

鉄筋コンクリート造建物の免震



横浜国立大学 教授

田 才 晃

現在委員を担当している免震の構造性能評価に上程される建築物は鉄筋コンクリート構造が圧倒的に多い。コンクリートはその可塑性ゆえ、造形の自由度が高い材料である。免震構造は高い耐震性を備え、かつ自由な空間を実現するためにまことに適した技術である。1995年の阪神淡路大震災以降、免震建物は広く普及してきているが、その設計は通常の耐震設計に比べ高度な知識と設計技術を必要とする。ここでは、研究で得られた信頼性の高い成果を設計に生かす工夫があるであろう。

鉄筋コンクリート構造の設計で使用される各種の評価式の精度検証を目的として、2012~2013年度に、国土交通省建築基準整備促進事業の一環として「高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造構造部材の強度、剛性及び変形能の評価方法に関する検討」(主事業者:田才晃)が、国立大学を中心とした7研究機関により行なわれた。研究の背景は、構造解析を実施するためには部材の剛性・強度の適切な推定が必要であること、技術基準解説書の評価式は材料強度の範囲が広くない時期に提案されたものも多く、構造設計の現状を踏まえた適用範囲に関する技術的知見が必要であること、近年開発された式は技術基準解説書ではほとんど反映されておらず当該式の利用に向けた技術的知見が必要であること、などである。具体的には普通強度・高強度材料を用いた実験データベースを構築し、構造設計で常用されている既往の評価式の精度検証を行なった。データベースで対象とした部材は、梁、柱、腰壁・垂れ壁付き梁、袖壁付き柱、耐力壁、および柱梁接合部である。データは、査読により第三者が内容を確認した国内の論文集から構造実験が報告されている論文を過去40年間にわたって網羅し、収集した試験体数は全体で約3,500体となった。

構造設計において常用される評価式の精度検証結

果の詳細については、2014年度の建築学会大会における一連の発表梗概に詳述されているが、主な結果は以下のとおりである。

梁部材において、せん断ひび割れ強度式は荒川mean式、靱性指針式ともに安全側の評価を与え、終局強度式は荒川mean式、靱性指針式ともに一定の精度を有している。ただし、靱性指針式は、コンクリートが高強度化するにつれて実験値の計算値に対する比率が低下する傾向が見られた。柱部材において、せん断ひび割れ強度は荒川式、靱性指針式ともに一定の安全性を有しているが、荒川式で軸力比が、靱性指針式ではせん断スパン比が精度に影響する。曲げ性状では、弾性剛性の実験値の計算値に対する比率は梁部材、柱部材とも1.0を大きく下回ったが、曲げ終局強度は実験値を適正に評価することを確認した。ただし、柱部材の評価精度は軸力比に影響される。腰壁・垂れ壁付き梁部材は、試験体数が非常に少ない。曲げ終局強度および降伏点剛性低下率は評価式の精度が充分でない場合もある。袖壁付き柱部材では、降伏時の剛性低下率および終局変形角の評価式の精度はばらつきが大きく、後者は断面形状による差異が顕著である。終局耐力の評価精度では、現行設計で使用される技術基準式に比べ、曲げ理論式および分割累加式の精度が良好である。耐力壁部材においては、曲げ終局強度はいずれの評価式も実験の最大耐力を10%程度低く評価し、開口や柱型の影響により、評価精度が変動する。せん断終局強度はやはりいずれの評価式も実験値を低めに評価する。柱型がない壁では、壁端部の横拘束筋量が少ないことに起因して実験値が計算値を下回った。柱梁接合部については、せん断強度の評価式は概ね実験値の下限を評価しているが、T形およびL形接合部の開く方向では実験値が推定値より小さい場合が3割程度の部材に見られた。接合部せん断強度式に基

づくせん断余裕度が1以上であっても、架構が梁曲げ終局時の強度を発揮できない場合がある。

現在、免震建物の上部構造はレベル2の応答において、弾性限度内に収まるように設計されるため、終局時の強度や変形が課題となることはあまりない。そこで重要となるのは、各部材が降伏に至る過程を精度よく評価できているかどうかである。前述の評価式における精度で気なるのは、まず弾性剛性の実験値が計算値を下回る事実である。これはどのような実験においてもよく知られた現象である。なぜそのようなことが起こるのか、設計において非常に重要な弾性剛性の計算は間違っているのだろうか。一つにはコンクリートの収縮による影響が考えられるが、それよりも実験で計測される変形量が非常に小さい領域であるため試験区間以外の変形が計測値に影響を与えていることが考えられる。試験体を有限要素法解析で試験区間以外の部分まで精密にモデル化して解析した弾性剛性は実験値と適合するということも言われている。コンクリートが応力の増加に伴い、非線形性を顕す材料であることにも影響されるであろう。

腰壁・垂れ壁付き梁や袖壁付き柱などの変断面部材は、新耐震設計法施行以降、通常の耐震設計においてスリットで二次壁を絶縁し、部材の脆性的破壊を防ぎ、解析を明快にすることが行なわれる。免震構造の設計においてもスリットを設けた例をよく見かける。上部構造が降伏に至らない設計となる免震構造においては、冒頭で述べた造形の自由度とも関連して、一体的に建造できる鉄筋コンクリート構造では、必ずしもスリットを設けなくても、充分安全な設計が可能な場合も多い。前述のとおり腰壁・垂れ壁付き梁の実験例は少なく、変断面部材の降伏に至る剛性評価は必ずしも精度が充分とはいえない現状にあることに留意する必要がある。最新の研究によると、二次壁の両端にスリットを設けた梁では、せん断余裕度が1.1以上確保されていても、梁端部のスリット部から有害な斜めひび割れが卓越する場合がある。

柱梁接合部では、梁の曲げ強度に対する柱の曲げ強度の比が1.0を上回っていても、この比率が充分

大きくないと梁の強度に相当する架構の強度が発揮されず接合部で降伏が生じる現象が指摘されている。大地震時の応答が弾性限度を十分に下回る設計では深刻な問題とはならないだろうが、余裕度があるかない場合、気になるところである。

鉄筋コンクリート造部材は、曲げ降伏以前にひび割れを生じる。免震構造では大地震時においても降伏を生じさせないように設計するため、ひび割れが入ったとしても地震が去ればひび割れは殆ど閉じた状態になるであろうということ、設計で問題にされることは殆どない。しかし、大地震時にひび割れは生じるのか生じないのか、生じるとしたらどこにどの程度どのようなひび割れが生じるのかは、エンドユーザーにとっては切実な関心事であろう。性能設計的な観点があってもよいように思う。

さて、東日本大震災では免震建物に致命的となるような被害は生じず、免震技術の有効性が実証されたともいえる。ただし、やや古い時代に導入された免震構造に被害の生じた例もあった。震度5弱の揺れを観測した地域に立つ中層鉄筋コンクリート造建物の上層階に設置された重要機器を守るための床免震が損傷した。原因として、建物の固有周期と地震動の卓越周期が同程度となり、長時間応答したこと、減衰装置がなかったことなどが指摘された。建設されたのは20年ほど前であり、免震構造が今のように普及していなかった頃である。当時は主に応答加速度に着目した設計で、建物の基礎・地盤系を考慮した応答解析などは一般的ではなかった。また、継続時間の長い揺れも当時は記録などなかった。つまり、当時の技術水準では妥当な設計であったと考えられる。

ある時代の技術はその時代の技術に過ぎないと言ってしまうまでもだが、精緻化された現在の免震技術によって設計された建物が、将来の大地震によって必ず想定内の挙動で収まることを期待している。昨年の建築学会大会のパネルディスカッションにおいて、免震層が設計の想定を超えるような変形を生じて破断し、上部構造が基礎から脱落したら建物全体が倒壊するのではないかと、との意見があったことを複雑な気持ちで思い起こしている。