

論文 コンクリートの強度推定へのリープ式硬度計の適用性について

初 航*1・西脇 智哉*2・Maisha MALIHA*3・湯浅 昇*4

要旨：リープ式硬度計は金属材料の硬度試験に一般的に用いられている非破壊試験機である。コンクリートの強度推定に一般的に使用されるリバウンドハンマーと比べ、軽量小型で操作方法も平易である。また、打撃エネルギーが小さく測定対象への影響が極めて小さいなどの長所があるため、若材齢などの低強度コンクリートの強度推定に適すると考えられる。ここでは、バングラデシュとスリランカの既存建築物および試験体などに対してリープ式硬度計と反発速度比式のリバウンドハンマーを用いて強度推定を行った。その結果、リープ式硬度計は平滑な測定面に対しては、コンクリートの強度推定に使用できることが確認された。

キーワード：リープ式硬度計, リバウンドハンマー, 測定面の平滑さ, 低強度コンクリート, 強度推定

1. はじめに

反発速度比式リバウンドハンマーと似た原理に基づくリープ式硬度計（リバウンド式硬度計などとも呼ばれる）は、金属の硬度試験に広く用いられており、ASTM規格¹⁾が既に整備されている。リープ式硬度計は、コンクリートの非破壊検査に一般的に用いられているリバウンドハンマーより小さくて軽く、狭い測定対象に対しても硬度試験が可能である。また、使用方法も既存のリバウンドハンマーと類似しており簡便である。リープ式硬度計の打撃エネルギーは、幾つかのタイプによって分かれるが、11.5 Nmm~88 Nmmと極めて小さい（通常のN型リバウンドハンマーでは2.2 Nm）ため、低強度の試験対象でも破壊する恐れがない。これらを背景に、近年は国内外でリープ式硬度計のコンクリートへの適用が検討されはじめている^{2)~5)}ものの、実構造物コンクリートの強度推定に関する適用性は十分とは言い難い。上述のASTM規格についても、金属表面の硬度測定方法に関する記述のみで、金属以外の材料への適用性については整備されていない。

ここでは、リープ式硬度計のコンクリートへの適用性を検討するとともに、特に打撃エネルギーの小ささを利用して低強度コンクリートの強度推定、もしくはスクリーニングの可能性を検討する。日本ではJISや建築基準法によって建築物に使用されるコンクリートの品質が担保されるが、途上国なども含めて十分な品質管理が行われない、低強度・低品質なコンクリートが使用されている場合もある。既存建築物のコンクリート強度を知るためには、コア採取して強度試験をすればよいが、国や地域によっては網羅的な調査が必要となる場合もあり、詳細な調査は時間や経費などの点で現実的とはならない。

したがって、より簡便な非破壊試験によって、特に低強度・低品質なコンクリートをスクリーニングすることは、調査の効率化に大きな効果が期待される。

本研究ではリープ式硬度計と反発速度比式リバウンドハンマーとの比較を通じ、低強度な場合を含めたコンクリートの強度推定に対してリープ式硬度計の適用可能性について検討を行う。

2. 試験機について

コンクリートの圧縮強度を推定する簡便な非破壊試験として、リバウンドハンマーを用いた反発度（ハンマーヘッドの反発時の高さ）が国内外で広く用いられている。日本ではJIS A 1155によってコンクリートの反発度の測定方法が規格化されている。従来のリバウンドハンマーは重力や摩擦などの影響のため、測定結果を打撃角度により補正の必要があるが、反発の高さではなく、反発速度比（ハンマーの打撃前後の速度比）より圧縮強度を推定する反発速度比式リバウンドハンマーは、打撃角度による補正が不要、測定可能な強度域が広いなどの長所を持つ。ここで用いるリープ式硬度計は、これと同様の反発速度比を計測するもので、打撃角度の影響は受けるものの、上述のように小型軽量で打撃エネルギーが小さく、汎用のN型リバウンドハンマーに見られるような低強度の測定対象にした場合の強度低下^{6) 7)}のおそれが小さいものと考えられる。本研究が対象としたバングラデシュの既存建築物には、圧縮強度が10 MPa以下の低強度コンクリートが散見されるとの報告⁸⁾もあり、このような低強度のコンクリートの強度を推定したい場合打撃エネルギーの小さいリープ式硬度計が特に期待される。

*1 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻（学生会員）

*2 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻 准教授・博士(工学)（正会員）

*3 東北大学 大学院工学研究科都市・建築学専攻（学生会員）

*4 日本大学 生産工学部 教授・博士(工学)（正会員）

2.1 リーブ式硬度計

図-1に示すリーブ式硬度計⁹⁾は1975年、Proceq社に所属していたLeeb氏とBrandestini氏によって開発された⁹⁾。リーブ式硬度計には磁石を内蔵したインパクトデバイスが内蔵されている。インパクトデバイスの先端には極めて硬い炭化タングステン製かシリコン窒化物あるいはダイヤモンド製の球体インテンダーが設置されている。硬度試験の際には、インパクトボディがバネによって測定面に発射され、所定の速度で測定面を打撃して跳ね返る。この際に生じる測定面の変形のため、インパクトデバイスの運動エネルギーにはロスが生じる。インパクトデバイスが硬度計に付けられるコイルを通過する際に誘導電圧が生じ、これによって打撃前後インパクトデバイスの速度比を求め、リーブ硬度 HL を以下の式(1)によって算出する。

$$HL = 1000 \cdot \sqrt{\frac{E_{reflected}}{E_{forward}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1/2MV_r^2}{1/2MV_0^2}} = 1000 \cdot \frac{V_r}{V_0} \quad (1)$$

ここで、 HL ：リーブ硬度 (-)、 $E_{forward}$ ：打撃前のインパクトボディの運動エネルギー (j)、 $E_{reflected}$ ：打撃後のインパクトボディの運動エネルギー (j)、 M ：インパクトボディの質量 (kg)、 V_0 ：打撃前のインパクトボディの速度 (m/s)、 V_r ：打撃後のインパクトボディの速度 (m/s) である。

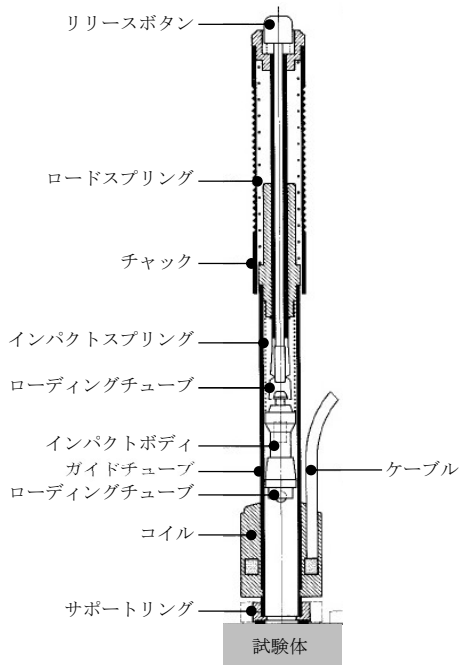







図-1 リーブ式硬度計構造図¹⁾

リーブ式硬度計はインパクトデバイスの違いでいくつかの種類に分けられる。ここで用いたのはインテンダーの直径が3 mm、打撃エネルギーが11.5 NmmのD型と、インテンダーの直径が5 mm、打撃エネルギーが88.8 NmmのG型である。リーブ式硬度計の打撃エネルギー

が小さいため、測定面の表面粗さに厳しい制限が設定されており、ASTMA956¹⁰⁾によるとD型には平均表面粗さが1.6 μm以下、G型には平均表面粗さが6.3 μm以下の測定面を用意すべきと記載されている。ここでは、同タイプで製造会社、打撃部とデータ表示部などの機器構成（分離式・一体式）が異なる3台のD型測定機と、2台のG型測定機を用いた。使用したそれぞれのリーブ式硬度計の写真を表-1に示す。

表-1 使用したリーブ式硬度計

| | D 型 | G 型 |
|-----|--|---|
| 分離式 | D1  | G1  |
| | D0  | G2  |
| 一体式 | D2  | |

2.2 反発速度比式リバウンドハンマー

ここでは、参照試験機として、反発速度比式リバウンドハンマーについても取り上げる。図-2に示すように、反発速度比式リバウンドハンマーは光センサ、インパクトボディとケースによって構成されている¹⁰⁾。測定時は、重錘がバネに押し付けられ、コンクリート表面を打撃して跳ね返る。コンクリート測定面の弾塑性変形によって、打撃前後の重錘の運動エネルギーに差が生じる。光センサは打撃時と跳ね返り時の重錘の速度を測定する。以下の式(2)により反発速度比 Q 値を求める。

$$Q = 100 \cdot \frac{e_{reflected}}{e_{forward}} = 100 \cdot \frac{1/2mv_r^2}{1/2mv_0^2} = 100 \cdot \frac{v_r}{v_0} \quad (2)$$

ここで、 Q ：反発速度比 (-)、 $e_{forward}$ ：打撃前の重錘の運動エネルギー (J)、 $e_{reflected}$ ：打撃後の重錘の運動エネルギー (J)、 m ：重錘の質量 (kg)、 v_0 ：打撃前のインパクトボディの速度 (m/s)、 v_r ：打撃後インパクトボディの速度 (m/s) である。

ここでは、低強度コンクリートを対象とするため、最も一般的に使用されているN型ではなく、打撃エネルギーが0.735 Nmと比較的小さいL型を用いた。また、プランジャーにはマッシュルームヘッドを使用し、低強度の測定対象への影響を極力抑えた。この反発速度比式リバウンドハンマーは、式(1)(2)の比較からもわかるように、リーブ式硬度計と同様の測定メカニズムを採用している。

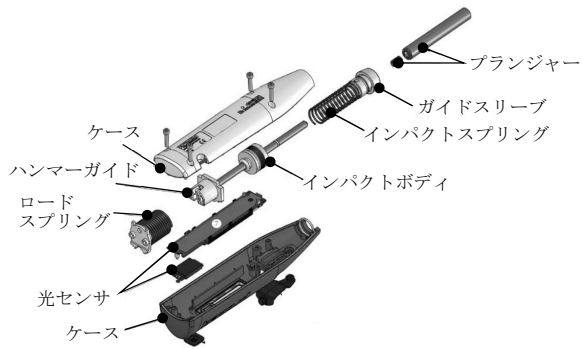


図-2 反発速度比式リバウンドハンマー構造図¹⁰⁾

3. 測定対象と試験方法

本研究では日本で製作した試験体に加え、バングラデシュとスリランカの既存建築物及び試験体に対してL型リバウンドハンマーとD型およびG型リープ式硬度計を用いた測定を行った。試験対象表面を平滑に処理した上で、リバウンドハンマー及びリープ式硬度計を用いて測定を行った。リバウンドハンマーの場合はJIS A 1155及びJSGE G 504に倣って、互いの測定点の距離が30mm以上離れた位置で30回測定した。リープ式硬度計はASTM A 956に倣って、互いの測定点が3mm以上離れるように50点を測定した。粗骨材はコンクリート中ランダムに存在するものであるため、測定回数を多く取ると試験結果はペーストが粗骨材に偏ることはないと考えられる。また、測定箇所から採取したコンクリートコアからJIS A 1107に準拠して圧縮強度を求めた。本論文での圧縮強度はコアの高さと直径の比によって補正したものである。表-2に測定対象を示す。

3.1 バングラデシュの既存建築物および試験体

バングラデシュでは1971年の独立戦争以降、十数年間に亘る政治的混乱期があり、この時期に建設された建築物にはコンクリートは品質管理が十分にされていないものが多いとの指摘がある。更に、ミャンマー・ネパール・インドなどのバングラデシュの周辺諸国には大規模地震が発生しており、バングラデシュも地震リスクは大きく、既存建築物に対する調査が喫緊の課題である。また、バングラデシュの場合、レンガを砕いたチップを粗骨材に広く使われており、やや特殊なコンクリートである。本研究ではバングラデシュの砕石骨材、レンガチップ骨材を使用した既存建築物、および、現地大学で製作した試験体に対して、反発速度比式L型リバウンドハンマーとD型リープ式硬度計(D0)を用いてQ値およびHL値を測定した。この際、既存建築物には仕上モルタルを用いられていたため、これを剥がした後、砥石で表面をできるだけ磨いた後に行った。

3.2 スリランカの既存建築物と試験体

バングラデシュと同様に南アジアに位置するスリラ

ンカでも、同様の測定を行った。現地での一般的な練混ぜ方法は、現場にミキサーを設置して、セメント・砂・砂利を1:2:4の見かけの容積比(同程度のサイズのバケツなどにより計量)として量り取り、必要な流動性が得られるまで水を加える方法である。このため、水セメント比は必ずしも管理されていない。ここでは、2004年12月のスマトラ沖地震で津波被害を受け、そのまま2018年12月まで放置されていたRC造低層住宅建築物を対象として調査を行った。モルタル仕上げが施されている場合には、測定面の仕上材を剥がし、電動グラインダーを用いて表面を研磨して試験面とした。この研磨処理により、総じてバングラデシュでの測定対象表面より平滑な面が得ることができた。また、試験体については、上述の通常の作製方法で得たものに加え、特に低品質のコンクリートを模擬するために、セメント量を減らし通常は使用しない土などを混入させて作製した。スリランカの測定対象に対しては複数台のD型、G型リープ式硬度計を用いて試験した。

3.3 日本で製作した試験体

日本で製作した試験体は日本で製作した試験体はバングラデシュの状況を模擬し、レンガチップ骨材を用いた低強度コンクリートと、現地での練混ぜ方法を模擬し、見かけの体積比で調合を決定した低強度コンクリートを用いた。試験体は非破壊検査用の35×55×30cmの試験体と圧縮試験用のφ100×200mmのシリンダー試験体の2種類であった。非破壊検査用試験体は枕木で床に浮かした状態で行った。

表-2 測定対象一覧

| | 対象番号 | 試験体・実構造物 | 材齢 | 骨材 | 表面状態 |
|---------|----------|----------|-----|-----|-------|
| スリランカ | LK-T-S-1 | 試験体 | 16日 | 砕石 | 平滑 |
| | LK-T-S-2 | 試験体 | 18日 | 砕石 | 平滑 |
| | LK-M-S-1 | 実構造物 | 長期 | 砕石 | 比較的平滑 |
| | LK-M-S-2 | 実構造物 | 長期 | 砕石 | 比較的平滑 |
| | LK-M-S-3 | 実構造物 | 長期 | 砕石 | 比較的平滑 |
| バングラデシュ | LK-M-S-4 | 実構造物 | 長期 | 砕石 | 比較的平滑 |
| | BD-T-B-1 | 試験体 | 38日 | レンガ | 比較的粗い |
| | BD-M-S-1 | 実構造物 | 長期 | レンガ | 比較的粗い |
| | BD-M-S-2 | 実構造物 | 長期 | 砕石 | 比較的平滑 |
| | BD-M-B-1 | 実構造物 | 長期 | 砕石 | 粗い |
| | BD-M-B-2 | 実構造物 | 長期 | レンガ | 粗い |
| 日本 | BD-M-B-3 | 実構造物 | 長期 | 砕石 | 粗い |
| | JP-T-B-1 | 試験体 | 28日 | レンガ | 平滑 |
| | JP-T-B-2 | 試験体 | 28日 | レンガ | 平滑 |
| | JP-T-S-1 | 試験体 | 42日 | 砕石 | 平滑 |
| | JP-T-S-2 | 試験体 | 44日 | 砕石 | 平滑 |

4. 試験結果

表-3 に、測定対象ごとの各試験機によるリーブ硬度 HL もしくは反発速度比 Q 、試験結果の有効率と変動係数 CV 及び採取したコアにより得た圧縮強度を示す。ここでの HL および Q の測定結果は、JISA 1155 および JSCE G 504 に規定されたリバウンドハンマーのデータの扱い方に倣い全データの平均値から 20%以上離れた値を除外した後の平均値である。全データの平均値より 20%以内の値を有効値とする。有効値の数と全試験結果数の比率を有効率とする。 Q および HL とも、式(1)(2)にあるように反発前後の速度比により求められる値であるが、式中の平方根の有無に加え、リバウンドハンマーとリーブ式硬度計では打撃エネルギーとインパクトデバイスのサイズが大きく異なるため、ここでは HL と Q の直接的な値の比較は行わない。なお、測定対象は「国」-「試験体 (T) もしくは既存建築物 (M)」-「使用粗骨材 (S :

砕石もしくは B : レンガチップ) として分類している。測定結果には使用粗骨材の種類による相違は確認されなかった。表-3 からは、試験対象の表面が平滑な試験体の場合、D 型、G 型リーブ式硬度計から得られた測定結果の変動係数は一つの例外 (LK-T-S-2) を除き概ね 0.2 以下であった。これは、粗い測定面での試験結果で得られた 0.46 までの変動係数と比べて小さく、測定面の平滑さがリーブ式硬度計の測定精度に影響を及ぼすことが確認できた。この一方で、測定対象の表面が粗い現地の既存建築物の場合には、L 型リバウンドハンマーを用いての測定結果の変動係数がリーブ式硬度計の測定結果から得られる変動係数よりも小さい。すなわち、ここで行った既存建築物など粗い表面での適用を想定する場合には、リーブ式硬度計よりも L 型リバウンドハンマーを用いる方が適当と考えられる。図-3~5 に、いくつかの測定対象から得られた D 型、G 型リーブ式硬度計および L 型リ

表-3 試験結果のまとめ

| | 測定対象 | 圧縮強度 [MPa] | D0 | | | D1 | | | D2 | | |
|---------|----------|---------------|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|
| | | | HL | 変動係数 | 有効率 | HL | 変動係数 | 有効率 | HL | 変動係数 | 有効率 |
| スリランカ | LK-T-S-1 | 2.6 | 169 | 0.21 | 92% | 121 | 0.19 | 82% | 127 | 0.15 | 90% |
| | LK-T-S-2 | 17.9 | 267 | 0.18 | 76% | 265 | 0.17 | 84% | 253 | 0.31 | 74% |
| | LK-M-S-1 | 20.8 | 411 | 0.22 | 64% | 416 | 0.33 | 42% | 345 | 0.46 | 34% |
| | LK-M-S-2 | 11.7 | 299 | 0.32 | 50% | 310 | 0.41 | 42% | 291 | 0.41 | 50% |
| | LK-M-S-3 | 15.7 | 386 | 0.26 | 58% | 384 | 0.25 | 62% | 406 | 0.22 | 62% |
| | LK-M-S-4 | 22.7 | 372 | 0.21 | 74% | 353 | 0.28 | 58% | 364 | 0.26 | 62% |
| バングラデシュ | BD-T-B-1 | 15.2 | 371 | 0.22 | 66% | - | - | - | - | - | - |
| | BD-M-S-1 | 32.5 | 355 | 0.26 | 66% | - | - | - | - | - | - |
| | BD-M-S-2 | 10.8 | 347 | 0.2 | 54% | - | - | - | - | - | - |
| | BD-M-B-1 | 21.7 | 338 | 0.3 | 56% | - | - | - | - | - | - |
| | BD-M-B-2 | 8.9 | 132 | 0.27 | 54% | - | - | - | - | - | - |
| | BD-M-B-3 | 22.9 | 438 | 0.23 | 54% | - | - | - | - | - | - |
| 日本 | JP-T-B-1 | 7 | 199 | 0.13 | 54% | - | - | - | - | - | - |
| | JP-T-B-2 | 15 | 338 | 0.15 | 54% | - | - | - | - | - | - |
| | JP-T-S-1 | 2 | - | - | 54% | 213 | 0.18 | 88% | 191 | 0.17 | 86% |
| | JP-T-S-2 | 4.9 | - | - | 54% | 316 | 0.11 | 94% | 324 | 0.1 | 98% |

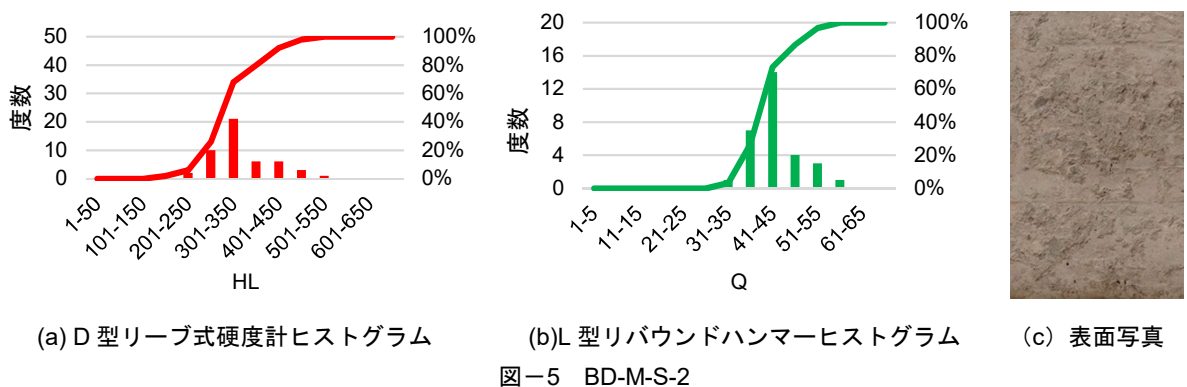
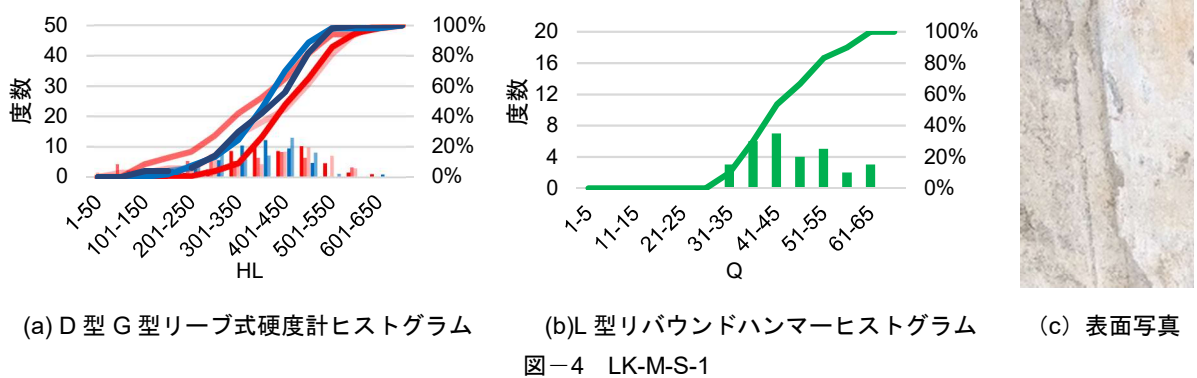
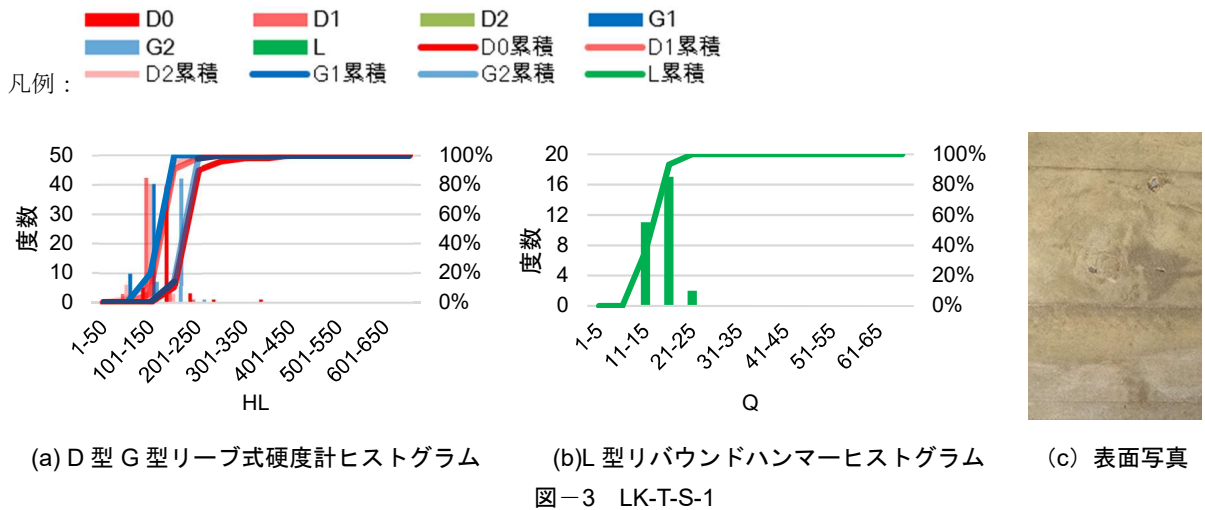
表-3 試験結果のまとめ (続)

| | 測定対象 | 圧縮強度 [MPa] | G1 | | | G2 | | | L | | |
|---------|----------|---------------|-----|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|
| | | | HL | 変動係数 | 有効率 | HL | 変動係数 | 有効率 | Q | 変動係数 | 有効率 |
| スリランカ | LK-T-S-1 | 2.6 | 110 | 0.12 | 88% | 170 | 0.11 | 94% | 16.3 | 0.19 | 83% |
| | LK-T-S-2 | 17.9 | 227 | 0.13 | 92% | 243 | 0.16 | 74% | 43.8 | 0.10 | 87% |
| | LK-M-S-1 | 20.8 | 357 | 0.26 | 56% | 397 | 0.28 | 54% | 47.5 | 0.19 | 67% |
| | LK-M-S-2 | 11.7 | 256 | 0.27 | 60% | 286 | 0.19 | 72% | 36.4 | 0.19 | 67% |
| | LK-M-S-3 | 15.7 | 347 | 0.20 | 72% | 365 | 0.20 | 62% | 52 | 0.13 | 90% |
| | LK-M-S-4 | 22.7 | 330 | 0.27 | 66% | 367 | 0.17 | 88% | 36.2 | 0.14 | 73% |
| バングラデシュ | BD-T-B-1 | 15.2 | - | - | - | - | - | - | 41.5 | 0.09 | 97% |
| | BD-M-S-1 | 32.5 | - | - | - | - | - | - | 39.8 | 0.17 | 88% |
| | BD-M-S-2 | 10.8 | - | - | - | - | - | - | 42.8 | 0.12 | 97% |
| | BD-M-B-1 | 21.7 | - | - | - | - | - | - | 46.2 | 0.17 | 75% |
| | BD-M-B-2 | 8.9 | - | - | - | - | - | - | 20.8 | 0.32 | 35% |
| | BD-M-B-3 | 22.9 | - | - | - | - | - | - | 50.5 | 0.15 | 48% |
| 日本 | JP-T-B-1 | 7 | - | - | - | - | - | - | 23 | 0.12 | 97% |
| | JP-T-B-2 | 15 | - | - | - | - | - | - | 42.5 | 0.12 | 100% |
| | JP-T-S-1 | 2 | 194 | 0.18 | 78% | 208 | 0.13 | 90% | 20.4 | 0.17 | 77% |
| | JP-T-S-2 | 4.9 | 280 | 0.1 | 94% | 265 | 0.09 | 98% | 50 | 0.07 | 81% |

バウンドハンマーの測定値のヒストグラムと、測定箇所
のコンクリート表面の写真を示す。図-3 に示されるよ
うに、平滑の測定面が取れた試験体 (LK-T-S-1) は、リ
ープ式硬度計の測定値は安定しており、狭い範囲に集中
している。一方、図-4, 5 に示されるように、既存建築
物 (LK-M-S-1, BD-M-S-2) のコンクリート表面は試験体
と比べてやや粗く、測定値は比較的に広い範囲に分散し
ている。そのため、極めて平滑な試験面は期待できない
現地調査にリープ式硬度計を適用する場合には、適切な
HL 値を得るために打撃回数をできるだけ多くとる必要
があると考えられる。また、図-3, 4 に示されるように、
同型のリープ式硬度計では、変動係数は概ね同等の値を
示す一方で、平均値は必ずしも一致しない場合が確認さ

れた。これは、個々の試験機の個体差の範囲と考えられ
るが、標準試料などを用いた校正が重要なものと考えら
れる。ここでは、特にリープ式硬度計の測定結果には比
較的大きなバラつきが生じることを想定し、L 型リバウ
ンドハンマーよりも多い 50 回の打撃回数により測定し
ているが、実用上も約 5000 回の打撃ごとの校正が必須
とされているため、適切な頻度の校正作業の重要性が指
摘できる。

表-3 に示した試験結果から、圧縮強度と HL との関
係を図-6, 7 にそれぞれ示す。図に示されるように、HL
と圧縮強度はおおむね正の線形関係となることが確認さ
れた。測定対象に着目すると、試験面の粗い実構造物よ
りも、平滑な型枠面を試験面とした試験体での決定係数



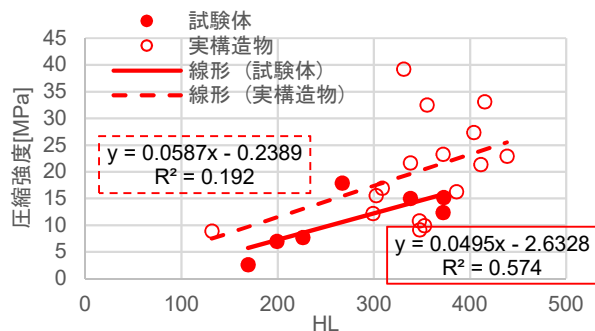


図-6 D型リープ式硬度計による HL と圧縮強度の関係

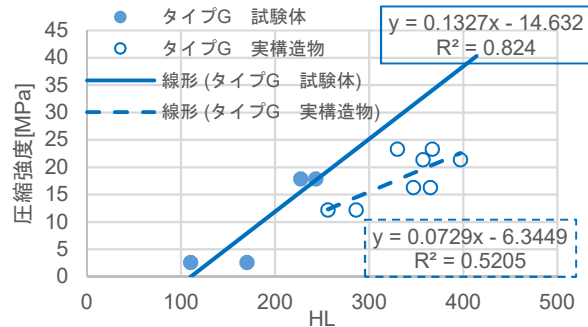


図-7 G型リープ式硬度計による HL と圧縮強度の関係

が大きく、測定面の粗さが圧縮強度の推定に大きく影響することが確認された。これらのことから、リープ式硬度計をコンクリートに適用するに当たり、特に平滑な表面が得にくいと考えられる実構造物の現地調査においては、適切な前処理によりできる限り平滑な測定面を得ることが重要と思われる。この一方で、前処理に過大な労力が必要となる場合には、非破壊検査の簡便性が失われることに注意が必要である。

5. まとめ

本研究では試験体と既存建築物に対してリープ式硬度計とリバウンドハンマーを用いて試験を行った結果、以下の知見が得られた。

コンクリートのリープ硬度と圧縮強度との関係は、正の相関にあることが実験的に確認された。本検討の範囲では、圧縮強度とリープ硬度は正の線形相関がみられた。実験室で作製した試験体のような平滑面においては粗面より試験結果の変動係数が大きく、また、試験結果の有効率も高くなることが確認できた。一方、既存建築物など粗い測定面に適用する場合、適切な HL 値を得るためには前処理などにより測定面を十分な平滑面として仕上げしてから打撃回数を多く取る必要があると考えられる。ただし、測定面の平滑さを得るための前処理に過大な労力が必要となる場合には、非破壊検査の簡便性が失われることに注意が必要である。

同型のリープ式硬度計では、測定結果の変動係数は概ね同等の程度にあるが、平均値は必ずしも一致しなかった。また、異なる粗骨材を用いたことによる、測定結果への影響は確認されなかった。

謝辞

本研究は、SATREPS-TSUIB プロジェクト（研究代表者：中埜良昭・東京大学教授）、および、科研費挑戦的研究（萌芽）（課題番号：17K18915、代表：西脇智哉）の一部として実施されたものである。また、スリランカの現

地調査においては、Pushpalal, Dinil・東北大学教授に多大な支援をいただいた。論文執筆には、五十嵐豪・東北大学助教から貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) ASTM international, ASTM A 956 Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products, 2017
- 2) 野中英, 湯浅昇, 三谷和裕, 金森誠治: エコーチップを用いたコンクリートの圧縮強度推定試験方法の提案, 日本建築学会技術報告集, Vol.23 No.54, pp.397-402, 2017.6
- 3) 重松岳史, 豊福俊泰, 亀井頼隆: エコーチップ硬さ試験による構造物中のコンクリートの品質兼検査方法に関する研究, 土木学会西部支部研究発表会, pp.A-572-573, 2002.3
- 4) Szilagyi, K., Borosnyoi, A., Zsigovics, I.: Understanding the rebound surface hardness of concrete, Journal of Civil Engineering and Management, Vol.21 No.2, pp.185-192, 2015
- 5) Kovler, K., Wang, F.-Z., Muravin, B.: Testing of concrete by rebound method: Leeb versus Schmidt hammers, Materials and Structures Vol.51, 138, 2018
- 6) Aydin A, Basu A: The Schmidt hammer in rock material characterization, Eng. Geol., Vol.81, pp.1-14, 2005
- 7) Leshchinsky, A.: Non-destructive methods instead of specimens and cores, quality control of concrete structures, Proceedings of the International Symposium, pp. 377-386, 1991
- 8) 金子史夫: SATREPS TSUIB プロジェクト内資料, 2016
- 9) Leeb, D.: Dynamic hardness testing of metallic materials, NDT Int., Vol.12, pp.274-278, 1979
- 10) Proceq, S. A., Silver Schmidt Operating Instructions, 2007