論文 静的加振と動的加振を受けた RC 梁部材の損傷量評価についての研究

周 塬*1·高橋 典之*2·佐藤 真俊*1

要旨:本研究では,静的載荷と動的載荷を受けた鉄筋コンクリート部分架構の梁部材における総ひび割れ長 さおよび最大ひび割れ幅に関する損傷量データを画像処理手法により取得し,静的載荷と動的載荷より生じ た総ひび割れ長さおよび最大ひび割れ幅の違いについて考察を行った。また,静的載荷と動的載荷を受けた 鉄筋コンクリート梁部材に対する,部材変形法を適用した断面解析を用いて曲げひび割れと曲げせん断ひび 割れの長さの進展量推定を通して,当該推定手法について分析を行った。

キーワード:損傷量評価,画像処理,損傷量推定

1. はじめに

鉄筋コンクリート造 (RC 造) 部材の損傷進展過程の追 4 跡は,性能評価型耐震設計における修復性能評価の高度 さ 化に資する重要課題となっている。従来,RC 造建築構造 ____ 物の被害程度は,大破・小破といった損傷度区分で表現 していた。近年,補修費用の積算に基づいた被災建築物 の修復性能評価への展開を図るべく,損傷状態を定量的 に表現・評価する方法が検討されるようになった。部材 レベルの損傷量評価手法が確立されれば,これを積み上 びることで建築物全体の損傷量評価が可能になると期待 される。そこで,部材レベルで生じるひび割れ幅,ひび 割れ長さ,剥落面積などの損傷量を評価する手法が提案 されるようになり ^{1),2},高度な修復性能評価手法が現実 的なものになりつつある。 _____

本研究では,損傷量評価を目標として,静的載荷およ び動的載荷を受ける鉄筋コンクリート部分架構の加振実 験を実施し,梁部材におけるひび割れの発生とその進展 過程を分析した。具体的には,画像処理手法により総ひ び割れ長さと最大ひび割れ幅を損傷量データとして算出 し,静的載荷と動的載荷による損傷量の違いを考察した。 また,部材部材変形法を適用した断面変形解析を用いて, 部材変形に伴うひび割れの進展状況を推定し,実験結果 と比較しながら,方法の妥当性について検討を行った。

2. 検討対象試験体

2.1 試験体概要

試験体の形状と配筋詳細を図-1,材料および構造諸 元を表-1に示す。本試験体は,RC造建築物の外柱-梁 を切り出した部分架構を想定した実大試験体である。梁 の断面寸法は540mm×200mmで,部材長2578mm,梁危 険断面から加力点位置までの長さ2393mm,主筋3-D16, 補強筋 D6@100 である。一方,柱の断面寸法は 400mm× 400mm で,部材長 2588mm,反曲点間(ピン支持間)長 さ 2000mm,主筋 12-D16,補強筋 D10@100 である。



表-1 材料および構造諸元

鉄筋	主筋	補強筋				
径	D16	D6@100				
鋼種	SD390	SD295				
コンクリート	$\sigma_B(\mathrm{N/mm^2})$	被り厚 (mm)				
	23	40				
曲げひび割れ	Mcr(N/mm)	Pcr(kN)				
強度	265.7×10^5	11.1				
せん断ひび割れ	Vc(kN)					
強度(AIJ 靭性 指針式) ²⁾	58.1					
せん断余裕度	3.16					

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員) *2 東北大学大学院 工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

2.2 加振計画

2 つの同じ試験体をそれぞれ,振動台を使い静的およ び動的載荷した。加力概要を図-2 に示す。振動台外周 の反力床に設置した固定載荷梁と振動台上の試験体梁部 材先端部をピン冶具およびロードセルを介し接続し,振 動台の加振方向に試験体を載荷した。柱部材は振動台上 に設置した固定冶具によりピン支持となるよう設置した。

静的載荷に用いた振動台加振変位波形は周期 100 秒の sin 波とし,加振継続時間の制約により表-2 に示す静的 載荷 A,静的載荷 B,静的載荷 C の 3 段階に分けて載荷 を実施した。動的加振に用いた変位波形は周期 1 秒の sin 波とし,表-2 に示す動的載荷 A と動的載荷 B の 2 段階 に分けて載荷した。なお,動的載荷 B の振幅と繰り返し 回数は,静的載荷 B と静的載荷 C の振幅と繰り返し回数 をつなげたものと等しい (図-3)。ただし,静的載荷 C の振幅 96mm での載荷においては,繰り返し回数 6 回ま でで加振を停止した。



図-2 振動台を用いた載荷方法概要平面図



表-2 加振計画

	変位振幅	繰返	加振開始から	部材角	
		回数	の経過時間	(柱回転含)	
1	10 mm	6	10分	1/240	
2	13 mm	6	20分	1/184	
静的載荷 B					
1	18 mm	6	10分	1/133	
2	24 mm	4	16分40秒	1/100	
3	36 mm	2	20 分	1/61	
静的載荷C					
1	32 mm	2	3分20秒	1/75	
2	48 mm	2	6分40秒	1/50	
3	65 mm	2	10分	1/37	
4	80 mm	2	13分20秒	1/30	
5	96 mm	9(6)	28分20秒	1/25	
動的載荷 A					
1	10 mm	6	6 秒	1/240	
2	13 mm	6	12 秒	1/184	
動的載荷 B					
1	18 mm	6	6 秒	1/133	
2	24 mm	4	10 秒	1/100	
3	36 mm	2	12 秒	1/61	
4	32 mm	2	14 秒	1/75	
5	48 mm	2	16 秒	1/50	
6	65 mm	2	18 秒	1/37	
7	80 mm	2	20 秒	1/30	
8	96 mm	9	29 秒	1/25	

3. 損傷量計測

3.1 損傷量計測範囲

振動台上に試験体を見上げるように設置したビデオカ メラ4台を用いて,梁部材正面について,図-1に併記 した計測範囲(梁危険断面側を区間A,加力点側を区間 D,区間Aと隣り合う区間を区間B,区間Dと隣り合う 区間を区間C)の損傷量進展状況を動画撮影した。ビデ オカメラ設置状況の一例を図-4に示す。

振動台と試験体の間の距離が限られているため,近距 離で広域の撮影が可能な広角レンズを用いて撮影をした。 そのため撮影画像(動画)には主に樽型収差が生じる。 そこで本研究では、本試験固有の樽型収差を解消するデ ジタルフィルタを予備実験に基づき作成し、取得画像の 樽型収差を補正してから損傷量計測に用いることとした。 樽型収差の補正例を図-5に示す

3.2 ひび割れの分類

損傷量計測にあたり、既往の研究成果との比較を容易



図-4 ビデオカメラの設置状況







(a)曲げひび割れ (b)せん断ひび割れ (c)曲げせん断ひび割れ
図―6 ひび割れの分類⁴⁾

にするため文献4)を参考に、ひび割れを図-6に示した 方法により分類した。ひび割れ進展の角度が材軸に対し て75~105°の場合は「曲げひび割れ」、15~75°の場合は 「せん断ひび割れ」、曲げからせん断に移行するひび割れ は「曲げせん断ひび割れ」として、「曲げ」区間と「せん 断」区間に区分できるものとする。

3.3 CADによるひび割れ長さの計測(目視計測)

CADによるひび割れ長さの計測(目視計測)は, 歪み 補正済みの画像を CAD に取り込み, ひび割れをトレー スし,線分長さの合計を算出した。

3.4 画像処理法によるひび割れ幅の計測

画像処理法によるひび割れ計測の概要を図-7に示 す。3.1節に示すように4台のビデオカメラで540mm ×1600mmの計測範囲を撮影しており、ビデオカメラ有 効画素数により1pixelあたり0.2204mmの解像度を有す る画像が取得されている。これより、原理上読み取れる 最小ひび割れ幅は0.5pixel=0.1102mmと推定される。

ここで、図-7 に画像処理によるひび割れ幅抽出の概 要を示す。まず演算処理におけるメモリ容量を確保する ため画像をトリミングする。このトリミングされた画像 を二値化し(図-7(a)),ひび割れを含む黒色領域におい



図-7 画像処理法によるひび割れ計測の流れ⁵⁾

て、コンクリート表面の気泡など、ひび割れとは幾何学 的性質の異なる黒色領域をノイズと判定し、これを除去 する(図-7(b))。ノイズを除去した黒色領域をひび割れ 領域として、ひび割れ幅の計測を行う。

まず,ひび割れ領域の外郭画素を走査対象点として, 予め設定した画素数だけ離れた外郭画素同士を結ぶ接 線を定め,接線と垂直な線(法線)で挟まれた範囲にあ るひび割れ領域の外郭画素を選択する(図-7(c))。接線 ベクトルと向きが180°±誤差の範囲にある外郭画素を ひび割れ計測対象候補点として抽出する(図-7(d))。こ のうち,走査対象点と候補点の中間点,第1四分点と第 3四分点の全てがひび割れ領域内に含まれる候補点を選 ぶ(図-7(e))。ここから2点間距離が最小のものをひび 割れ幅候補とする(図-7(f))。当該処理をひび割れ領域 外郭にある全ての点を走査対象点として行い,ひび割れ 幅の候補のうち最大値を当該ひび割れ領域の最大ひび 割れ幅とした。

画像処理に用いた二値化閾値は 256 階調(0~255)に 対して 105 とした⁵⁾。なお,文献 5)において計測面全視 野内の明度差により損傷量計測誤差(ノイズ除去の不具 合)発生が確認されており,本研究においても試験体周 辺環境(照明状況等)の影響により,ノイズ除去が不完 全な部分が確認された。そこで,最大ひび割れ幅を示す ような主要なひび割れを残し,ノイズとひび割れの区分 が難しい黒色領域については,ポストプロセスにおいて 白地化(手動除去)した。また,解像度の関係で部材角 1/100rad.未満のひび割れ認識が難しいため,部材角 1/100rad.,1/61rad.,1/50rad.,1/37rad.,1/25rad.に振幅が 更新された時点の正負ピーク時のひび割れ画像を本論に おける計測対象とした。

4. 実験結果

4.1 荷重一変形関係

静的載荷試験体と静的載荷試験体の荷重-変形関係を 図-8 に示す。両試験体とも曲げ破壊挙動を示す紡錘形 の履歴を描いている。正側では静的載荷試験体よりも動 的載荷試験体の最大耐力がわずかに(1%ほど)大きいく



らいであるが,負側では静的載荷試験体よりも動的載荷 試験体の最大耐力が 8%ほど大きい結果となった。繰り 返し載荷による耐力劣化は,静的載荷試験体のほうが動 的載荷試験体よりも大きくなった。また,動的載荷試験 体では,除荷後に試験体支持部材と試験体面の摩擦すべ りが荷重変形関係に負勾配区間を生じさせているが,残 留変位自体は両試験体ともほぼ同一であった。

4.2 ひび割れ長さ計測結果

静的載荷試験体と静的載荷試験体のひび割れ長さと部 材角の関係を図-9(a)に,静的載荷試験体および動的載 荷試験体の計測区間ごとのひび割れ長さと部材角の関係 を図-9(b)および図-9(c)に示す。

図-9(a)より,静的載荷試験体と静的載荷試験体とで 総ひび割れ長さに顕著な差は見られないものの,若干静 的載荷試験体のひび割れ長さのほうが多い傾向にあるこ とが読み取れる。また,静的載荷試験体のほうが静的載 荷試験体よりも総ひび割れ長さが長くなる傾向は,文献 4)で指摘された傾向と同じではあるものの,本実験にお けるその差はあまり顕著ではない。ひずみ速度による材 料強度上昇がひび割れ量に影響した原因の一つとして考 えらえるが,文献 4) では材料強度の上昇だけでは説明



(c)動的載荷試験体の区間別ひび割れ長さ 図―9 ひび割れ長さ計測結果

のつかない差が生じていることが報告されており,今後 の詳細な分析が必要と考えらえる。

図-9(b)および図-9(c)より,両試験体とも区間 A お および区間 B に生じたひび割れ長さが長く,区間 D のひ び割れ長さが最も少ないことが分かる。区間 A および区 間 B のひび割れ長さは振幅の増加に伴い増大をつづけた が,区間 C および区間 D のひび割れ長さは 1/100rad.~ 1/50rad.以降はほぼ一定値となり,ひび割れ進展が生じな かった。なお,1/25rad.の振幅では繰返し載荷により激し い剥落が生じていたが,本論では振幅更新時の正負ピー ク時を計測対象としているため,大きな剥落が生じる直





前のひび割れ長さを計測しており、剥落による見かけの ひび割れ長さの減少は顕著ではなかった。

4.3 ひび割れ幅計測結果

静的載荷試験体と静的載荷試験体において、平均ひび 割れ幅と部材角の関係を図-10(a)に、静的載荷試験体お よび動的載荷試験体の計測区間ごとの最大ひび割れ幅と 部材角の関係を図-10(b)および図-10(c)に示す。

図-10(a)より,静的載荷試験体と動的載荷試験体の平 均ひび割れ幅は,概ね近い値となった。部材変形成分(曲 げ変形およびせん断変形)とひび割れ幅合計値が幾何学 的に比例関係にあることがかねてより指摘されておりの, 同一振幅を与えている両試験体の幾何学的条件に差はな く,合計ひび割れ幅がほぼ一緒になると考えられる。ま た,図-10(a)においてひび割れ長さに顕著な差が見られ なかったことから,本実験でひび割れ本数にも顕著な差 が生じないことを考えると,ひび割れ幅合計値をひび割 れ本数で除すことで概算できる平均ひび割れ幅が両試験 体で概ね近い値になることは容易に想定される。

図-10(b)および図-10(c)より,静的載荷試験体では 区間 A,区間 B,区間 C,区間 Dの順で最大ひび割れ幅 が大きい傾向が見られるが,動的載荷試験体では変形が 大きくなると区間 B の最大ひび割れ幅が区間 A の最大 ひび割れ幅よりも大きくなった。

5. 部材変形法によるひび割れ長さ推定とその検証

5.1 推定手法概要

文献 5)で採用されている部材変形法に基づくひび割れ 長さ推定に基づき,ひび割れ長さを推定する。

(1) 曲げひび割れ本数と間隔

本実験体の材軸方向のモーメント分布は三角形分布で あることから、曲げひび割れ発生区間 l_{cr} は、引張強度時 モーメントを M_c 、危険断面のモーメントを $M(M \ge M_c)$ とすると、以下のように表せる。

$$l_{cr} = \left(1 - \frac{M_c}{M}\right)H\tag{1}$$

ひび割れ本数 n は、危険断面を起点として曲げひび割れ 発生区間 l_{cr} において平均ひび割れ間隔 S_{av} ごとに発生す ると下式を得る。

$$n = 1 + \frac{l_{cr}}{S_{av}} \tag{2}$$

本研究において, 平均ひび割れ間隔*Sav*は森田式⁷⁾によっ て算出した値(114mm)を用いた。

(2) 曲げひび割れ長さ

曲げひび割れの長さは断面解析により得られた部材断 面のモーメントーひずみ度関係を用いて,引張縁からコ ンクリート引張強度時のひずみ度に到達した部分までの 長さを曲げひび割れ長さとした。断面解析におけるコン クリートの構成則は,圧縮側は修正 Kent&Park 式⁸⁾を用 い,引張側は引張強度までを線形,その後は引張軟化曲 線に従うものとした。ただし,コンクリートの圧縮強度, 引張強度は材料試験の値を用いることとし,鉄筋の構成 則は降伏後に勾配を持たないバイリニアとした。

(3) 純せん断ひび割れ長さと曲げせん断ひび割れ長さ

純せん断ひび割れは、材軸と一定のなす角で進展する ものとし、進展方向の直線上の任意の点におけるコンク リートのひび割れ進展直交方向のひずみ度に基づきひび 割れ状態を定め、ひび割れ長さを計算する。

曲げせん断ひび割れは、曲げひび割れ先端の主応力方 向を算出し、材軸とのなす角が 75°以下になる場合は、曲 げからせん断へとひび割れが移行し、曲げせん断ひび割 れになるものとする。

5.2 推定結果

ひずみゲージの値から平均ひずみ速度を算出すること で,ひずみ速度による材料強度上昇の影響を考慮すべく, 危険断面の引張鉄筋が降伏する 1/100rad.程度までの応答 を対象に総ひび割れ長さを推定した。本実験では降伏点 に到達する載荷サイクルでの平均ひずみ速度が静的載荷 実験で 120µ/sec, 動的載荷実験で 12000µ/sec であった。 ひずみ速度の影響を材料強度上昇分として考慮した場合 の,静的載荷実験におけるひび割れ長さ推定値と動的載 荷実験のひび割れ長さ推定値を図-11に示す。参考とし て図-9(a)に示した実験結果を図-11に重ねて再掲する。 ひび割れ長さの推定結果では動的載荷時のひび割れ長さ が2割ほど少ないのに対し、実験結果では動的載荷時の ひび割れ長さがわずかに少ないとはいえ殆ど差がない, また,推定結果は実験結果よりも過大評価となっている。 そこで、図-12 に部材角 1/100rad.時におけるひび割れ長 さ進展状況推定図と実験時のひび割れ進展状況を比較し た図を示す。図より実験結果よりも推定結果では曲げひ び割れの発生数が多く、森田式による平均ひび割れ間隔 が本実験結果と整合しなかったことが推察される。

6. まとめ

RC 造部分架構の静的および動的載荷実験を実施し, 損傷量評価および推定を行い,以下の知見を得た。

- 静的載荷試験体のほうが動的載荷試験体より総ひび割れ長さが僅かに長いものの顕著な差は見られず、平均ひび割れ幅は両試験体とも概ね同様の計測結果となった。
- 2) 部材変形法によるひび割れ長さ推定において、載 荷速度による材料強度状況の影響を考慮したところ、動的載荷試験体のひび割れ長さは静的載荷試 験体より2割程度少ないと計算された。
- 3) 部材変形法によるひび割れ長さ推定結果は、平均 曲げひび割れ間隔式が影響し実験結果を過大評価 する結果となった。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究 C 15K06283)の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) キムキョンミン,高橋典之,塩原等:鉄筋コンクリ



図—12 ひひ割れ進展推定結果の比較 (損傷量計測区間@1/100 rad.)

ート部材の損傷状態を考慮した損傷量評価, コンク リート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1537-1542, 2005.6

- 高橋典之、中埜良昭:鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ長さ進展過程に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.2、pp.883-888、2013.7
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保証 型耐震設計指針・同解説, 1999
- N. Takahashi: Influence of Loading Ratio on Quantified Visible Damages of R/C Structural Members, Proc. of the Sixteenth World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1458, Jan. 2017
- 5) 佐藤真俊,高橋典之,菅野秀人,西田哲也:非定常 変位を受ける RC 造柱部材の損傷量計測および推定 手法に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.931-936, 2016.7
- 6) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の耐震性能 評価指針(案)・同解説,2004
- 森田司郎:ひび割れの制御設計-RC構造の場合-コ ンクリートジャーナル, Vol.11, N0.9, 1973.9
- D. C. Kent and R. Park: Flexural members with confined concrete, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.97, Issue 7, pp.1969-1990, 1971