

衝撃荷重を受ける鋼製ライナー補強コンクリート 板状部材の局部損傷に関する研究

学位論文内容の要旨

飛来物がコンクリート構造物に衝突する場合の衝撃現象は、飛来物とコンクリート構造物の相互作用に、コンクリートの圧壊、剥離、飛散などが絡み合う極めて複雑な現象である。これまでに数多くの実験が国内外で実施され、耐衝撃設計上重要となる貫通限界厚さおよび裏面剥離限界厚さを推算する評価式が提案されてきた。一方これらの衝撃実験の中には、鉄筋コンクリート板の裏面に鋼製ライナー補強した試験体も含まれており、この補強により耐衝撃性が向上することが報告されている。しかし、鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の衝撃現象は飛来物と鉄筋コンクリート板および鋼製ライナー間の複雑な相互作用となり、この複合構造物の貫通、裏面剥離などの局部損傷を論じた研究は極めて少なく、限界厚さを定量的に評価するまでには至っていない現状である。したがって、鋼製ライナー補強された鉄筋コンクリート板に対して耐衝撃設計を行おうとすると、鉄筋コンクリート板に対して提案された各限界厚さの評価式を用いて算定した必要板厚による設計を行いライナーの効果を無視せざるをえなかった。また、コンクリートの飛散や剥離、鋼板の亀裂や破断などを伴う局部損傷を解析的に表現できる手法も従来ほとんど無く、解析的に限界厚さを評価することもできなかった。

このような観点から、本研究は鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板への飛来物の高速衝突実験による貫通限界厚さおよび穿孔限界厚さの定量的評価を行うとともに、コンクリート構造物の破壊挙動を追跡できる個別要素法による解析法を提案し、衝撃実験のシミュレーション解析による局部損傷のメカニズムの把握を経て、設計上必要な鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の穿孔限界厚さを簡便に推算できる簡易評価法を提案し、耐衝撃設計法確立の一助とするものである。本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

(1) 衝撃実験による各限界厚さ評価

鋼製ライナーで補強した鉄筋コンクリート板の耐衝撃性を定量的に評価するために、コンクリート厚さおよび鋼製ライナー厚さをパラメータとして剛飛来物による衝撃実験を行い、以下の成果を得た。

- 1) 裏面を鋼製ライナー補強した鉄筋コンクリート板の局部損傷は、飛来物が完全に通り抜ける貫通、鋼製ライナーに穿孔が生じるが飛来物が貫通しない穿孔、コンクリート板の裏面剥離は起きているが鋼製ライナーによって飛散していない膨らみ、および飛来物がコンクリート板に貫入するが裏面の膨らみも生じない貫入の4種のモードに分けられる。
- 2) 鋼製ライナーを裏面に取付けることにより、鉄筋コンクリート板の裏面コンクリートの飛散を防止するとともに貫通に対しても効果がある。一方衝突面に取付けた場合には、貫通や裏面剥離防止にはほとんど効果がない。
- 3) 局部損傷の大きさを減少させるために必要なコンクリート厚さは、鋼製ライナーを取り付

けることにより減少させることができる。また同一の損傷の生じるコンクリート厚さは、取り付ける鋼製ライナー厚さに逆比例する。穿孔限界に対する鋼製ライナーの等価なコンクリート厚さは、鋼製ライナー厚さの21倍に相当する。

(2) 個別要素法による衝撃実験シミュレーション

コンクリート構造物の破壊現象を追跡する解析手法として個別要素法による方法を提案し、この手法により鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の衝撃挙動を明らかにした。

- 1) 非連続体解析法の一つである個別要素法は、コンクリート構造物の連続体としての挙動から大変形、破壊の発生、進行に至る解析が可能であり、コンクリートの持つひずみ速度効果を考慮して、鉄筋コンクリート板の衝撃実験シミュレーション解析に適用した結果、損傷の進行など実験と良い対応を示した。提案したモデル化手法、解析パラメータの設定法によって、個別要素法による衝撃現象を表現する一連の解析手法を確立できた。
- 2) 鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の衝撃実験に対して個別要素法で解析した結果、衝突時の鉄筋コンクリート板内部の圧壊、ひびわれなどの損傷の進行状況、衝撃荷重や飛来物速度の時刻歴などの各種の応答をうることができ、多面的に局部損傷を捉えることができた。ライナーの有無による解析結果を比較することによって、鋼製ライナーの耐衝撃性効果は板厚方向のひびわれ角度を大きくさせ広い範囲に損傷を分散させるとともに膜要素としての大変形状態における張力による抵抗作用が大きいことが推察できた。

(3) 簡易評価法の提案

鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の耐衝撃設計法を確立するための基礎となる局部損傷の評価法に関して、既往の局部損傷式を組み合わせる穿孔現象の生じる限界厚さを推定する方法を提案した。

- 1) コンクリート板と鋼製ライナーそれぞれの貫通を想定し、コンクリート板の貫入深さと貫通厚さの既往評価式および鋼製ライナーの貫通厚さ評価式を組み合わせた本簡易評価手法は、実験結果と良い適合性を示すことが確認できた。
- 2) 本評価法の有効性を確認するために、過去に実施されたBarrらの衝撃実験、米国電力研究所が主宰して行った衝撃実験や個別要素法による各種条件の異なる衝撃解析との比較に本評価法を適用した結果、限界厚さや限界速度が実験結果や解析結果と矛盾していないことが確認でき、本評価法の妥当性と有効性が確認できた。

以上の成果により、鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の衝撃挙動を明らかにし、耐衝撃設計のための鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の必要板厚の簡易評価法および個別要素法による詳細な検討法を確立した。

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	内山	武司
副査	教授	大沼	博志
副査	教授	野口	徹

学位論文題名

衝撃荷重を受ける鋼製ライナー補強コンクリート 板状部材の局部損傷に関する研究

近年、構造物は大型化・複雑化し、新しい構造材料や工法の使用が進められると共に、安全性と信頼性の高い設計法が要求されている。構造物の安全性に関わる外的要因の一つとして、飛来物による衝撃破壊がある。従来、コンクリート構造物は経験的に耐衝撃性に優れたものとして使用されて来たが、飛来物が構造物に対して相対的に小さい場合の衝撃現象は両者の相互作用と、コンクリートの局部的な圧壊・剥離・飛散などが絡み合う複雑な現象を伴う。鉄筋コンクリート板に関しては、実験的な研究により耐衝撃設計上重要となる貫通限界厚さおよび裏面剥離限界厚さを推算する評価法が提案されている。しかし、その裏面に鋼製ライナーで補強することにより優れた耐衝撃性能が期待される鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板に関しては、研究の実績が極めて少なく、複合構造物としてのより複雑な挙動を示すために、応力伝達および破壊機構の解明とその設計法が確立されていない。

本研究は、鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板を対象として、飛来物に対する耐衝撃設計を確立するための基礎的検討を目的としたものである。これを解決するために、1) 飛来物の高速衝撃実験による貫通限界厚さおよび穿孔限界厚さの定量的評価、2) コンクリート構造物の破壊挙動を追跡できる個別要素法による数値解析法の提案、3) 衝撃実験のシミュレーション解析による局部損傷メカニズムの把握、4) 鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の穿孔限界厚さ簡易評価法の提案 を順次行って、実用的な設計法の確立に供している。

本論文は、全5章から成り、各章の成果は以下のように纏められる。

第1章は序論であり、小物体の衝突問題と、これによるコンクリート構造物の局部損傷に関する実験的な既往の研究、ならびにコンクリート構造物の衝撃問題に関する解析的な既往の研究を詳細に調べて、本研究の目的と範囲を特定している。

第2章は、裏面を鋼製ライナーで補強した鉄筋コンクリート板（以下、鋼板補強RC板）を対象として、コンクリート板厚さおよび鋼製ライナー厚さを影響要因とする剛飛来物による衝撃実験を行ったもので、その耐衝撃性能を定量的に評価し、以下の事項を明らかにした。1) 鋼板補強RC板の局部損傷は、貫通型、穿孔型、膨らみ型、貫入型の4種に分けられる。2) 鋼製ライナーを裏面に取り付けることにより、貫通防止およびコンクリートの飛散防止に効果がある。しかし、衝突面への取り付けではその効果は極めて小さい。3) 同一の損傷を生じるコンクリート厚さは、鋼製ライナー厚さに逆比例する。

第3章は、個別要素法による衝撃実験のシミュレーションを行ったもので、コンクリート構造物の局部破壊現象を追跡する手法として個別要素法による数値解析法を提案し、鋼板補強RC板の衝撃挙動を明らかにした。即ち、1) コンクリートの歪み速度効果を考慮することにより、コンクリート構造物の連続体としての挙動から亀裂の発生、分離、破壊へと非連続体に移行する損傷過程を精度良く再現できる個別要素法の適用方法を提案した。2) 各鋼板補強RC板試験体の衝撃実験に適用し、コンクリート内部の損傷過程、衝撃荷重や飛来物速度の時刻歴応答など、局部損傷を多面的に把握した。また、鋼製ライナーの耐衝撃性効果は、コンクリートの損傷を分散させ、大変形時に膜要素としての張力による抵抗作用が支配的であることを明確にした。

第4章は、鋼板補強RC板の実用的な耐衝撃設計法を確立するために、局部損傷の簡易評価法の提案を試みたもので、既往の局部損傷式を組み合わせる穿孔現象を生じる限界厚さおよび飛来物の限界速度推定式を提示し、以下の性能を確認している。

1) コンクリート板と鋼製ライナーそれぞれの貫通を想定し、既往のコンクリート板貫通厚さ評価式および鋼製ライナー貫通厚さ評価式を組み合わせる表記した簡易評価法は、実験結果と良く適合する。2) 著者以外が行った既往の衝撃実験結果や解析結果における限界厚さや限界速度に対しても、本簡易評価法による計算結果は適合し、本評価法の妥当性と有効性を示すことが出来た。

第5章は、第1章から第4章を総括し取り纏めると共に、今後における研究の方向を示している。

これを要するに、著者は鋼製ライナー補強鉄筋コンクリート板の衝撃挙動を明らかにし、耐衝撃設計における鋼製ライナーおよび鉄筋コンクリート板の必要板厚さの簡易評価法ならびに個別要素法による詳細な検討方法を提案したもので、コンクリート構造学の発展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。