

増幅機構を用いた制震構造システムの開発 (その3. トグル制震装置を用いた耐震補強)

7

○久保田 雅 春*¹ 中 川 三 夫*¹ 前 川 康 雄*¹
Masaharu Kubota Mitsuo Nakagawa Yasuo Maekawa
長 塚 典 和*¹ 堀 田 潔*²
Norikazu Nagatsuka Kiyoshi Hotta

〈概要〉

トグル制震装置は建物の小さな層間変形をこの応用(トグル機構)により増幅し、建物に入力された地震エネルギー等を効率よく吸収する非常に優れた制震装置である。

この装置は建物の柱・梁骨組内に設置するブレース形状のパッシブ型制震装置で、地震による建物の応答変位や応答加速度を小さく押さえることが可能であり、鉄骨造や鉄筋コンクリート造等の構造種別の違いによらず優れた制震効果を発揮することができる。そして新築建物から耐震改修まで幅広く適用する事が可能である。ここではR/C既存建物の耐震改修の検討を例にとり述べる。

〔キーワード〕 トグル機構、増幅機構、制震構造、耐震改修、耐震補強、減衰、性能設計

1. はじめに

1995年1月の兵庫県南部地震により建築構造物に多大な被害が及び、わずか数十秒の地震が6,430名の尊い命を奪い、約1,500tonfものガレキの山を築いてしまった。4年経つ今も被災した町は表面的な復興は進んでいるように見えるが、そこに住む人々の生活はまだその震災の影を色濃く残している。

現在、新耐震設計法(1981年施工)以前の建物は全国で1,400万棟(木造含む)にも及ぶといわれており、兵庫県南部地震クラスの巨大地震に対してこれらの建物は崩壊の可能性が高い。

1995年12月に「建築物の耐震改修に関する法律」いわゆる耐震改修促進法が施工され、これを契機に既存建物の耐震改修・補強が行われている。

ここでは様々な耐震改修法の中でトグル機構制震装置を用いた耐震改修の方法について述べることとする。

2. 耐震改修の考え方

耐震改修の方法には大きく分類すると在来構造型の①強度補強型、②靱性補強型と、応答制御型の③免震補強型、④制震補強型に分けることができる。ここでそれぞれの補強方法の特徴を簡単に表2.1に示す。これまでに用いられてきた方法は①と②の強度・靱性型補強が主な方法であり、応答制御型補強は近年の事例を見るのみである。表2.1はそれぞれの性能を全て表現しているわけではなく、耐震改修は建物構造種別、形式、形状や敷地条件及びコスト等を含め、総合的な検討を行い、判断される必要がある。

3. 制震改修のクライテリア

既存建物の耐震改修の目安として図3.1に示すような目標レベルを設定し、一つの性能指標とすることができる。ここでは、モデル建物が耐用年

1. 技術研究所 構造研究室 2. 建築事業本部 設計第2部

表-2.1 各補強方法の能力別比較一覧

	① 強度補強型	② 靱性補強型	③ 免震補強	④ 制震補強
長期荷重 (鉛直力)	主架構+ α	主架構	主架構+ 免震部材	主架構
地震荷重 (水平力)	主架構+ 補強部材	主架構+ 補強部材	免震部材	制震部材
剛性	増大	やや大	変化あまり なし	補強タイプ により異なる
耐力	増大	あまり 増加なし	あまり 増加なし	あまり 増加なし
変形能力	低	中	高	高
加速度	増大	あまり 増加なし	減少	減少
対地震能力	低	中	高	高

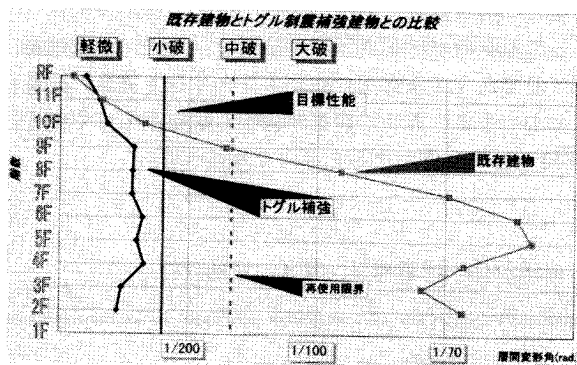


図-3.1 地震応答解析結果

限中に受ける最大規模の地震（レベル2）を想定し、既存建物のみとトグル制震補強をした場合について応答解析を行い、その結果をまとめ、グラフにしたものである。既存建物はレベル2の地震に遭遇すると中層階は層降伏し、下層階が崩壊し、建物は倒壊することが予想される。ここでは建物の被災状況を軽微から大破までのランクに大きく分けている。例えば建物の被災状況が a) 軽微な場合は建物機能も維持されており、b) 軽微から中破までは補強後建物の再使用が可能であり、c) 中破程度で建物の再使用限界と考えている。d) 中破以降大破までが人命の保護が可能である建物の損壊を許し、e) 大破以降は建物が崩壊すると考えられる被災状況を想定している。

4. トグル制震補強

トグル制震装置については前報その1、その2で詳しく述べているので、ここではその概要を記す。建物の各層の層間変形は小さいためトグル機構（てこ機構の一種）で層間変形を増幅し、その変形を増幅した部分で地震エネルギーを効率よく吸収する装置である。建物の補強に必要とするダンパー等の個数を各層に配置し、建物全体の揺れを抑えようとするものである。図4.1に動き

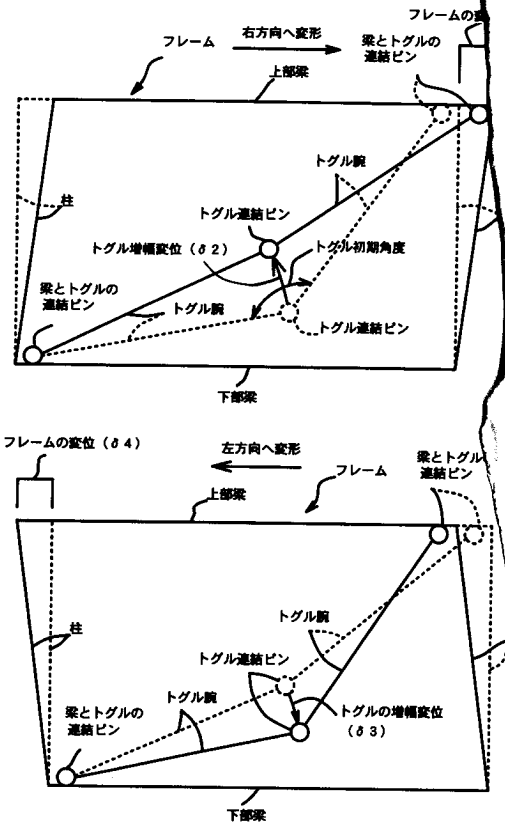


図-4.1 トグル機構の動き

4.1 RC建物の制震改修

既存建物にトグル制震補強を行った場合の検討例について記す。対象とする建物は1965年頃（約35年前）の鉄筋コンクリート造11階の集合住宅とし、改修を行う際の主な条件を示す。

- 1) 居住者が居ながら(引越をせず)改修を行う
- 2) 建物廻りに十分な敷地余裕がある
- 3) 入力地震波レベル2に対して十分な補強が可能である

4) 建物平面形状により弱軸方向のみの補強を行う

以上の条件を踏まえ改修を行う。

11階のRC既存建物をせん断型のトリリニアにモデル化し構造減衰は初期剛性比例型の2%である。その既存建物にトグル制震フレームを付加し、制震補強を行う。トグル装置はトグルの腕が伸び一直線になる限界層間変形角 $Ru=1/75$ (radian)とし、初期増幅率 $\beta_0=3.5$ となるように設計した。既存建物及びトグル制震装置の解析諸元を表4.1に示す。ここで解析は①既存建物のみ、②既存建物+粘性減衰付加、③既存建物+トグル制震の3タイプを行った。CASE②は、既存建物の層間に直接油圧ダンパーを取り付けたモデルで、CASE③はCASE②と同じ減衰力、同じ個数の油圧ダンパーをトグル機構の増幅部に取り付けトグル制震装置を構成したモデルで、CASE①~③の数学的モデルを図4.1.1に示し、CASE②とCASE③の1スパンのユニットを図4.1.2、図4.1.3にそれぞれ示す。

耐震改修の目標性能を大地震(レベル2相当)に対して、既存建物がほぼ弾性範囲内で納まり、被災後、軽微な補修で建物が使用可能であるように既存建物の層間変形角を $R=1/350$ (radian)以

内になるように定め、地震波は1995年1月に神戸海洋気象台が観測した波形のNS成分*1(以降JMA神戸NS波)の加速度振幅100%を採用した。

3ケース共に同じJMA神戸NS波を用い応答解析を行った。その結果を建物の崩壊度合いの指標となる層間変形を横軸に、建物階数を縦軸に取り、図4.1.4に示す。

ここでTarget Displacementは既存建物の解析モデルであるトリリニアの第二折点($R=1/350$)とし、補強のクライテリアとしている。

表-4.1 解析諸元

	δc (cm)	Qc (tf)	δy (cm)	Qy (tf)	M (tf·s/cm)	cd (tonf·s/cm)
11 F	0.134	514.3	0.355	587.5	0.8234	1
10 F	0.130	656.3	0.455	847.9	0.5690	2
9 F	0.130	762.0	0.587	1078.2	0.5779	4
8 F	0.130	855.9	0.677	1288.2	0.5779	12
7 F	0.130	945.6	0.709	1475.8	0.5829	20
6 F	0.131	1029.8	0.729	1645.5	0.5839	24
5 F	0.133	1113.5	0.731	1802.4	0.5999	36
4 F	0.134	1204.7	0.690	1940.7	0.6031	44
3 F	0.135	1335.4	0.592	2065.1	0.6176	52
2 F	0.153	1626.6	0.512	2182.7	0.7492	60
1 F	0.218	1884.2	0.590	2331.4	1.0173	100

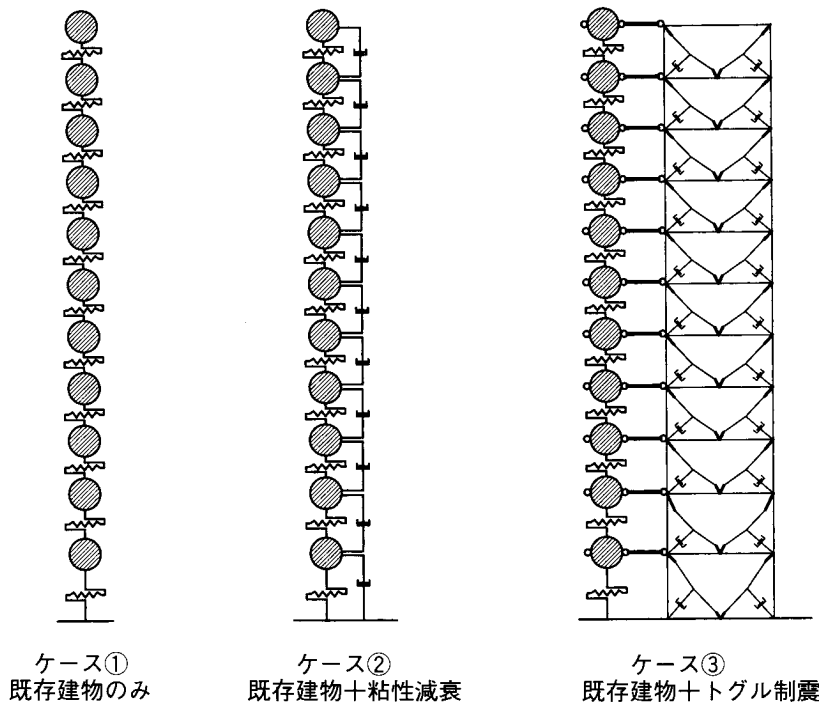


図-4.1.1 各解析モデル

CASE①の既存建物のみの場合には7階程度で $R=1/150(\text{rad.})$ を越えており、3階以下では既に建物は崩壊レベルにまで至っている。

CASE②は建物の倒壊は免れているものの、3階以下では破壊レベルは中破を越えており、被災後既存建物を補修しても再使用は不可能と考えられる。

CASE③のトグル制震補強は、1本当たりの性能がCASE②と同じ油圧ダンパーを用い、同数を各階に同じバランスで配置しているが、トグル制震装置の効果により、CASE②より大幅に応答変位が小さくなっていることがわかる。CASE③は目標変形($R=1/350(\text{rad.})$)以内に納まっており、既存建物は被災後もほぼ弾性範囲内で軽微な被害であり、被災直後も建物の機能を損なうことなく、補修後建物の再使用は充分可能である。

CASE①～③を減衰の違いで見ると、それぞれの1次モード減衰定数で比較すると、CASE①が2%、CASE②が6%、CASE③が45%となっており、トグル制震装置が建物に作用する減衰力も増幅され、効率よく制震効果を発揮していることにより建物の応答変位を大幅に軽減していることがわかる。

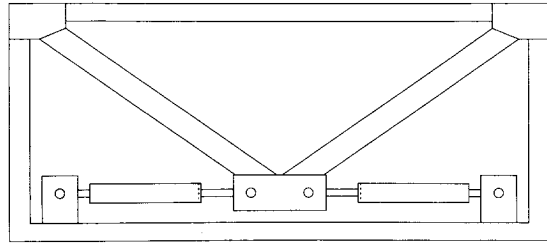


図-4.1.2 ケース①：ダンパー設置

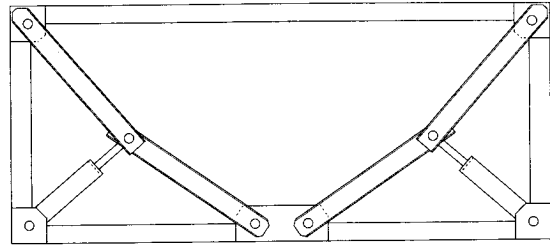


図-4.1.3 ケース②：トグル機構設置

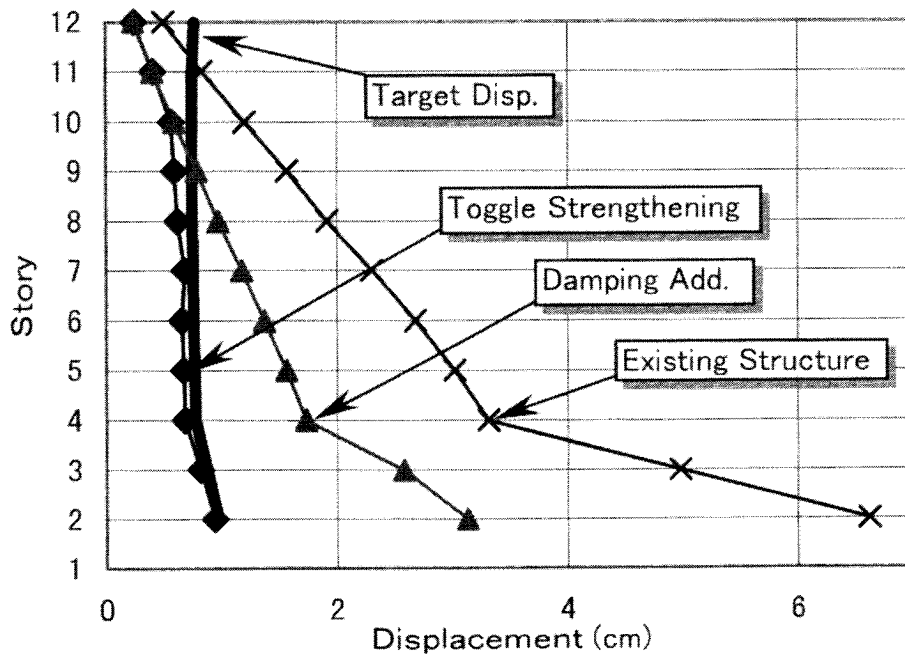


図-4.1.4 各モデル応答解析結果

4.2 補強方法検討例

前節で応答解析した結果の具体的施工検討例を示す。ここでは、トグル装置を新設のフレーム内に配置し、既存建物の両妻に設置するタイプ（タイプⅠ）と既存建物のラーメン架構の外側に設置するタイプ（タイプⅡ）の2タイプについて説明する。

タイプⅠは図4.2.1に示すように各層に必要な減衰力に相当するトグルユニットを既存建物の妻側に設ける。減衰力を既存建物に圧縮力として伝達する場合は新たに設けたスラブを介し、引張力は5スパンの柱に設けたPCケーブルにより引張力を分担し、既存建物とトグルフレームとの一体化を図っている。各柱には1ヵ所当たり10～20tonfのPCケーブルを配することで、既存建物の柱に対する負担を軽くすると同時に、PCケーブルの破壊に対するロバスト性を高めることとなる。

次に図4.2.2と図4.2.3に示す基礎形式は、トグ

ルフレームが独立フレームである為、転倒モーメントによる基礎に対し、多大な引張力が生じることの対策である。

妻フレーム片側当たり10,000tonf・mを越す転倒モーメントに抵抗させるため、一方は地中連続壁による方法であり、他方は拡底杭と鉛直式アースアンカーによる方法により対処している。

タイプⅡは外構面フレームによる補強方法であり、図4.2.4に示すようにトグルユニットを三角形に配置し、各層に必要な減衰力に見合うユニットの数を調整すると共に柱軸力を軽減するための配置計画を行うことで各新設基礎杭への負担を軽減することが可能である。杭への軸力は中央スパンで10～20tonf程度であり最外端で150tonf程度である。補強前の既存建物のイメージを図4.2.5、タイプⅠ、タイプⅡのイメージをそれぞれ図4.2.6、図4.2.7に示す。

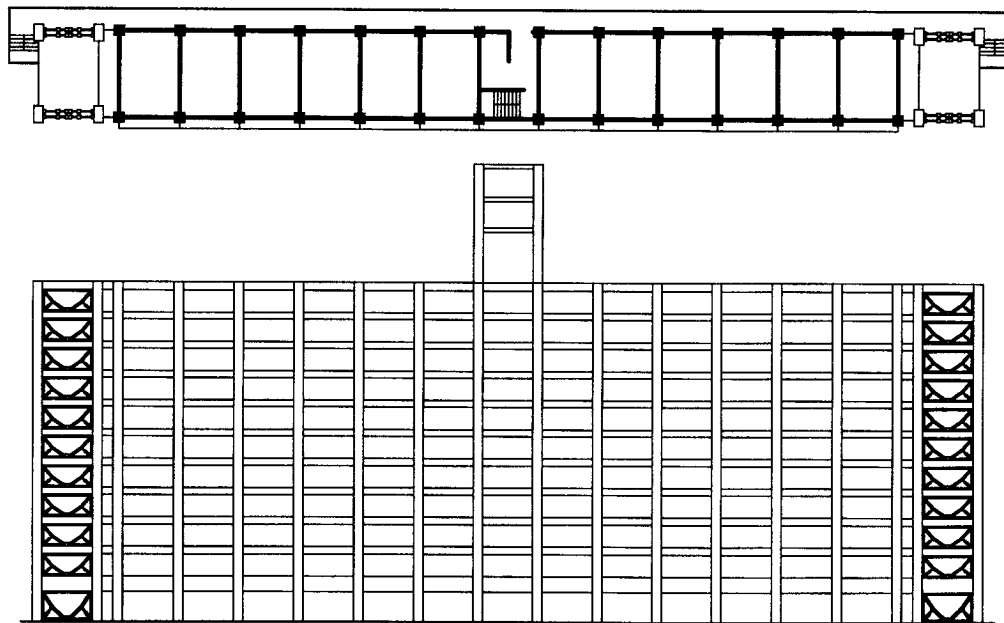


図-4.2.1 タイプⅠ：両妻トグル制震補強

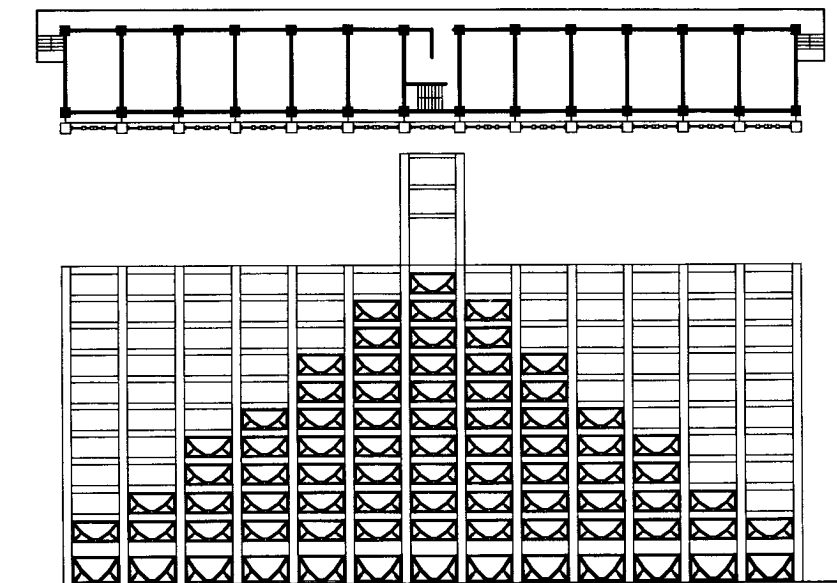


図-4.2.4 タイプⅡ：外構面トグル制震補強

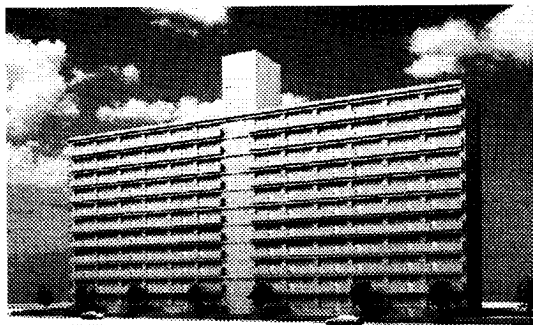


図-4.2.5 既存建物

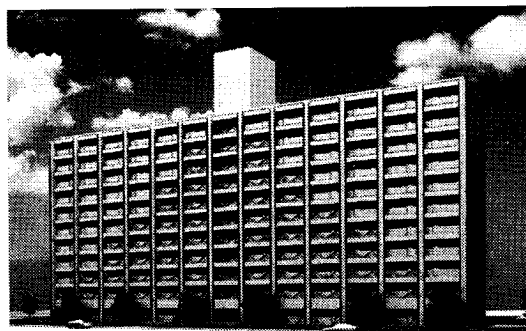


図-4.2.6 トグル制震補強建物
(両妻タイプ)

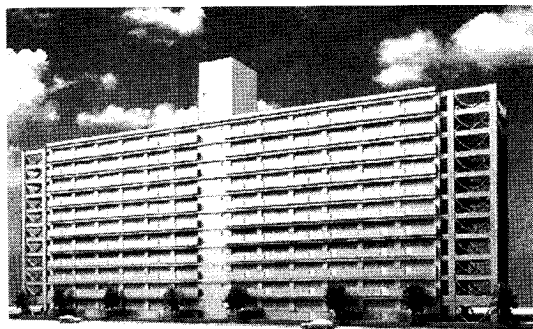


図-4.2.7 トグル制震補強建物
(外構面タイプ)

5. 長期耐用建物

ここでは主に既存建物の耐震改修について述べてきたが、1998年6月に建築基準法の改訂が行われ、2000年6月には性能設計が本格的に始動することになる。そのことを踏まえ、長期耐用建物を中心に触れておく。日本経済も高度経済成長が崩壊し、今までのような右肩上がりの経済成長を期待することはできず、建築構造物のスクラップ&ビルドのやり方では多くの建設資材を必要とし、また多くの建設廃材を生み出すことになる。また、限りある地球資源を考えると今後は壊れない、壊さない建築構造物が求められ、耐用年数を100～300年と想定すると巨大地震に遭遇する機会もおのずと多くなる。

そこで、対地震性能に優れた建築構造物の構築に免震・制震技術が積極的に取り入れられることが予想される。この考え方の一つにSI (Skelton & Infill) 住宅があり、図5.1に示すように長期耐用住宅に求められる様々なニーズと世代が代わること等による建物の用途変更に対応できるように耐震性能を変えらることなく住戸間の間仕切りを自由

に変更することも可能な構造物が必要となるであろう。

一方、社会資本ストックを有効利用する為にも既存建物の耐震改修は重要であり、今後増えることが予想される。

6. おわりに

既存建物の耐震改修において制震構法による補強が可能であり、建物の各層にトグル制震装置を配置することで地震エネルギーを効率よく吸収し、耐震性を向上させることができた。

現在、災害時の緊急避難場所、災害対策の拠点となる庁舎や学校などの公共建物の耐震改修は進みつつある。そして、今後は民間の病院やオフィスビルや住宅に広がることが期待されている。しかし、耐震改修は、設計、施工等でまだ経験が豊富であるとは言い難く、改修にかかる費用も決して少なくはない。今後、行政の抜本的な施策、我々ゼネコンの品質改良、コスト低減への努力等により、少しでも多くの建物が地震に強い建物に生まれ変わることを望む。

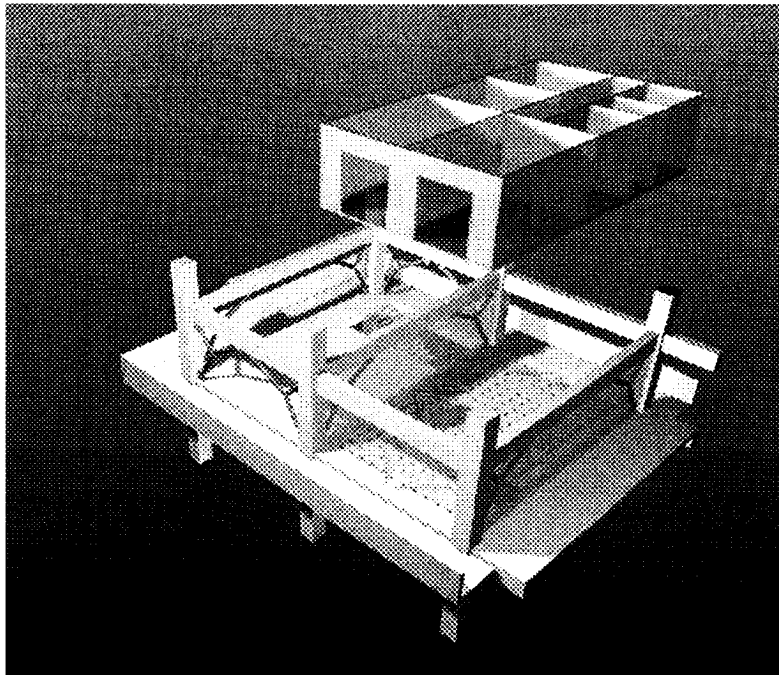


図-5.1 SI住宅イメージ