープ筋量の計算は許容応力度法に基づいた昭和55年度版の土木学会コンクリート標準示方書に従って行い、現行の示方書[3]における限界状態設計法によるせん断耐力の照査を行い、せん断に対して十分に安全であることを確認した。また、梁柱接合部においては、フープ筋量を1.5倍として補強を施しているが、ハンチは設けていない。

3.2 静的載荷実験

準動的載荷実験を行うに先立ち、剛性マトリクス（ 2×2 ）を求めることを主体とし、供試体を静的に加力した。構造力学における、剛性マトリクスの要素 k_{ij} は、一般に j 点のみに単位の変位を与えて、他のすべての点を無変位にしておくために i 点に加えるべき力と定義され、本研究においてもこの定義に従って、静的正負載荷を行うこととした。載荷は2本の水平方向アクチュエーターを用いて行い、最も早期に降伏すると予想された部材に対して、材料の非線形特性を考慮して計算した降伏荷重時の変位（ $1 \delta_y$ ）から、最終載荷まで変位を $1 \delta_y$ ずつ増加させながら、各変位で1回の正負水平載荷を行った。なお、鉛直力は加えていない。

供試体RS-1は、第1層（下層）を固定し第2層（上層）のみを加力し、供試体RS-2は、第2層を固定し第1層のみを加力した。図-3に実験より得られた供試体RS-2の荷重-変位曲線を示し、各供試体の割線剛性を表-2に示す。

3.3 準動的載荷実験

準動的載荷実験に用いた初期設定値を表-2に示す。作用地震波としては、El-Centro(NS)波を使用し、最大加速度の大きさは、部材の破壊を想定して、約 $6 \delta_y$ レベルの被災を目標とした150galとした。剛性マトリクスの各要素は静的載荷実験により得られた各ケースの履歴曲線の原点と計算降伏点を結ぶ割線剛性の正負の平均値とした。準動的載荷実験では任意の仮想重量を自由に設定することができ、本実験では仮想重量として、各層の梁上に等分布荷重を想定し、各層とも重量が等しいとして、第1次基準振動の固有周期（ T_1 ）が0.5秒となるように、その大きさを

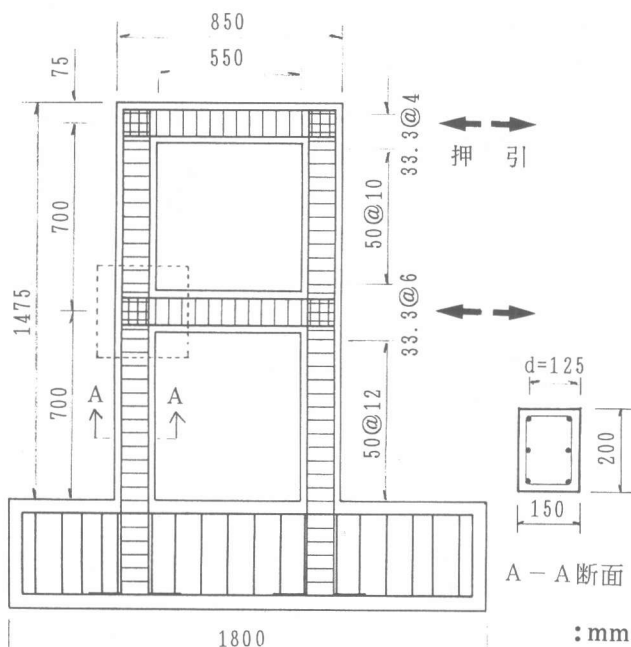


図-2 供試体の形状

表-1 使用材料の力学的特性

鉄 筋					
種 類	規格	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	適 用
D6	SD295	4270	5810	1.9×10^6	フープ筋
D10	SD295	3830	5580	1.9×10^6	主筋
コンクリート					
圧縮強度 (kgf/cm ²)		引張強度 (kgf/cm ²)		ヤング係数 (kgf/cm ²)	
293		25.8		2.68×10^5	

決定した。また、粘性減衰マトリクスの各要素は弾性剛性比例型とし、部材降伏前の対1次モードの減衰定数 (γ_h) を0.05として値を決定した。なお、部材降伏後は γ_h を0、つまり粘性減衰項を無視して実験を行った。

载荷は、コンピューター内で系の振動方程式を中央差分法により計算して求めた各層の水平変位の増分を分割して、供試体に各層交互に強制変位として与え、各層がほぼ同時に目

標変位に到達するよう考慮した。なお、目標変位と実変位との差は変位計及びADコンバーターの分解能、実験の効率性を考慮して、0.03mmまで許容することとした。

動的映像記録化システムは、供試体の固有周期を考慮して、地盤地震波の生起時刻の0.03秒毎に作動させ、一静止画の録画時間を1フレームとした。この場合、地震波データの時間16秒に対して総録画時間は約17.8秒となり、ビデオテープの標準再生によって得られる映像でも、ほぼ実時間スケールとなる。また、ビデオカメラを2台使用し、1台は全体系の挙動を、他の1台は図-2の中で破線で囲んである中間梁接合部のみを撮影した。なお、中間梁载荷治具には、映像から即座にひび割れ幅が計測できるようにクラックスケールを貼付した。

3.4 実験結果と映像シミュレーション

図-4に実験より得られた時刻歴応答変位曲線を示す。また、写真-1に、図-4に示す地震波の生起時刻における被災状況を示す。これらの写真は、動的映像記録化システムにより撮影した映像をビデオプリンターで出力したもので、写真中の数字は地震波の生起時刻を示し、クラックスケールの最も太い線(左上)は、1.9mmのひび割れ幅に相当する。なお、写真における供試体の左方向への変位は、図-4における

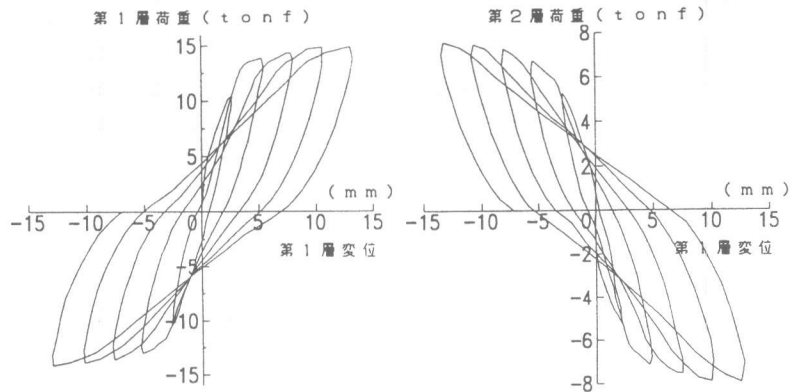


図-3 RS-2 荷重-変位曲線

表-2 準動的载荷実験の初期設定値

使用地震波	El-Centro 1940 (NS) 0.01秒~16秒 $\Delta t=0.01$ 秒
地震波の最大加速度	6 $\delta y/v^{\wedge}l$: 150 (gal)
割線剛性(tonf/cm)	$k_{11}=40.15, k_{12}=-20.41, k_{21}=-19.85, k_{22}=15.23$
固有周期(sec.)	${}_1T = 0.5 \quad {}_2T = 0.14$
仮想重量(tonf)	$W_1 = 25 \quad W_2 = 25$
減衰定数	$\gamma_h = 0.05$ (対1次モード)
粘性係数(ton*sec/cm)	$C_{11}=0.320, C_{12}=-0.163, C_{21}=-0.158, C_{22}=0.121$

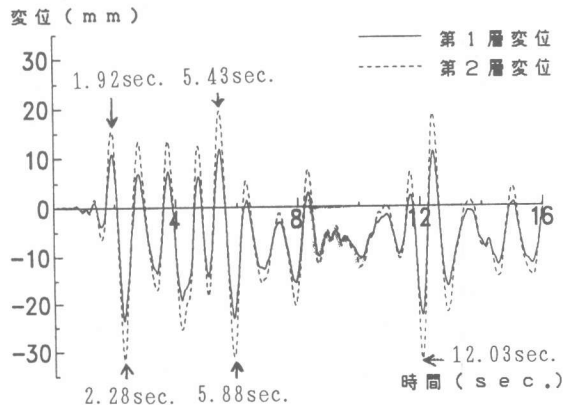


図-4 時刻歴応答変位曲線

正側の変位に対応している。また、表-3には各生起時刻における供試体の応答変位及び復元力の一覧を示す。

地震波の生起時刻1.92秒時には、第1層載荷点の変位は既に $2\delta_y$ を超え、第2層層間変位もほぼ降伏変位に達している。中間梁接合部には、梁端部に鉛直方向のひび割れが発生し、その幅は0.6mmに達していた。以後、変位が正側に生じた時には、このひび割れが層間変位の大半を負担し、この部分が塑性変形するために、中間梁上面の高さの柱部の軸方向鉄筋の歪は、変位量が大きくなるにもかかわらず、上昇しなかった。中間梁下面から $d/2$ 下がった位置からは、接合部に向かうひび割れが発生している。2.28秒時には、第1層載荷点の変位が負側で最大となり、柱のフーチング付け根部に全体系の写真からでも確認できるような大きなひび割れが発生しているのがわかる。また、中間梁下面から、柱に水平方向の大きなひび割れ（幅1.9mm）及び鉛直方向のひび割れ（幅1.8mm）が、軸方向鉄筋に沿って伸びている。5.43秒時には、各載荷点が正側の最大変位を記録し、中間梁下面の水平方向のひび割れが柱全面に貫通し、梁端部の鉛直方向のひび割れ幅が、1.4mmまで成長している。5.88秒時には、柱根元に斜めひび割れが観察でき、12.03秒時に第2層載荷点が負側で最大変位を記録した。

図-5に供試体の16秒時のひび割れ状況を示す。比較的大きいひび割れは太線で示し、ひび割れ幅を記入してある。ひび割れ幅の大きいものは、柱根元部と中間梁接合部に集中しており、第1層の部材の損傷が第2層の部材に比べて大きく、第1層の柱は $5\delta_y$ ま

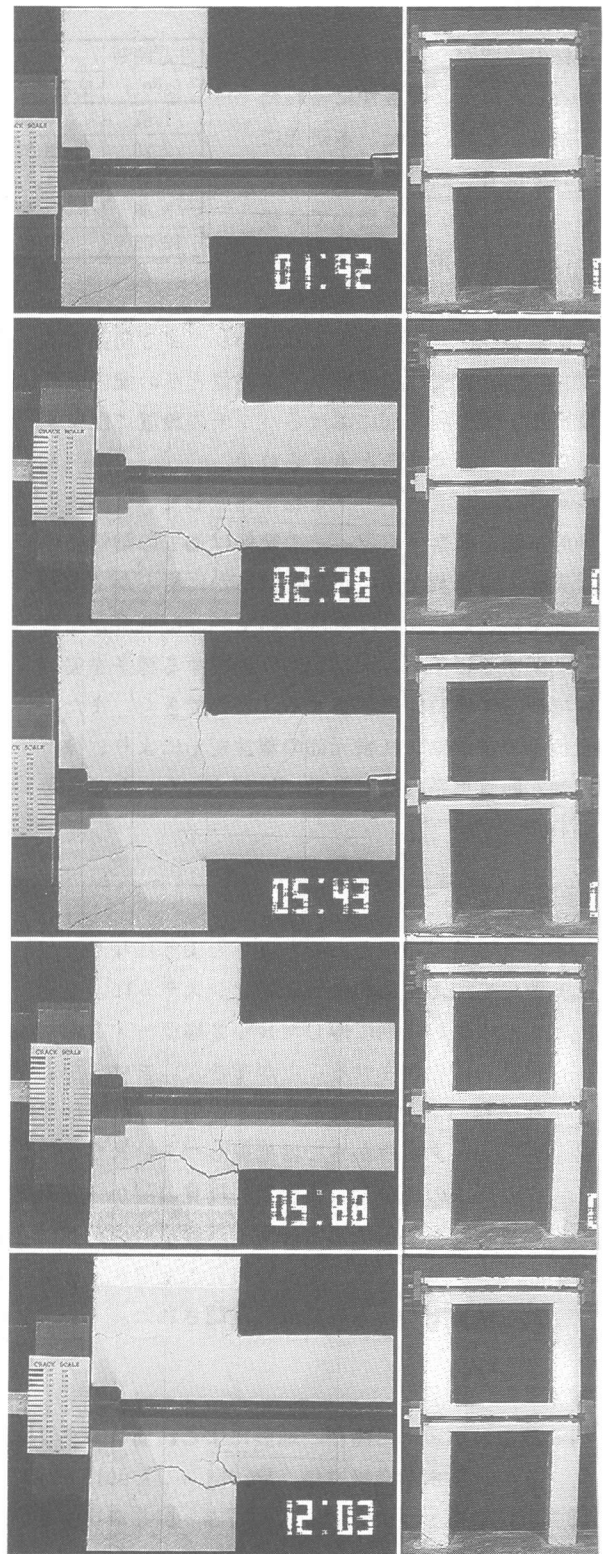


写真-1 供試体の被災状況

で変形した。しかしながら、一部材の破壊が全体の崩壊につながることなく、耐震性に優れた挙動を示した。また、本研究においては各質点の重量を等しくし、El-Centro 波を用いて実験を行ったが、第1層に損傷が集中する結果となった。終局時の

耐荷能力及び変形能力をより高いレベルで期待するためには、特に柱根元部フープ筋量とその配置間隔、及び第1層の隅角部におけるハンチの設置に配慮することが重要であると考えられた。

記録したビデオテープを標準再生して、供試体の動的挙動を観察すると、その映像は過去の動的映像化実験で得られたものよりもはるかに滑らかであり、中間梁接合部の映像は特に鮮明で、ひび割れが瞬時に開閉する様子や、部材が塑性変形する様子を実時間に即して連続的に観察することができた。また、全体系の挙動は、柱根元部の塑性変形により、徐々にせん断質点系の変形挙動に近づくようになると思われた。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

1) 改良を加えた動的映像記録化システムにより地

震波の生起時刻に即したRC2層ラーメン部材の地震時の動的応答挙動をビデオ映像として視覚的に生起させることができた。また、中間梁接合部におけるひび割れの開閉等の局所的な挙動と全体的な変形挙動とを対応させて観察することができた。

2) 力学データのみからでは把握しづらいRC2層ラーメン部材の地震時の塑性変形挙動やコンクリートのひび割れの開閉を視覚の面からも考察することができ、本実験システムはこの種の構造物の地震による破壊や塑性挙動の把握に極めて有効な手法であった。

3) ラーメン構造において、柱根元部と梁柱接合部の補強の必要性がひび割れの開閉を伴った動的な映像上からも視覚的に確認された。

参考文献

- [1] 池田尚治・山口隆裕：地震による鉄筋コンクリート柱の動的応答に関する映像シミュレーション、土木学会論文集、No. 451/V-17, pp139-147, 1992. 8
- [2] 山口隆裕・池田尚治・武村浩志・柳井修司：鉄筋コンクリート柱の耐震性能とその動的挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 2, pp1265-1270, 1994
- [3] 土木学会、平成3年度版コンクリート標準示方書、1991

表-3 準動的載荷実験の結果

生起時刻 (sec.)	第1層		第2層	
	応答変位(mm)	復元力(tonf)	応答変位(mm)	復元力(tonf)
1.92	10.89	3.890	15.48	3.231
2.28	-23.57	-3.681	-31.71	-3.668
5.43	11.71	3.241	19.49	3.122
5.88	-23.07	-4.027	-31.05	-2.731
12.03	-22.60	-2.012	-31.92	-4.106

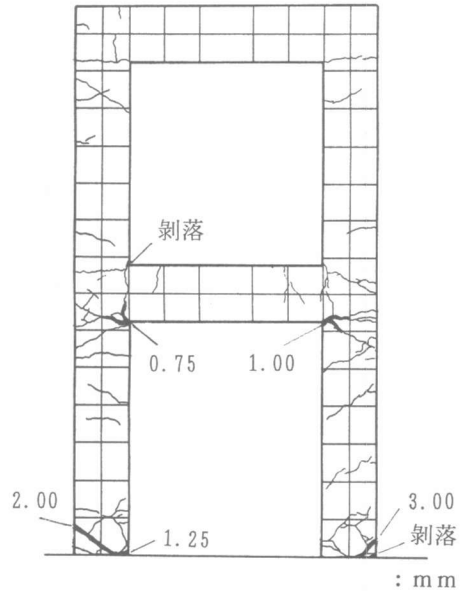


図-5 供試体のひび割れ状況(16秒時)