

論文 鉄筋コンクリート 2 層試験体の補修効果に関する実験的研究

菊田 繁美*1 · 千葉 脩*2

要旨：鉄筋コンクリート造建築物の地震時挙動、損傷度合い及び地震後の補修効果を把握する目的で、2層1スパンで縮尺約1/2の試験体を用い、補修前後においてレベル2(50cm/sec)の地震動による仮動的実験とレベル2及びレベル3(75cm/sec)以上の地震動による応答を想定した動的実験を行った。結果として、レベル2の地震動により約1/90rad.の層間変形角を被っても損傷は僅かであり、約1/45rad.の層間変形角を被った場合でも、エポキシ樹脂注入による補修を実施すれば、初期剛性は低下するものの補修前とほぼ同程度の地震応答性状を示すことが判明した。

キーワード：エポキシ樹脂、補修、仮動的実験、ひびわれ幅、残留変形

1. はじめに

本報では、鉄筋コンクリート造建築物の地震時挙動、損傷度合い及び地震後の補修効果を把握する目的で行った2層1スパン試験体の仮動的実験及び動的実験の概要について報告する。

いたエポキシ樹脂の材料試験結果を表-1に示す。コンクリートの圧縮強度は36.1N/mm²である。補修に用いたエポキシ樹脂のヤング率はコンクリートの割線剛性の約1/16である。

2. 試験体

試験体形状を図-1に示す。対象とした建築物は、梁間および桁行方向とも同スパン長で各階等重量(20kN/m²)の2階建鉄筋コンクリート純ラーメン構造である。梁端部および柱脚の曲げ降伏によりメカニズムを形成し、メカニズム時のベースシア係数を約0.35で設計した。試験体は、桁行方向中央部の平面フレームを取り出した縮尺約1/2の2層1スパンである。

1階階高が1.75m、2階階高が1.5m、スパンが2.5mである。各階とも柱断面は30cm×30cm、梁断面は20cm×30cmであり、20cm×30cmの直交梁及び厚さ8cmの床スラブを設けた。

コンクリート、鉄筋および補修に用

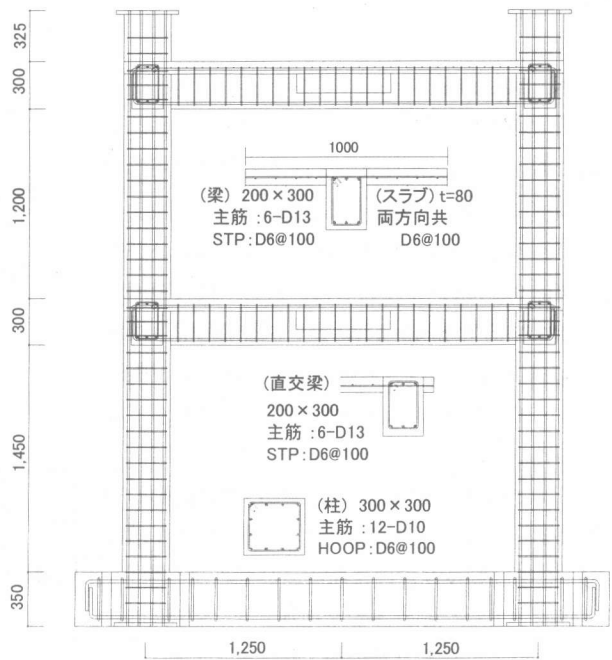


図-1 試験体形状

*1 戸田建設(株)技術研究所研究第2室研究員 工修 (正会員)

*2 戸田建設(株)技術研究所所長 工修 (正会員)

3. 加力方法

加力装置を図-2に示す。上部アクチュエーターにより、245kN（柱軸応力度：1.36N/mm²）の一定軸力を作用させ、各階スラブ中央の加力スタブに加力梁を介して取り付けられた2台の水平アクチュエーターを用いて水平変位を作用させた。

仮動的実験では、各階重量を122.5kNとし、減衰定数を1次2次とも3%のモーダル減衰とした。

実験順序及び種別を表-2に示す。補修前及び補修後とも、始めに仮動的実験を行った。次に、耐震安全余裕度を確認する目的で、入力地震動が50cm/secの仮動的実験で得られた各階の応答変位履歴の振幅を拡幅して、2台の水平アクチュエーターを所定の載荷速度とする強制変位制御の動的実験を行った。

すなわち、V75DとV75DRでは振幅を1.5倍、V100DとV100DRでは振幅を2倍とした。

入力地震動としては最大速度を25cm/secおよび50cm/secに基準化したEl Centro 1940 NSを用いた。

4. 実験経過

入力地震動を25cm/secとしたV25Pの仮動的実験においては、1階柱脚と2階と3階の梁両端部に曲げひび割れが発生する程度であった。最大ひび割れ幅は0.04mm以下であり、残留最大ひび割れ幅は0.02mm以下であった。鉄筋の最大歪度は2階梁端部下端筋が1800 μ 、3階梁端部下端筋が1100 μ 、1階柱脚の柱主筋が900 μ で引張降伏はしていなかった。残留層間変形はほとんどなかった。

入力地震動を50cm/secとしたV50Pの仮動的実験においては図-3に示すように、新たに1階柱頭、2階柱脚及び柱頭に曲げひび割れが発生し、各部材ともひび割れ本数が増加した。各部材接合面におけるひび割れ幅の増大が顕著となり、1階柱脚のスタブ面で0.2mm、2階梁両端の柱面で0.5mm、3階梁両端の柱面で0.3mmであった。部材の最大ひび割れ幅は、全て0.07～0.1mmであり、残留最大ひび割れ幅は2階スラブ上面で

0.06mm、その他は0.02mm以下であった。鉄筋の最大歪度は2階梁端部の下端筋が14000 μ 、上端筋が8000 μ 、3階梁端部下端筋が2300 μ で引張降伏しており、1階柱主筋は柱脚が1600 μ で柱頭が

表-1 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	割線剛性 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
	36.1	29200	3.1

鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D6	342	172000	499
D10	370	177000	526
D13	363	175000	529

エポキシ樹脂	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
	67.5	1800	38.2

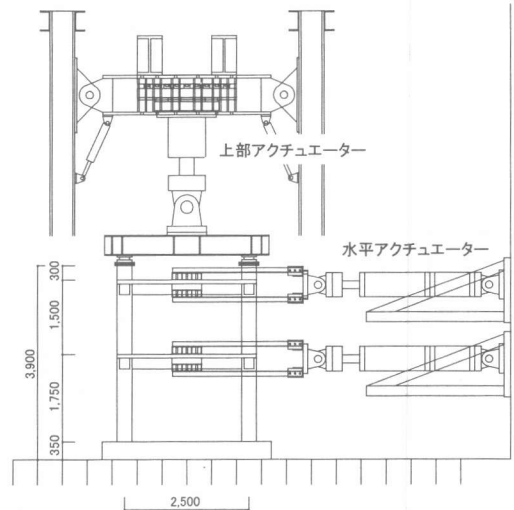


図-2 加力装置

表-2 実験順序・種別

	順序	名称*	種別	最大変位 cm	最大載荷速度 cm/sec
補修前	①	V25P	仮動的	0.77	---
	②	V50P	仮動的	3.06	---
	③	V50D	動的	3.07	6
	④	V75D	動的	4.65	
	⑤	V100D	動的	6.42	
補修後	⑥	V50PR	仮動的	3.37	---
	⑦	V50DR	動的	3.15	6
	⑧	V75DR	動的	4.85	
	⑨	V100DR	動的	6.57	

*: V50=入力地震動50cm/sec
P=仮動的実験
R=補修後

900 μ , 3階梁端部上端筋は1700 μ , 2階柱頭部主筋は1000 μ , 柱脚部主筋は300 μ で引張降伏はしていなかった。残留層間変形は1層および2層ともほとんどなかった。

V50Dの動的実験におけるひび割れ状況は、V50Pとほぼ同じで、ほとんど増加しなかった。残留層間変形角は1層で約1/3000, 2層はほとんどなかった。

V75Dの動的実験においては、2階梁両端下端において若干の圧壊が発生した。残留層間変形角は1層で約1/3000, 2層は約1/2000であった。

V100Dの動的実験においては、2階梁両端下端の圧壊が拡大し、1階柱脚部にも圧壊が発生した。残留層間変形角は1層で約1/1000, 2層で約1/500であり、2階の梁の内法スパンが約2mm長くなった。

1階柱脚主筋はV50Dで約4000 μ , V75DおよびV100Dでは6000 μ 以上で引張降伏した。

補修後の入力地震動を50cm/secとしたV50PRの仮動的実験においては図-3に示すように、ひび割れ補修箇所の近辺に新たにひび割れが発生し、V50Pとほぼ同じひび割れ発生状況を示した。各部材接合面における最大ひび割れ幅の増大が顕著となり、1階柱脚のスタブ面で0.9mm, 2階梁両端の柱面で0.8mm, 3階梁両端の柱面で0.4mmであった。残留最大ひび割れ幅は2階スラブ上面および梁下端で0.2mm, 1階柱脚部で0.08mm, 3階梁下端で0.05mm, 2階柱頭部で0.05mm, その他は0.02mm以下であった。残留層間変形角は1層で約1/1500, 2層は約1/5000であった。

V50DR, V75DR, V100DRにおいてはV50D, V75D, V100Dとほぼ同じひび割れ発生状況を示した。V50DRの残留変形角は1層はほとんどなく、2層で約1/5000であった。V75DRの残留変形角は1層で約1/7000, 2層で約1/2000であった。V100DRの残留層間変形角は1層で約1/300, 2層で約1/170であった。

5. 実験結果

5. 1 荷重変形関係

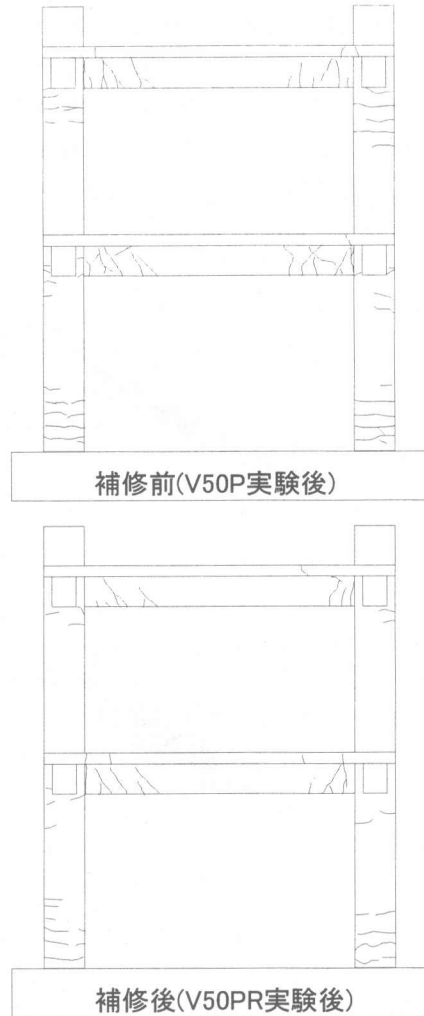


図-3 ひびわれ状況

表-3 層間変形角と層せん断力の最大値

名称	1層		2層	
	最大層間変形角(rad.)	最大層せん断力(kN)	最大層間変形角(rad.)	最大層せん断力(kN)
V25P	0.0026	88	0.0024	57
V25P解析	0.0028	83	0.0025	59
V50P	0.0110	145	0.0086	87
V50P解析	0.0109	132	0.0077	81
V50D	0.0112	145	0.0088	111
V75D	0.0169	170	0.0130	114
V100D	0.0229	170	0.0187	143
V50PR	0.0125	154	0.0092	90
V50DR	0.0114	161	0.0089	103
V75DR	0.0174	183	0.0138	126
V100DR	0.0236	188	0.0187	129

各実験における層間変形角と層せん断力の最大値を表-3, V50P, V50PR, V100D 及び V100DR の荷重変形関係を図-4 に示す。図-4 には V50P の弾塑性地震応答解析結果も併記した。解析モデルとして, 一定軸力下における柱およびスラブの全幅を有効とした梁を武田モデルとし, 接合部パネ

ルを弾性とした。各階質量および粘性減衰は仮動の実験と同じとした。

仮動の実験における最大層間変形角は, 入力地震動が25cm/secのV25Pで約1/400rad., 50cm/secのV50Pで約1/90rad., 補修後の50cm/secのV50Pで約1/80rad. であった。V50Pについて実験と解

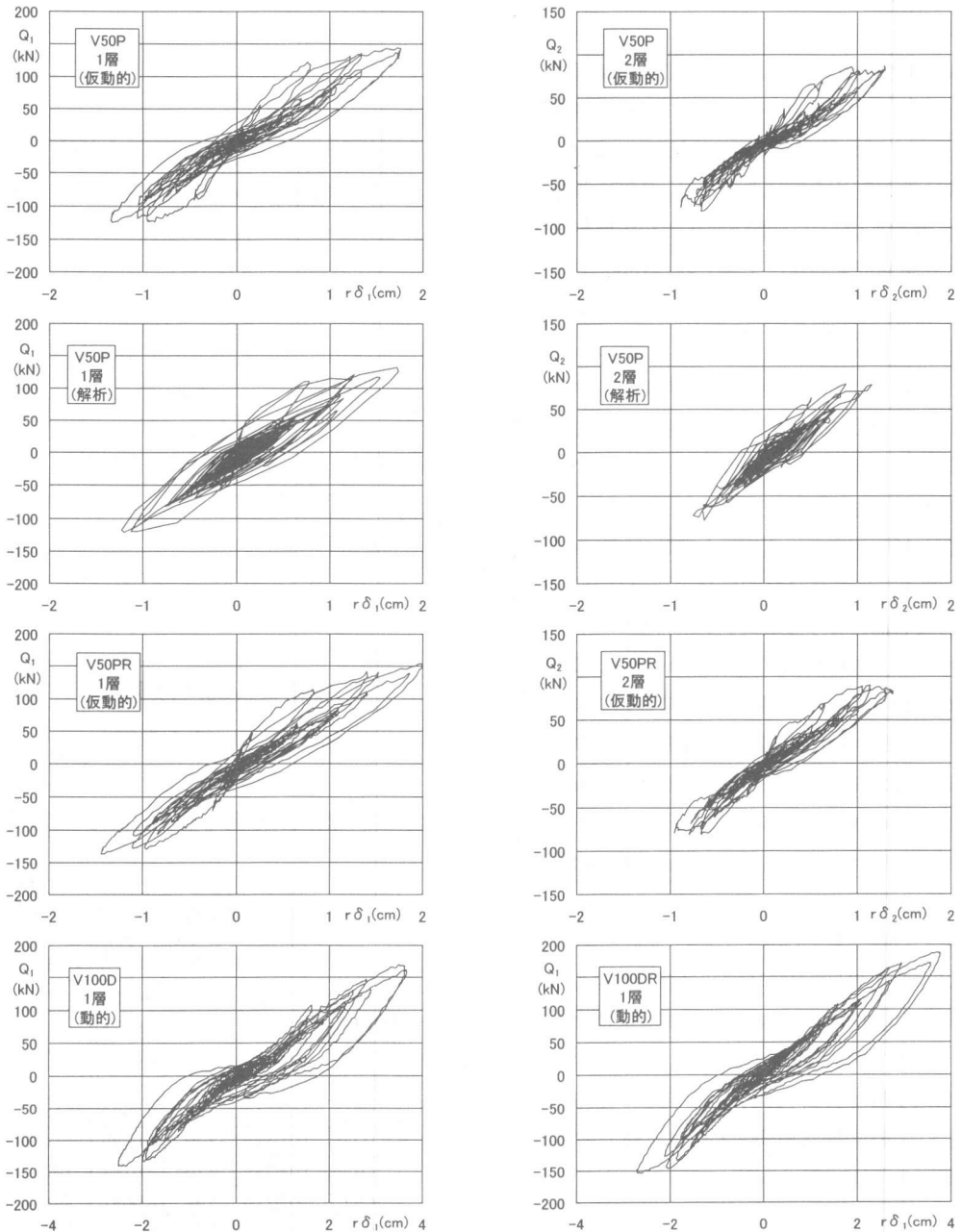


図-4 荷重変形関係

析を比較すると、最大応答値は良く適合した。履歴ループの形状については1, 2層とも解析に比べて実験が逆S字型で細くなる傾向を示した。1層についてV50PとV100Dを比較すると、V100Dは逆S字の履歴ループとなりV50Pに比べて剛性低下が大きかった。補修前のV50Pと補修後のV50PRを比較すると、最大応答値及び履歴性状ともにほぼ同じ性状を示した。補修前のV100Dと補修後のV100DRの1層の荷重-変形関係を比較すると、両者とも同様の履歴ループを示しているが、補修後のV100DRの復元力のほうが若干大きかった。以上の結果から、補修により耐震性能が回復したものと考えられる。

5. 2 剛性

補修前と補修後の固有周期を表-4, V25P, V50P, V100D及びV50PRについて1層の層間変形と層せん断力から求めた接線剛性のヒストグラムを図-5に示す。試験体の固有周期は予備加力から得られた初期剛性を基に計算したものである。1次周期の実験値は解析値に比べて若干長かった。補修後の1次周期は補修前の約1.37倍と長く、補修しきれなかった微細なひびわれ等の影響と考えられる。接線剛性の分布から、V25Pに比べてV50Pでは約1/3, V100Dでは約1/4に剛性が低下しており、補修後のV50PRでは補修前のV50Pとほぼ同等までに回復していることが判った。

5. 3 歪み度分布

補修前のV25PおよびV50Pにおける柱主筋と2階梁主筋の最大歪み度の分布を図-6に示す。柱主筋は降伏しなかった。1階柱脚柱頭部および2階柱頭部に比べて2階柱脚部の歪み度が小さかった。V50Pにおいて2階梁主筋は両端部で降伏し、6000 μ 以上の大きな歪み度となったが、端部から20cm中央寄

りでは2000 μ 以下で降伏しておらず端部に歪み度が集中していた。

5. 4 梁端部付着劣化

V50Pについて2階梁の右端部位置における主筋

表-4 固有周期

	補修前 (sec)	補修後 (sec)	解析 (sec)
1次	0.180	0.246	0.151
2次	0.045	0.058	0.041

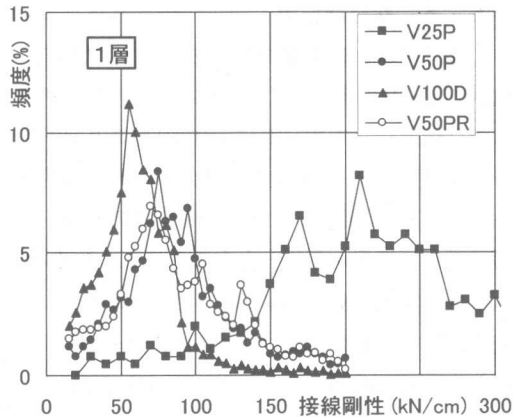


図-5 接線剛性の頻度分布

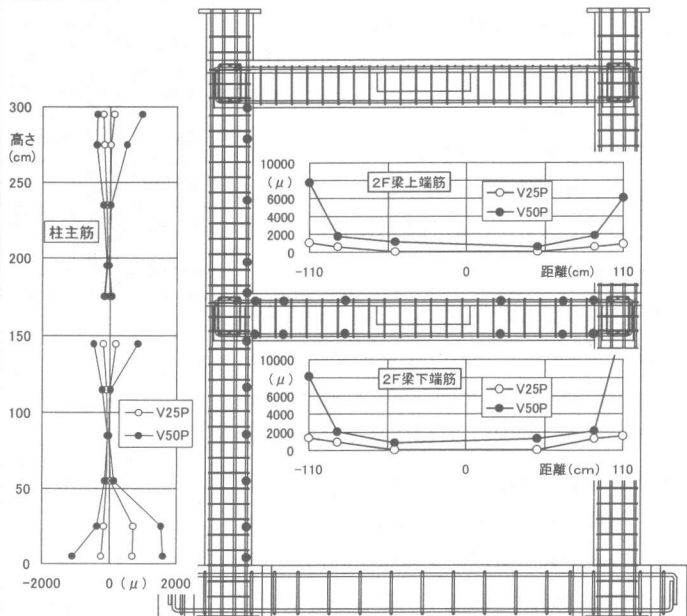


図-6 最大歪み度の分布

の歪み履歴と同位置(図8の●)の柱面と梁端部の相対変位履歴を図-7に示す。上端および下端とも最大歪み度を経験するまでは変位と歪み度はほぼ同様に变化したが、その後は変位が大きく変動したのに対して歪み度はほぼ一定値で僅かな変動であった。上端筋に比べて大きな歪み度を経験した下端筋のほうが歪み度の変動が小さかった。これは、梁端部において付着劣化が生じたためと考えられる。このため、履歴ループの形状が逆S字型で細くなったものと考えられる。

5.5 端部回転角

1階柱脚および梁端部から約10cmの位置の変位計(図-8参照)を用いて求めた最大回転角および残留回転角を表-5に示す。V50Pと同一変形を与えたV50DはV50Pの約2倍の最大回転角を生じており、端部における付着劣化等の損傷の影響で端部に変形が集中したのと考えられる。補修後の仮動的実験V50PRにおいてもV50Dと同程度の回転角を生じた。補修後のV50DR、V75DRおよびV100DRの端部回転角は補修前のV50D、V75DおよびV100Dに比べて柱脚部で約1.5倍、梁端部で約1.2倍と大きかった。以上より、エポキシ樹脂注入による補修では端部への変形集中が改善されないことが判った。

6. まとめ

2層1スパンの鉄筋コンクリート試験体の仮動的実験および動的実験を行い、以下の結論を得た。

- ① レベル2の地震動による最大層間変形角は約 $1/90$ rad.であり、2階の梁主筋が引張降伏し、梁端部で最大ひびわれ幅は0.5mmであった。残留ひびわれ幅は最大で0.06mm、残留層間変形はほとんどなかった。
- ② 層間変形角で約 $1/45$ rad.の大変形を被った後でも、エポキシ樹脂注入により補修すれば初期剛性は低下するものの最大応答値及び履歴性状は補修前とほぼ同程度に回復することが判明した。

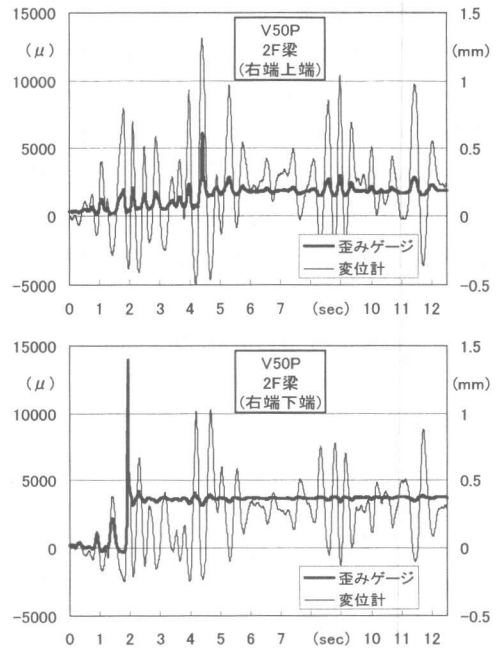


図-7 梁端部の歪み度および変位履歴

表-5 最大回転角および残留回転角

		回転角 ($\times 10^{-3}$ rad.)					
		柱脚(左)	柱脚(右)	2F梁(左)	2F梁(右)	3F梁(左)	3F梁(右)
V25P	最大	0.4	0.5	0.9	1.2	0.5	0.4
	残留	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
V50P	最大	2.4	2.8	3.4	4.0	1.9	1.3
	残留	0.3	0.2	0.2	0.5	0.1	0.1
V50D	最大	6.5	6.6	6.9	6.1	4.6	2.4
	残留	0.5	0.5	0.5	0.7	0.6	0.3
V75D	最大	11.0	10.9	11.1	14.1	7.8	3.2
	残留	0.2	0.7	0.5	2.2	1.8	0.2
V100D	最大	13.9	14.3	15.3	17.7	11.4	6.3
	残留	0.3	1.1	0.4	1.8	2.7	1.1
V50PR	最大	6.2	6.4	5.5	4.6	3.7	2.0
	残留	0.8	0.4	1.6	0.4	0.1	0.1
V50DR	最大	10.1	11.0	8.7	7.3	5.4	3.0
	残留	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
V75DR	最大	15.8	18.0	12.2	9.7	9.6	4.0
	残留	1.2	1.2	2.8	1.2	1.1	0.3
V100DR	最大	19.5	23.7	17.1	13.3	12.9	9.6
	残留	1.4	3.1	5.9	1.4	1.1	1.8

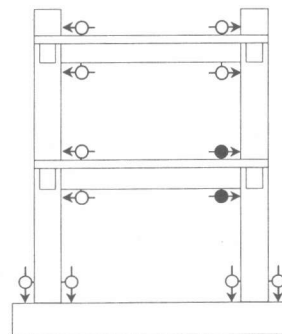


図-8 変位測定位置