

## 学位論文題名

ASEISMATIC BEHAVIOR OF REINFORCED  
CONCRETE WALL-SLAB CONNECTIONS UNDER  
VERTICAL AND OUT-PLANE LATERAL LOADINGS(鉛直加力と同時に面外水平加力を受ける壁式鉄筋コンクリート造壁・  
スラブ交差部の耐震性能に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

東欧諸国等の非地震国では、プレキャストスラブを用いた壁式現場打ち鉄筋コンクリート構造が多く用いられている。この種の壁式構造は、桁行方向に耐震壁(または剛性壁とも言う)が少なく、この方向の水平抵抗は壁・スラブ交差部の面外耐力に大きく依存している。これらの国の壁式鉄筋コンクリート構造は、壁ないしは床にプレキャスト板を用いた合成部材とする事が主に5~16階程度の集合住宅建築に採用されている。集合住宅建築では、積載荷重や空間が小さいこと、規格化・量産化が求められること等の理由により壁式プレキャスト構造が最も適していると言えよう。又、住宅建築の場合、集中荷重はそれほど大きくないので、スラブには空洞スラブが広く用いられている。

日本では、壁式プレキャスト鉄筋コンクリート構造に関して、5階以下の低層建物の場合は日本建築学会による設計規準に基づいて設計される。また、6階建て以上の高層建築の場合は、一般化された設計規準はまだ設定されておらず、日本建築センターの構造評価を受けて実施設計がなされている。しかし、いずれの場合にも大きな地震力に抵抗させるために壁式構造では耐震壁の面内方向の耐力に期待して設計される。従って、耐震壁及び壁・スラブ交差部の面内加力時性能については多くの研究があるにもかかわらず、面外加力時性能については殆ど検討されていない。地震観測技術の発達にともない、これまで非地震国と考えられた地域の地震対策が無視できない場合が指摘されている。この意味に於いても、東欧諸国等の非地震国に見られるように、地震荷重を考慮せずに設計された建築物の水平加力時の破壊性状を明らかにすることは重要である。

本研究は、ハーフPCスラブと現場打ちRC壁とから構成される壁式構造を対象として、鉛直荷重と同時に面外水平力を受ける壁スラブ交差部の破壊性状の把握と耐震性能の向上について実験的及び解析的に検討したものである。

本論文の構成は8章及び付録からなり、その内容は以下に示す通りである。

第1章「序論」では、壁式RC造における耐震問題の重要性及び研究の目的を述べている。さらに、用いた記号の説明を行っている。

第2章「既往の研究」では、本研究課題の基本となる水平加力を受けた鉄筋コンクリート造柱梁接合部に関する既往の研究を概観し、破壊モード、変形性状、剪断耐力評価方法、等に影響を及ぼす要因を明らかにしている。さらに、現在施工現場で実施されている各種合成床板及び壁・スラブ交差部のディテールに関して概述した。

第3章「壁・スラブ交差部の信頼性」では、構造信頼性理論に基づいたシステムの安全性について論じている。構造物の崩壊の定義は構造物部材の強度および荷重効果を表す確率変数の差によって表される。この差を示す効率関数値は壁式構造部材抵抗の評価に影響を及ぼす

材料の強度（コンクリート及び鉄筋）ばらつきと固定及び積載荷重履歴、または、それぞれの要因の相互共分散で考え決定した。さらに、構造物の設計で考える使用期間及び社会的重要性を評価し、構造物の部材それぞれ確率的な構造安全性から全システムの安全性率を得た。

第4章「合成ポットスラブの力学的性状」では、壁・スラブ交差部の耐力評価に先立ち、本研究で対象とする、PCa板と現場打ち空洞スラブから成る合成スラブ内の境界面の付着性状を調べるために7体のハーフPCaスラブを製作して予備実験を行って検討した。試験体は、十字形内部壁スラブ試験体の片側のスラブを取り出し、支持部として壁厚と余長部を加えたもので、スラブの先端を加力した。実験変数は、境界面条件(接合筋の有無、シフ・コッターの有無)、壁及びスラブ主筋の配筋(シングル配筋、ダブル配筋)、PCaスラブ筋の交差部内定着長、加力方法(単調、繰り返し)である。その結果、全試験体においてスラブ主筋の降伏時までは試験体のPCaスラブと現場打ちスラブ間の接合条件に拘らず、構造性能に及ぼす境界面のスリップは生じず、合成スラブは一体性を維持した。また、実験結果を用いて合成ポットスラブの終局曲げ耐力算定方法を提案した。

第5章「壁・スラブ交差部の破壊状況及び耐力」では、10階程度の集合住宅建築物を想定しその中間階に相当する十字形内部壁・スラブ交差部とT形外部壁・スラブ交差部を対象とし、合計8体の試験体を用いた加力実験を行った。試験では地震時における壁スラブの応力状態を再現するために、壁軸力とスラブ鉛直力を加えると同時に壁面外に繰り返し変位増大水平加力を行った。各試験体ごとに亀裂の伸展と破壊状況には相違が現れ、破壊モードは交差部の剪断破壊またはスラブ端の曲げ破壊及びその組み合わせによって最大耐力に至った。実験結果の考察から鉄筋コンクリート造壁スラブ接合部生ずる応力は各種の影響因子、特に交差部<sup>6</sup>の寸法、コンクリート強度、壁及びスラブ主筋量、の影響を受けることを明らかにした。壁スラブ交差部剪断耐力に関して、既往の柱梁接合部の耐力式を用いて計算値と実験値の比較を行い、新たに壁・スラブ交差部に精度よく摘要できる終局剪断耐力評価式を提案した。

第6章「補修した壁・スラブ交差部の破壊状況及び耐力」では、前章で行った破壊実験後の壁・スラブ交差部試験体にエポキシ樹脂を注入して補修を行い実験により補修の評価について検討を行った。各試験体の加力条件は、補修前と後の比較検討ができるように本実験のものと同様とした。試験体は補修前と後亀裂発生状況、破壊モード及び最大耐力等について補修前と補修後の比較を行った結果初期剛性は低下するが、初亀裂耐力及び最大耐力は十分に回復できることを明らかにした。

第7章「壁・スラブ交差部の解析的検討」では、今後の展開に用いる解析モデルの妥当性について検討を行った。まず、2次元弾性問題として扱った鉄筋コンクリート造に於ける既往の解析モデルを概述した。続いて本解析では、コンクリート要素に内部積分点を持つ8節点の四角形要素を使用し、等価一軸歪みに基づく直交異方性モデルを用いて剛性評価を行った。支配的な亀裂は離散型モデルを設定し、コンクリート要素内では分布型ひび割れモデルを用いた。鉄筋はいずれもBi-Linear型応力-歪み関係を有する線材要素とし、鉄筋とコンクリートの間に付着すべりを考慮した。実験で用いた合成スラブ及び壁・スラブ交差部の二つの試験体の解析モデルとして、亀裂発生状況・鉄筋の歪み分布・コンクリートの主応力度分布等について実験結果と比較した。両試験体ともに荷重変形関係は実験値とよく対応して、解析方法の妥当性が示された。

第8章「結論」では、本論文の結論を述べることも、今後の課題について言及した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 城 攻 副 査 教 授 石 山 祐 二  
副 査 教 授 井 野 智 副 査 教 授 角 田 與 史 雄

学 位 論 文 題 名

## ASEISMATIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE WALL-SLAB CONNECTIONS UNDER VERTICAL AND OUT-PLANE LATERAL LOADINGS (鉛直加力と同時に面外水平加力を受ける壁式鉄筋コンクリート造壁・ スラブ交差部の耐震性能に関する研究)

集合住宅建築物には、居住性や施工性の面から壁式鉄筋コンクリート(以下RC)構造が用いられ、住戸を横並びに連続させた長方形平面が用いられることが多い。この平面形では桁行方向に開口部を多く用いるために、地震動を設計荷重としていない国や地域では、桁行方向には耐力壁が少なく、この方向の水平抵抗は壁、スラブおよびその交差部の面外耐力に大きく依存することになる。地震動などの水平力を設計荷重とするわが国などの壁式RC構造の耐震設計では、耐力壁の面内抵抗性能に期待しているため、面外方向の抵抗機構については殆ど検討されていない。発生頻度は少なくとも一たび地震動に襲われると耐震設計を行っていないこの種の構造形式の建築物は、壊滅的な被害が発生しているのが現状である。他方でこの種の建築物の生産性と品質向上のためにプレキャスト(以下PCa)部材が特にスラブで用いられることが多く、さらに住宅建築では集中荷重が小さいためにPCa合成ボイドスラブ(PCa底板に空洞RCスラブを現場打ちで重ねたもの)とすることがある。

本研究は、現場打ちRC壁とPCa合成ボイドスラブから構成される壁式構造を対象として、鉛直荷重と同時に面外水平力を受ける壁スラブ交差部の破壊性状の把握と耐震性能の向上について実験的及び解析的に検討したものであり、その主な成果は次の点に要約される。

PCa合成スラブに用いるPCa板と現場打ちボイドスラブとの接合条件を種々に変えた合成スラブ試験体の加力実験に基づき、界面を横断する接合筋やシヤコッターの有無などの接合条件と接合面の滑り変位との関係を明らかにすると共に、合成ボイドスラブの終局曲げ耐力算定方法を提案した。

十字形内部壁スラブ交差部およびT形外部壁スラブ交差部を対象とする実大模型試験体を用いて、中高層建物の低層部を想定した壁軸力とスラブ鉛直力を加えると同時に、地震動を想定した繰り返し面外水平力を与えた加力実験を行った。各種の影響因子を組み合わせた実験結果に基づき、壁スラブ交差部の耐震性能は、特に交差部パネル寸法、コンクリート強度、壁に加わる鉛直力、壁及びスラブ主筋量の影響を顕著に受けることを明らかにした。また、ラーメン架構の柱梁交差部における破壊性状と対比して、新たに壁スラブ交差部に精度よく適用できる終局剪断耐力評価式を提案した。

全ての壁スラブ交差部試験体は、コンクリートの破壊によるスラブ端部の曲げ圧壊または壁スラブ交差部の剪断破壊に至っている。このためコンクリートの亀裂にはエポキシ樹

脂注入を行い、コンクリートの圧壊部分はエポキシモルタル置換を行って補修した後、再加力実験を行って補修効果を確認した。この結果、水平力による初期剛性の低下は回避し難いこと、スラブの曲げおよび交差部の剪断による初亀裂耐力および最大耐力はいずれも十分に回復できること、表面に現れない鉄筋周辺に発生した内部亀裂の補修の成否が耐力回復に影響することなどを明らかにした。

PCa合成スラブ及び壁スラブ交差部を対象として、2次元非線形有限要素解析法に基づく数理モデル化を行った。この数値解析結果を実験値と対比して提案した解析法の妥当性を検証すると共に、交差部の内部応力分布と破壊機構との関係について検討した。この結果、柱梁交差部と同様に壁スラブ交差部においても、対角線上の圧縮ストラットコンクリートの圧壊によって剪断耐力に至ることを明らかにした。

構造信頼性理論を用いて、壁スラブ交差部を構成する壁・スラブ・交差部の各部材それぞれの確率的な構造安全性から壁スラブ交差部架構システムの安全性指標を導出して、システム全体の安全性について評価する方法を示した。

これを要するに、著者は、壁式鉄筋コンクリート造壁スラブ交差部の面外抵抗性状について実験的および解析的検討を行い、交差部およびその周辺の破壊機構を解明すると共に精度の高い耐力計算法の提案を行ったもので、鉄筋コンクリート造建物の耐震設計に対して有益な知見を得ており、建築構造学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。