

東海大学紀要

建築都市学部

Vol. 2, No. 1 2023

目次

論文

コンクリート用水分計の学術的位置付けの検討

..... 横井 健・福島蒼平..... 01

真砂土および関東ロームを材料とした盛土地盤における SDS 試験による締固め度の推定に関する実験的研究

..... 坂本智之・野村圭介..... 09

新任教員研究紹介

建築学科..... 篠原 奈緒子..... 16

建築学科..... 須沢 栞..... 19

2023年11月30日発行

コンクリート用水分計の学術的位置付けの検討

横井 健*¹ 福島蒼平*²

Academic Utility of a Concrete Moisture Meter

by

Takeshi YOKOI and Sohei FUKUSHIMA

(Received on Mar. 23, 2023 and accepted on Jul. 14, 2023)

Abstract

In this study, we assessed the academic utility of a high-frequency capacitance moisture meter (model HI-520-2, Kett Electric Laboratories), which is widely used for managing concrete moisture. The D-mode value represents the direct value of capacitance under specific voltage conditions, while the CON-mode value is derived from the D-mode value through internal conversion within the device. The D-mode and CON-mode values are correlated by a cubic function. According to the theoretical relationship between water content and capacitance, the D-mode value is considered a more appropriate index for academic research.

The characteristic temperature-dependence of the moisture meter does not generate any measurement errors. However, an error of approximately 2/°C has been observed due to changes in the dielectric constant of concrete. Nevertheless, this error is extremely small compared to the variations caused by factors such as measurement sites. Hence, temperature correction is unnecessary in practical applications of the device.

The relationship between water content and D-mode value presented in this report is based on a limited set of experiments, conducted using concrete comprising specific materials. We aim to validate the relationship using various materials in future investigations.

Keywords: Concrete moisture meter, Academic meaning, Water content, Temperature dependence

1. はじめに

コンクリート床下地の水分は、床下地に直接接着する工法を採る床仕上げ材の剥離の主な原因である。したがって、水分量を定量的に把握して適切に評価し、仕上げ材施工時期を定める指標とする必要がある。このような観点から、筆者らは、床下地の水分量と接着力や不具合との関係を検討している^{1)~4)}など。

日本床施工技術研究協議会^{注1)}の『コンクリート床下地表層部の諸品質の測定方法, グレード⁵⁾』(通称“床会グレード”)に規定されている水分量の測定方法としては、静電容量と含水率の相関関係を応用した計測機器を用いる『水分計法』と、水蒸気を吸収して変色する試験紙の色で評価する『乾燥度試験紙法』の2種がある。

このうち、水分計法に用いる機器は、写真1に示すケット社製の高周波静電容量式水分計HI-520-2(次章以降、単に“水分計”と記す場合、本機の意とする)が、事実上市場を独占している。ただし、本機は、コンクリートの水分の多寡に応じた数値(以降、“水分計指示値”と記す)が表示されるものの、測定原理や水分計指示値の導出方

法については十分な説明がされていない。したがって、学術研究に用いるには、これを明確にする必要がある。

このような背景から、筆者は、本機の信頼性を明らかにする研究に着手した。

2. 目的・範囲

1. で述べたとおり、本研究では、水分計の学術的な位置付けを明確にし、研究実験での使用に堪え得ることを証明するのが目標である。

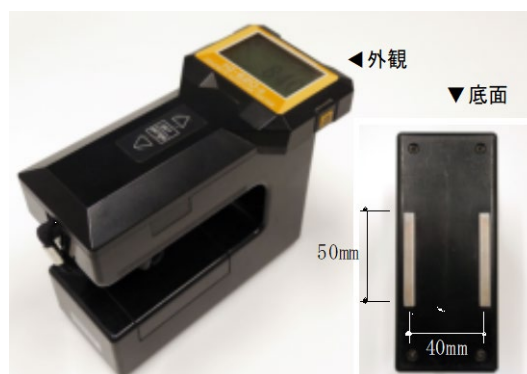


写真1 高周波容量式水分計(K社製 HI-520-2)

*1 建築都市学部建築学科准教授

*2 工学部建築学科学部生

本報では、その初期段階として、水分計指示値の理論的位置付けを明確にすることを目的とした。あわせて、信頼性検証の初期段階として、測定値の温度誤差の程度も把握することとした。

本報で扱うコンクリートの範囲は、普通ポルトランドセメント・普通骨材を用いたコンクリートに限定した。すなわち、現場で広く用いられているがこれまでの水分計において普通コンクリートとは異なる傾向を示している高炉セメントなどや軽量骨材などを用いた検討は今後の課題とした。

3. 水分計の概要 および測定原理に係る既往の研究

3.1. 水分計の概要

改めて写真1の水分計を説明する。

水分計は、底面の長さ50mmの電極で特定の高周波を印加し、40mm間隔に設置された電極が展開する概ね放物柱状の電界内の静電容量を得る。一定の印加条件下での静電容量は誘電率に比例し、水の誘電率の寄与がセメントや砂の影響を無視できる程度に大きいため、水を含む物質の水分量の多寡は静電容量の大小で表せる、という理論に基づく測定機器である。1986年に旧型機HI-500が開発され、マイナチェンジを経て2018年に現行機が販売された。

本機が指示する値(以降、“水分計指示値”と記す)は、ボタン操作により、検出した直読値であるDモードと、コンクリートの水分とDモードの関係から『水分値(%)を表すよう補正している』とされるCONモードとを、切り替えて表示できる。その他にも、ALCや石膏ボードなどの水硬性材料に対応した換算モードも搭載されている。ただし、これらの補正・換算方法は、公開されていない。

他に競合する水分計がなかったことから、本機は長らく業界標準となっており、なまじ『%』が付されて表示されるが故の『CONモードでの値(以降、“CON値”と記す) = 含水率』という誤解から、Dモードでの値(以降、“D値”と記す)ではなくCON値が用いられてきた。本機の歴史的な背景は、湯浅が詳述している^{6), 7)}。ただし、湯浅は、CON値が含水率ではないことを明言するとともに、不変的な物性値であるD値での議論への転換を推奨し、また、CON値の圧倒的な実績に対する転換の困難も指摘している。

筆者らも、20年以上研究実験に用いているが、CON値の理論的な不明瞭さや、D値の社会的な馴染みのなさから、不便さを感じていた。特に強く意識していたのは、CON値が水分量の大小のみを表す、いわゆる『順序尺度』ではないか、という疑問である。順序尺度である場合、例えば不具合を何らかの方法で数値化した尺度とCON値の対応関係を数式で表すことはもちろん、厳密には複数回測定したCON値の平均値を算出することすらもできないことになる。

3.2. 水分計の機械的特性に関する検証

湯浅らと水分計の開発者のひとりである沓掛は、誘電率が既知の種々の物質を用いた実験により、D値と誘電率(すなわち静電容量と)とに一次相関があることを証明した⁸⁾。なお、電極を押し当てる表層部の誘電率の方が深部よりも測定値に及ぼす影響度が大きい、深さ方向の影響範囲は約40mmとのことである。

また、筆者らは、現行機と1世代前のHI-520とで測定値が等しいことを検証した⁵⁾が、印加条件の異なる2世代前のHI-500とは同一のコンクリートで測定しても表示されるD値が異なる(換算されたCON値は同等になるよう内部換算が設定されている)。床会グレードでは、現行機およびHI-520と、HI-500とで、異なるグレードの境界値を提示している⁵⁾が、この煩雑さもD値での議論への転換を困難にしている一因と考えられる。

3.3. 既往の研究から演繹されるD値の位置付け

宮崎らは、水分計とは異なるSパラメータ法という電磁波の伝搬速度から算出する測定手法で、コンクリートの誘電率を測定し、誘電率と含水率に一次相関があることを実証している⁹⁾。この結果と、3.2.で述べた湯浅らの結果⁸⁾とを合わせて考えれば、理論的には、D値と含水率に一次相関があると考えられる。

これを裏付ける結果として、林らは、ALCの含水率との関係を実験的に検討し、一次相関を確認している¹⁰⁾。また、湯浅らは、普通コンクリートの埋め込み式セラミックセンサで測定した含水率との関係を実験的に検討し、一次相関を確認している¹¹⁾。ただし、センサがごく小さく、把握できるのは埋め込んだ深さでの局所的な含水率であることから、深さ方向に乾燥状態が異なるコンクリートの包含的な含水率によるさらなる検討が望まれる。

3.4. CON値に関する理論的な不明瞭さ

沓掛らは、水分計の開発時に、CON値とコンクリートの含水率の関係を検討している¹²⁾。試験片の寸法は100×100×30mmで、調査は4種類であった。実験の結果として、CON値は含水率に比例すると結論付けている。

しかし、仮に、CON値は含水率に比例とした場合、3.3.で述べたように、理論的にはD値と含水率に一次相関があるので、CON値もD値と一次相関があつて然るべきである。一方、D値からCON値への変換方法は明らかにされていないが、少なくとも横井がこれまでに測定してきた結果では、測定可能範囲全体にわたってはD値とCON値に一次相関が認められない。変換が一次関数式以外の方法であるならば、実務上は、CON値は順序尺度とみなすのが適当と思われる(変換関数が単調増加式でない場合は、順序尺度ですらない)。

また、実験結果が示されているのはCON値5程度以下の範囲であり、仕上げ材施工後に不具合が発生する確率が高いCON値5以上²⁾での関係は示されていない。

以上より、全測定範囲においてCON値が含水率と直線近

似できるという説には、理論的な疑問がある。

18cmを基本とし、スランプか強度の一方を変化させた。

4. 水分計指示値の理論的位置付け

4.1. 本章の目的

3.で述べたとおり、水分計指示値には、圧倒的な実績があるが理論的疑問もあるCON値と、より合理的だが検証不十分のD値がある。本章では、水分状態が広い範囲で種々異なる普通コンクリートを試験体とし、D値とCON値の関係や、それらと含水率の関係を定量的に求め、理論的位置付けを明確にする。

4.2. 検討方法

本章の検討方法を以下に示す。

- ① 試験体を作製する
- ② ①で作製した試験体のD値を測定しつつ気中養生し、所期のD値となったタイミングでCON値を測定する
- ③ ②の測定後、ただちに重量含水率を測定する
- ④ ②で測定したD値とCON値の関係や、D値、CON値と③で測定した含水率の関係を考察する

4.3. 実験概要

4.3.1. 試験体の作製方法

写真2に、試験体の概要を示す。3.1.で述べたとおり、水分計の測定範囲が概ね深さ40mm⁸⁾の放物柱状であることから、表裏の対になる面を測定することにより表層から内部までを包含できるよう、1辺が70mm角の立方体とした。

表1に、コンクリートの概要を示す。コンクリートは、強度やスランプが多様となるよう設定した。具体的には、床下地にごく一般的に用いられる強度27N/mm²、スランプ

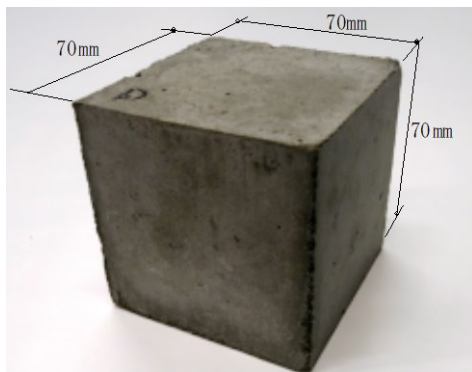


写真2 試験体の概要

表1 コンクリートの概要

記号	強度の呼び値 (N/mm ²)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	混和剤* 添加率 (%)
A	27	8	54	44	157	1.1
B		12	54	46	164	1.1
C		18	54	48	178	1.1
D	36		45	44	183	0.95
E	45		39	39	185	0.90

* AE減水剤のセメント質量に対する割合

4.3.2. 水分計指示値の測定方法

水分計指示値は、D値とCON値の両方を、試験体の全面6面の中央で、水分計の向きを変えて縦横1回ずつ測定することとした。測定時には、水分計を動かさずにモードを切り替え、なるべく厳密に同位置でのD値とCON値を得るよう留意した。

4.3.3. 重量含水率の測定方法

コンクリートの含水率は、体積基準ではなく重量基準で表すのが一般的で、コンクリート中の水の質量を水以外の質量で除して求める。本報では、ごく一般的な方法として、試験体の乾燥前後の質量差を水の質量、絶乾質量を水以外の質量とみなすこととした。乾燥には105℃の恒温機を用いることとした。含水率は、D値とCON値を測定した直後に測定にとりかかった。乾燥時間は24時間とした。

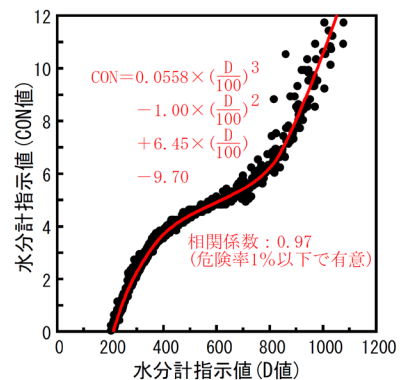


図1 CON値とD値の関係

表2 CON値とD値の対応一覧

CON値	D値	CON値	D値	CON値	D値	CON値	D値
0.1	216	3.1	359	6.1	785	9.1	959
0.2	219	3.2	366	6.2	794	9.2	962
0.3	223	3.3	374	6.3	803	9.3	966
0.4	226	3.4	381	6.4	812	9.4	970
0.5	230	3.5	390	6.5	820	9.5	974
0.6	234	3.6	399	6.6	828	9.6	977
0.7	237	3.7	408	6.7	835	9.7	981
0.8	241	3.8	418	6.8	842	9.8	984
0.9	245	3.9	428	6.9	849	9.9	987
1.0	249	4.0	439	7.0	856	10.0	991
1.1	253	4.1	451	7.1	862	10.1	994
1.2	257	4.2	464	7.2	868	10.2	997
1.3	261	4.3	478	7.3	874	10.3	1001
1.4	266	4.4	493	7.4	880	10.4	1004
1.5	270	4.5	510	7.5	886	10.5	1007
1.6	275	4.6	528	7.6	891	10.6	1010
1.7	279	4.7	548	7.7	896	10.7	1013
1.8	284	4.8	569	7.8	902	10.8	1016
1.9	289	4.9	592	7.9	907	10.9	1019
2.0	294	5.0	615	8.0	911	11.0	1022
2.1	299	5.1	637	8.1	916	11.1	1025
2.2	304	5.2	658	8.2	921	11.2	1028
2.3	309	5.3	677	8.3	925	11.3	1030
2.4	315	5.4	695	8.4	930	11.4	1033
2.5	320	5.5	711	8.5	934	11.5	1036
2.6	326	5.6	726	8.6	938	11.6	1039
2.7	332	5.7	740	8.7	943	11.7	1041
2.8	339	5.8	752	8.8	947	11.8	1044
2.9	345	5.9	764	8.9	951	11.9	1047
3.0	352	6.0	775	9.0	955	12.0	1049

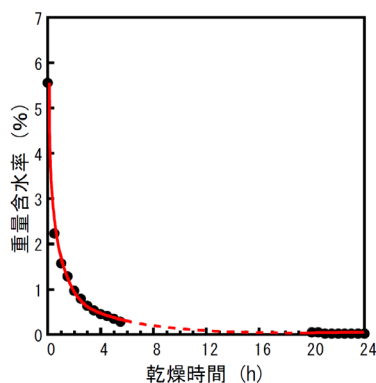


図2 重量含水率と乾燥時間の関係の例

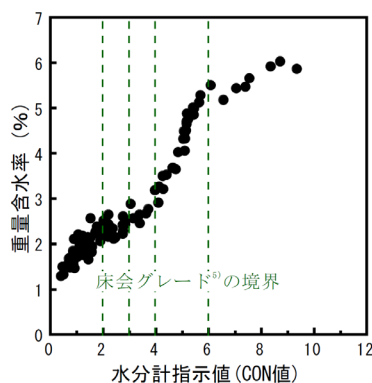


図3 重量含水率とCON値の関係

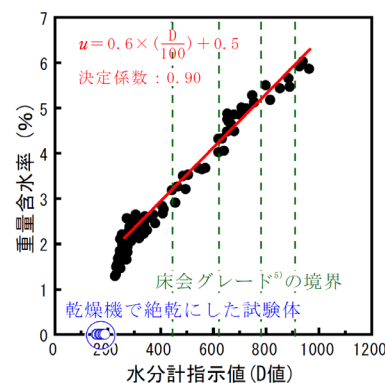


図4 重量含水率とD値の関係

4. 4. 実験の経過, 結果

4. 3. で述べた概要にしたがって、試験体を作製し、翌日に脱型してからは気中養生により自然乾燥させ、水分計指示値と含水率の測定を行った。実験は、2020年10月～2021年1月に実施した。

はじめは、試験体をコンクリートごとに多数作製しておき、毎日1体ずつ測定を実施した。しかし、材齢3日にはCON値4程度以下となり、材齢1～2日の間にもっと多数の測定を行う必要があることが判明した。このことから、さらに試験体を追加作製し、目標の水分計指示値となった時点で含水率を測定する作業を十分な分布の試験体群となるまで繰り返し行った。最終的な試験体数は111体となった。

図1に、CON値とD値の関係を示す。図には、筆者らの既往の測定結果もあわせて示した。図に示すとおり、両者には明確な対応が認められ、図中に示す三次関数で精度良く近似できる。すなわち、水分計内部ではこの式に近い変換をしていると推測される。したがって、既往の多くの管理者、研究者のCON値による記録や考察をD値に換算して再検討したり、逆に最近のD値のみの管理データを既往のCON値ベースの研究成果に換算照合することは十分可能である。ただし、三次関数の逆換算は、非常に煩雑である。容易に照合できるよう、表2に、CON値に対応する代表的なD値の一覧を示す。

含水率の算出において、まだ残留している水分により乾燥機内でも水和が進行し、水分計指示値を測定したタイミングでの水以外の質量と絶乾質量とが齟齬することが懸念された。これを検討するため、1つの試験体を用いて、乾燥重量を30分毎に計測する実験を予備的に行った。図2に、含水率と乾燥時間の関係の例を示す。図より、乾燥時間が2時間強で含水率1%以下になり、12時間程度でほぼ絶乾に達しているときみせる。このことから、乾燥機内での水和進行の影響はほとんどないと結論付けた。

4. 5. 考察

試験体の水分計指示値の代表値として、各面での測定値の平均を算出した。なお、上面は、凹凸やブリーディング水の影響で異常値となることが多々あったため、対

表3 含水率および床会グレード⁵⁾の境界に対応するD値

含水率 (%)	D値	グレードの境界	D値
3	約420	AとB	440
4	約580	BとC	620
5	約750	CとD	780
6	約920	DとE	910

になる下面とともに平均算出には用いないこととした。

図3に、含水率とCON値の関係を示す。図より、CON値5程度以上の範囲も含めると、一次相関は認められない。むしろ三次関数的な相関が見られる。すなわち、CON値とD値の三次相関の影響を受けていると考えられる。したがって、CON値は、実務上は順序尺度として扱うのが妥当であり、水分指標としては不便であると結論付けられる。ただし、図1および表2に示したように、算術的にD値に再変換可能である。

図4に、含水率とD値の関係を示す。図より、D値250程度以上の範囲では明確な一次相関が認められる。一方、250より小さい範囲では、含水率との関係はみられない。これは、コンクリート自体や空隙中の空気静電容量が測定結果に反映されているためと考えられる。対応範囲での含水率とD値は、図にあわせて示すごく簡単な係数の一次関数で、比較的精度良く近似できる。すなわち、含水率をD値により推測することは、十分可能と結論付けられる。

表3に、図4に照合した含水率3, 4, 5, 6%に対応するD値と、床会グレードの境界に対応するD値を示す。表より、対応するD値は比較的近似していることがわかる。すなわち、床会グレードの境界は、概ね普通コンクリートの含水率3, 4, 5, 6%に相当すると位置付けられる。

4. 6. 本章の結論

以上より、水分計はコンクリート内部の水分量把握方法として十分な妥当性があり、CON値よりもD値の方が学術研究で用いるのに適していると結論付けられる。

ただし、D値もあくまでも特定の印加条件での静電容量にすぎず、印加条件の異なる機器間での相関を検討されないまま数値がひとり歩きする危険をはらんでいる。本

研究で示された関係性に基づき、一般性がある含水率を基盤として検討することにより、合理的で受容性の高い水分管理指標を確立できるものとする。

5. 温度誤差の検討

5.1. 本章の目的

4.で述べたとおり、実験室実験では、水分量把握方法としてD値を用いるのが妥当と結論付けられたが、測定環境が大きく異なる現場でも適用できるかは、また別に検討が必要である。

特に、水の誘電率は温度依存性があることが一般的に知られている¹³⁾が、D値は温度補正を特段していない。一方、材齢初期の反応が活発な水和熱や、夏期炎天下や冬期厳寒などの要因で、コンクリート温度が通常範囲を著しく逸脱する状況は、容易に想像される。このことから、D値の温度依存性を把握しておくことが、必要である。

以上の背景から、本章では、D値の温度依存性を検討した。

5.2. 検討方法

一般論として、そもそも測定機器は、温度による測定誤差を生じやすい。これは、熱膨張によるセンサ部の変形や温度による電気的な変調などが原因である。すなわち、まずは何より、水分計自体が温度によって測定誤差を生じるか、また、生じた場合誤差はどの程度か、を把握する必要がある。

以上のことから、まずは、

- a. 機器の特性による測定誤差を検証し、その後、
- b. コンクリート中の水分の誘電率の変化による誤差を検証した。

具体的には、a. およびb. それぞれを検証するための試験体を湯煎し、種々異なる温度で水分計指示値を測定して両者の関係を求めた。その際の手順を以下に示す。

- ① 熱水に試験体を沈没させ、初期温度を上げておく
- ② 試験体を取り出し、速やかに表面温度とD値を測定する
- ③ ②の測定後、ただちに試験体を再び水中に沈没させる
- ④ ②、③を徐々に水温を下げながら繰り返し実施する

5.3. 実験概要

5.3.1. 試験体

a. の試験体は、温度によって誘電率が変化しない物質とした。具体的には、表4に示す物質の板状成形品4種と

表4 誘電率一定物質の概要

種類	主成分
A	ジルコニア
B	ジルコニア
C	アルミナ
D	ガラス繊維補強エポキシ樹脂

した。3.1.で述べたとおり、水分計の測定範囲が深さ約40mmであることから、同じ板を数枚重ねて用いた。なお、湯煎時には、試験体が吸水しないよう密封袋に入れて沈没させた。

b. の試験体は、4. の試験体から、各調査1体ずつ計5種を用いた。材齢数日で一度絶乾にはしているが、その後気中養生状態で1年以上実験室内に保管してあり、本実験にあたって1ヶ月以上水中養生した。このため、水和反応は十分進行しており、本実験中に短時間で水和が進行し水分量に変化を生じることはないとみなした。なお、湯煎時には、試験体が完全に吸水するよう裸で沈没させ、D値測定直前には表乾状態となるよう表面水を固く絞った布巾で素早く拭いた。

5.3.2. 表面温度およびD値の測定方法

湯煎しておいた試験体を取り出し、速やかに表面温度とD値を測定した。測定後は速やかに湯煎状態に戻した。加温には、写真3に示す極小規模の恒温水槽を構築し、用いた。加温機は、いわゆる『低温調理器』で、本研究では葉山社中社製BNQ-01を用いた。科学実験機器メーカーの



写真3 恒温水槽



写真4 放射温度計

恒温水槽は非常に高価であるが、低温調理器と断熱保温性の高い容器は安価であり、本研究のような目的では十分な精度で温度制御が可能であった。

表面温度は、写真4に示す堀場製作所製の放射温度計IT-545NHを用いて、試験体の各面の中央を測定した。また、温度計と試験体の距離および角度が、毎回の測定でおおよそ一定となるよう留意した。

D値は、試験体の各面の中央で縦方向と横方向を1回ずつ測定し、平均値を算出した。

一連の測定中に時間経過で温度が下がることを懸念して、表面温度はD値の測定前後に計2回測定することとした。また、b.の試験体は、型枠に接しておらず凹凸となった上面以外の5面で測定することとしたが、全ての面を一度に測定すると時間がかかり温度が大きく下がると思われたことから、1面を測定したら別の試験体と交換し、5個の試験体全ての測定が終わった後に最初の試験体の次の面を測定する、というようにした。

5.4. 実験の経過、結果

5.3.で述べた概要にしたがって、異なる温度でのD値測定を行った。実験は、2022年1月に、a.およびb.それぞれ1日ずつ実施した。

ここで、温度の範囲は、約15～70℃とした。上限は、夏場の直射日光にさらされてもせいぜい50℃程度と思われたが、実験の容易さもかなり広めに設定した。前日から温度を75℃に設定した恒温水槽に沈没させておき、測定開始後は加温機を止め、自然に水温が下がるままとした。また、恒温水槽に冷却機能はないため、表面温度が20℃以下となった頃からは、実験室の窓を開放して室温を外気温と等しくするとともに、氷を入れて室温以下に冷却した。低温域はもう少し低い温度でも実施したかったが、特にコンクリート試験体は外気温が氷点下の状態で冷水に長時間沈没させてもなかなか温度が下がらず、また冷却水が凍らないように低温を維持するのが困難であったため、断念した。この実験を、a.およびb.それぞれ2回実施した。なお、a.のガラス繊維補強エポキシ樹脂試験体では、高温で変性する可能性があるため、60℃程度以下で実施した。

表面温度とD値の一連の測定に要した時間は、およそ30秒程度であった。また、その間の表面温度の低下は平均0.1℃、最大2.8℃であり、十分短時間に測定が実施できたと思える。なお、縦横の指示値の差は、a.では平均1、最大9、b.では平均14、最大44であった。

5.5. 考察

a. 機器の特性による測定誤差

図5に、誘電率が変化しない物質でのD値と温度の関係を、試験体により凡例を変えて示す。

図より、温度にかかわらず各物質で一定の値を示しており、機器自体には温度特性がないことがうかがえる。

b. コンクリート中の水分の誘電率の変化による誤差

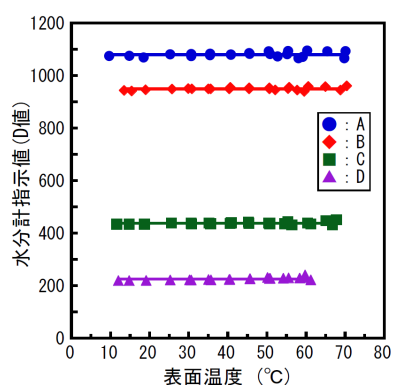


図5 誘電率が変化しない物質でのD値と表面温度の関係

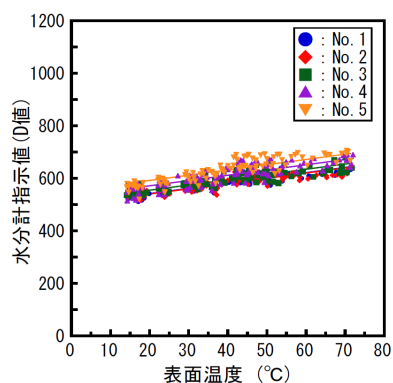


図6 水を含んだコンクリートのD値と表面温度の関係

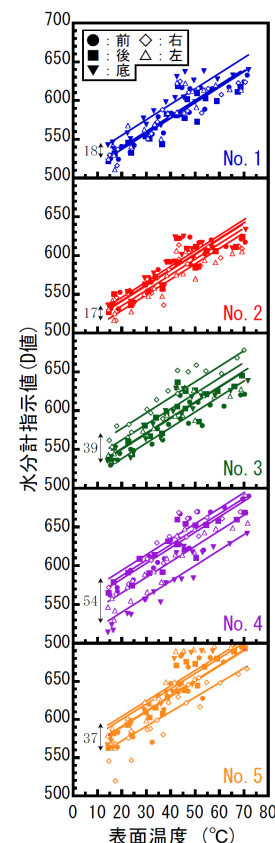


図7 試験体別の測定面による違い

図6に、水を含んだコンクリートのD値と温度の関係を、試験体により凡例を変えて示す。また、図7には、補助的に、試験体ごとに、測定面により凡例を変えて示す。図の縦軸は、500～700の範囲に拡大表示した。

図6より、いずれの試験体でも、温度が高くなるほどD値が大きくなる様子がうかがえる。変動率は、概して、温度が1℃上昇するごとに指示値が2大きくなる程度である。すなわち、例えば20℃を基準として温度差×2を増減するなどの補正が、有効である。

ただし、図7から読み取れるように、同じ試験体でも測定面を変えた場合の差(すなわち、同じ下地コンクリートで測定位置をずらした場合の差)は、本実験の範囲では平均33、最大54ある。5.4.で述べたように、ほぼ同一箇所で測定器の向きを変えただけでも、平均14、最大44のばらつきが生じる。すなわち、場所差と比較して温度による変動は相対的にかなり小さく、よほど極端な温熱環境ではない限りそれほど問題とならないと考えられる。

なお、純水の誘電率は温度が上がる程小さくなる¹³⁾とされており、誘電率とD値は比例する⁸⁾ため、本来温度が高くなるほど指示値が小さくなると思っていた。物理法則に反した結果になった理由は思い当たらないが、2回の測定で同じ傾向が得られたことから、測定時の間違いではないと考える。また、土壌水分量の測定方法を検討した先行研究¹⁴⁾における誘電率と温度の関係図でも同様の傾向がうかがえることから、純水と電解水の違いなどを要因として考える。

5.6. 本章の結論

以上より、機器自体には温度特性がないこと、水を含んだコンクリートでは温度が1℃上昇するごとに指示値が約2大きくなることを示した。

ただし、同一のコンクリートでも測定位置が変わることによる局所的な差の方が大きいことも勘案すれば、実用上は温度補正の必要がないとも考える。

6. おわりに

本報では、コンクリートの水分管理方法として普及している高周波静電容量式水分計HI-520-2について、学術的位置付けを検討した。本報の結論は以下のとおりである。

- ・特定の印加条件での静電容量の直読値であるD値と、それを機器内部で換算したCON値には、3次関数的な関係がある
- ・水分量と静電容量の理論的關係から、含水率と一次相関するD値が、学術研究指標としてより適切である
- ・水分計の温度依存性に関し、機器の特性による測定誤差はない。一方、コンクリート中の水分の誘電率の変化による誤差は、2/℃程度存在する。ただし、場所差などと比較して極めて小さく、実用上は温度補正の必要はない

以上であるが、D値は特定の印加条件での静電容量であり、印加条件の異なる機器では絶対的な比較ができない点に留意が必要である。D値から含水率などの位置付けが明確な指標に換算して検討に用いるのが理想的と考えられる。ただし、本報で示した含水率とD値の關係は、限定した材料で作製したコンクリートを用いた限定的な実験結果に過ぎず、今後は多様な材料でのさらなる検証が必要である。

謝辞

実験に協力いただきました高橋力也氏、高橋健太氏(ケツト科学研究所)、および多くの助言をいただきました横山 裕先生(東工大)、湯浅 昇先生(日大)をはじめとする日本床施工技術研究協議会各位に、厚く御礼申し上げます。なお、実験では、蓮田 隼君、土居大起君、吉田唯人君、河崎晃大君、塩原頼樹君、三宅 優君、望月洗佑君、小野遼亮君、杉村英俊君(本学科生)の協力を得ました。

注

注1) 日本床施工技術研究協議会(会長：横山 裕)：床施工に関する技術を調査、研究することを目的に1994年に設立された任意団体で、主たる床関係工業会8団体および法人会員、さらに個人会員として床関係技術者、研究者が加盟する、2023年3月現在会員数50の協議会である。

参考文献

- 1) 横井 健, 藤井佑太朗, 横山 裕, 福田眞太郎：高分子系張り床材の接着力と床下地表層部の水分量の關係に関する基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第747号, pp.659-667, 2018.5
- 2) 横井 健, 藤井佑太朗, 横山 裕, 福田眞太郎：高分子系張り床材の突き上げと床下地表層部の水分量の關係の基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第84巻, 第755号, pp.9-16, 2019.1
- 3) 藤井佑太朗, 横井 健, 横山 裕, 福田眞太郎：高分子系張り床材の突き上げとコンクリート床下地の放出水分量の關係, 日本建築学会構造系論文集, 第85巻, 第767号, pp.11-18, 2020.1
- 4) 藤井佑太朗, 横井 健, 福田眞太郎, 横山 裕：コンクリート床下地の上面仕上げ作業および養生が放出水分量におよぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第85巻, 第773号, pp.845-855, 2020.7
- 5) 日本床施工技術研究協議会：コンクリート床下地表層部の諸品質の測定方法, グレード(第3版), 2014.8
- 6) 湯浅 昇：旧JASS8における防水施工の目安「kettの水分計を用いて8%」物語(特集:防水層の膨れを回避する), 月刊防水ジャーナル, 第45号, pp.70-75, 2014.2
- 7) 湯浅 昇：塗り床施工の判断として, なぜ「kettの水分計で5%以下」が使われているのか(特集:規基準の数値は「何でなの」を探る Part 5), 建築技術, 第771巻, p.130, 2014.4
- 8) 沓掛文夫, 湯浅 昇, 美岬町雅弘, 結城英恭：押し当て高周波容量式水分計の表示値の意味に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1233-1234, 2013.8
- 9) 宮崎弘志, 佐川裕一郎, 寺西佳子：テレビ電波障害防止方法に関する研究(その3.軽量コンクリート含水率と誘電率の關係), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学, pp.1037-1038, 1996.7
- 10) 林志翔, 佐々木哲也, 宮井俊章, 沓掛文夫：高周波容量式水分計を用いた軽量コンクリートの含水率に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.799-800, 2009.7
- 11) 美岬町雅弘, 湯浅 昇, 沓掛文夫, 結城英恭：試製新型高周波容量式水分計を用いた表層コンクリートの含水率推定, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.237-238, 2012.9
- 12) 沓掛文夫：打放しコンクリート外壁の補修・改修技術, 外装仕上げおよび防水の補修・改修技術2, 日本建築センター, pp.246-248, 1992.7
- 13) 国立天文台：理科年表2022, 丸善出版, 物72, p.438, 2021.11
- 14) 中川慎治, 向井雅之, 古藤田一雄：誘電式水分計のキャリブレーション, 筑波大学水理実験センター報告, No.8, pp.75-81, 1984.9

真砂土および関東ロームを材料とした盛土地盤における SDS 試験 による締固め度の推定に関する実験的研究

坂本 智之*¹ 野村 圭介*²

Experimental Study on Estimation of Compaction Degree of Soil by SDS Test in Embankment Using Decomposed Granite Soil and Kanto Loam

by

Tomoyuki SAKAMOTO*¹, and Keisuke NOMURA*²

(Received on May. 23, 2023 and accepted on Oct. 31, 2023)

Abstract

The objective of this research is to propose a method for estimating the compaction degree of the ground using the Simple Dynamic Cone Penetration (SDS) test, which is a convenient on-site soil investigation technique. Insufficient compaction during embankment construction can lead to ground subsidence. It is commonly believed that by constructing embankments to achieve a specified compaction degree, ground subsidence can be minimized. In this paper, simulated grounds with varying compaction degrees were created using sandy soil and Kanto loam, and SDS tests were conducted on them.

The correlation between the measured total penetration energy and the compaction degree suggests that the compaction degree can be estimated. Furthermore, it was observed that even at the same compaction degree, the total penetration energy changes with variations in the moisture content of the soil. The change in soil composition also affects the ratio of torque component to weight component in the total penetration energy, indicating the possibility of soil classification based on this ratio. These findings demonstrate the potential of the SDS test as a practical method for estimating the compaction degree of the ground and assessing soil characteristics in engineering applications.

Keywords: embankment, soil, settlement, soil type, water content ratio, degree of compaction, simulated soil, decomposed granite soil, Kanto loam.

1. 序論

日本には山地が多いため、建築物を盛土による地盤の上に建てることがある。このような場合、盛土の施工時に地盤を十分に締め固めないと、建築物を建てた際に沈下が生じ、建築物に有害な障害を生じさせる可能性がある。地盤の特性を調査し、有害な沈下が起こり得るか検討することも可能だが、大掛かりな調査機器が必要であり、また、採取した試料を持ち帰って室内試験を行う必要がある。小規模な建築物では費用を抑えたいことも多く、簡易な現場の調査のみで沈下の有無を判別できると有用であろう。一方で、盛土には施工基準が存在し、盛土の用途ごとに一般的な規模の建築物における有害な沈下を防止できる締固め度の指定値が定められている¹⁾。建築物の設計は、盛土が既に施工された状態で行われるため、現地での地盤調査によって締固め度が推定できると有用であろう。

本研究では、盛土地盤の締固め度を簡易な地盤調査で推定する方法の提案を目的としている。本研究では、地盤調査にスクリードライバーサウンディング試験（以降は SDS 試験と呼ぶ）を用いている。貫入ロッドを地盤に回転貫入させ、抵抗を計測する、という簡易な地盤調査方法である。文献 2 などの既往研究において開発された調査方法であるが、締固め度との関係には言及されていない。本論文では、締固め度と含水比を変えた試料土で模擬地盤を作成し、その模擬地盤に対して SDS 試験を行い、得られた抵抗エネルギーと締固め度および含水比の関係性を調査した。なお、盛土の材料に真砂土あるいは関東ロームを用いた時に沈下被害が起こった事例がある。本論文では、これら 2 種類の試料土を対象とした。なお、実験は既報^{3,4)}で行われたものであり、本論文は結果を再整理したものである。

本論文の 2 章では実験概要と得られた結果について述べる。3 章では模擬地盤の締固め度・含水比と実験結果の関係について述べる。4 章では実験結果より SDS 試験により土質判別の可能性について述べる。5 章では本論文で得られた知見を述べる。

*1 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

*2 建築都市学部建築学科 講師

2. 模擬地盤における SDS 試験

2.1 実験概要

含水比および締固め度を変えた模擬地盤を作成し、SDS 試験を行った。土質試験で得た試料土の諸元と、本実験における模擬地盤の締固め度・含水比の組み合わせを表 1 に示す。なお、事前に最適含水比の試料土で模擬地盤を作成可能な締固め度の範囲を確認しており、関東ロームでは締固め度 70~90%，真砂土では締固め度 70~95% を目標値とした。上記の範囲外では、試料土の自重のみで目標値を超える、あるいは締め固めを繰り返しても（方法は後述する）密度が上がらなかったため、除外した。試料土の含水比は、最適含水比を基準として、その含水比よりも高い、および低い含水比で試験体を作成した。以降は各々の条件を高含水比あるいは低含水比と呼ぶ。含水比の変動が大きい関東ロームでは最適含水比 $\pm 15\%$ 、変動が少ない真砂土では $\pm 5\%$ 程度になるように含水比を定めた。

Table 1. Experimental conditions

Soil name		Kanto loam	Decomposed granite soil
General	Density of soil particle ρ_s [g/cm ³]	2.680	2.702
	Natural water content ratio ω_n [%]	49.5	12.2
Particle size	Stone(over75mm) [%]	0	0
	Pellet(2-75mm) [%]	0.2	15.4
	Sand(0.075-2mm) [%]	17.1	62.1
	Silt(0.005-0.075mm) [%]	42.2	15.6
	Clay(under0.005mm) [%]	40.5	6.9
	Maximum grain size [mm]	4.75	19.00
Compaction	Maximum dry density ρ_{dmax} [g/cm ³]	0.816	1.699
	Optimum water content ratio ω_o [%]	74.7	16.2
	Low water content ratio ω_L [%]	60.0	10.0
	High water content ratio ω_H [%]	85.0	20.0
	Target values for the compaction degree [%]	70,75,80,85,90	70,75,80,85,90,95

試験体の作成方法について述べる。土槽には鋼製のモールド（図 1 左、内法直径 298.5mm、高さ 985mm、厚さ 10mm）を用いた。モールド内に試料土を一定の規則で詰め込み、その時の密度で試料土の締固め度を管理した。モールドを高さで 16 層に分け、指定の密度から 1 層分に詰め込む試料土の重量を求めた。その土をモールドに入れ、その上に直径 280mm の円形載荷板を敷き、土の体積が各層の体積と一致するまで、繰り返し載荷板上に錘を落とした。体積はモールド頂部から土表面までの距離で管理し、錘を落とす度に距離を計測した。各層に詰め込む試料土の重量 m_i は、締固め度 D_c 、最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、含水比 w 、各層の体積 V_i として、(1)式で求めた。

$$m_i = \rho_{dmax} \left(1 + \frac{w}{100} \right) V_i \frac{D_c}{100} \quad (1)$$

使用したモールドの写真および作成した模擬地盤の写真を図 1 に示す。図 1 の左図はモールドの写真、右図は作成した模擬地盤である。SDS 試験は日東精工株式会社製のジオカルテ III で行った。SDS 試験の概要は次節で述べる。同一の試験体において、貫入位置を変えながら 3

回の SDS 試験を行った。図 2 に試験中の様子を示す。



Figure 1. Steel mold (left) and test specimen (right)



Figure 2. During the SDS test

2.2 SDS 試験による貫入エネルギー

図 3 に SDS 試験の手順を示す。回転する貫入ロッドに荷重を載荷し、1 回転するごとに荷重を増加させる。荷重は 0.25kN から 1.00kN まで 6 段階で増加させる。その後、荷重は 1.00kN で一定に保たれ、貫入ロッドは回転し続ける。貫入深さが 25cm に達した時点で荷重は取り除かれ、再度載荷と回転貫入が開始する。この試験中に、載荷荷重、回転トルク、貫入深さが計測される。

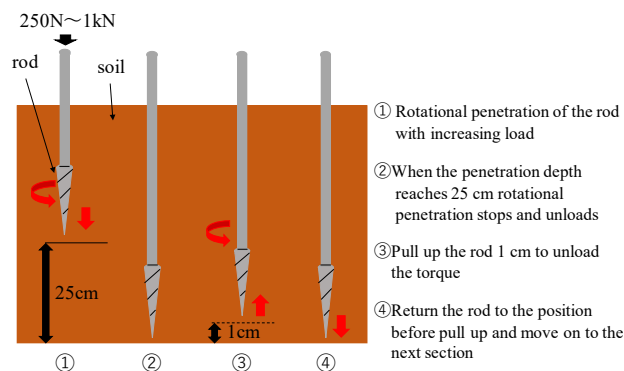


Figure 3. Procedure of SDS test

この試験では、載荷荷重と回転トルクによるエネルギーが定義されており、それらの和は貫入エネルギーと定義されている²⁾。載荷荷重によるエネルギーは EW 、ロッドの回転によるトルクのエネルギーは ET 、貫入エネルギーは dE と呼ばれている。それらの算定式を(2)~(4)式に

示す。

$$EW = Wds_t$$

$$W = W_a - W_f \tag{2}$$

$$ET = \pi Tdn_{ht}$$

$$T = T_a - T_f \tag{3}$$

$$dE = EW + ET \tag{4}$$

EW は荷重段階ごとに求められており、(2)式中の W_a は当該段階の載荷荷重、 W_f は垂直方向の周面摩擦力、 ds_t は当該載荷荷重時に貫入した量 (0~25cm) である。 ET も荷重段階ごとに求められており、(3)式中の T_a は当該荷重段階でロッドが1回転する間に計測された最大トルク値、 T_f は水平方向の周面摩擦力、 dn_{ht} は当該荷重段階でロッドが半回転した回数である。

最終の荷重段階 (載荷荷重 1.00kN) で貫入深さが 25cm に至らなかった場合は、載荷荷重 1.00kN の状態で 25cm に到達するまでロッドが回転し続ける。なお、この場合は初回の1回転分で EW, ET を求め、それ以降は EW, ET を求めていない。

2.3 実験結果

本実験で得られた ET, EW の例を図4に示す。なお、対象は真砂土の試験体であり、特定の1回分の貫入結果である。また、締固め度による変化を調査するため、締固め度 70,80,90%の結果を示している。凡例の名称は「試料土名称+含水比+締固め度」を組み合わせており、以降は、真砂土はG、関東ロームはLと呼び、最適含水比はO、低含水比はL、高含水比はHと呼ぶこととする。GO90は真砂土、最適含水比、締固め度90%であることを意味する。縦軸はロッドの貫入深さであり、特定の荷重段階でロッドが1回転したときのロッドの貫入量で求めた。横軸は、図4(a)では ET 、(b)では EW である。貫入深さ 0.00~0.25m、0.75~1.00m の範囲では貫入直後あるいはモールド底板に近く、値が過小あるいは過大であったため、以降は 0.25~0.75m の範囲に着目する。

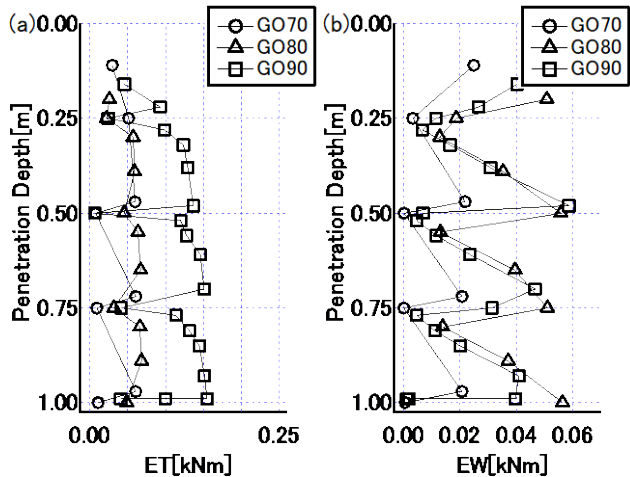


Figure 4. Variation of SDS value with degree of compaction (a) ET , (b) EW

ET, EW は載荷荷重の増加に従って増大し、除荷されることで値が急激に減少している。締固め度によって荷重段階数が異なっており、締固め度が低いと段階数が少なく、載荷荷重が小さい段階で貫入量が 25cm に到達していることがわかる。載荷荷重の増加による ET の変化量は小さく、締固め度 90%では徐々に増加しているが、80%では一定値である。また、70,80%の ET は90%と比べると値が小さく、1/2程度である。一方 EW は、載荷荷重の増加に対して線形に増加しており、また、締固め度が大きいほど値は大きい。また、関東ロームにおいても、同様の傾向であった。

次に、含水比による影響を調査した。図5,6に試料土と含水比を変えた ET と EW の例を示す。図5は ET 、図6は EW であり、(a)は真砂土、(b)は関東ロームである。これらの図は締固め度 90%の結果であり、低含水比の場合は青線、高含水比の場合は赤線、最適含水比の場合は黒線で描いている。

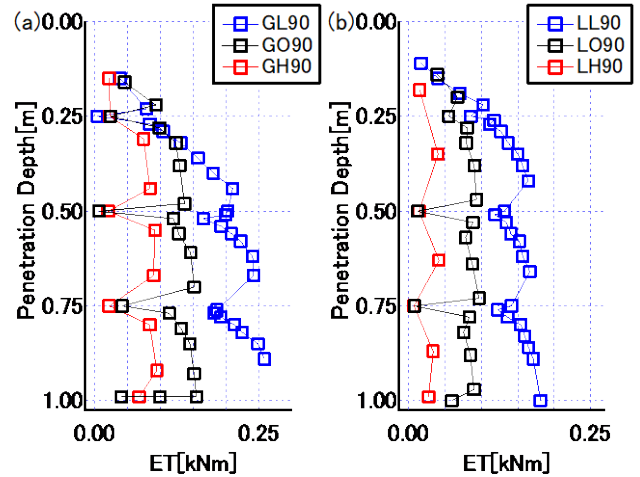


Figure 5. Variation of ET with penetration depth (a) decomposed granite soil, (b) Kanto loam

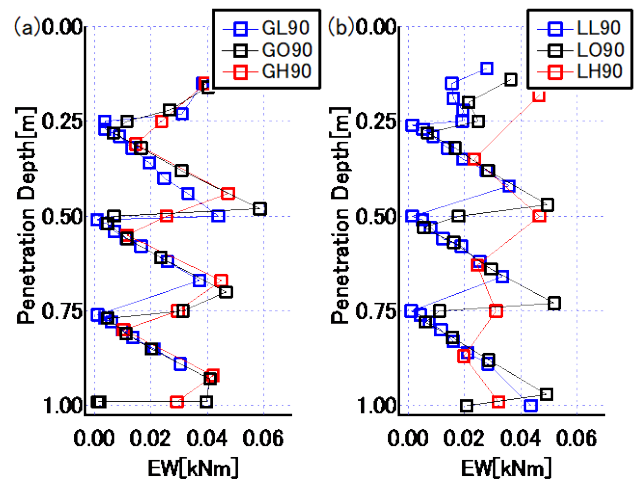


Figure 6. Variation of EW with penetration depth (a) decomposed granite soil, (b) Kanto loam

含水比によって荷重段階数は変化しており、高含水比の方が貫入されやすいことがわかる。 ET においては、同一の締固め度にも関わらず、低含水比の方が高含水比よ

りも 2~3 倍程度大きな値である。貫入量に対して非線形の関係にある点に変化はない。また、真砂土と関東ロームを比較すると、真砂土の方が各 25cm 区間内での変化量が大きい。EW においては、高含水比と低含水比を比較すると、荷重段階数が異なるにも関わらず、互いの最大 EW に大きな差は無い。EW には貫入量が影響するため、高含水比のように小さい載荷荷重でも深く貫入する場合には EW が大きくなる傾向にある。

3. 総貫入エネルギーによる締固め度の判別

3.1 貫入エネルギーの補間と区間の総貫入エネルギーの算定

本実験の結果より、試験体の締固め度・含水比は、増加する載荷荷重に対する ET,EW の変化量に大きく影響することがわかった。このことから、25cm 区間の総貫入エネルギーから試験体の締固め度あるいは最適含水比に対する水分量の多寡を推定できると考えた。

ところで、ET,EW を載荷荷重の段階ごとに求めているため、貫入量 25cm 到達時にロッドの回転が半端である場合や、最終荷重段階で 25cm に到達しない場合には、25cm 区間内の総エネルギー量を求めることができない。例を図 7 に示す。図 7(a) は、最適含水比・締固め度 85% の 25~50cm 区間の ET 分布図である。この場合は、載荷荷重 0.75kN で貫入量は 18cm であり、次の荷重段階である載荷荷重 0.88kN でロッドが 1 回転する前に貫入量が 25cm に達したため、回転が止まり、次の荷重サイクルに移行している。この時の 18cm から 25cm の間のエネルギーは分からない。また、図 7(b) は最適含水比・締固め度 90% の 25~50cm 区間の ET 分布図である。この場合は、最終荷重段階である載荷荷重 1.00kN における貫入量は 14cm であり、そこから 25cm までのエネルギーは分からない。このような場合でも 25cm 区間の総エネルギー量を求めるために、ET,EW を累積するのではなく、近似曲線を積分して求めた面積として求めることとした。

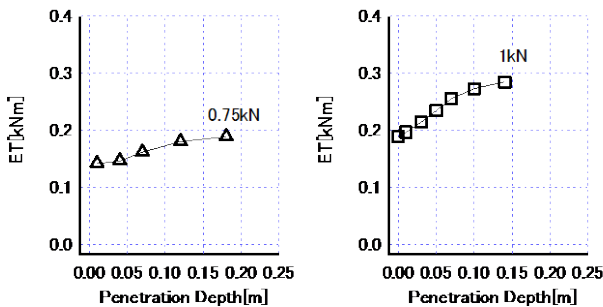


Figure 7. Examples of ET (a) GO85, (b) GO90

前述のように、疎な地盤では初期段階の荷重で計測が終わるため、25cm 区間の計測点は 1,2 点となり、密な地盤では 25cm よりも短い区間に多数の計測点が表れる。

これらの条件から総エネルギーを求めるために、各計測点のエネルギー値で近似曲線を描き、その曲線で 25cm 区間を包括する面積を求め、25cm で正規化し、総エネルギーを求めることとした。なお近似曲線は、図 5,6 の分布傾向より、ET は貫入量が大きくなるほど上昇量が減るため、推定値が大きくなりすぎないように累乗近似を用いることとした。EW は締固め度、含水比が変化しても貫入量に対して線形であることが示唆されるため、線形近似にすることとした。また、計測点が少ないと近似曲線を描けないため補間点を設けることとした。図 8 に近似曲線作成の概念図を示す。これらは縦軸に ET, 横軸に 25cm 単位深さで描いている。図 8(a) は計測点が 1 点の場合を描いている。この場合は傾き 0 の線形近似とした。図 8(b) は計測点が 2 点の場合であり、2 点間を 3 等分割した点に補間点を設け、累乗近似している。図 8(c) は計測点が 3 点以上の場合であり、全ての計測点で累乗近似している。なお、EW も同様の方法で補間点と近似曲線を描いている。

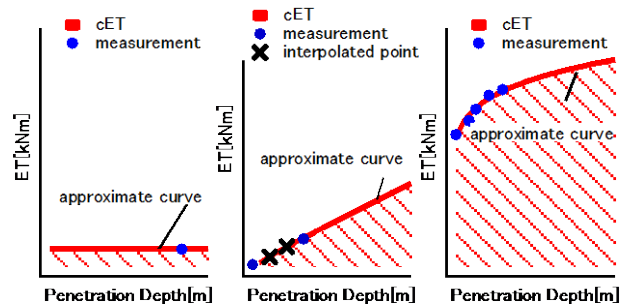


Figure 8. Approximate curves and interpolation points of ET
(a) In the case of 1 point, (b) In the case of 2 points,
(c) In case of 3 or more points

上記の手順で、ET から求めた総エネルギートルク cET 、EW から求めた総エネルギーウエイト cEW を求め、それらの和を総貫入エネルギー cE と呼ぶ。 cET, cEW は(5),(6)式で求めた。

$$cET = \frac{\int_0^{0.25} az^b dz}{0.25} \quad (5)$$

$$cEW = \frac{\int_0^{0.25} (az + b) dz}{0.25} \quad (6)$$

式中の a, b は近似曲線作成用の係数であり、計測された ET および EW とそれらの計測位置の 25cm 単位深さ z を用い、最小二乗法で値を求めている。なお a, b は各貫入点、各 25cm 区間 (深さ 0.25~0.50m と 0.50~0.75m の範囲) で個別に求めている。

3.2 締固め度・含水比と総貫入エネルギーの関係

総貫入エネルギー cE と締固め度 D_c および含水比の関係を図 9,10 に示す。図 9 は真砂土、図 10 は関東ロームの場合である。貫入深さで結果を区別しており、0.25m~0.50m の区間は凡例に小文字の a を、0.50m~0.75m では

小文字の b を付している。縦軸は cE , 横軸は締固め度 D_c である。なお, 各試験体は表 1 の締固め度を目標値として作成しているが, 錘の落下では微調整ができず, 過大あるいは過小に締め固められた試験体があった。これらの場合は, 錘落下による沈下量で密度を再計算し, 締固め度を補正している。最適含水比の結果は図中では黒色で, 低含水比は青色, 高含水比は赤色で描いている。また, 図中の各色の線は, 各試験条件の cE から求めた近似曲線であり, 各試験料土の分布傾向から, 図 9 の真砂土の場合には指数近似, 図 10 の関東ロームの場合には線形近似として描いた。

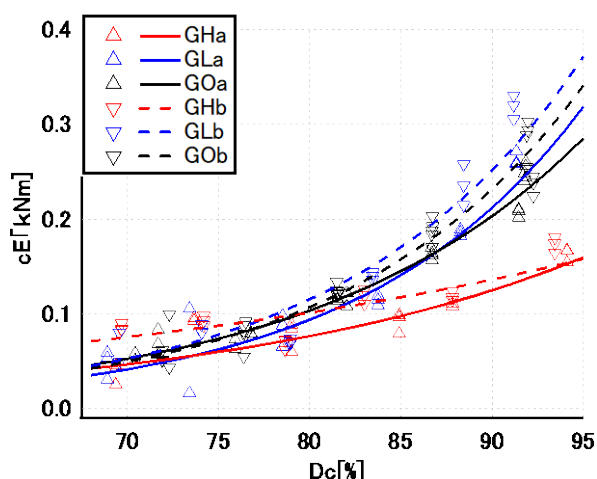


Figure 9. Relationship cE and compaction degree D_c of decomposed granite soil:

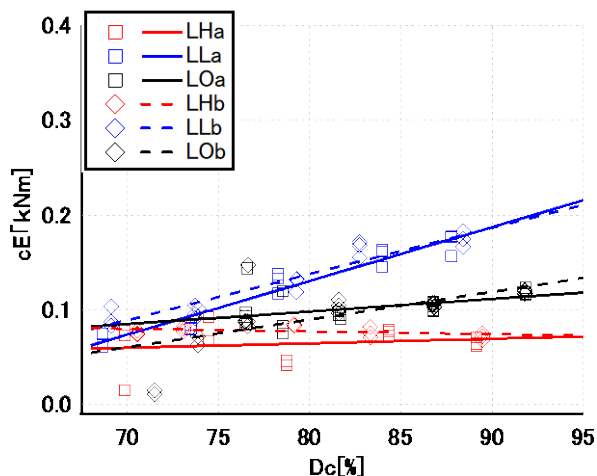


Figure 10. Relationship cE and compaction degree D_c of Kanto loam:

どちらの試料土も, 同一の試験条件間でばらつきはあるものの, 締固め度 D_c と cE の間に相関が見られる。また, 含水比によって D_c と cE の関係が変化していることがわかる。

真砂土の場合, 全ての含水比において, $D_c 70 \sim 80\%$ 近傍まで D_c に対する cE の変化量は小さく, 低含水比と最適含水比では, 80% を超えると変化量は増加している。また, 低含水比と最適含水比は同程度, 高含水比は明らかに小さい値であった。含水量が最適含水比を超えると

ロッドの回転に対する抵抗が下がり, 同一の締固め度であっても貫入エネルギーが下がる傾向にある。また, 全ての含水比において, 貫入深さ $0.25\text{m} \sim 0.50\text{m}$ の区間と $0.50\text{m} \sim 0.75\text{m}$ の区間で cE の値に差異が見られ, $0.50\text{m} \sim 0.75\text{m}$ の区間の方が大きい。

関東ロームの場合は, D_c に対する cE の変化は線形の関係にあり, 含水比によってその傾きが変化していることがわかる。高含水比の場合には傾きは非常に小さく, 最適含水比, 低含水比になるにつれて傾きが大きくなっていることがわかる。また, 貫入深さによる差異は真砂土に比べると小さい。

以上より, SDS 試験の結果から総貫入エネルギー cE を求め, その値から D_c を推定可能であることが示唆される。ただし, 真砂土においては, 本実験の結果では貫入深さが深いほど cE が大きいことから, より深い点における cE の変化を調査する必要がある。関東ロームにおいては, 含水量が最適含水比よりも大きい場合には D_c による cE の変化が無くなると考えられる。本実験の結果では, 関東ロームの高含水比は全ての D_c で載荷荷重の段階が初期あるいは次の段階であったため, cE に差が表れなかったと考える。より小さな載荷荷重で SDS 試験を行うことで, 含水量が最適含水比よりも大きい場合にも D_c を推定可能だと考える。

4. 土質判別の可能性

2章の図 5,6 より, 真砂土と関東ロームの間で EW に大きな差は無い一方で, ET には明確な差が見られた。このことから, ET と EW の比によって土質の違いを判別できると考えた。本実験の結果を cET/cEW と D_c でまとめ, 図 11 に示す。貫入深さ $0.50\text{m} \sim 0.75\text{m}$ 区間の結果を用いており, 破線は真砂土の近似曲線, 実線は関東ロームの近似曲線である。

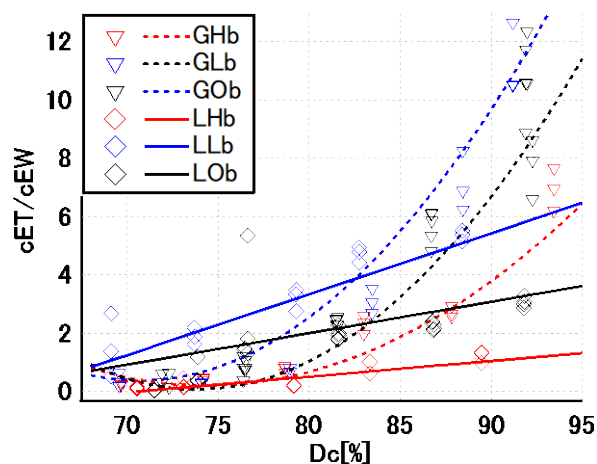


Figure 11. Relationship cET/cEW and D_c

関東ロームでは D_c に対して cET/cEW は線形に変化し, 真砂土では 2 次関数的に変化していることがわかる。ただし, 締固め度が低い場合には, 試料土間で cET/cEW が干渉しているため, 真砂土と関東ロームを区別できない

が、85～90%の間であれば明確な差異があり、判別可能である。また、真砂土の cE においては、最適含水比と低含水比の結果に大きな差は見られなかった（図 8 参照）が、 cET/cEW では明確に差が表れた。関東ロームにおいても含水比が異なると cET/cEW に明確に差異が表れている。この値を用いることで含水比推定の可能性が示唆されるが、本実験で扱った高含水比などは、最適含水比に対する相対的な含水量の多寡で表しているため、定量的な判断は困難であると考えられる。

本実験では真砂土と関東ロームを扱っており、その他の種類の土における挙動は不明であるが、真砂土のような砂質土系では 2 次関数的な変化、関東ロームのような粘性土系では 1 次関数的な変化となることが示唆される。

5. おわりに

本論文では、真砂土と関東ロームを材料とした盛土地盤において、SDS 試験で締固め度を推定する方法の基礎的研究として、模擬地盤における SDS 試験値と締固め度の関係、さらに、含水量が最適含水比より増減した場合の影響について調査した。本論文で得られた知見は以下の通りである。

- ・締固め度が低い模擬地盤では、載荷荷重が小さい段階での貫入量が大きく、貫入量が 25cm に到達するまでの荷重段階数が少ない傾向にある。締固め度が高くなるにつれ、ロッドが 1 回転する間の貫入量が減り、25cm 到達させるのに必要な載荷荷重も増えた。

- ・締固め度が同じ模擬地盤であっても、最適含水比よりも含水量が多い高含水比の場合は荷重段階数が少なく、低含水比では荷重段階数が多くなる傾向にあった。

- ・載荷荷重が同じ段階であっても、締固め度が高い方がエネルギートルク ET は大きい。また ET には含水量も影響しており、最適含水比の ET に比べて、低含水比で

は大きく、高含水比では小さい。エネルギーウエイト EW の大きさには締固め度や含水量の影響は少なく、載荷荷重が同じ段階における EW は概ね同じ値であった。

- ・本論文で提案した 25cm 区間の総貫入エネルギーである cE は、締固め度との相関が見られた。真砂土の場合は締固め度 85%程度から cE が急減に増大する指数的な傾向であった。関東ロームの場合は線形的な傾向であった。また、含水量によってこれらの傾向が変化し、真砂土の場合は最適含水比と低含水比において cE に大きな差は生まれず、高含水比では減少した。関東ロームの場合は、最適含水比に比べて低含水比では増加し、高含水比では減少した。

- ・本論文で提案した cET/cEW を用いることで、一定以上の締固め度を持つ地盤であれば、土質判別が可能であることが示唆された。

参考文献

- 1) 宅地防災研究協会:宅地防災マニュアルの解説, 第三次改訂版,株式会社ぎょうせい, pp.184-185, 2022.2
- 2) 吉井孝文, 大和眞一, 末政直晃, 田中剛: SDS 試験による凝灰質粘土と沖積粘土の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.517-518, 2014.9
- 3) 小山匠, 胡桃理治, 武智耕太郎, 田中伸治, 野村圭介: 盛土の締固め度と沈下に関する基礎的研究(その2)実物大模擬地盤の作成, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.601-602, 2021.9
- 4) 小山匠, 坂本智之, 武智耕太郎, 田中伸治, 野村圭介: 盛土の締固め度と沈下に関する基礎的研究(その4)模擬地盤による貫入試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.591-592, 2022.9

新任教員紹介

建築学科・特任准教授・篠原奈緒子

略歴

2001.03	東海大学工学部建築学科 卒業
2003.03	東海大学大学院工学研究科建築学専攻博士課程前期 修了
2003.04-2005.07	裕幸計装株式会社
2005.08-2007.12	株式会社日建アクトデザイン
2008.01-2022.03	株式会社日建設計
2016.04-2021.03	東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻 博士課程後期 博士・(工学)
2022.04-	(現在に至る)



担当科目

建築環境工学・演習、建築環境計画・演習、建築の理数学、入門ゼミナール、卒業研究、卒業論文・卒業設計、建築視環境計画特論、建築室内環境計画特論・同演習

研究活動内容

LED 照明によるウェルネスに配慮した照明環境に関する研究

1. はじめに

照明の LED 化により建築空間内で多種多様な光環境の提供が可能となり、これまで演出用のみ用いられていた白色光以外の有彩色光も一般的に用いられるようになった。特に、近年ではウェルネスへの注目の高まりから、機能としての照明のみならず雰囲気や生理的な影響についても考慮することが求められている。特に、ヒトの概日リズムが 24 時間に同調しているのには太陽光の影響が大きいと言われており、光とヒトの健康は密接に関わっている。

建築空間内で機能として求められる光は主に白色であるが、この白色はある程度幅を持っている。例えば、自宅の電球を選択するときは、電球色、白色、昼白色などの光源色の中から選ぶだろう。わかりやすく説明すると、赤みを帯びた白色光から青みを帯びた白色光の中から選択する。ただし光源色の中でも光色に幅があり、照明設計を行う際には、その空間を使用するヒトの行為、目的から最適な光色を選択して設計する。一般的には赤みを帯びた光色を選択した時には暗めに、青みを帯びた光色を選択した時には明るめにする。これは、Kruithof が示した快適範囲²⁾を参考にしている。しかし、LED 照明はその光源開発の手法により、同じ光色と定義されても色みが異なって見えることがある。これにより、これまで快適とされてきた光色でも色みによっては快適ではなくなる可能性があり、またその逆となる可能性もある。また、白色光以外の有彩色光の利用

も可能な時代に入り、照明色の選択肢は広がった。どのような光がウェルネスに貢献できるのか、については検討が始まったばかりである。

2. 研究の概要

2.1 白色光の明るさ、心理効果

白色光にはある程度の幅があることを前述した。一般的には電球色、白色のように光源色で表現されるが、同じ光源色でも光色に幅がある。一般的に光色は相関色温度で示される。電球色は相関色温度 2,600K~3,250K の範囲と JIS では定義されている³⁾。この範囲を色度図に示すと図 1 のようになる(電球色以外の光源色も併記した)。また、同じ光色(相関色温度)でも、光色が異なって見えることがある。これは、光色が黒体軌跡から外れていることが原因であるが、JIS⁴⁾では、黒体軌跡からの偏差 duv が $-0.02 \sim +0.02$ の範囲であれば同じ光色と定義している(図 1 に併記)。相関色温度 5000K の光でも、図 2 に示すように光色の見え方に違いがある(JIS で同じ光色と定義される $-0.02 \sim +0.02$ よりも狭い範囲である)。同じ光色と定義されるのに見た目の光色が異なることに着目し、明るさや光色の好ましさを調査した研究は多く行われている。ただし、実験方法の違い等により統一された見解は今のところない。

照明は、空間の利用目的等に合わせて設計される。主には相関色温度(光色)、照度、演色性(物体色をどの程度忠

実に再現できるか) などから検討する。ただし、5000K の照明器具を選定しても、光色の見えの違いによって空間の明るさや印象に与える影響が異なるのであれば、それも設計に加味するべきと考えられ、設計照度も変わる可能性がある。空間の利用目的に合わせて最適な色みの光色を選定して照明設計するために、同じ相関色温度、照度条件において、光色の見えの違いが明るさや視認性、作業性などに与える影響に関する研究を行っている。行為を想定したモデルを用いた被験者実験では、想定する行為や照明光の相関色温度によって傾向は少し異なるものの、 $duv-0.02\sim 0$ の光が明るく感じ心理評価も高かった⁵⁾。

2.2 ウェルネスへの対応

光はヒトの概日リズムに大きく影響し、曝露状況によっては健康被害も起こる。近年はヒトの健康や快適性への注目に高まっており、建築空間をヒトの健康の視点で評価、認証する WELL 認証制度⁶⁾もある。この制度はアメリカで始まったものであるが国内でも注目が高まっており、認証件数は増加傾向である⁷⁾。評価項目は、温熱、空気、水、音、光などの環境評価に加えて、食べ物や人間関係などの建築空間以外についても評価がされる。光環境については、昼光利用やまぶしさなどの視環境の快適性、概日リズムへの影響を与える光曝露に関する評価項目がある。

光は、明視のためのものとして考えられてきたが、近年、覚醒、睡眠リズムへ影響を与える視細胞 ipRGC が発見され、この視細胞への影響を加味した光環境計画が求められるようになった。ipRGC への影響度を示す物理量として、等価メラノピック照度⁸⁾がある。等価メラノピック照度は、青い波長域の光の量が多くなると高くなり、等価メラノピック照度が高くなると覚醒する。この指標を WELL 認証制度でも用いており、概日リズムへの影響を評価する。明視のために用いられる物理量である照度とは異なるため、照度が高い場合に等価メラノピック照度が高くなるとは限らない。青い波長域の光のコントロールにより、同じ照度でも覚醒しやすい、もしくはリラックスしやすい照明環境を作ることができる。一般的には、相関色温度が高くなることで覚醒すると言われ、高い相関色温度の青っぽい光は執務などの集中する空間などに、低い相関色温度の赤っぽい光は住宅のリビングなどリラックスする空間などに用いられる。ただし、相関色温度、照度が等しくても、2.1 で述べた見た目の光色が異なれば、等価メラノピック照度も異なる。

3. 今後の展望

光色の見えの違いが印象や作業性に与える影響に加えてウェルネス（等価メラノピック照度）にも配慮した照明計画を行うことで、ヒトの心理・生理の両方に効果的な照明環境の創出が可能となる。既往の研究では、心理的効果と生理的効果は両立しない場合が多いが、光色の見えの違いを考慮することで両立できる可能性もある。

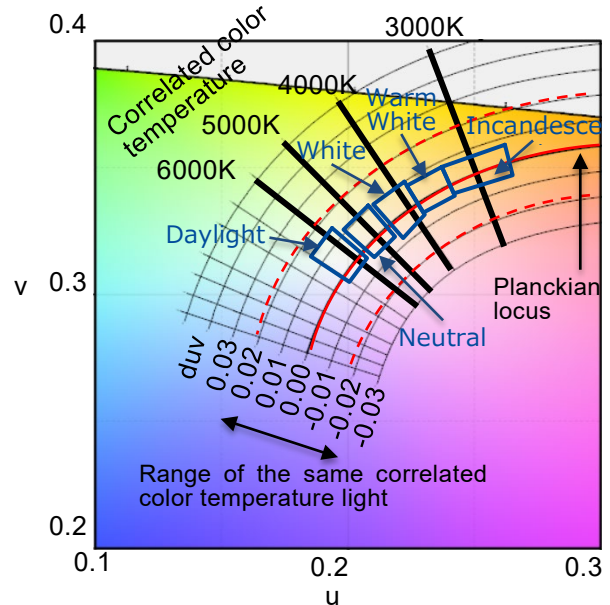


Fig. 1 Chromaticity and isocorrelated color temperature range for each light source color (CIE 1960 UCS chromaticity diagram).



Fig. 2 Difference in the appearance of light for each duv at 5,000K.

参考文献

- 1) C A Czeisler 1, R E Kronauer, J S Allan, J F Duffy, M E Jewett, E N Brown, J M Ronda : Bright light induction of strong (type 0) resetting of the human circadian pacemaker, *Science*, Vol. 244, Issue 4910, pp. 1328-1333 (1989-6)
- 2) Kruithof, A.: Tubular luminescence lamps for general illumination, *Philips Tech. Rev.*, 6, pp.65-96 (1941)
- 3) JIS Z 9112: 蛍光ランプ・LED の光源色及び演色性による区分 (2019)
- 4) JIS Z 8725 : 光源の分布温度および色温度・相関色温度の測定方 (2015)
- 5) N.Shinohara et al.: EFFECTS OF LIGHT WITH THE SAME CORRELATED COLOUR TEMPERATURE BUT DIFFERENT COLOUR OF APPEARANCE ON THE IMPRESSION OF A SPACE, *PROCEEDINGS of the 30th Session of the CIE Ljubljana, Slovenia, Vol.1-part2*, pp.1354-1359 (2023)
- 6) WELL Building Standard v2 (2022)
- 7) グリーンビルディングジャパン HP https://www.gbj.or.jp/well/about_well/ (accessed 2023-09-11).
- 8) CIE : CIE SYSTEM FOR METROLOGY OF OPTICAL RADIATION FOR IPRGC-INFLUENCED RESPONSES TO LIGHT, *CIE S 026/E* (2018)

新任教員紹介

建築学科・特任講師・須沢栞

略歴

- 2014.03 新潟大学工学部建設学科 卒業
- 2016.03 新潟大学大学院自然科学研究科環境科学専攻博士前期課程 修了
- 2021.03 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士課程 修了
- 2019.04-2021.03 日本学術振興会 特別研究員 DC2
- 2021.04-2023.03 日本女子大学家政学部住居学科 助手／助教
- 2023.04- (現在に至る)



担当科目

建築計画 A・B, 建築デザイン演習 1・2, 住宅論, 入門ゼミナール, 卒業研究, 卒業論文・卒業設計, 建築施設計画特論

研究活動内容

住環境の視点から考える住宅・地域計画, 平時と災害時をつなぐ居住支援

1. はじめに

これまで筆者は、東日本大震災後の応急仮設住宅や災害公営住宅の住宅供給や居住実態について明らかにし、今後必要とされる居住支援のあり方について検討を行ってきた。その中で、培われてきた問題意識は主に以下の2つである。

- ・住環境や居住の安定は、建物単体では評価できない：近隣や周辺も含めた物的・社会的環境やサービスに適切にアクセスできているかといった観点も重要となる。
- ・建物や空間があるのに利用できない人の存在：制度や社会的問題の解決や、情報支援や手続き支援といった居住支援も重要となる。

このような考えに至るようになった、これまでの主要な2つの研究の概要を次章で紹介する。なお、研究の詳細については、参考文献1, 2を参照されたい。

2. 研究の概要

2.1 応急仮設住宅のコミュニティを基盤とした近隣の災害公営住宅への移転事例（宮城県仙台市）

我が国の住まいの復興フェーズは、「仮住まい」、「本設住宅」と二段階に分かれており、居住地の移動に伴う環境移行（人間と周囲の環境との関係が変化すること）も2回に渡って生じる。環境移行の過程において、環境変化への適応に負荷が伴うことにより、主体にネガティブな影響（いわゆる、リロケーション・エフェクト）を及ぼす可能性があることが指摘されており、高齢者や障がい者など、特定の属性の人に対しては特に配慮が必要であると言われる

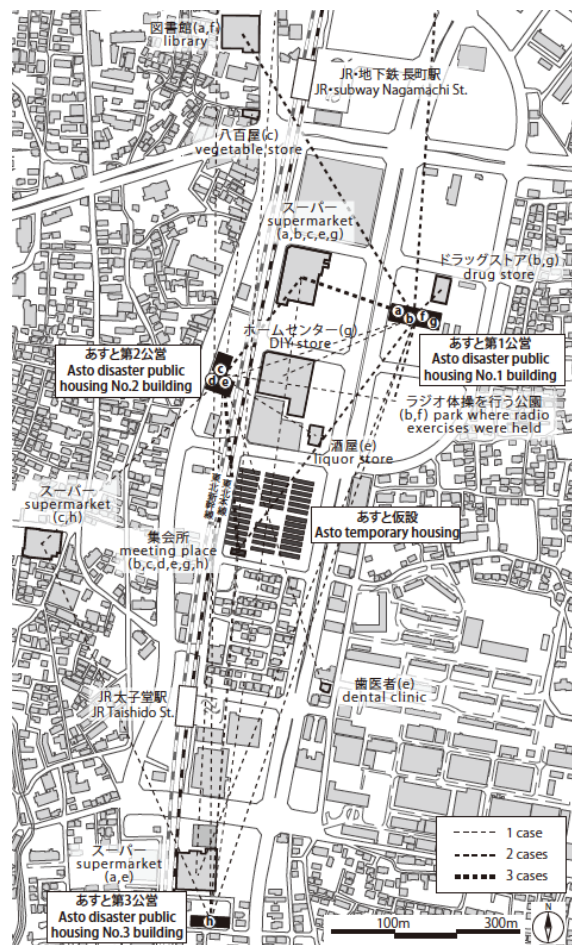


Fig. 1 Kept environment built in the temporary housing.
(出典：参考文献1, 一部加工)

ている。建築計画学分野では、応急仮設住宅から災害公営住宅への移行に伴う負荷を軽減する方法として、コミュニティのまとまりでの移転、慣れ親しんだ環境がある近隣への移転が有効であることが議論されてきた。

筆者らは、仮設住宅団地のコミュニティを基盤として災害公営住宅への近隣移転を行った仙台市の事例を対象として、住民へのインタビュー調査とアンケート調査を行い、その移行プロセスを明らかにし、環境移行の負荷軽減の観点から評価を行っている。結果として、災害公営住宅入居後も近所のスーパーや病院を継続して利用していること、そこでの挨拶や会話により交流が継続されていること等を明らかにし (Fig. 1), 有効な移転手法であると評価している¹⁾。

2.2 東日本大震災後の遠隔地避難者への居住支援に関する研究 (岩手県盛岡市)

東日本大震災以降、市町村や県境を跨いで仮住まいを確保する遠隔地避難が顕著であり、首都直下地震や南海トラフといった将来的な大規模災害においても遠隔地避難が生じることが予測されている。自治体を跨ぐことにより、遠隔地避難者は捕捉が難しいことや支援の対象から外れやすいことが課題として挙げられる。筆者は、東日本大震災において岩手県盛岡市によって行われた遠隔地避難者への居住支援の実態の解明を通して、将来的な大規模災害で求められる居住支援のあり方について検討を行っている。

具体的には、盛岡市で避難者を対象に居住支援を実施しているもりおか復興支援センター (以下、センター) の協力を得て、センターが作成した被災者台帳や支援記録の閲覧、センター職員や岩手県・盛岡市の行政職員など関係者へのインタビューを行った。その結果、盛岡市に遠隔地避難した後、元の居住地に戻らずに避難先の盛岡市に留まり続ける世帯が5割を超えていることや (Fig. 2), 盛岡市に留まる世帯の方が、元の市町村に戻る場合や別の市町村に移る世帯と比較して、住宅確保要配慮者 (特に障がい者、低所得の属性) に該当する割合が高いことが明らかになった (Fig. 3)。また、支援制度の多くは被災時の自治体に紐づいているため、避難先の支援団体は被災自治体とのやり取りが必要となるが連携に課題があること、盛岡市では発災後に有志市民により結成された団体 (後に法人化) が居住支援を担っており、資金繰りの課題や支援体制を確立するのに労力を要するといった状況も見えてきた²⁾。

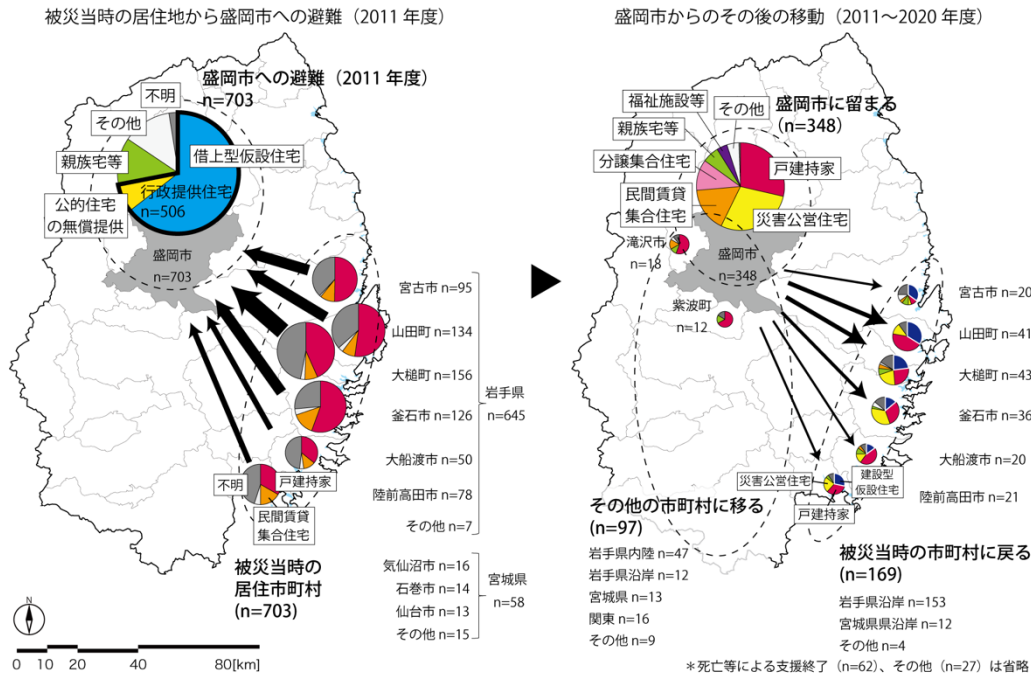
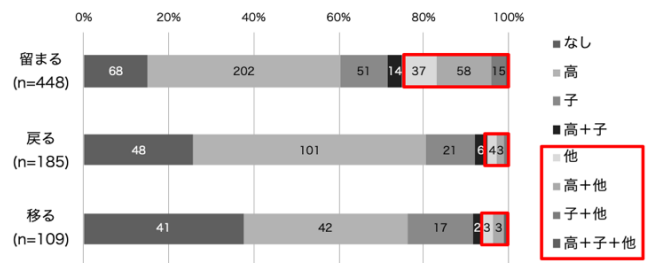


Fig. 2 Residential relocation to/from Morioka city. (出典：参考文献 2)



凡例の「高」は高齢者を含む世帯、「子」は子育て世帯、「他」は障がい者を含む、低所得に該当する世帯等を示している。

Fig. 3 Percentage of people requiring special assistance in securing housing by residential pattern. (出典：参考文献 2)

3. おわりに／今後の展望

これまでの研究では、建築を単体でみるのではなく、近隣や周辺を含めた住環境の評価や、居住支援といった観点で研究を行い、計画手法の検討を行ってきた。これまでの被災地や災害後の住まいを対象に調査研究を行うことが多かったが、そこでの課題は平時に共通するものも多い。今後は、東海大学界限にもフィールドを広げ、実践的な研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 須沢菜, 新井信幸, 岩佐明彦, 黒野弘靖, 大月敏雄, 井本佐保里, 仮設住宅コミュニティを基盤とした復興公営住宅への近隣移転の有効性 環境移行の視点からの検証, 日本建築学会計画系論文集, Vol.83, No.750, pp.1391-1401(2018)
- 2) 須沢菜, 複線型復興プロセスに向けた東日本大震災における遠隔地避難者への居住支援に関する研究, 東京大学学位論文(2021)

東海大学建築都市学部紀要委員会

委員長 後藤 純
委員 笠井 哲郎 竹下 秀

EDITORIAL COMMITTEE OF PROCEEDINGS OF
THE SCHOOL OF ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING
TOKAI UNIVERSITY
Chairman Jun Goto
Members Tetsuro Kasai Shu Takeshita

本紀要は、学術刊行誌である。掲載可と判定された原著論文で
建築都市学部紀要委員会で査読・審査を受けたものである。

東海大学 建築都市学部 紀要

Vol. 2 No. 1 2023
2023年 11月30日

発行者 東海大学建築都市学部
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目4丁目1番1号
School of Architecture and Urban Planning, Tokai University
4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa-ken. Japan
