

報告 バングラデシュを対象とした非破壊検査を用いた低強度コンクリートのスクリーニング調査事例

初 航*1・西脇 智哉*2・湯浅 昇*3・野中 英*4

要旨： 発展途上国をはじめとした多くの地域には規制類や設計基準強度を満たさない、低強度のコンクリートを用いた建築物が存在している。本調査が対象とするバングラデシュでは、10 MPa 以下など圧縮強度が極めて低いコンクリートが散見されるが、膨大な既存建築物のコンクリート強度を把握するためには、簡易な方法で速やかに低強度コンクリートをスクリーニングすることが有効と考えられる。ここでは、バングラデシュを想定した材料・調合による模擬試験体と、現地調査において各種非破壊検査を適用した。その結果、測定結果は測定表面の平滑さに大きな影響を受けることが確認された。

キーワード： 非破壊検査, スクリーニング, 反発度, 反発速度比, 表面の平滑さ, 圧縮強度

1. はじめに

コンクリートは原料の入手が比較的容易であり、練混ぜという単純なプロセスによって、極めて経済的に製造可能であることから世界各国で大量に使用されている。それぞれの国や地域にはコンクリートを適切に用いるための規・基準類や法律などが整備されているが、特に発展途上国においては品質管理が十分ではないなど、基準を満たさないコンクリートが用いられる場合もある。

本研究が対象とするバングラデシュでは、建築基準法 (BNBC) が 1993 年に制定されたが、それ以前に建設された建築物も大量に存在している。特に、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コンクリートの圧縮強度は、図-1 に示すように 10 MPa を下回るものも散見される。更に、近年はバングラデシュ国内では大規模な地震災害が発生していないものの、ミャンマー・ネパール・インドなど周辺諸国で大規模地震が発生しており、地震リスクが大きいといわざるを得ず、喫緊の対応が必要となる。しかし、膨大な既存 RC 建築物に対して、日本国内で実施される

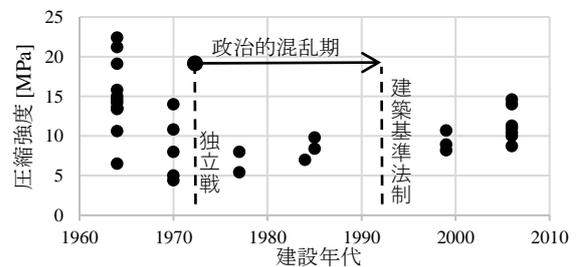


図-1 年代別の既存 RC 構造物の圧縮強度

ような詳細な耐震診断を網羅的に行うことは現実的ではない。このことを背景として、本研究では簡易に実施可能な非破壊検査 (以下、NDT) により、特に強度の低いコンクリートを現地においてスクリーニングが可能な手法の開発を目的に、国内で作製した模擬試験体を用いての検討と、バングラデシュ現地での調査を実施した。

2. NDT

ここでは、バングラデシュを想定した模擬試験体およびバングラデシュでの現地調査において、特に低強度コ

表-1 各種 NDT の特徴

	名称	簡易性	破壊の程度	現地での判定	時間	低強度への適応	検査箇所の制限	強度推定の正確性
コア採取法	JIS による φ100mm 以上のコア	×	×	×	△	○	△	○
	小径コア法 (φ25mm など)	×	×	×	△	○	△	○
表面硬度法	引っかき試験	○	△	○	○	要検証	△	要検証
	リバウンドハンマー (反発硬度法)	○	○	○	○	要検証	○	要検証
音響法	超音波法	×	◎	○	○	要検証	○	要検証
	衝撃弾性波法	△	◎	○	○	要検証	○	要検証
貫入抵抗法	ウィンザーピンテスト	○	△	○	○	要検証	△	要検証

*1 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学 工学研究科 准教授・博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 生産工学部 教授・博士(工学) (正会員)

*4 (株)熊谷組技術研究所 課長・博士(工学) (正会員)

ンクリートのスクリーニングすることを目的とする NDT を実施する。そのため、操作の簡易性や、その場で結果を得ることが必要条件となる。また、バングラデシュでは碎石資源が潤沢ではなく、レンガを砕いてチップとしたものも粗骨材としたものが一般的に使用されている。このように、通常用いられる NDT とは使用材料や強度範囲が異なる場合であっても、コンクリート強度のスクリーニングが可能な NDT 手法を選択する必要がある。ここでは、表-1 にまとめた主な NDT 手法の特徴を考慮して、ここでは反発度法（各種リバウンドハンマー）と引っかけ試験を採用した。

2.1 反発硬度法（リバウンドハンマー等）

ここでは、極めて弱いコンクリートを対象とするため、低強度コンクリートに適用可能として市販されている反発速度比を計測するリバウンドハンマー（図-1(a)、Proceq 社製・シルバーシュミット L 型。以下、L 型ハンマー）を採用し、さらに先端部のアタッチメントとしてマッシュルームヘッドを使用した。これは、L 型ハンマーの打撃エネルギーが 0.735 Nm と、通常用いられるリバウンドハンマー（Proceq 社製・シュミットハンマー N 型など）の打撃エネルギーである 2.207 Nm の約 1/3 であり、検査対象を破壊する恐れが小さい。

また、打撃エネルギーが 0.833 Nm と小さく、低強度コンクリート用として市販されている振子式リバウンドハンマー（図-1(b)、Proceq 社製・シュミットハンマー P 型。以下、P 型ハンマー）も、主に現地調査に使用した。加えて、金属の硬度測定用として規格化されている超小型のリバウンドハンマー（図-1(c)、Proceq 社製・エコーチップ硬さ試験器。以下、エコーチップ）²⁾ を使用した。これは、計測機がコンパクトで携帯性が良く、打撃エネルギーが 11.5 Nmm と極めて小さいため測定対象を破損する恐れがない。測定する際には、測定対象の端部から 5 mm 以上、隣接する測定点が 3 mm 以上離れていれば測定可能であり、試験体の寸法及び形状の制限を受けにくいなどのメリットがある²⁾。



(a) L 型ハンマー (b) P 型ハンマー (c) エコーチップ
図-1 各種リバウンドハンマー

2.2 引っかけ試験

引っかけ試験は、コンクリート表層の硬さを確認するための試験方法として日本建築仕上げ学会により標準化されている。これは、図-2(a)に示す鋼製のピンを内蔵

した試験機によりコンクリート表面を引っかけて、図-2(b)に示すような引っかけ傷跡を得て、この引っかけ傷幅の最大値を読み取ってコンクリートの表面硬さを確認するものである。この方法は、強度推定としても検討されており³⁾、ここでの簡易な NDT 手法の一つとして採用した。



(a) 引っかけ試験器 (b) 引っかけ傷跡

図-2 引っかけ試験

3. レンガ骨材コンクリート模擬試験

3.1 実験概要

(1) 使用材料及び調査

上述のように、バングラデシュでは碎石が容易に入手できないため、レンガを砕いて得るレンガチップを粗骨材として用いることが多い。また、この用途のための専用レンガが製造されている。既報⁴⁾では国産の普通強度レンガを砕いたチップを粗骨材として用いた検討を行ったが、ここではより現地の状況に近いと考えられる、焼成温度の低い低強度レンガを砕き、レンガチップ（BC、密度 2.20 g/cm³）として粗骨材に用いた。これは、通常の碎石骨材と比べて吸水率が 13%と極めて大きく、骨材自体の圧縮強度も通常の碎石骨材では 100 MPa 以上と十分大きいのに対し 23 MPa と小さい。その他の使用材料は、結合材として普通ポルトランドセメント（C、密度 3.16 g/cm³）、混和材として石灰石微粉末（LSP、密度 2.71 g/cm³）、細骨材には陸砂（S1、密度 2.61 g/cm³）と砕砂（S2、密度 2.65 g/cm³）を混合して用いた。調査表を表-2 に示す。低強度コンクリートとするために、水セメント比を大きく取り、材料分離を抑制するために LSP をセメントの代替として用いた。

表-2 BC 骨材を用いた模擬試験体の調査表

シリーズ (W/C)	単位体積重量(kg/cm ³)					
	W	C	LSP	S1	S2	BC
2.1	354	169	68	292	292	662
2.0	235	118	160	358	358	807
1.5	225	150	150	365	365	825
1.0	210	210	110	365	365	825
0.6	210	350	0	365	365	825

(2) 模擬試験体

試験体には、圧縮強度試験用に φ100×200 mm シリン

ダーと、各種 NDT 用に 150×150×600 mm の角柱試験体を用いた。練混ぜは螺旋アーム式二軸強制練りミキサーより行った。打設後は硬化が確認できた段階で脱型し、その後の養生方法は室温 20℃での湿空養生とした。

(3) NDT 及び圧縮試験

材齢 7, 28, 56 日において L 型ハンマー、引っかき試験及び圧縮試験を行った。L 型ハンマーによる測定は、JIS A 1155 に倣い実施した。すなわち、試験体端面から 50 mm 以上離れ、互いの打撃点の距離が 30 mm 以上離れる位置で 9 点以上計測し、平均値から ±20% 以上となる値は除外した 9 点での平均値を反発速度比 Q として得た。引っかき試験は、L 型ハンマーの試験面と同じ面で行った。また、試験面は材齢ごとに打設面を除く型枠面をそれぞれ対象として実施した。

加えて、P 型ハンマーとエコーチップによる試験もシリーズ 2.1, 1.0, 0.6 (それぞれ材齢 56, 26, 28 日) を対象に実施した。P 型ハンマーの打撃は 30×30mm のグリッドを基本として 12 点以上で行った。エコーチップはそれぞれの打撃点が 3mm 以上離れるように 99 点以上で測定した。これらの結果は 4 章で述べる。

引っかき試験は、引っかき傷を明瞭に確認できるように、予め試験対象面を着色してから実施した。引っかき試験器を試験対象面に押し当て、一定の速度で移動させて傷をつける。ここで得られた 1.0 kgf のピンによる傷幅の最大値を読み取って代表値とした。ただし、骨材が剥がれるなどして得られた外れ値は除外した。

3.2 実験結果

(1) L 型ハンマー

図-3 に、L 型ハンマーによる反発速度比 Q と、圧縮試験により得られた圧縮強度の関係を示す。ここには、今回得られたデータだけでなく、既報⁴⁾の砕石骨材・再生骨材・軽量骨材および普通レンガチップ骨材を用いた場合の結果も併せて示している。既報のデータでは、普通レンガ骨材も含めて骨材種類に拠らず一つの回帰式で表すことができていたが、ここで用いた低強度 BC 骨材を用いたコンクリートでは、同じ反発速度比に対して圧縮強度が小さくなる傾向が見られる。また、いずれの結果も、図中に示す L 型ハンマー製造会社が提示している回帰曲線とは一致していない。すなわち、特にバングラデシュを想定した低強度 BC 骨材を用いる場合には、独自の回帰式を用いる必要があるものと考えられる。また、スクリーニング対象を 10 MPa と設定した場合、既報では反発速度比 Q が 25 以下のものが該当するが、BC 骨材では 30 以下が該当するものと考えられる。

通常、コンクリートに圧縮応力が生じる場合には、強度の弱い骨材とマトリックスの界面でひび割れが生じるが、BC 骨材を用いたコンクリートの圧縮試験では、ひび

割れが BC 骨材を貫通して生じている場合が確認された。リバウンドハンマーの影響範囲は、コンクリート表面から約 20~30 mm と考えると、BC 骨材の存在が反発速度比と圧縮強度の関係に影響を与えたものと考えられる。

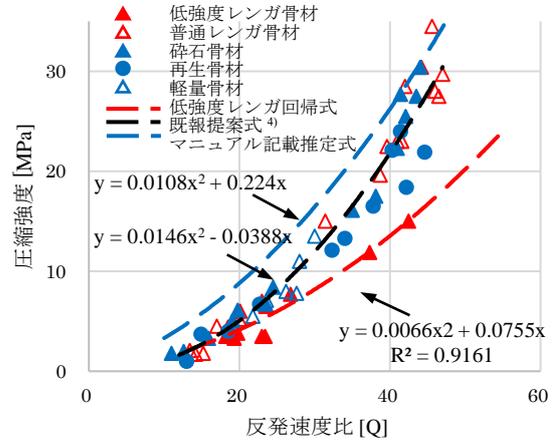


図-3 反発速度比 Q と圧縮強度の関係

(2) 引っかき試験

図-4 に、引っかき傷幅と圧縮強度の関係を示す。この図に示されるように、引っかき試験においては低強度 BC 骨材を用いた場合においても、既報データ⁴⁾と同様の傾向が確認できる。すなわち、引っかき試験においては骨材種類に関わらず、引っかき傷幅と圧縮強度には相関関係があることが確認できる。スクリーニング対象となる 10 MPa 以下の領域に着目した場合、図中に赤枠で示す、引っかき傷幅が 0.7 mm 以上がその範囲となると考えられる。また、この範囲においては、図中の既往研究⁴⁾による提案式により、引っかき傷幅から圧縮強度が推定可能と考えられる。このように、引っかき試験の場合は骨材種類が引っかき傷幅と圧縮強度の関係に影響を及ぼさないのは、リバウンドハンマーとは異なり、基本的に表面のマトリックス部分にのみ影響するためと考えられる。

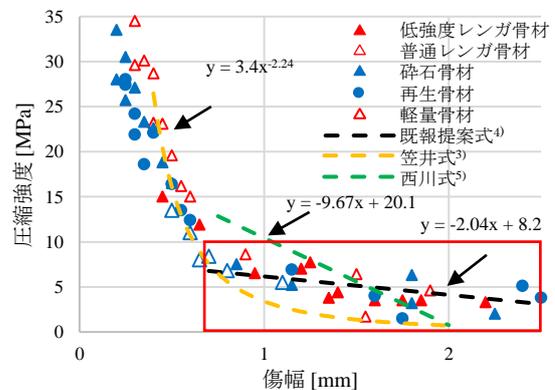


図-4 引っかき傷幅と圧縮強度の関係

表-3 バングラデシュ現地調査対象

測定対象	住宅建築研究所 (HBRI)		バングラデシュ気象庁 (BMD)		バングラデシュ工科大学 構造実験供試体(BUET)
建造年	1973～1978		1981～1989		2017
計測場所	構造躯体	非構造部材	構造躯体	非構造部材	試験体
試験対象写真					
表面写真					
骨材種類	レンガ	レンガ	碎石	レンガ	レンガ
設計基準強度	24 MPa	不明	24 MPa	不明	10 MPa
説明	階段室柱。仕上材剥離後の表面は粗く、粗骨材の露出や空隙が多く見られる。	屋上の増築用柱。仕上材剥離後の表面は荒く、粗骨材の露出と空隙が見られる。	事務室柱、階段室耐震壁。仕上材剥離後の表面はやや粗いが、粗大な空隙は見られない。	屋上の増築用柱。仕上材剥離後の表面は、HBRI 屋上柱よりも更に粗い。	構造試験用試験体。表面は基本的に滑らかだが、部分的に粗骨材の露出や空隙が見られる。

4. バングラデシュ現地調査

ここでは、表-3 に示すようにダッカに現存している1970年代から1980年代建設された建築物に使用されたコンクリート、および、バングラデシュ工科大学 (BUET) にて作製されたレンガ骨材を用いた試験体に対して NDT を実施した。このことにより、模擬試験より得られたデータの有効性を検証する。現地調査では、前述の L 型ハンマー、引っかき試験に加えて、P 型ハンマーとエコーチップを用いた。

4.1 実験概要

上記の建築物の RC 部材は、BUET を除きいずれも仕上げ材 (モルタル塗) が施されていた。NDT に先立ってこれを剥がし、その表面を砥石で可能な限り滑らかにした上で測定を行った。また、各種 NDT を行った同じ部分から、圧縮試験用コア試験体を採取した。

4.2 試験結果

試験結果を表-4 に纏めて示す。また、L 型ハンマーにより測定した反発速度比 Q とコアコンクリートの圧縮強度の関係を図-5 に示す。この図のように、バングラデシュ現地のコンクリートでは、碎石骨材を使用している BMD を含めて反発速度比と圧縮強度の関係は、模擬試験体における BC 骨材を用いた場合の関係式に近い。

引っかき試験における引っかき傷幅 W (図-6)、エコーチップにより測定した表面硬度 L (図-7)、および、

P 型ハンマーの反発度 R (図-8) と、コアコンクリートから得られた圧縮強度の関係をそれぞれ示す。

引っかき試験の結果は、黒い点線で示す既報及び今回の検討で用いた模擬試験体から得られた回帰式と大きく異なる傾向を見せており、極めてばらつきが大きい。これは、引っかき試験が表面の状態に大きく左右されるためであると考えられる。表-3 に示すようにコンクリート表面が粗く、粗骨材や空隙などが見られる。エコーチップについても、赤の破線で示されるここでの現地調査データの回帰式は、黒の破線で示される既往研究²⁾による回帰式と異なる傾向となり、同じ測定値に対して圧縮強度が低い傾向が見られる。このことも、エコーチップが本来表面が非常に平滑な金属材料を測定するためのものであり、極表層のみを測定対象としているため、表面が荒さが大きく影響したものと考えられる。P 型ハンマーについても、測定値と圧縮強度に一定の関係が見られるものの、ばらつきは大きい。

また、ここで得られた圧縮強度は、スクリーニング対象となる 10 MPa を下回る場合が十分に得られなかったため、今後も引き続き現地調査を続けてデータを得る必要がある。

4.3 コンクリート表面の平滑さの影響

バングラデシュ現地調査の対象となった RC 建築物では、コンクリート表面が必ずしも平滑とは言えない。こ

れは、現地では建築に用いられるほぼすべてのコンクリートがモルタル仕上げによって覆われるために、型枠およびコンクリート表面の精度が求められていないことが一因と考えられる。また、仕上材を撤去する際にコンクリート表面のマトリックスと一緒に剥がれてしまい、粗骨材が露出するケースも散見された。表-3 に示すように、今回はモルタル仕上げを剥がした上で、コンクリート下地を砥石で簡易に研磨した状態で NDT を実施したが、十分に平滑な表面を得ることは困難であった。引っかき試験はコンクリートの表面硬度、そしてリバウンドハンマーは表面の反発度よりコンクリートの反発度か反発速度比によってコンクリートの圧縮強度を推定するため、基本的には滑らかな面が望ましい。今回の調査では試験対象の表面平滑さの定量的な測定は実施しなかったが、目視の範囲では、表-3 に示すように HBRI の表面が最も粗く、順に BMD, BUET, 模擬試験体となっている。各試験対象の強度が異なるため、変動係数で離散の程度を比較する。図-9 に、エコーチップ（破線）、および、L 型ハンマー（実線）の測定回数ごと変動係数を表す。また、表-5 に各測定対象に対して各種リバウンドハンマーの測定結果から得られた変動係数をまとめて示す。図-9 より、表面の荒さがエコーチップの精度に大きく影響することが分かる。すなわち、測定面が最も平滑であった模擬試験体での変動係数が最も小さく、現地調査の結果は表面状態が粗いものほど、ばらつきが大きくなる傾向が確認された。この一方で、L 型ハンマーの場合は、模擬試験体とバングラデシュ現地の試験対象の変動係数は、比較的小さな差となっている。今回の対象であるバングラデシュをはじめとした途上国での既存建築物に対する NDT の適用を考える場合、平滑なコンクリート表面を得ることが難しい場合も想定されるため、十分な下地処理を必要としない、L 型ハンマーの方が適する場面が多いものと考えられる。

表-4 バングラデシュ現地調査試験結果

試験対象	骨材	圧縮強度 [MPa]	表面硬度 L	反発度 R	反発速度比 Q	傷幅 W [mm]
BMD C2-D04	砕石	9.92	352.40	55.10	39.80	0.85
BMD C2-D07	砕石	15.59	302.40	56.60	39.90	0.65
BMD C2-D14	砕石	10.84	347.10	63.00	42.80	0.75
BMD wall	砕石	9.18	347.60	57.40	39.90	0.70
BMD rooftop	レンガ	8.90	131.50	38.30	20.80	—
BUET bottom	レンガ	12.37	371.90	67.60	43.30	0.85
BUET top	レンガ	15.20	372.40	72.50	41.50	0.55
HBRI rooftop1	レンガ	22.96	438.40	72.50	50.50	0.85
HBRI rooftop2	レンガ	33.14	415.00	67.60	38.30	1.00
HBRI stairs1	レンガ	21.67	338.00	65.30	46.20	0.80
HBRI stairs2	レンガ	16.96	308.50	45.10	40.50	1.10

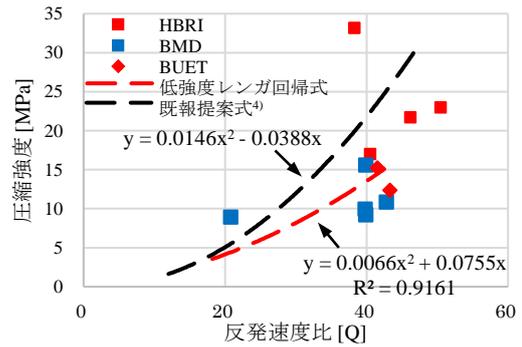


図-5 現地調査での反発速度比と圧縮強度の関係

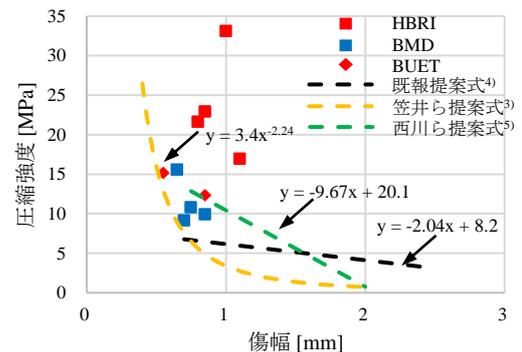


図-6 現地調査での引っかき傷幅と圧縮強度の関係

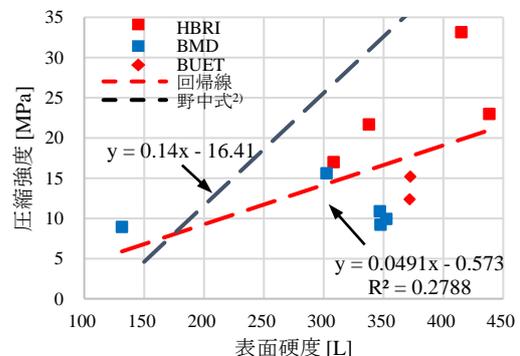


図-7 現地調査での表面硬度と圧縮強度の関係

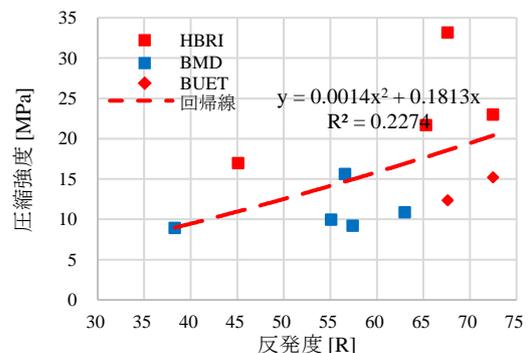


図-8 現地調査でのP型ハンマー反発度と圧縮強度関係

表-5 各種リバウンドハンマーの測定回数毎の変動係数

試験対象	エコーチップ					L型ハンマー			P型ハンマー			表面状態
	9回	18回	27回	49回	99回	9回	18回	27回	9回	18回	27回	
BMD C2-D04	0.38	0.31	0.26	0.26	0.25	0.11	0.10	0.09	0.09	0.14	0.13	やや粗い
BMD C2-D07	0.21	0.52	0.44	0.29	0.36	0.10	0.11	0.11	0.14	0.20	0.20	やや粗い
BMD C2-D14	0.21	0.23	0.20	0.20	0.20	0.16	0.12	0.11	0.13	0.12	0.11	やや粗い
BMD wall	0.14	0.22	0.28	0.21	0.22	0.08	0.14	0.15	0.14	0.17	0.16	やや粗い
BUET bottom	0.15	0.14	0.17	0.20	0.22	0.03	0.04	—	0.09	0.08	0.08	平滑
BUET top	0.27	0.22	0.20	0.22	0.20	0.09	0.09	0.09	0.06	0.12	—	やや粗い
HBRI rooftop1	0.22	0.24	0.24	0.23	0.23	0.15	0.14	—	0.19	0.15	—	粗い
HBRI rooftop2	0.22	0.22	0.24	0.24	0.26	0.14	0.13	—	0.09	0.13	—	粗い
HBRI stairs1	0.35	0.32	0.28	0.27	0.26	0.17	0.14	0.13	—	—	—	非常に粗い
HBRI stairs2	0.43	0.39	0.30	0.30	0.32	0.17	0.18	0.17	—	—	—	非常に粗い
0.6-28d	0.06	0.11	0.11	0.11	0.12	0.08	0.08	—	0.10	0.12	0.11	平滑
1.0-28d	0.07	0.07	0.09	0.10	0.10	0.14	0.11	—	0.13	0.10	0.12	平滑
2.1-56d	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.06	0.07	—	0.09	0.08	0.10	平滑

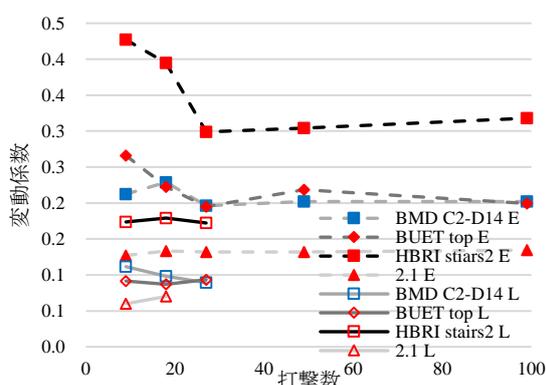


図-9 リバウンドハンマーの測定回数と変動係数

5.まとめ

模擬試験と現地調査を通して、各種 NDT による低強度コンクリートのスクリーニングについて検討を行った。得られた知見を以下に示す。

L 型ハンマーに関して、模擬試験体の範囲では、粗骨材などの使用材料と調合の違いによらず、低強度領域を含めて一定の反発速度比と圧縮強度の関係が得られた。一方で、BC 骨材を用いた場合には異なる関係を示した。また、既存建築物への適用に当たっては、比較的粗い表面であっても適用可能であった。

引っかき試験に関して、模擬試験体の範囲では、使用材料によらず引っかき傷幅と圧縮強度に一定の関係が得られた。この一方で、測定結果が表面の平滑さに強く影響されるため、バングラデシュでの適用結果では極めて大きいばらつきが生じた。

また、エコーチップに関して今回の検討範囲では、表面硬度と圧縮強度には相関関係が見られたが、表面の平

滑さに大きく影響を受けるため、特に現地調査で使用した際には、ばらつきが大きい結果となった。

謝辞

本検討は、SATREPS-TSUIB プロジェクト (代表: 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, BC 骨材は真田靖士・大阪大学准教授, 高橋之・大同大学講師よりご提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 金子史夫: SATREPS TSUIB プロジェクト内資料, 2016
- 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
- 笠井芳夫, 湯浅昇, 西田健治: コンクリートの早期引っかき傷幅による材齢 28 日強度の推定, シンポジウム: コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集, Vol. 2, pp. 417-420, 2006.8
- 西脇智哉, 宮部裕太郎, 五十嵐豪: 非破壊検査を用いた低強度コンクリートのスクリーニング手法に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), A-1 材料施工, pp. 569-570, 2017.9
- 西川奈津子, 山根政夫, 谷川恭雄, 鈴木計夫: 各種非破壊試験法による低強度コンクリートの強度推定方法に関する研究 その 2: 引っかき傷法, 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), A-1 材料施工, pp. 241-242, 2007.8