一般財団法人新潟県建設技術センター 平成 28 年度 研究助成事業報告書

加振特性を考慮した打撃応答特性に基づく接着系あと施工アンカーの性能評価手法確立に関する事業

平成 29 年 3 月

| 長岡工業高等専門学校 | 環境都市工学科 | 村上 | 祐貴 | (研究代表者) |
|------------|---------|----|-----|---------|
| 長岡工業高等専門学校 | 機械工学科 | 池田 | 富士雄 | (研究分担者) |
| 長岡工業高等専門学校 | 機械工学科 | 井山 | 徹郎 | (研究分担者) |
| 長岡工業高等専門学校 | 電子制御工学科 | 外山 | 茂浩 | (研究分担者) |

1. はじめに

土木分野において,接着系あと施工アンカーはコ ンクリート構造物の耐震補強やトンネル天井板,ジ ェットファンや道路標識等の道路付属物の設置に使 用される.2012年12月2日,中央自動車道上り線 笹子トンネルでトンネル換気のために設置されてい た天井板と隔壁板が約140mの区間にわたって落下 し,9名が死亡する大事故となった.

事故後、落下原因の究明や、同種の事故の再発防 止策について専門的見地からの検討を目的とした, 「トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委 員会」が設置された. 当該事故調査委員会では, 落 下事故の要因として,施工段階で引抜強度を発揮し ない(初期欠陥)接着系あと施工アンカーがあった こと、経年の材料劣化による引抜強度の低下等が挙 げられた.加えて、換気装置の作動による風荷重に よる引張力振幅、大型車通過時に天井板に与える振 動による繰り返し引張力振幅による疲労の影響もあ ったと考えられる. 当該事故調査委員会は, 笹子ト ンネル上り線全線を対象区間(天井板落下区間を除 く)として打音試験を実施し、打音点検は機能を損 失したボルトを把握する上では有効であるが、現有 の付着性能を把握することは困難であることを報告 している り.

2014年には「あと施工アンカーの耐久性の評価方法の確立と設計の高度化研究委員会」が発足された. あと施工アンカーの諸性能に関する既往の知見の整理がなされたが,あと施工アンカーの疲労に関する 検討事例が極めて少ないことが示唆された²⁾.このように,現状ではあと施工アンカーの付着性能評価 に資する知見は蓄積される段階にあり,実務で適用 可能な,あと施工アンカーの付着性能評価手法は確 立されていない.

本研究では接着系あと施工アンカーの付着性能評 価手法の確立を目的として,接着系あと施工アンカ ーの打撃試験および引き抜き試験を実施し,初期欠 陥や繰り返し荷重が点検時の打撃応答特性や付着強 度に及ぼす影響について検討した.さらに,打撃応 答特性を入力データとして自己組織化マップに適用 した性能評価手法について検討を行うとともに定常 的な打撃試験を可能とする打撃装置の開発を行った.

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体概要を図-1 に示す. 試験体寸法は,断面 200mm×200mm,高さ200mmの角柱供試体である.



図-1 試験体概要

表-1 示方配合

| 粗骨材の | 水セメ | 細骨 | | スラ | 単位量 (kg/m³) | | | | |
|--------------|------------|-----------|------------|------------|-------------|----------|---------|---------|-----------|
| 最大寸法 (mm) | ント比 (%) | 材率 (%) | 空気量 (%) | ンプ (cm) | 水 | セメ ント | 細骨 材 | 粗骨 材 | AE 減水剤 |
| 25 | 55.0 | 42.0 | 4.5 | 12.0 | 162 | 294 | 774 | 1077 | 2.94 |

表-2 実験パラメータ

| 荷重 種別 | 試験体 シリー ズ | 試験 体名 | 圧縮 強度 (N/mm ²) | アンカー打ち込 み完了後からの 回転時間 (秒) | 締め付け トルク (N・m) | 最大 荷重 (kN) | 最大 荷 (kN) | 破壊 形態 | 繰り返し 回数 (回) |
|--------------------|-----------------|----------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------|-----------------|----------|-------------------|
| S0 静的 S5 S10 | S0 | S0-1 | 41.5 | 0 | 0 | 72.4 | 71.1 | 破断 | - |
| | | S0-2 | 35.6 | | 0 | 71.5 | | 破断 | - |
| | | S0-3 | 46.5 | | 0 | 69.3 | | 破断 | - |
| | | S5-1 | 44.8 | 5 | 0 | 51.8 | 63.8 | 引き抜け | - |
| | S5 | S5-2 | 48.1 | | 0 | 70.8 | | 引き抜け | - |
| | | S5-3 | 44.6 | | 0 | 68.7 | | 引き抜け | - |
| | | S10-1 | 47.7 | 10 | 0 | 32.5 | 33.3 | 引き抜け | - |
| | S10 | S10-2 | 40.5 | | 0 | 43.7 | | 引き抜け | - |
| | | S10-3 | 43.9 | | 0 | 23.7 | | 引き抜け | - |
| 繰り返し | C0 | C0-1 | 42.8 | 0 | 0, 35, 70 | 73.5 | 72.2 | 破断 | 2×10 ⁶ |
| | | C0-2 | 38.9 | | 0, 35, 70 | 73.3 | | 破断 | 2×10 ⁶ |
| | | C0-3 | 40.7 | | 0, 35, 70 | 69.8 | | 破断 | 2×10 ⁶ |
| | C10 | C10-1 | 42.3 | 10 | 0 | 38.4 | 44.4 | 引き抜け | 2×10 ⁶ |
| | | C10-2 | 42.2 | | 0 | 64.0 | | 引き抜け | 2×10 ⁶ |
| | | C10-3 | 50.0 | | 0 | 30.9 | | 引き抜け | 2×10 ⁶ |

試験体隅角部には冶具と試験体を固定するボルトを 通すため、塩ビ管(vp20)を4か所に埋設した.

コンクリートの配合を表-1 に示す. セメントは 早強ポルトランドセメントを使用した. 試験体は 7 日間標準養生を行い, その後は気中養生とした.

試験体中心部を直径 19mmのドリルで深さ130mm まで削孔し、アンカー用ワイヤーブラシとエアダス ターを併用して孔内を清掃後、エポキシアクリレー ト樹脂を主剤とするカプセル式樹脂アンカーを孔内 に挿入した.その後、ハンマードリルを用いて M16 アンカーボルトに回転・打撃を加えて所定の深さま で埋め込み、固定化するまで静置した.

実験パラメータを表-2 に示す. S シリーズ試験 体は静的引き抜き試験を行う試験体であり,検討項 目はアンカーボルトの固着程度である.固着程度は, 所定の深さまでアンカーボルトを挿入した後,一定 時間さらに回転打撃を加えて過剰攪拌することで変 化させた. 過剰攪拌時間は0秒,5秒,10秒の3水 準とした.

C シリーズ試験体は、繰り返し荷重試験を行う試 験体であり、検討項目はアンカーボルトの固着程度、 アンカーボルト締結時の締め付けトルク量である. 固着程度については過剰攪拌時間を0秒,10秒の2 水準とした.締め付けトルクに関する検討は C0 シ リーズ試験体を対象とし、2.2節で詳述する.

2.2 打撃試験

打撃試験ではインパルスハンマー(周波数範囲: 0~8kHz, 測定範囲:2200N)を用いて試験体を加振 し,振動応答を加速度センサー(周波数範囲:0.3Hz ~20kHz,最大使用加速度:4900m/s²)で受信した. 計測におけるサンプリング周波数は25.6kHz,デー タ数は4096とし,5回の打撃による平均を実験デー タとして採用した.

打撃試験は、載荷試験直前に図-2の状態で実施 した.図-3に示すように、80mmの高さの位置に固 定したダブルナットの上側ナットに、両面粘着テー プ(厚さ0.4mm)を用いて、加速度センサーを密着 させた(50mm打撃試験).試験体上面から50mmの 高さの位置でアンカーボルト側部をインパルスハン マーで水平に打撃した.また、打撃位置と加速度セン サー設置位置を入れ替えて、50mmの高さの位置に 加速度センサーを設置し、試験体上面から80mmの 高さでアンカーボルトを打撃した試験も実施した (80mm打撃試験).

C0 シリーズ試験体の打撃試験では、100mm× 100mm, 厚さ 9mm の鋼製プレートを試験体端面に 設置し、デジタルトルクレンチを用いてワッシャー とナットでアンカーボルトを締結し、打撃試験を実 施した. 締め付けトルクは 0N・m、35N・m および 70N・m の 3 水準とした.

2.3 載荷試験

(1) 静的引き抜き試験

載荷試験は 200kN 疲労試験機(電気油圧式サーボ 機構)を使用し,打撃試験終了後ただちに引き抜き試 験を行った.試験体上面にはコーン上の破壊を防止 する目的で断面 200mm×200mm,厚さ 25mmの支圧 板を設置した.試験体は,図-2 に示すように,試 験体隅角部の4 か所に埋設した塩ビ管にボルト

(M16)を挿入し、試験体上面に設置した支圧板と 疲労試験機テーブル部に固定された H 鋼とを、デジ タルトルクレンチを用いてトルク量 35N・m で固定 した.また、チャック部でのボルト破断を防ぐため、 アンカーボルト先端に長さ 50mm の高ナットを取り 付けてチャックで固定した.載荷は荷重制御で行い、



試験速度は 0.1kN/sec とし、ボルト挿入から 2 日後 に静的引き抜試験を行った.

(2) 繰り返し荷重載荷試験

図-4 に繰り返し荷重載荷試験概要を示す.載荷 は、速度 6Hz の正弦波で行った.上限荷重 20kN (劣 化試験体の場合は 10kN),下限荷重 0kN とし、繰り 返し回数の上限は 200 万回とした.疲労試験機を 40 万回ごとに停止し、打撃試験を行った.試験は、ボ ルト挿入から1日後に開始した.なお、繰り返し荷 重載荷回数が上限の 200 万回に到達した時点で、試 験体が破壊に至らなかった場合は,2.2 節(1)項の方 法で静的引き抜き試験を実施した.なお,実構造物 に用いられるあと施工アンカーは,常時荷重が作用 する場合が多いが,本実験では繰り返し荷重が付着 特性に及ぼす影響について検討するため,常時荷重 は作用しない条件で試験を実施した.

3. 実験結果

3.1 静的引き抜き試験結果

表-2 に各試験体の引き抜き試験の最大荷重およ び破壊形態を示す.適切な回転打撃時間でアンカー ボルトを挿入した S0 シリーズでは,アンカーボル トは引き抜けることなく破断して破壊に至った.こ れに対し,過剰攪拌した S5,S10 シリーズ試験体で は,全試験体で引き抜け破壊を生じ,過剰攪拌時間 が長いほど最大荷重が小さくなる傾向にあった.カ プセル方式の接着系あと施工アンカーでは,過度な 回転・打撃時間が付着挙動に及ぼす影響は極めて大 きいと言える.

繰り返し荷重載荷試験では、全試験体が繰り返し 荷重載荷回数の上限の200万回までアンカーボルト は引き抜けることはなかった。繰り返し荷重載荷試 験後,静的引き抜き試験を実施した結果、C0シリー ズ試験体は全てアンカーボルトが破断しており、本 実験の載荷条件では繰り返し荷重載荷による付着性 能の低下は明確には認められなかった。

過剰攪拌した C10 シリーズ試験体では,繰り返し 荷重載荷試験後に静的引き抜き試験を実施した結果, 全試験体でアンカーボルトの引き抜け破壊が生じた. C10 シリーズ試験体の最大荷重の平均値は,S10 シ リーズ試験体の平均値に比べてむしろ 10kN 程度大 きく,本実験の範囲内では過剰攪拌により付着が劣 化した場合においても繰り返し荷重載荷による接着 性能の低下は認められなかった.

3.2 打撃試験結果

(1) 挿入時間が打撃応答特性に及ぼす影響

図-5 および図-6 に各試験体の周波数応答関数 を示す.図-5 は高さ 50mm の位置でアンカーボル トを打撃した際(50mm 打撃試験)の周波数応答関 数であり,図-6は80mmの位置を打撃した際(80mm 打撃試験)の結果である.ここで,周波数応答関数 とは,打撃のフーリエスペクトルと出力のフーリエ スペクトルの比で表され,入力打撃力のばらつきの 影響や,入力成分の影響を低減することが可能であ る.なお,各試験体シリーズの周波数応答関数は試 験体 3 体の平均である.

周波数応答関数は打撃位置によらず、ほぼ同様の



応答関数(50mm 打撃試験)

分布を示しており,400Hz,3000Hz,8000Hz付近で 卓越周波数が確認された.3次ピークに着目すると, 試験パラメータごとに差異が認められる.図-7に 一例として50mm打撃試験の3次ピーク周波数付近 の周波数応答関数を示す.アンカーボルトを過剰攪 拌した S5 および S10 シリーズの卓越周波数は,過 剰攪拌していない S0 シリーズに比べて高周波側に シフトした.

各試験体シリーズの周波数応答関数(3 体平均) の 6000Hz~9000Hz 区間における面積を 750Hz 間隔 で算出した結果を図-8 に示す. なお,各周波数帯 の面積値は 6000Hz~9000Hz 区間の面積値で正規化 した.いずれの打撃位置においても, S0 シリーズと



S5, S10 シリーズ試験体では,各周波数帯の面積の 構成割合が異なっており,過剰攪拌時間が長くなる に従い,対象領域における高周波帯の構成割合が大



応答関数(COシリーズ)

きくなる傾向にあった.

50mm 打撃試験の3次ピーク周波数と各試験体シ リーズの最大荷重の関係を図-9に示す.バラツキ はあるが,卓越周波数が高周波側にシフトするほど, 引き抜き試験の最大荷重は小さくなる傾向にある. (2) ボルト締結が打撃応答特性に及ぼす影響

あと施工アンカーは道路付属物等の被締結物と締結固定される場合が多いことから、締結時の締め付けトルクが打撃応答特性に及ぼす影響について検討を行う.図-10はC0シリーズ試験体の繰り返し荷



ク付近の周波数応答関数(CO シリーズ)

重載荷試験前の各締め付けトルクにおける周波数応 答関数を示す.締め付けトルク量が35N・mおよび 70N・mの場合,締め付けトルクを有しない場合と 比べて,卓越周波数が高周波側にシフトしたことに 加え,高周波側の成分が大きい.このように,締め 付けトルクの大きさによって,周波数応答関数の分 布は変化することから,締め付けトルク量を一定に して打音点検を行う必要があると考えられる.

(3) 繰り返し荷重が打撃応答特性に及ぼす影響

図-11 に C0 シリーズ試験体の締め付けトルク ON・mの場合における各繰り返し荷重載荷回数時の 周波数応答関数を示す.なお,周波数応答関数は試 験体3体の平均値である.全体的な周波数応答関数 の分布の傾向は,繰り返し回数によらず同様であり, 400Hz,3000Hz,7000Hz付近で卓越周波数が確認さ れた.図-12は図-11に示した周波数応答関数の3 次ピーク付近を拡大したものである.同図に示すよ うに,繰り返し荷重載荷回数の増加に従い,卓越周 波数が低周波側にシフトする傾向にある.図-13は C10シリーズ試験体の各繰り返し荷重載荷回数時の 周波数応答関数であるが,C0シリーズと同様,3次 ピーク周波数は繰り返し荷重載荷回数の増加に従い, 低周波側にシフトした.

図-14 に CO および C 10 シリーズ試験体の繰り



ク周波数(CO, C10 シリーズ)

返し荷重載荷回数ごとの3次ピーク周波数を示す. 締め付けトルクが0N・mの場合,両シリーズともに



繰り返し荷重載荷回数の増加に伴う3次ピーク周波 数の低下が確認され,過剰攪拌をしたC10シリーズ の方が顕著に低下した.

締め付けトルクを有する場合,締め付けトルクを 有しない場合に比べて,3次ピーク周波数は高くな るが,締め付けトルクを有しない場合とは異なり, 繰り返し荷重載荷回数の増加に伴う3次ピーク周波 数の低下は認められなかった.

3.3 周波数応答関数を入力データとして自己組織 化マップに適用した付着性能評価

(1) 自己組織化マップ

自己組織化マップ(SOM)とは,Kohonenによって提 案されたニューラルネットワークアルゴリズムの1種 で,多次元データ間の類似性を2次元的に可視化するこ とが可能である.

(2) パラメータの設定

SOM の作成には Viscovery SOMine 7.0 を使用し, ノード数 2000, テンション(近傍半径)0.5, クラス タ数は12, クラスタ手法は凝集性のあるクラスタを 算出する SOM-Ward に設定した.入力データには打 撃試験により生じる周波数特性のばらつきを考慮し, 図-15 に示す面積(以下,周波数応答面積と称する) を用いた.SOM に用いる入力データには,表-2に 示す試験体の打撃試験結果を用い,Sシリーズと C シリーズは別々に解析を行った.0~9.9kHzの範囲 から,0.1kHz 間隔毎に周波数応答面積を算出した, 計 99 次元の周波数応答面積データを用いた.

(3) 解析結果

図-16 に S シリーズ試験体のクラスタマップ,図 -17 に C シリーズ試験体のクラスタマップを示す. マップにおいて,各打撃点データは六角型のノード に配置されており,類似した特性を有するノードの 大まかなまとまりが,クラスタとして色分けされて いる.各クラスタマップ上のラベルの数値は試験情 報を示しており,図-16 に示す S シリーズの場合は 過剰攪拌時間(秒),試験体 No,打撃位置(cm)を 順に表す.図-17 に示す C シリーズのラベルは,過



(a) 50mm 打撃試験



(b) 80mm 打撃試験 図ー16 クラスタマップ(S シリーズ)



(a)50mm 打撃試験



(b) 80mm 打撃試験 図ー17 クラスタマップ(C シリーズ)

剰攪拌時間(秒), 試験体 No, 打撃位置(cm), 打撃 試験時までの繰り返し回数を順に表す.

まず,Sシリーズにおいて,50mm 打撃試験の場 合,S0 試験体とその他の試験体でクラスタが分かれ ており過剰攪拌による初期欠陥を適切に評価できた. 一方,80mm 打撃試験の場合では,過剰攪拌時間が 10秒の試験体2体はS0試験体と異なるクラスタ(赤 色)に配置されたが,S0試験体が多く配置されたク ラスタ(水色)にS5シリーズ試験体やS10シリー ズ試験体も配置されており,適切な分類がなされて いるとは言えない.打撃位置によって,クラスタリ ング結果が異なる主たる要因は現在検討中であるが, データ数が少ないことは要因の一つであると考えら れ,今後同様の実験を積み重ね,データの拡充を図 る予定である.

次にCシリーズについては、いずれの打撃位置の 場合においても、クラスタマップに特徴は見られな い.これは、引き抜き試験結果からも分かるように 本実験条件では繰り返しによる疲労が認められなく、 繰り返し載荷による周波数応答関数の変化も僅かで あったことが要因であると考えられる.今後は繰り 返し載荷する荷重を増加して実験を行う予定である.

数値解析による疲労したあと施工アンカーの振 動特性の評価

本章では前章までで述べた,あと施工アンカーの 疲労による劣化の解析的な評価の可否について検討 した.構造物の疲労による振動特性の変化をあらか じめ把握しデータベース化しておくことで,打撃試 験で得られた試験結果より,逆解析的にあと施工ア ンカーの劣化度合を判断できる.しかしながら,構 造物の疲労による振動特性の変化は通常の解析的手 法では表現することが難しい,そこで,本章では市 販の有限要素法ソフトウェア(ANSYS15.0)を用い て,境界条件およびモデル形状を変化させることで, 疲労によるアンカー接着部の劣化ならびに打撃試験 時の周波数応答特性の変化を,解析的に表現できる かどうか試みた.解析は前述した打撃試験と同様の 条件とするため,時刻歴応答構造解析による解析を おこなった.

4.1 解析モデル

図-18 に解析モデルの概要図を示す.あと施工ア ンカーの解析モデルは本来であれば図 18(a)のよう にコンクリート基盤,アンカー,接着剤から構成さ れるが,事前に解析をおこなった結果,コンクリー ト基盤の有無によるアンカーの振動特性の変化がみ られなかったため,本解析においては図 18(b)のよ



表-3 解析に用いた材料物性値

| | エポキシ | ステンレス鋼 | 構造用鋼 |
|------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| | (接着剤) | (ナット) | (アンカー) |
| 密度 [kg/m³] | 1100 | 7750 | 7850 |
| ヤング率 [Pa] | 2.42 × 10 ⁹ | 1.93 × 10 ¹¹ | 2 × 10 ¹¹ |
| ポアソン比 | 0.35 | 0.31 | 0.3 |



図-19 減衰係数の同定(時刻歴応答波形の比較)

うにアンカーと接着剤のみをモデル化した. 解析用 のアンカーは直径 14.5mm,長さ 250mm,コンクリ ート表面からの埋設深さが 130mm,材料は構造用鋼 と定義した.前述した打撃試験と同様の条件とする ため,アンカーにステンレス製の六角ナットを2つ 取り付けた.接着剤はエポキシ系接着剤とし,内径 14.5mm,外形 19.0mmの円筒形状でモデル化し,コ ンクリートとの接触面(円筒側面)を完全拘束した.

表-3 に使用したモデルの各物性値を示す.打撃 はコンクリート表面から 80mm の高さに相当する位 置に衝撃荷重として作用させ,2つのナットの合わ せ面における打撃方向の並進加速度を評価した.そ の際の荷重波形は予備実験により振幅が2200Nのイ ンパルス波とした.解析は打撃荷重発生時を0sと して,時間ステップ1.0×10⁻⁵ sで0.02 sまで計算 した.

4.2 解析結果

(1) 減衰率の同定

本解析では打撃荷重による振動の減衰特性をレイ



リー減衰にて定義する.そこで,減衰係数 α (質量 係数)と β (剛体係数)について,前述した実験結 果を再現できるような係数の同定を行った.具体的 には α を 1~10, β を 10⁻³~3×10⁻⁸ の間でそれぞれ変 化させて計算を行い,得られた時刻歴応答特性の対 数減衰率が実験値と最も良くなる条件を検討した.

その結果, α =7.0 β = 3.0×10⁸ とした条件が実験結 果を最もよく再現できていた. 図-19 に減衰係数を 同定した条件での解析結果と打撃試験時の時刻歴応 答波形の比較結果を示す. この際の対数減衰率の誤 差は実験値(δ =1.254) に対して 1%以内であった.

(2) 繰返し載荷試験による周波数特性の変化の解 析的表現

次に前述した載荷試験によってみられた接着部の 疲労による周波数応答特性の変化と同様の結果とな りえる解析条件を検討した.載荷試験における繰り 返し載荷回数の増加に伴い,卓越周波数が低周波数 側に移動したことから,接着部の劣化による剛性の 低下や,保持部の剥離が生じていると推察し,これ らを解析上で定義することで,実験と同様の傾向が 得られると考えた.具体的には接着部の剛性の低下 は材料特性(ヤング率)の変更,剥離による保持長 の変化は接着剤モデル形状の変更で模擬できると考



越周波数の変化の割合

え,それぞれを解析パラメータとした場合について 計算し,実験結果との比較をおこなった.

図-20 に接着部であるエポキシ樹脂のヤング率 を 2.4GPa (健全状態) ~1.2GPa (劣化状態) まで変 化させたときの,周波数応答特性の変化を示す.図 -20 より加速度振幅の値はヤング率の低下にとも ない低下する一方で,卓越周波数の値に顕著な変化 は見られなかった.また,健全状態に比べて一定割 合以上,接着部の剛性を低下させることは,非現実 的な解析結果につながることから,接着部の強度を 低下させることは適切でないと判断できる.

次に, 接着部の保持長を変化させた場合の周波数 応答について検討した.ここでは, 図-21に示すよ うにアンカーの接着部の保持長さを130mm(埋設部 は全て接着)~110mm(埋設部はアンカー下端から 110mmまで接着)まで5mmずつ変化させたときの周 波数応答特性の変化について調べた.図-22に接着 部の保持長を変更した場合の周波数応答特性の比較 結果を示す.図-22より接着部の保持長が短くなる につれて,卓越周波数が低周波数側に移動しており, 数 mm のわずかな変化で数十 Hz の変化が確認でき ることから,実構造物の物性値や形状を大きく変更 することなく疲労による周波数応答特性を表現する ことが可能であると判断した.

図-23 に前述した 80mm 打撃試験と解析におけ る健全時の卓越周波数を 100%としたとき,実験で の載荷回数の増加もしくは,解析での接着長の長さ の変化による卓越周波数の変化を比較した結果を示 す.図-23より,実験,解析それぞれの卓越周波数 の変化を直線近似することで,卓越周波数の変化は 実験結果と解析結果を一致させることができ,あと 施工アンカーに生じた載荷回数,すなわち疲労によ る劣化度合の推定が可能になるといえる.

5. あと施工アンカーを対象とする打撃装置の開発

本章では, 接着系あと施工アンカーの付着性能を 自動かつ容易に評価することのできる打撃装置の開 発を行う.

5.1 要求性能の検討

まず現有の実構造物に対して,接着系あと施工ア ンカーの付着性能を評価する際に

・評価に一貫性があるか

・評価が容易に行えるか

の2点が特に重要と考えられる.点検者がインパル スハンマーを用いて打音点検を行う場合,上記2点 の要求を十分満たせないことが予測される.そこで 評価に一貫性を持たせ,かつ容易に実施できる,打 撃装置の開発を目標とした.要求性能としては,以 下の項目を重視した設計・製作を行った.

・瞬間的に大きな打撃力を与えられること

・短時間で繰り返し打撃を与えられること

・打撃力および繰り返し周期を可変できること そこで、動力機構にはソレノイドを採用した.ソレ ノイドは比較的シンプルな構造を持ち、高速な往復 直線運動が容易に実現できるためである.

5.2 ソレノイド打撃装置(アクチュエータ性能の 検討)

ソレノイドは、電磁力により小型で高速な直線運動 を発生できるアクチュエータである.そこでまず、 ソレノイドの基本特性を把握し、要求に適う性能の 検証を行うため、床面への打撃装置を製作した.図 -24 に、製作した装置の 3DCAD 図面を示す.本装 置に使用した DC ソレノイドは、電流を流すことで コイルに磁界を発生させ、磁界の吸引力により可動 鉄心 (プランジャー)を高速で往復運動させるもの である.本装置は、電源装置から流れる電流をマイ コンと FET を用いて制御することにより、「接触時 間」と「打撃力」を変化できるよう以下の特徴を有 する.



図-24 ソレノイド打撃装置



図-25 打撃装置の 3D-CAD 図面



図-26 打撃装置の本体写真

・電流の流れる時間を制御することで打撃の際の試
験体との接触時間を制御できる

・印加する電圧の制御により打撃力を制御できる

電流の印加時間と電圧量の2つのパラメータを調 整することで,打撃試験に必要な打撃時間と打撃力 を検討することとした.

5.3 アンカーボルト用打撃装置

ソレノイドの基本特性を把握した後,アンカーボ ルト用の打撃装置を設計・製作した.図-25 に設計 した 3D-CAD 図面を示す.ボルト固定部でアンカー ボルトを固定し,ボルトの横から前述のソレノイド 打撃装置により打撃させる.またソレノイドと対面 する部分に打撃の振動を計測する加速度センサーを 取り付けることとする.本装置の設計方針を以下に 示す.

アンカーボルトの打撃位置を調整できるようにソレノイドの高さを可変とすること

・打撃力が調整できること

前者はリニアブッシュを用いた直動機構と手動で固 定可能なセットカラーを用いて実現し、後者は前述 の通り FET とマイコンを用いた通電時間調整回路 により実現させることとした.この設計指針に基づ き製作した打撃装置の本体写真を図-26 に、本装置 と制御回路部の写真を図-27 に示す.

5.4 アンカーボルト打撃実験

5.3 節に示したアンカーボルト用打撃装置を用い, あと施工アンカーを模した試験体に対して打撃を行 う. アンカーボルトにダブルナットでナットを取り 付け、ナットの高さに合わせてソレノイド打撃機構 で一方から打撃し、その反対側に取り付けた加速度 センサーによってナット部分の振動応答を測定した. 測定データは FFT 解析により,加速度振幅の周波数 応答関数を求めた. 図-28に打撃装置(2回分)と インパルスハンマーを用いて打撃した場合の比較を 示す.図より300Hz付近のピーク周波数がほぼ一致 した結果が得られている.これより振動の一次モー ドはインパルスハンマーと同等の打撃力特性を持た せることができたと考えられる. 一方で 300Hz~ 2500Hz の周波数帯域においてインパルスハンマー と異なる加速度振幅が得られた.本特性が性能評価 にとって有益となるのかどうかも含めて,装置の改 良および今後の検討が必要と考えられる.

6. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す. (1)アンカーボルト打ち込み完了後からの過剰攪 拌の時間の増加に伴い,引き抜き試験時の最大荷 重は小さくなった.また,打撃試験時の周波数応 答関数の卓越周波数は高周波側に移行した.

(2)締結時の締め付けトルクの大きさによって周 波数応答関数の分布は変化し,締め付けトルクな しの場合(0N・m)と比べて卓越周波数が高周波側 に移行する傾向にあった.



図-27 本装置と制御回路部



図-28 打撃力加速度の周波数応答の比較

- (3)本実験の範囲内では、アンカーボルトの繰り返し 荷重(疲労)による付着性能の劣化は認められな かったが、繰り返し荷重載荷回数の増加に伴い、 周波数応答関数が低周波側にわずかに移行した。
- (4)あと施工アンカーの疲労による打撃試験時の周 波数応答特性の変化を、アンカーに用いる接着剤 の接着長を短縮することで表現できた.打撃試験 で得られたあと施工アンカーの振動特性と、数値 解析結果を組み合わせることで、より高精度な劣 化度合の判定が行えると期待できる.
- (5)接着系あと施工アンカーの付着性能を自動かつ 容易に評価することを目的として,ソレノイドを 用いたシンプルな打撃機構を開発した.現時点で 以下の結果を得た.
- ・打撃力と接触時間をある一定範囲で変化できる.
- ・打撃位置,測定位置を上下に変化できる.
- ・実験の結果,振動の一次モードはインパルスハン マーと同等の打撃力特性を持たせることができた.

参考文献

- 1) 国土交通省:トンネル天井板の落下事故に関す る調査・検討委員会報告書,2013
- 2) 日本コンクリート工学会:あと施工アンカーの 耐久性評価と設計方法の高度化研究委員会報告 書,2016