

鉄道の道床バラストに用いられる岩石の物性と その吸水時の変化

川越 健^{1*}・河村祥一¹

¹ (公財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 地質 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
*E-mail: kawagoe.takeshi.43@rtri.or.jp

鉄道のバラスト道床に用いられる道床バラストは、列車の走行を支える重要な軌道部材であるため、その品質基準や品質管理の方法が規格化されている。品質管理のための試験を石質試験と呼び、原石山ごとに原則3年に1回の割合で実施すること、またその使用目的から、一定以上の物性値が求められている。本報告では工学的に良好な岩石の物性値の目安となると考えられるため、昭和62年4月から平成26年4月までに実施した試験結果を報告する。また、道床バラストは屋外環境下で使用されることから、岩石の吸水時の物性値の変化が重要となる。そこで、吸水時間と物性の関係、岩石の集合体としての圧縮性について検討し、乾燥状態と比べて吸水時に物性が低下する結果を得たことを報告する。

Key Words : ballast, rock test, physical property, coefficient of water absorption, railway

1. はじめに

鉄道のバラスト道床に用いられる道床バラストは、列車の走行を支える重要な軌道部材であることから、その品質の基準や品質管理の方法が規格化されている¹⁾。品質管理のための試験を石質試験と呼び、原石山ごとに原則3年に1回の割合で実施することが求められている²⁾。また、道床バラストには、その使用目的から一定以上の物性値が求められている。

ここでは、まず昭和62年4月から平成26年4月までに実施した石質試験のデータをまとめた結果を示す。先に述べたように道床バラストには一定以上の物性値が求められているため、一連の試験で得られたデータは、岩石の平均的な物性値を得ているわけではないが、工学的に良好な岩石の値を概観するうえでの目安となると考える。

道床バラストは屋外での使用が前提となっているため、その品質基準を考えるうえでは、吸水による物性の変化を考慮する必要がある。後述する現行の石質試験の中では吸水による強度低下、劣化の促進は考慮されているが、今後の試験方法や基準に関する検討の余地も残されている。特に道床として碎石を扱った場合の試験項目における吸水時の挙動については不明な点が残されている。そこで、吸水、乾燥過程の吸水率の変化を確認し、湿潤状態と乾燥状態における試験値の違いについて考察した。

2. 道床バラストに求められる性能と石質試験

(1) 道床バラストに求められる性能

碎石などの粒状体から構成される道床には、まくらぎを保持する、列車荷重を路盤に均等に分散させるなどの機能が必要である。そのため、道床バラストには摩損や風化に対する抵抗力が強いこと、列車通過による道床の変形などが生じないこと、道床を維持するためのつき固め作業が効率的に行える粒度組成であることが求められている³⁾。また、容易に入手できる必要もある。JR各社では、国鉄時代からの道床バラストの品質に関する基準⁴⁾を引き継ぎ、道床バラストの品質を確保するための試験方法や試験の実施時期を定めている。これらの規格は鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造⁵⁾ (以下、設計標準と呼ぶ) にも示されている。

(2) 石質試験

地質の変化に富む我が国では、常に良好で均質な道床バラストを得るのは難しく、また同じ原石山でも採取箇所により岩石の種類や物性値が異なることが想定される。そのため、3年に1度の頻度で石質試験を原石山ごとに実施することが義務づけられている。さらに、原石山など採取地の地質状況が大きく変化した時にも石質試験を実施する必要があるとしている²⁾。道床バラストに必要な性能とその評価項目を表-1に示す。同表の内、吸水率、

表-1 必要な性能と評価項目

必要な性能	評価項目
強度	圧縮粉砕率、吸水耐圧強度
耐摩耗性	摩損率、硬度、形状
耐候性	吸水率
道床としての安定性	単位容積質量
軌道保守の作業性	粒度

表-2 石質試験基準値：物理試験

項目 判定	単位容積質量 (kg/m ³)	吸水率 (%)	摩損率 (%)	硬度	吸水耐圧強度 (MPa)	圧縮粉砕率 (%)	形状	
							細長度 (%)	偏平度 (%)
合格	1400≤	3.0≥	27.0≥	17.0≤	80≤	24.0≥	60≥	45≥
要特認	-	-	35.0≥	-	-	30.0≥	-	-

*要特認：地域条件などにより所定の物理的性質の砕石が得られない場合、契約責任者が特に認める場合に限り使用出来るバラストの基準値。

表-3 石質試験基準値：粒度（参考値）

フルイの呼び寸法 (mm)	標準網フルイを通る砕石の質量百分率(%)				
	63.0	53.0	37.5	26.5	19.0
基準値(合格値)	100	100~80	75~35	40~0	5~0

硬度、吸水耐圧強度は岩塊から採取した径25mmの円筒試料を用い、他の試験項目は実際に道床に使われる粒度分布の砕石を用いて試験を実施している。

物理的性質に関わる試験項目の目的と試験方法の概要を以下に示す。

- 単位容積質量**：軽質なバラストや細片化しやすいバラストを除外し、細細粒が良好に混合した状態での質量を評価する。200×200×250mmの容器に所定の方法でバラストを詰めたとときの質量を測定する。
- 摩損率**：バラスト同士、バラストとまくらぎとのたたき合いなどに対する強さを評価する。規定の粒度組成に調整した試料と鋼球(φ47.5mm程度×12個)をロサンゼルス試験機に入れ、すりへり試験を行い摩損の程度を算出する。
- 圧縮粉砕率**：バラスト同士、バラストとまくらぎとの押し合いなどに対する強さを評価する。所定の大きさの円筒容器に規定の粒度組成に調整した試料を詰め、試料上面から所定の荷重を加えた後の粒度組成を調べ、試験前の粒度組成との比較から粉砕の程度を算出する。
- 吸水率**：吸水しやすいバラストは劣化しやすいことから吸水の度合いを評価することを目的としている。乾燥時と96時間水浸後の試料の質量差から求める。
- 硬度**：バラスト同士のこすり合いに対する強さを評価する。ドリーのすりへり摩耗試験機を用い、試料を一定圧力で円板に押しつけ、その円板を一定回数回転させた時の試料の質量変化から岩石の硬さを算出する。

- 吸水耐圧強度**：吸水状態下に置かれやすい道床バラストの特殊環境を考慮し、吸水させた試料に対して一軸圧縮試験機による破壊時の荷重から試料の強度を求める。

(3) 石質試験の基準値

現在用いられている石質試験の基準値を表-2と表-3に示す。粒度は道路で用いられる粒調砕石は50~10mmであるのに対して、鉄道用道床砕石は60~20mmとなっている。また、現場の状況により粒度調整が可能なようにある程度の幅をもたせている。

3. 石質試験結果

(1) 試験結果の概観

ここでは、昭和62年4月から平成26年4月までに実施した1,146件の試験結果を取り扱う。近年製作される道床バラストは、山や川から採取した岩塊を機械で破砕して作製する砕石がほとんどである。各試験値の平均、標準偏差などの統計値を表-4にまとめ、試験結果の頻度分布を図-1に示す。なお、一部の試料では石質の判定以外を目的とした場合があるため、試験項目ごとの総数は一致しない。岩石の種類のうち、最も多いのは安山岩や玄武岩などの火山岩類で、全体の約47%を占めている(図-2)。次いで多いのは、砂岩、チャートなどの堆積岩類に分類される岩石で、全体の28%を占めている。また、砕石中に複数の種類の岩石が認められる試料が95件あり、川砂利などを砕石として利用したものである。表-5に試料数が多い安山岩、玄武岩、砂岩の試験結果を示す。潜在的な亀裂の有無などが試験結果に影響を与える可能性がある。そのため、2章で示した試験項目とは別に、供試体の状態を確認することを主な目的として吸水耐圧強度を実施する直前に超音波伝播速度測定を行っている。超音波伝播速度の測定はJGS2110-1998に準拠して行っている。

(2) 単位容積質量

単位容積(L200mm×W200mm×H250mm)に所定の粒度分布となるように調整した砕石を密詰めした際の質量である。全体の平均値は $1.61 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である(表-4)。図-3に単位容積質量と岩石の比重との関係を示す。比重が大きい岩種ほど単位容積質量も大きい傾向がある。これは粒度分布、形状が一定の範囲にある試料を用い、かつ同様の締め固めを行っているため空隙率がおおむね同様となることを考えると、単位容積質量が岩塊そのものの質量に依存することを示唆すると考えられる。

表-4 石質試験結果

		単位容積質量	摩損率	吸水率	比重	圧縮粉砕率	硬度	吸水耐圧強度	超音波速度	
		$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	(%)	(%)		(%)		MPa	P波(m/s)	S波(m/s)
総数	平均値	1.61	16.76	0.64	2.71	17.86	19.13	201.09	5,372	3,386
試料数 1146	標準偏差	0.07	4.29	0.71	0.14	3.38	0.62	77.08	676	562
	最大値	1.88	43.70	6.80	4.00	31.30	20.50	471.38	7,865	5,761
	最小値	1.41	7.10	0.00	2.10	8.10	13.40	37.24	2,658	1,844
	データ数	1110	1117	1130	1128	1116	1127	1129	1103	1103

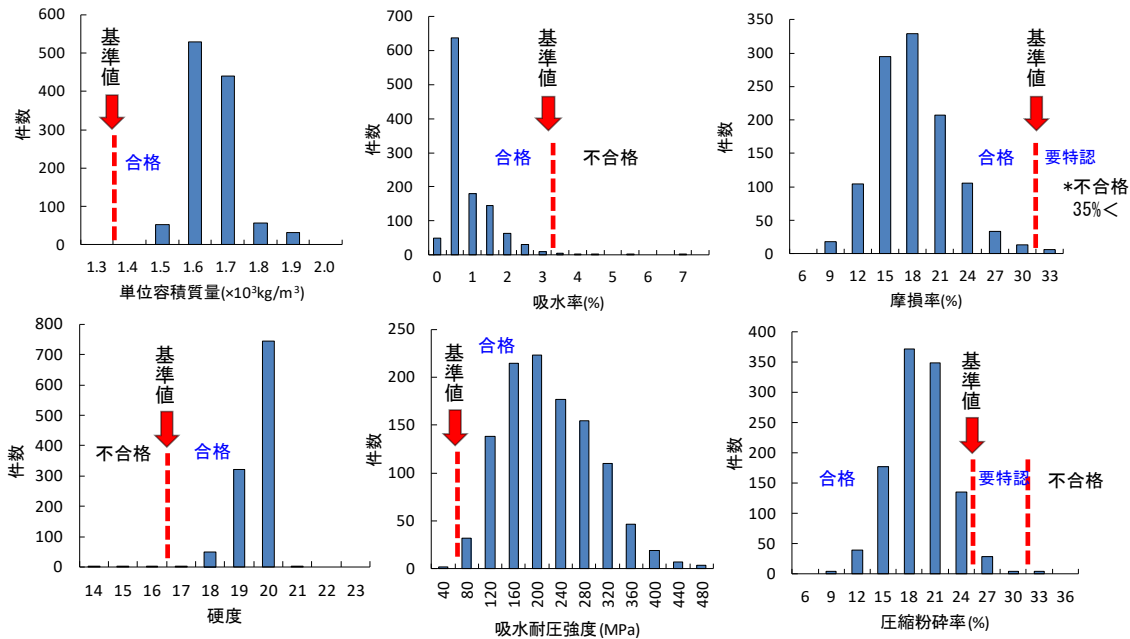


図-1 石質試験結果

表-5 主な岩種の石質試験結果

		単位容積質量	摩損率	吸水率	比重	圧縮粉砕率	硬度	吸水耐圧強度	超音波速度	
		$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	(%)	(%)		(%)		MPa	P波(m/s)	S波(m/s)
安山岩 試料数 327	平均値	1.59	15.79	1.21	2.65	18.64	18.88	182.85	5,039	3,170
	標準偏差	0.06	3.44	0.84	0.11	2.95	0.63	70.15	616	569
	最大値	1.85	31.30	6.80	2.95	30.30	20.00	471.38	7,149	5,037
	最小値	1.41	7.10	0.00	2.29	11.49	13.40	37.24	3,074	1,924
	データ数	319	321	319	319	320	318	319	309	309
玄武岩(類) 試料数 128	平均値	1.70	14.38	0.48	2.89	16.05	18.93	178.60	5,790	3,591
	標準偏差	0.09	3.32	0.54	0.16	2.95	0.64	75.97	681	558
	最大値	1.88	25.30	2.20	3.26	23.80	19.90	420.00	7,192	4,964
	最小値	1.47	7.60	0.00	2.58	9.40	15.90	40.18	4,102	2,202
	データ数	124	124	128	128	124	128	128	128	128
砂岩 試料数 300	平均値	1.59	17.02	0.41	2.67	16.93	19.27	221.24	5,282	3,415
	標準偏差	0.04	4.06	0.46	0.08	3.13	0.46	66.64	621	517
	最大値	1.69	29.00	2.50	3.50	25.10	20.00	401.80	6,680	5,761
	最小値	1.46	7.80	0.00	2.50	8.10	14.70	78.40	2,658	1,879
	データ数	293	295	298	297	295	297	298	294	294

(3) 吸水率

全体の平均値は0.64%である(表-4)。試料数の多い安山岩の平均値は1.21%と他の岩種より大きい値となっている(表-5)。

一連の石質試験とは別に、3種類の岩種(砂岩(来待砂岩)、凝灰岩(田下石)、安山岩)について、吸水率の変化を調べた。図-4に吸水率の経時変化を示す。供試体(径25mm、高さ500mmの円柱状)3本を浸水させた結果のそれぞれの岩種の平均値を示している。自然乾燥状態から浸水を開始した。おおむね96時間程度で一定値に近づいていることがわかる。96時間経過後、いずれの岩

種でもわずかではあるが吸水率の増加が認められる。浸水終了時の吸水率を岩種ごとにみると、凝灰岩が17%程度と最も大きく、砂岩が10%程度、安山岩が1%未満と低くなっている。

乾燥過程を見ると、水から取り出した後、いずれの岩種でも急激に吸水率が低下することが分かる。また、ある値以降は低下する割合は非常に緩やかになる。

(4) 摩損率・圧縮粉砕率・硬度

摩損率の全体の平均値は16.76%である(表-4)。圧縮粉砕率の全体の平均値は17.86%である(表-4)。硬

度の全体の平均値は 19.13 である。試料数の多い安山岩の平均値が 18.88, 玄武岩の平均値が 18.93 である, これらは全体の平均値よりも小さな値である (表-5)。

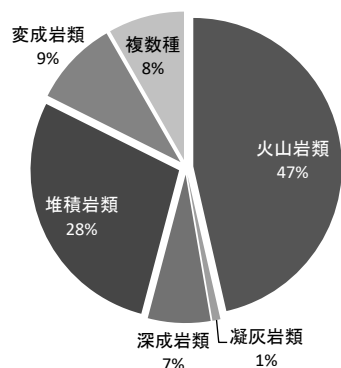


図-2 道床バラストに用いられる岩石の種類

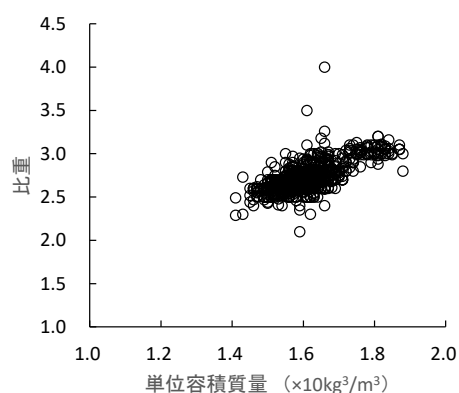


図-3 単位容積質量と砕石の比重の関係

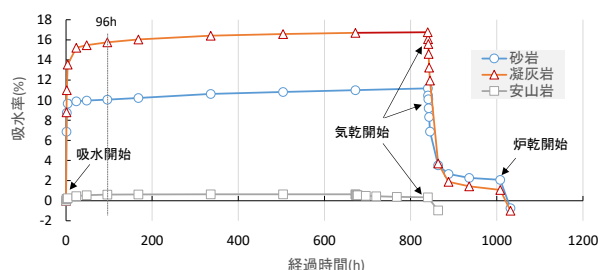


図-4 岩種ごとの吸水率の経時変化

(5) 吸水耐圧強度

吸水耐圧強度の平均は約 200MPa である (表-4)。大島他⁹⁾は, 湿潤時 (4 日間浸水) の岩石の一軸圧縮強さは乾燥時と比べておおむね 30%低下することを示している (図-5)。試験条件は異なるが, 鉄道用の道床砕石に用いられる岩塊は, 三木⁵⁾が示しているデータと比較すると, 岩盤区分が A 級に区分される岩盤から得られた岩石の値に相当する。

図-6 に岩石を火山岩類, 凝灰岩類, 深成岩類, 堆積岩類, 変成岩類の分類ごとの試験結果を示す。岩種ごとの平均値は, 堆積岩類が 220.60MPa と最も大きく, 次いで深成岩類 (206.18MPa), 火山岩類 (187.39MPa), 凝

灰岩類 (175.34MPa) の順となる。

(6) 超音波電波速度

図-7 に超音波伝播速度の測定結果を示す。ここでは吸水した供試体を用いた測定結果で示している。Vp と Vs の間には正の相関が認められる。試料全体では Vp で 4~6km/sec, Vs で 2~4km/sec の範囲にある既往文献^{たとえ}とと比較すると湿潤状態ではあるが, Vp, Vs とともに文献値に対してやや速い結果を得ている。これは, 砕石であることから, 岩質として工学的に良好な岩塊を対象とした結果と推測される。岩種別に平均値をみると玄武岩で 5.8km/sec, 安山岩で 5.0km/sec, 砂岩で 5.3km/sec であり, 岩種ごとの顕著な差は認められない (表-4)。Vp/Vs はおおむね 1.6~1.7 程度である。

次に吸水耐圧強度と超音波伝播速度の関係を図-8に示す。強度が大きい岩塊は湿潤時の超音波伝播速度が速い傾向はあるが, 全体としては明瞭な関係性は見いだせない。

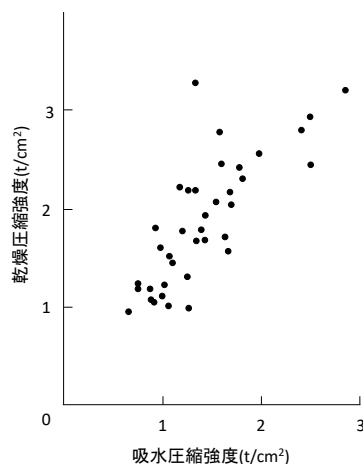


図-5 乾燥時と湿潤時の一軸圧縮強さ
参考文献 4)を編集。単位系は原文のままである。

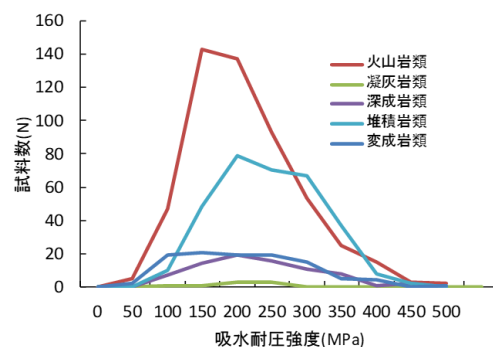


図-6 岩種ごとの吸水耐圧強度

4. 吸水による物性の変化

3章にて鉄道の道床バラストの石質試験結果を示すとともに, 湿潤状態の強度特性について述べた。これらの

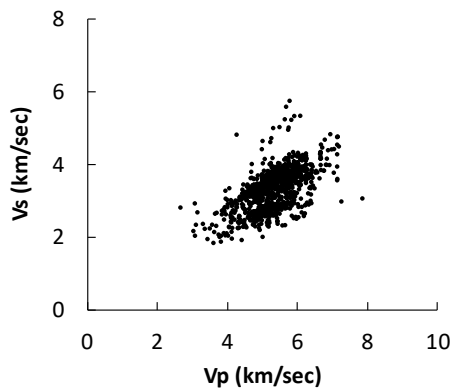


図-7 超音波伝播速度の測定結果

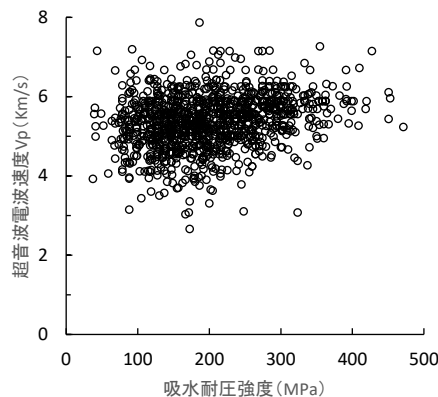


図-8 吸水耐圧強度と超音波伝播速度の関係

碎石の集合体としての道床が湿潤環境下でどのような強度特性を持つかは十分に明らかになっていない。現行の石質試験の内、岩石の集合体としての特性を評価する試験は、単位容積質量、摩損率、圧縮粉碎率がある。これらの内、単位容積質量は吸水率を考慮すれば、質量の増加は計算により求められる。また、図-4で示した吸水率の経時変化や試験方法を考慮すると、摩損率の測定時には一定の吸水率に保つのは困難なことが想定される。そこで、本論文では、モールドの中で静的に裁荷するため、比較的湿潤状態が保つことが出来ると考えられる圧縮粉碎率について、乾燥状態と湿潤状態の試料を用いて試験を実施した。

(1) 圧縮粉碎率試験の方法

圧縮粉碎率試験の方法を示す。まず、表-5 に示す粒度分布を概ね満たす試料を良く混和した後、内径 220mm、高さ 280mm の鉄製容器に締固めながら入れる。次に、ジャッキにより加圧板を介して 20 分かけて徐々に 500kN まで載荷し、2 分間保持した後、除荷する。載荷前後の試料の粒度加積曲線の面積比から圧縮粉碎率を求める（図-9）。この圧縮粉碎率試験を乾燥状態と湿潤状態の試料を用いて行った。

(2) 圧縮粉碎率試験に用いた試料

表-5 圧縮粉碎率試験に用いる試料の粒径ごとの質量

粒径 (mm)	53.0	37.5	31.5	19.0	9.5	計
質量 (g)	2550	5250	4500	2625	375	15000

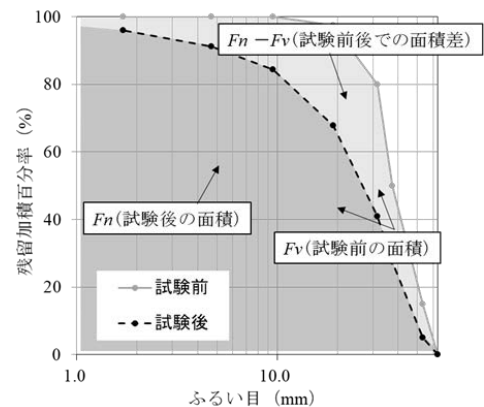


図-9 圧縮粉碎率の算出方法

試料には山梨県で採取される新第三紀の安山岩を用いた。湿潤用に用いた碎石の石質試験の結果は、単位容積質量 1.58kg/cm^3 、吸水率 1.03% 、摩損率 15.3% 、硬度 18.8 、吸水耐圧強度 213MPa である。形状は扁平度 16.6% 、細長度 20.1% である。これらの試験結果はすべて基準を満たすものである。湿潤試料は石質試験の基準に拠り、4日間（96時間）浸水させて試料を用いた。乾燥状態については気乾試料を用いた。

(3) 圧縮粉碎率試験の結果⁶⁾

圧縮粉碎試験前後の粒度分布を図-10に示し、変位量（試料の圧縮量）を図-11に示す。変位量は、モールドの対角2箇所にて加圧板の基準位置からの変位をコンベックスにより読み取った値の平均値である。

粒度の違いを見ると、湿潤状態では $37.5\sim 4.7\text{mm}$ の通過率が乾燥状態と比べて大きい値を示す。一方で 53mm 、 1.7mm の通過率はほぼ同量であった。また、圧縮粉碎率を比べると、乾燥状態では 19.7% 、湿潤状態では 24.5% であり、湿潤状態でより大きい圧縮粉碎率を示した。変位量は湿潤時の方が載荷開始から変位量が大きく、最終的には乾燥時に比べて 1.5 倍近くの変位量となった。本試験に用いた試料と同じ原石山における過年度3回の圧縮粉碎率は、 21.9% 、 20.0% 、 19.2% である。今回の湿潤試料を用いた圧縮粉碎率はこれらと比べても大きな値となっている。

5. 考察

岩石は吸水開始直後、ならびに乾燥開始直後に吸水率が大きく変化する。一軸圧縮強度は吸水させることにより低下する。圧縮粉碎率が大きくなり、変位量も大きく

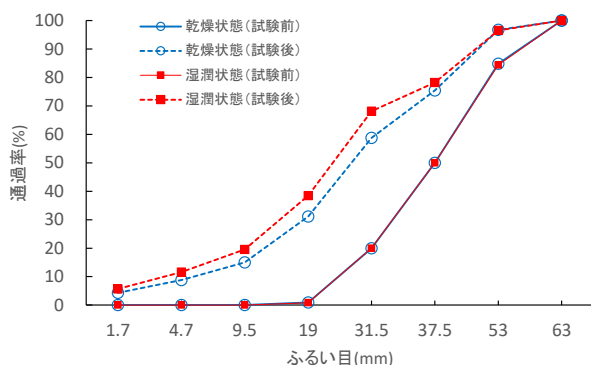


図-10 圧縮粉碎試験前後の粒度分布

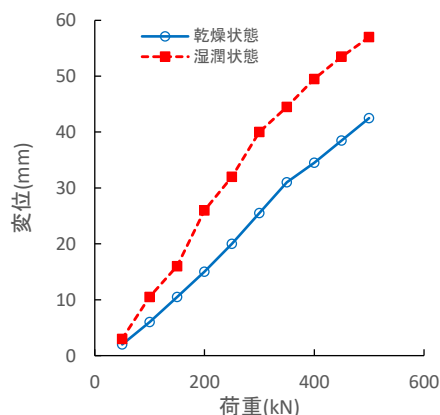


図-11 圧縮粉碎試験時の試料の変位量

なることから、碎石をマスとして捉えた場合、吸水時にはその全体としての強度は乾燥時とは異なると考えられる。碎石は元来、稜角に富むことから、マスとして圧縮されると稜角部分に応力集中が生じて粉碎される。この際、吸水により強度低下生じた碎石では、その事象がより強く発現することが、圧縮粉碎率が湿潤時に大きくなった原因の一つとして考えられる。粒度分布の変化では、顕著な細粒化は認められなかった。このことは、乾湿の違いによる碎石間の挙動の違いが原因の一つとしてあることを示唆すると思われる。

一方でモールドへの詰め方の違いでばらつきが出ると考えられる。今回の試験で実施した乾燥状態の結果が過年度の摩損率とほぼ同様の値であることから、試料そのものや供試体作成におけるばらつきは小さいと考えられ

る。

6. おわりに

約1,150件の道床バラストの石質試験を示し、その物理的性質を概観し、項目の一部について実験結果から乾湿の違いを示した。鉄道においては列車の通過量、保守精度の向上など、道床バラストが置かれた環境は変化していくと思われる。道床碎石としての評価方法も今後変わっていくことも考えられることから、より適切な道床碎石としての岩石の評価方法を検討としていく必要がある。

謝辞：石質試験は株式会社ジェイアール総研エンジニアリングの村井好男氏に、そのデータ整理は株式会社テスの橋本里美氏にご協力いただいた。また、実験用碎石の採取は甲州碎石株式会社殿にご協力いただいた。記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所編(2012)：鉄道構造物等設計標準・同解説―軌道構造，丸善，431p，2012.
- 2) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重編：新しい線路―軌道の構造と管理―，(社)日本鉄道施設協会，625p，1997.
- 3) 例えば，吉川恵也，大島洋志，榎本秀明，木谷日出男，辻徹：道床バラスト品質管理の手引（案），鉄道技術研究所速報，No.A-83-47，1983.
- 4) 大島洋志，中林好範：道床バラストの石質基準および試験法の改正に関する研究―附・道床バラスト仕様書にもとづく過去20年の成績，鉄道技術研究所速報，No.75-154，205p，1975.
- 5) 三木幸蔵：わかりやすい岩石と岩盤の知識，鹿島出版会，1978.
- 6) 河村祥一，川越健：乾湿によるバラストの圧縮粉碎率の違いに関する基礎的検討，日本応用地質学会平成30年度研究発表会講演論文集，pp.111-112，2018.

PHYSICAL PROPERTIES OF THE RAILWAY BALLASTS AND ITS CHANGE UNDER THE WET-CONDITION

Takeshi KAWAGOE, Shoichi KAWAMURA

The railway ballast is the important track member, because it supports the run of trains. So the ballasts quality criteria and the quality control were established. In the ballasts quality test, it was considered that the influence of the absorbed water and the progressing weathering gives the physical properties of the ballasts. In this paper, we experimented some the ballasts quality tests under the dry and absorb condition. In the result, we cleared that the strength of the ballasts in the condition of absorb was lower than dry.