

[復旧・補修技術]

阪神・淡路大震災で被害を受けた鋼構造建築物 の復旧技術および補修例

高橋 泰彦
藤田 佳広
(本店 建築設計第7部)
杉本 浩一

1. はじめに

阪神・淡路大震災により鋼構造建築物は大きな被害を受けた。今後、建物内部の仕上材や耐火被覆などを除去して詳細な調査をすれば被害の実態はさらに大きくなることも予想された。

筆者らは地震直後から被害の詳細調査を進めるにつれて、大破と判定され解体を余儀なくされた建物を除いた多くの被災建物に対して早急に再使用のための復旧工事を実施する必要に迫られた。

しかし、鋼構造建築物は過去において大規模な被害を経験しておらず、今回のような複雑な被害パターンが想定されていなかったことを反映して従来の補修・補強マニュアルに示された方法では対応しきれない状況であった。筆者らは部材別に被害パターンを分類してそれぞれのパターンに適用すべき補修・補強技術を急いで検討・考案し、鉄骨ファブリケータと施工の可否を検討した上で独自の復旧技術マニュアルとしてまとめた。

このマニュアルに基づき建物の復旧工事が進められ、すでにいくつかの工事が完了した。実施工に適用された技術から既往の文献^{1)~4)}に掲載されていない代表的な構造補修・補強技術および復旧設計法を紹介する。必ずしも最善の方法とは言えないと思うが今後の検討課題を提供することになれば幸いである。

なお、本論文では復旧工事を担当した建物に多用されていた冷間成形角形鋼管柱-H形鋼梁貫通(通しダイヤフラムブラケット方式)構造形式に限定して、復旧技術を述べるとともに、鋼構造建築物の復旧技術マニュアルと修復のための設計コンセプトを基に、阪神・淡路大震災で特に多大な損傷を受けた鉄骨造建物の補修例を紹介する。

2. 復旧方針

復旧工事は地震の被害による構造性能の低下を回復させるのみの補修と構造性能を向上させる補強に分類され、両者の選択は建物の所有者との相談で決められるが、それぞれの設計方針は次のとおりとした。

補修方針

- 1) 原状復帰を目指した本格的な復旧とする。
- 2) 割れ、座屈などの損傷の痕跡は除去するが、降伏部は補修の対象とはしない。ただし、損傷部を切除する場合にはできるだけ降伏領域を含めて除去する。

補強方針

- 1) 適切な剛性、耐力を付加するとともに変形能、エネ

ルギー吸収性の優れた方法を選ぶ。

- 2) 経年変化や補強工事に伴う建物の劣化を考慮する。
- 3) 建物の軽量化を目指す。

また、復旧工事の施工を可能とするには部材、ディテール、接合部の選択が重要な要素となる。次の施工条件を十分に考慮して設計した。

- 1) 撤去、揚重、搬送、組立の容易さ
- 2) 施工時の防災と安全性
- 3) 損傷部以外の劣化の防止
- 4) 良好な品質の確保

3. 損傷部の補修・補強技術

本論文で補修・補強の対象とした代表的な鋼構造建築物の地震被害をFig.1にまとめて示す。図中のC1, J2, B2などの記号は柱、柱・梁仕口部、梁に生じた損傷のパターンを示す略称である。例えばJ1, J2は梁の上下フランジ溶接部の破断を意味する。また、Fig.2, Fig.3, Fig.4, Fig.5, Fig.6にそれぞれの損傷に対する補修・補強技術を施工順序に従って示すとともに施工時の写真も掲載する。

ブレースの破断、座屈の補修工事も多数実施したがブレースとガセットプレートの取り替えなど一般的な作業で復旧できたので説明は省略する。

Fig.2は柱の破断に対する補修・補強技術であり、建物の鉛直荷重と水平力に抵抗する仮設を設けた後、柱の損傷部を切断して除去し、板厚をアップした新材を挿入して現場溶接する方法である。柱の上下の芯ずれ(e)を吸収し、かつ、下向または横向溶接ができるディテールとして新挿入材の上下にはさみ板を入れる方式と内部にトッププレートのみをつける方式の2種類を採用した。図中のPhoto1は2種類の方式を併用して補修した例で、3箇所柱の現場溶接が終了した状態である。実際にはさらに鉄筋コンクリートで周囲を被覆した。

Fig.3は梁の上下フランジの溶接部破断を補修した手順を示す。上フランジではガウジングして再溶接する単純な方法を、下フランジでは破断部を切除して下向溶接のための開先加工と裏当金の下側への移設をした後、再溶接する方法を示した。フランジの両端に三角リブを溶接する補強法も可能である。Photo2は三角リブを溶接した状態である。

Fig.4は破損の著しいブラケット全体を新しい材と取り替える方法である。寸法や孔位置を原寸測定をして新材

を製作した。床スラブのはつり工事で仮設による梁の支えが必要であった。Photo 3は円形鋼管柱に取り付いたブラケットを交換した状況を示す。

Fig. 5は柱・梁仕口近傍の複合的な破損を補修した2種類の方法を示す。ともに梁端の下フランジ位置での補修例であり、1例は梁のフランジとウェブの損傷を、他は梁端から柱にまで及ぶ損傷を対象にして実施した。作業は1) 損傷を包含する3次元の切断線を描く、2) 切断線の隅

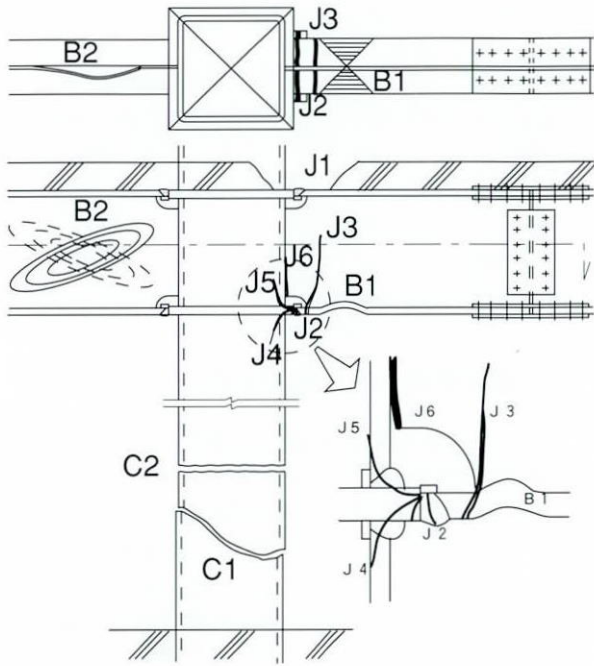


Fig. 1 地震被害パターンと記号
Seismic Damage Pattern and Symbol

角部に切断用ストップホールを穿ける、3) 損傷部を慎重にガスで切除する、4) 生じた開口部のまわりをグラインダで整形する、5) 開先加工した鋼板を1.2.3.の順に挿入して溶接で組み立てる、の順序で実施した。複雑な形をした小型の鋼板による継ぎはぎ細工に似た作業であったが工事中にトラブルは発生しなかった。柱を含む後者の補修は数例にすぎないが、梁のみの補修例はかなり多い。

Fig. 5に示すように柱・梁仕口近傍の補修の際に梁フランジ端の降伏や局部座屈が生じた領域を切除し、その間に台形状の新しい鋼板を挿入して溶接すれば水平ハンチが完成して、損傷劣化部の除去と梁の補強を同時に行うことができる。

Photo 4は梁端のみの補修で台形の鋼板でフランジに水平ハンチをつけている。Photo 5は柱の切除を含めた複雑な補修例で、水平ハンチをつけた状態を示す。

Fig. 5, Fig. 6に梁フランジとウェブの座屈の補修・補強法を示す。フランジでは切除を基本とし、ウェブではFig. 6のようにスチフナで座屈の進行を防止するとともにフランジの両先端位置にウェブと同厚のカバープレートを突合せ溶接した。溶接は炭酸ガス半自動溶接法で行ったが、姿勢、環境とも非常に条件が悪い現場溶接であり、高度な技量の保持者により施工を行うとともにすべての再溶接部に超音波検査を実施した。また、可燃物の中での施工であり、火災対策に特に配慮した。

これらの補修・補強全般にわたりかなりの困難が予想されたが実際には順調に推移し、工事は無事完了した。

損傷	補修方法	補強方法	施工写真
C1 C2	<p>切断</p> <p>損傷部の切削 切断面の開先加工</p> <p>新部材の挿入 現場溶接</p>	<p>R C断面で被覆</p>	<p>Photo 1 柱の補修完了 Completion of Repairing Column</p>

Fig. 2 柱の破断に対する補修・補強
Repairing and Strengthening for Failure of Column

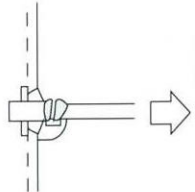
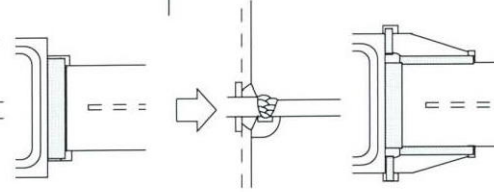

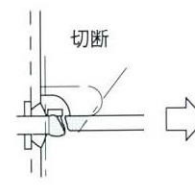
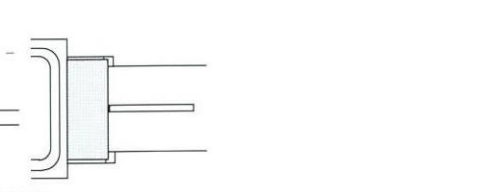
損傷	補修方法	補強方法	施工写真
J1	 <p>割れのがウジンゲ 船底型の溝加工</p> <p>再溶接</p>	 <p>同幅フランジ</p> <p>フランジの両側に 三角形リブ溶接</p>	 <p>Photo 2 三角リブの溶接 Making Triangle Rib Welds</p>
J2	 <p>切断</p> <p>損傷部の切除 切断面の開先加工</p> <p>裏当金取付 再溶接</p>		

Fig. 3 梁端溶接部の破断に対する補修・補強
Repairing and Strengthening for Failure of Beam End Welds

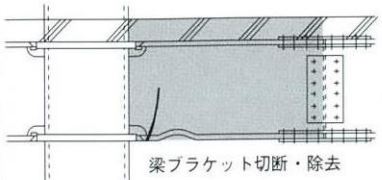
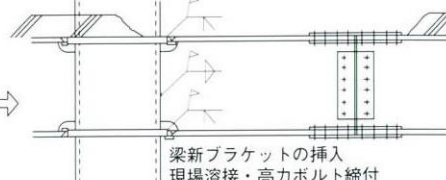

損傷	補修方法	補強方法	施工写真
B1 J1 J2 J3 J6	 <p>梁ブラケット切断・除去</p>	 <p>梁新ブラケットの挿入 現場溶接・高力ボルト締付</p> <p>補修：ハンチ無し 補強：水平ハンチ付き</p>	 <p>Photo 3 ブラケット取付完了 Completion of Attaching Bracket</p>

Fig. 4 梁端ブラケットの損傷に対する補修・補強
Repairing and Strengthening for Failure of Beam End Bracket

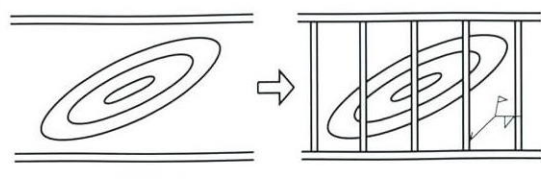
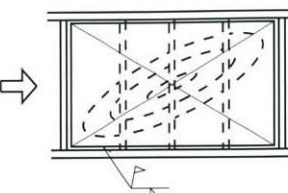

損傷	補修方法	補強方法	施工写真
B2	 <p>スチフナ溶接</p>	 <p>カバープレート 両面溶接</p>	 <p>Photo 6 カバープレート溶接 Making Cover-Plate Welds</p>

Fig. 6 梁ウェブのせん断座屈に対する補修・補強
Repairing and Strengthening for Shear Buckling of Web

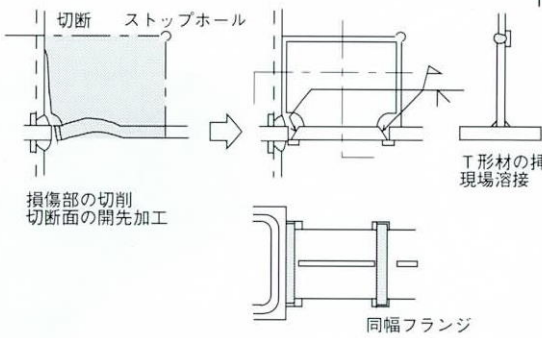
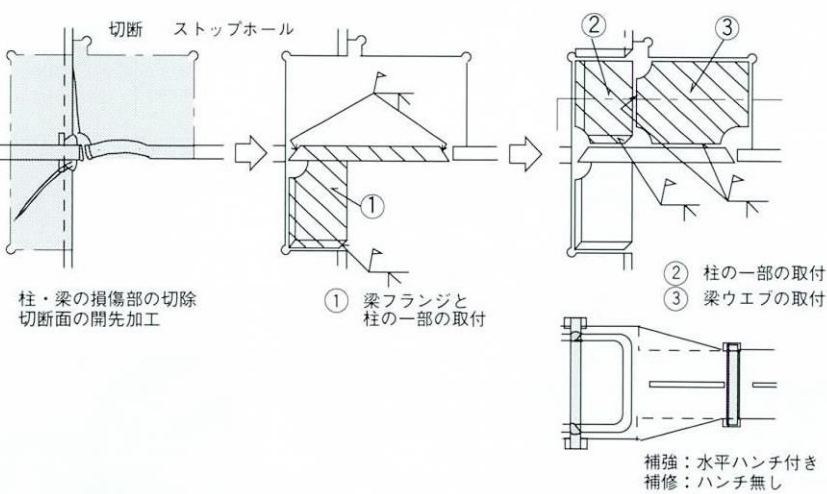
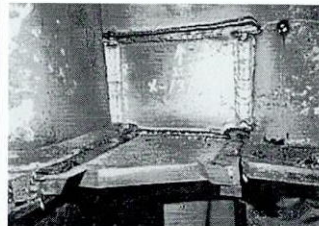
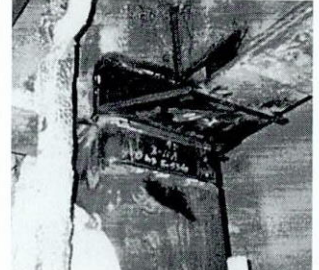
損傷	補修方法	補強方法	施工写真
B1 J1 J2 J3 J6	 <p>損傷部の切削 切断面の開先加工</p> <p>同幅フランジ</p> <p>T形材の挿入 現場溶接</p> <p>台形フランジ</p>	 <p>柱・梁の損傷部の切除 切断面の開先加工</p> <p>① 梁フランジと 柱の一部の取付</p> <p>② 柱の一部の取付 ③ 梁ウエブの取付</p> <p>補強：水平ハッチ付き 補修：ハッチ無し</p>	 <p>Photo 4 ハンチ付きの補修 Repairing of Flange with Haunch</p>  <p>Photo 5 柱・梁の補修 (ハンチ付き) Repairing of Beam-to- Column Connection (with Haunch)</p>

Fig. 5 柱・梁接合部の損傷に対する補修・補強
Repairing and Strengthening for Damage of Beam-to-Column Connection

4. 耐震要素による補強技術

被災した建築物の復旧工事において耐震性能を向上させるために増設した耐震要素と設計方法を紹介します。

4.1 Y形ブレースの増設

Y形ブレース⁹⁾は、1) ブレースが座屈する以前に梁とブレースの交点をつなぐリンクを降伏させる、2) リンクは変形能に優れ安定した復元力特性を持った部材とする、という方針で設計する。したがって、Y形ブレースでは剛性、耐力の調節が容易にでき、設計の自由度が大きだけでなく、Y形ブレースは履歴減衰ダンパーの役割を果して建物の耐震性能を大幅に向上させる。被災建物を補強する耐震要素として最適と考えられるので設計法にも検討を加え積極的に使用した。

Fig. 7の水平力(Q)－層間変形角(R)関係を使用し、Y形ブレースによる補強設計の基本的な考え方を説明する。(A)は既設の1層の架構が持つQ－R関係であり、ブレースの特性(B)を加えるとTri-Linear形の(C)となり、補強後の建物の復元力特性となる。Y形ブレースの

リンク材の降伏で第一折点が、既設の架構の降伏で第二折点が決まる。復旧設計では増設するY形ブレースの特性を適切に選択して、Y形ブレース付き新架構のレベル2地震の応答値を第二折点近傍((C)の▲印)におさえることを方針とした。また、補強工事に伴う困難な現場溶接やスラブのはつりなどで架構の特性(A)が劣化することを考慮して、(C)より剛性・耐力が多少低い復元力特性による計算も行い、耐震安全性をチェックした。

この方法で補強した建物に再度大地震が襲った場合、リンク材に著しい塑性化が起り、多くの地震エネルギーを吸収するので、柱や梁などの既存架構の主要部材の損傷は軽微に留まることになる。

したがって、今回の補強工事の際に既存部材の降伏部が残されたとしてもあまり耐震性能に影響しない。

また、リンク材が被害の有無を判定するセンサーの役目を果たすだけでなく、リンク材の取り替えが可能なディテールとしておけば地震の後でこの部分のみを交換して耐震性能を回復させることができる。

上記の設計思想に基づいて補強を進めている建物のY形ブレースの形状をFig. 8に示す。この建物ではFig. 7の復元力特性を有し、リンクのせん断降伏が中規模以上の

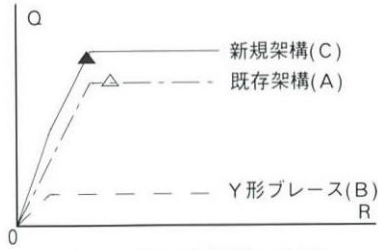


Fig. 7 復元力特性の変更
Changing of Restoring Force Characteristic



Photo 7 Y形ブレース取付
Attaching Y-Shape Brace

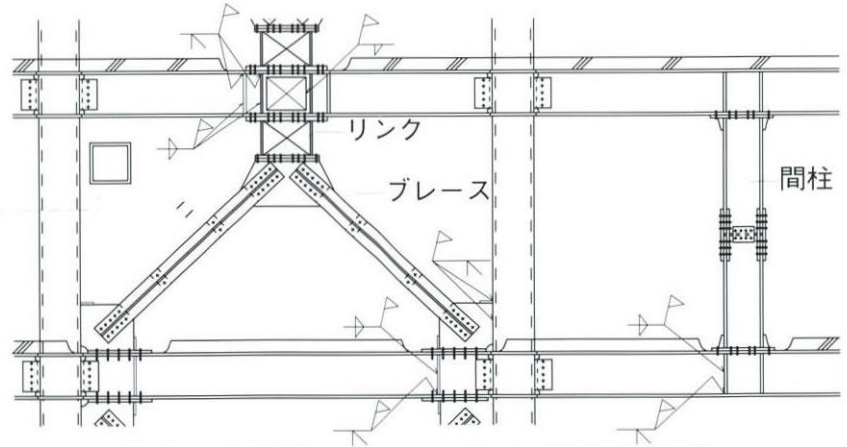


Fig. 8 Y形ブレースの増設
Increasing of Y-Shape Brace



Fig. 9 耐震間柱の増設
Increasing of Earthquake Resisting Stud

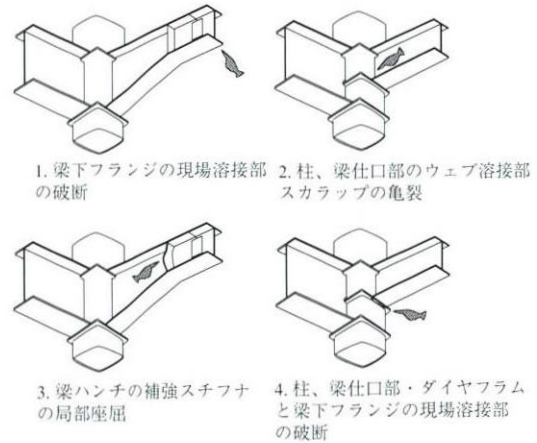


Fig. 10 損傷パターン
の代表図
Typical Pattern of Damage

地震で起こる予定である。

Y形ブレースはブレース（2本）、リンク、ガセットプレート（3枚）に分割して搬入し、現場溶接と高力ボルトで組み立てた。ブレース本体の取り付け以外にも、梁にスチフナ、梁とリンク材との交差部（パネル部）にダブルプレート溶接するなどの既存部分の補強を伴った大規模な工事であった。

なお、Photo7はすでに補強工事が完了した別の建物のY形ブレースである。

4.2 間柱の増設

Y形ブレースは大規模の補強工事に適用したが、剛性と耐力の増加分が比較的小さい簡易な補強の場合には耐震間柱を増設する方法を採用した。

Fig. 9にH形間柱の施工例を示す。2分割した間柱を搬入して高力ボルトで組み立てた。床のはつりや梁の補強工事を伴うが、ブレースの増設に比べ施工は容易であった。地震荷重により間柱が早期に曲げ降伏して地震エネルギーを吸収するように設計した。そのほか補強設計の考え方はY形ブレースと同様である。

5. 鉄骨造の補修例

5.1 補修例1 Aビル

建物概要 規模 地上7階 塔屋1階 地下なし
延床面積 10,300 m²

軒高さ 28.7m

設計年度 昭和56年以降の建物

構造概要 柱 角型鋼管 (SM490A) □-550×550
大梁 組立溶接H型鋼 (SM490A) BH-800×300
架構 南北、東西両方向共純ラーメン構造
基礎 独立杭基礎 PHC 杭 φ600

被害概要 南北方向の中間層に損傷が集中
鉄骨損傷は柱梁仕口部の溶接部の破断
外装損傷は、東西面PC版のファスナの破損

損傷パターンの一覧を以下に、その内1~4の損傷図を Fig. 10 に示す。

1. 梁下フランジの現場溶接部の破断
2. 柱梁仕口部のウェブ溶接部スカラップの亀裂
3. 梁ハンチの補強スチフナの局部座屈
4. 柱梁仕口部・ダイヤフラムと梁下フランジの工場溶接部の破断
5. ダイヤフラムと柱との溶接部の亀裂
6. 梁ハンチの補強スチフナの下端フランジと溶接部の亀裂
7. 梁端部ガセットプレートの溶接部の亀裂
8. 柱梁仕口部のエンドタブ取り付け部の亀裂

9. 梁下端フランジの局部座屈

10. 梁下端フランジの母材破断

11. U T検査による上フランジの溶接部の欠陥

12. U T検査による下フランジの溶接部の欠陥

柱梁仕口数に対する損傷率を各階ごとにTable 1に、5階梁の破断箇所を伏図上でFig. 11に示す。

この建物を修復するに当たっては、設計が新耐震以降の建物であり、建物の損傷度が中破であったことから、補強のない補修だけの、現状復旧を目標とした。

合計12の損傷のパターンを7つの補修パターンで整理したものを以下に示し、その一覧表をTable 2に示す。

A. 梁ジョイント部において、梁ウェブと下フランジを部分切断し、補修する。

B. 柱梁仕口部において、梁ウェブと下フランジを部分

切断し、補修する。

C. 柱梁仕口部において、梁ウェブと上フランジを部分切断し、補修する。

D. 梁ハンチ部スチフナの両側に補強スチフナを入れる。

E. 補強スチフナを2枚入れる。

F. 溶接部の損傷部をガウジングにより削除し、再溶接する。

G. 柱の一部を切断し、補修する。

塑性化した損傷部の再溶接の可能性については、破断部位でのマクロ組織の検査、ピッカース硬さ分布、再溶接ヒートパターンによるシミュレーションでの異常組織の形成など検討を行った結果、特に問題は無かった。

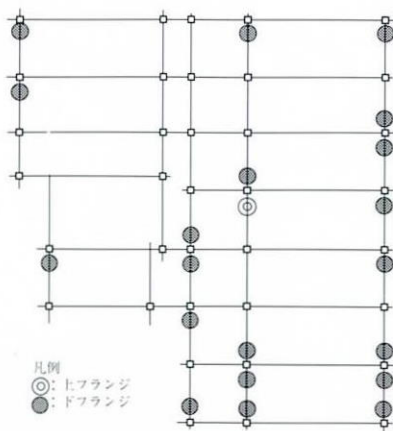


Fig. 11 Aビル5階の梁損傷箇所
Location of Fractured Beam at 5FL

Table 1 Aビルの柱梁仕口数に対する損傷率
Fractured Proportion of Beam-to-Column Connections

階	損傷箇所数		柱仕口数		全体損傷率 (%)	
	東西	南北	東西	南北	東西	南北
7	0	1	3	8	0	2.5
6	0	3	5	6	0	5.0
5	0	8	5	6	0	13.3
4	0	2	5	6	0	35.0
3	0	5	5	6	0	8.3
2	0	4	5	6	0	6.7
1	0	2	5	6	0	3.3
合計	0	4	3	4	0	11.0

Table 2 Aビルの補修パターンの一覧表
Schedule of Repaired Pattern

損傷パターン	A	B	C	D	E	F	G
	① ⑩ ⑫	② ④ ⑧	⑪	③ ⑥	⑨	⑤ ⑦ ⑪	⑤
7階	0	0	1	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	1	1
5	1	3	2	6	4	1	1
4	4	1	6	2	1	3	0
3	4	1	1	1	1	0	0
2	3	1	0	1	0	0	0
1	2	0	0	4	0	0	0
合計	1	4	6	5	8	3	3

5.2 補修例2 Bビル

建物概要 規模 地上7階 塔屋1階 地下1階

延床面積 1,300 m²

軒高さ 26.4m

設計年度 昭和56年以降の建物

構造概要 柱 角型鋼管 (SM490A) □-450×450

大梁 ロールH型鋼 (SM490A) BH-700×300

架構 南北、東西両方向共純ラーメン構造

基礎 独立杭基礎 (場所打ちコンクリート杭)

被害概要 南北方向の中間層に損傷が集中

鉄骨損傷は柱梁仕口部の溶接部の破断

外装損傷は、南面ALC版の損傷

この建物の損傷はAビルと異なり、Photo 8のような、柱梁仕口内のダイヤフラムからさらに冷間成型角型鋼管柱のR部にまで至る特異な破断が数箇所見られた。



Photo 8 Bビルの仕口内への破断
Cracking into Beam-to-Column Connections

Table 3 Bビルの柱梁仕口数に対する損傷率
Fractured Proportion of Beam-to-Column Connections

階	調査箇所数	梁および柱の損傷箇所数	損傷率 (%)
8	1	0	0
7	1	0	0
6	1	1	10
5	1	4	40
4	1	4	40
3	1	4	40
2	1	1	10
合計	7	1	14.2

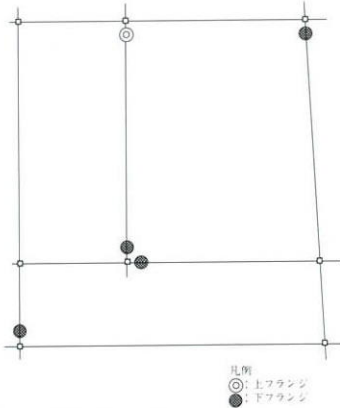


Fig. 12 4階の梁損傷箇所
Location of Fractured Beam at 4FL

この建物の復旧の方針はAビルと同様で、仕口内破断部の補修について4章のFig. 5に示す方法を採用した。

柱梁仕口数に対する損傷率を各階ごとにTable 3に、4階梁の破断箇所を伏図上でFig. 12に示す。

5.3 補修例3 Cビル

建物概要 規模 建築は地上3階の3階部分
(下層は土木構造物 H=12.3m)

設計年度 昭和56年以前の建物

構造概要 柱 Gカラム (SM490A) ϕ - 400
大梁 ロールH型鋼 (SM490A) H-600 × 300
架構 南北、東西両方向共純ラーメン構造
柱脚 土木構造物との取合はピン

被害概要 梁のスカラップからの母材破断 (Photo 9)
柱の残留変形が最大1/36
内部仕上げの破損

この建物は新耐震以前に設計された建物であり、耐力が不足していると考えられるため、復旧方針は部材の耐力を上げる方法を探らず、建物の重量を削減し、地震時荷重を軽減することで建物全体を補強することとした。屋根の大梁端部の破断箇所をFig. 13の伏図上で示すが、その方法としてFig. 14のように、屋根の約70%のコンクリートスラブを乾式材料に置き換え、補修には4章のFig. 4の方法を採用し、ブラケット部分をすべて取り替える方法とした。柱脚の回転と梁端の破断と柱梁材の塑性化による残留変形は可能な限り修正を行うこととし、1/200以下を目標とした。

架構の残留変形の修正方法はFig. 15に示すようにワイヤーとテンションジャッキを利用して建起しの要領で行った。その場合、架構の水平時の変形拘束をできる限り少なくするために、屋根スラブのボルト部分を研り、大梁ジョイント部の高力ボルトは最小本数を残し他すべて撤去した。建起し作業としては各列の架構を同時に引っ張るため、ジャッキ軸力の管理は非常に複雑であった。

また、変形改善後の新しいボルトとスプライスによる再締め付けにはボルトの孔合わせのために、かなりの調整が必要となった。

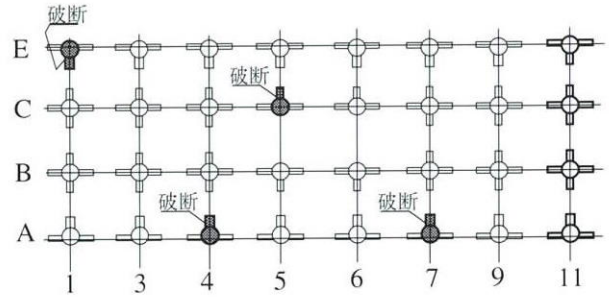


Fig. 13 屋根の梁損傷箇所
Location of Fractured Beam at Roof

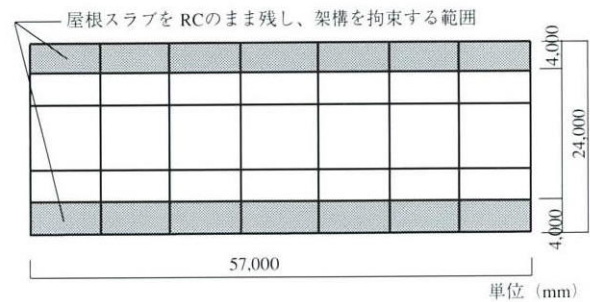


Fig. 14 屋根スラブを残す範囲
Remaining Area of Concrete Slab at Roof

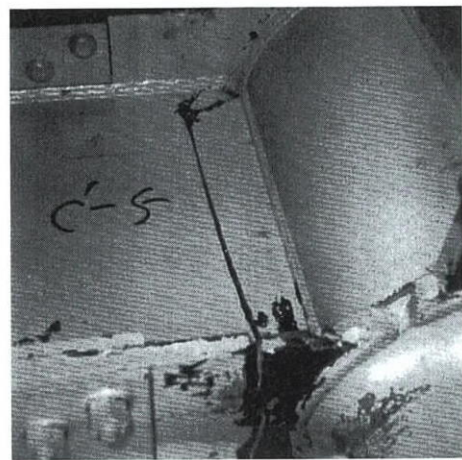


Photo 9 梁下フランジの母材破断
Fracture of Lower Flange of Beam

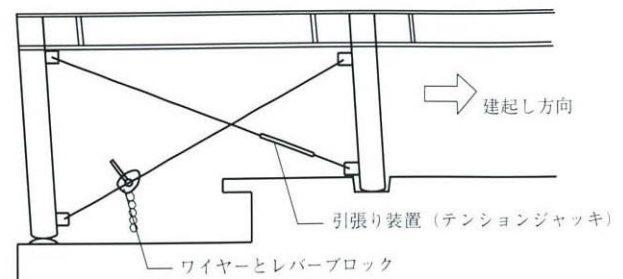


Fig. 15 軸組の残留変形の修正
Repairing of Residual Deformation at Framing Section

Table 4 柱梁仕口数に対する損傷率

Fractured Proportion of Beam-to-Column Connections			
階	調査箇所数	梁の損傷箇所数	損傷率 (%)
13	208	1	0.5
12	208	4	1.9
11	208	10	4.8
10	208	10	4.8
9	208	28	13.5
8	208	28	13.5
7	208	18	8.7
6	208	16	7.7
5	208	5	2.4
4	208	2	1.0
合計	2080	122	5.9



Photo 10 Y形ブレースのリンク材のせん断変形
Shearing of Link Member of Y-Shaped Brace

5.4 補修例 4 Dビル

建物概要 規模 地上14階 塔屋2階 地下なし
延床面積 21,000 m²
軒高さ 52.8m
設計年度 昭和56年以降の建物
構造概要 柱 角型鋼管 (SM490A) □-550×550
大梁 ロールH型鋼 (SM490A) H-600×300
架構 南北、東西両方向共純ラーメン構造
基礎 独立杭基礎 (場所打ちコンクリート杭)
被害概要 5~10階の中間層に損傷が集中
鉄骨損傷は柱梁仕口部の溶接部の破断
外装損傷は、東西面P C版のファスナの損傷
この建物は新耐震以降に設計された建物であるが、規模も大きく柱梁仕口部の溶接部の破断と部分的な塑性化により残留変形を残しており、溶接部の補修だけでは震災以前の性能を確保できないため、Photo 10に示すように各階にY型ブレースを新設し耐力と性能の向上を計った。各階の柱梁の仕口数に対する損傷率を Table 4 に示す。

5.5 補修例 5 Eビル

建物概要 規模 地上8階 塔屋2階 地下2階
延床面積 907 m²
軒高さ 37.5m
設計年度 昭和56年以降の建物
構造概要 柱 角型鋼管 (SM490A) □-550×550
大梁 ロールH型鋼 (SM490A) BH-650×300
架構 南北、東西両方向共純ラーメン構造
基礎 直接ベタ基礎
被害概要 1階の柱に損傷が集中
外装損傷は、西面下層部のALC版の損傷
この建物は新耐震以降に設計された建物であるが、比



Photo 11 柱部破断
Cracking of Column

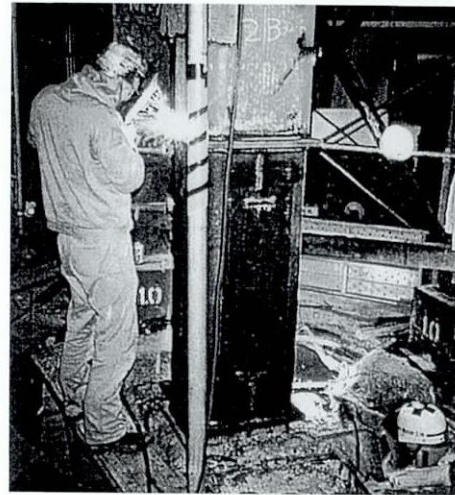


Photo 12 柱部の補修
Repairing of Column

較的に搭状であったため1階部分に被害が集中し、4箇所の冷間成型角型鋼管柱の内、2箇所に柱脚部分で破断が生じた。2階以上の構造体に損傷が無かったことから、補修として柱の損傷部を切断、除去し、板厚を上げた新材を挿入し、現場溶接を行った。切断のために、建物の鉛直と水平に仮受けする仮設支柱と仮設ブレースを設置し、損傷時のレベルの調整、現場溶接時の縮みを考え、ジャッキをセットして、柱軸力と変形の変動を管理しながら新材の溶接を完了した。補修と補強は4章の Fig. 2 に示す方法を採用した。柱の損傷写真を Photo 11 に、補修中の写真を Photo 12 に示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：1995年兵庫県南部地震 鉄骨造建物被害調査報告書、(1995.5)
- 2) 兵庫県南部地震被害度判定体制支援会議：RC造、SRC造建築物の被害と補強事例、(1995.3)
- 3) 日本建築防災協会：既存鉄骨造建築物の耐震診断基準・耐震改修設計指針、(1978.6)
- 4) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針、(1991.2)
- 5) 清水敬三、高橋泰彦：偏心ブレース、建築技術 481号、p.123~128、(1991.4)