

近畿建設協会研究助成
発表論文集



一般社団法人

近畿建設協会

論 文 集

目 次

1. 3次元数値流体解析による地すべり津波の生成・伝播機構の解明
近畿大学 理工学部 社会環境工学科 准教授 高畠 知行 . . . 1
2. AE法と耐震工学の融合による地震後の橋梁用ゴム支承の損傷度評価指標の開発
立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授 川崎 佑磨 . . . 11
3. 災害時の最適な避難経路を示すためのドローンを用いたシステム(SEN)の作成
和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 横田 恭平 . . . 17
4. ゴム繊維くずを有効利用した高靱性人工地盤材料の開発
香川高等専門学校 建設環境工学科 教授 荒牧 憲隆 . . . 29
5. 橋梁部材のコンクリートに生じたひび割れの自己治癒に関する研究
神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授 水越 睦視 . . . 37
6. 液状化による地盤大変形および対策工の評価シミュレータの開発
京都大学大学院 経営管理研究部 教授 肥後 陽介 . . . 45
7. デジタルツインとゲームエンジンを活用した暑熱環境リスクの可視化
関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 教授 安室 喜弘 . . . 53

※所属等は2025年5月時点のもので、助成選定時とは異なる場合がございます。

3 次元数値流体解析による地すべり津波の生成・伝播機構の解明

近畿大学理工学部 准教授 高島知行

1. 研究目的

津波は、地震動によって発生することがほとんどであるが、海底地滑りや山体崩壊など、大規模な地すべりに伴い発生することもある。実際に、2018 年にインドネシア・スラウェシ島の港湾都市パルを襲い、4,000 名以上の死傷者を発生させた津波は海底地すべりにより生成されたことが、現地調査結果^{1),2)}などから明らかになっている。また、同年 12 月には、インドネシアのスダ海峡に位置するアナク・クラカタウ火山が山体崩壊し、ジャワ島、スマトラ島沿岸部に津波被害を発生させた³⁾。加えて、2024 年能登半島地震の際に富山湾を襲った第 1 波は、海底地すべり津波による可能性が高いことが報じられている⁴⁾。

こうした地すべり津波は、日本国内の様々な沿岸域で将来の発生が懸念されている。実際に多くの原子力発電所や臨海施設が、地すべり津波に対する検討を行っている。しかしながら、地すべり津波に関する研究事例は少なく、津波の生成・伝播機構については未解明な部分が多いため、有効な防災対策の策定が進んでいないのが現状である。特に地すべり津波は、地すべり塊と水面の位置関係に応じて陸上・半没水・海底地すべり津波の 3 種類に分類できるが、地すべり形態の違いが津波の生成・伝播機構（生成される津波の最大高さや最大流速、伝播に伴う津波高の減衰量など）にどのような影響を及ぼすのかについてはほとんどわかっていない。研究代表者は、2018 年のパル津波以降、こうした地すべり形態の違いに着目し、陸上・半没水・海底地すべり津波の全てを対象とした水理実験を実施し、各形態の特性解明に取り組んできた⁵⁾。しかしながら、実施した水理実験⁵⁾では水位変動のみを計測対象としており、流速変動を計測していないため、地すべり形態の違いが津波の生成・伝播機構に及ぼす影響を完全に解明するには至っていない。

以上を踏まえて本研究では、オープンソースの 3 次元数値流体解析ツールである OpenFOAM を活用し、数値解析によって地すべり形態の違いが津波の生成・伝播機構に及ぼす影響を解明することを目指す。具体的には、研究代表者が実施した地すべり津波実験（陸上・半没水・海底地すべり全てを対象とした実験）⁵⁾の再現解析を行い、実験で得られた水位変動と解析結果として得られる水位変動を比較することにより、地すべり津波形態ごとの OpenFOAM の解析精度を検証する。さらに、解析により得られた地すべり津波内の流速変動を抽出・分析するとともに、解析対象とした全ケースについての第 1 波の最大水位、第 1 波の最大水位発生時の水平方向流速の鉛直分布、第 1 波の最大水位の減衰過程に着目し、地すべり形態の違いによる影響を分析する。これらを通じて、地すべり形態の違いが津波の生成・伝播機構に及ぼす影響を、既往実験では計測できていなかった流速場を含めて、より包括的に明らかにすることを目指す。

2. 研究方針・経過

本研究では、既往実験⁵⁾で用いた 2 次元長水槽（長さ 14.5 m、幅 0.02 m、高さ 0.8 m）を OpenFOAM 内にモデル水槽として再現した（図 1）。ただし、計算負荷を軽減するため、水槽幅を 0.4 m から 0.02 m に、長さを 14.5 m から 12 m に縮小してモデル化した。解析に用いた水の密度および動粘性係数はそれぞれ 1.000 kg/m^3 および $1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ であり、空気については密度を 1.00 kg/m^3 、動粘性係数を

$1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。地すべり塊（実験ではガラスビーズを使用）の密度は $2,500 \text{ kg/m}^3$ に設定した。実験では地すべり塊はガラスビーズの集合体であるため多孔性（空隙率 35%）を有している。これを解析で再現するため、解析では地すべり塊内部の空隙部には空気または水を充填した。また、数値解析では地すべり塊をニュートン流体としてモデル化し、その動粘性係数については別途感度解析を実施し最も適切な値を採用することとした。数値解析の精度評価は、実験と同じ位置に設置した 4 つの波高計（WG）で得られた水位変動の時系列データを用いて行った（図 1）。

既往実験⁵⁾では、水深、斜面角度、地すべり塊の重量などを変化させ 200 通り以上の実験を実施しているが、本研究では、これらの中から陸上地すべり 27 ケース、半没水地すべり 42 ケース、海底地すべり 27 ケースの合計 96 ケースを抽出して再現解析を行った。各ケースで設定したパラメタは、斜面角度（ θ ）、地すべり塊の質量（ m ）、初期水深（ h ）、地すべり塊の初期位置（ h_i ）、気中高さ（ h_a ）、没水深（ h_s ）であり、それらの設定範囲を表 1 に示した。地すべり形態ごとの各パラメタの詳細な定義は、図 2 に示す通りである。また、表 1 には、これらのパラメタを無次元化したものの範囲も示している。具体的に用いた無次元パラメタは、相対地すべり質量： $M = m/(p_w b h^2)$ 、相対気中高さ： $A = h_a/h$ 、相対没水深： $S = h_s/h$ 、相対位置： $I = h_i/h$ 、相対流下方向距離： $X = x/h$ である（ここで、 p_w ：水の密度、 b ：水槽幅、 x ：地すべり斜面下端から波高計までの距離である）。

本研究ではまず全 96 ケースについて解析を実施し、第 1 波の最大・最小水位、第 2 波の最大水位、第 1 波の周期、波速、波長を実験結果と比較することで、各地すべり形態ごとの解析精度を定量的に評価した。その後、第 1 波の最大水位、第 1 波の最大水位発生時の水平方向流速の鉛直分布、第 1 波の最大水位の減衰率のそれぞれを目的変数に、各無次元パラメタを説明変数に設定した多変量回帰分析を実施した。最終的に得られた回帰式を地すべり形態ごとに比較することで、地すべり形態の違いが各目的変数に与える影響の程度を定量的に分析した。

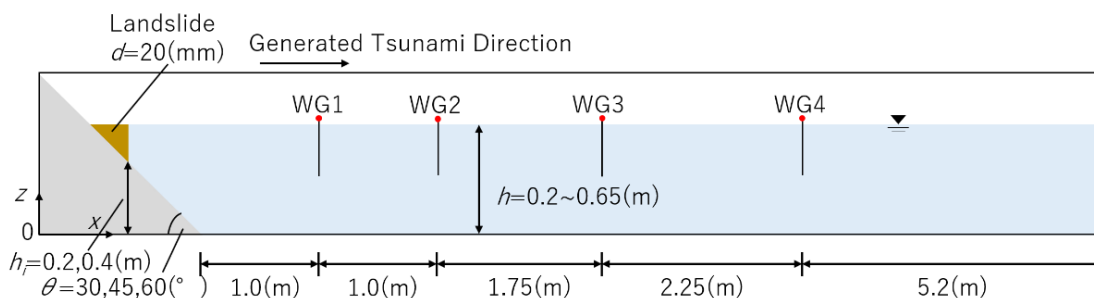


図 1 数値解析に用いたモデル水槽の概要図と波高計設置位置

表 1 数値解析における各パラメタの設定範囲

Parameters	Subaerial	Partially submerged	Submarine
θ (°)	30, 45, 60	30, 45, 60	30, 45, 60
m (kg)	5, 10, 15	5, 10, 15	5, 10, 15
h (m)	0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40	0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55	0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65
h_i (m)	0.40	0.20, 0.40	0.20, 0.40
M	0.08–0.94	0.04–0.60	0.03–0.23
A	0.31–2.15	0.02–0.93	–
S	–	0.11–0.56	0.03–0.44
I	1.00–2.00	0.44–0.89	0.33–0.73
X	2.50–30.00	1.67–24.00	1.54–15.00

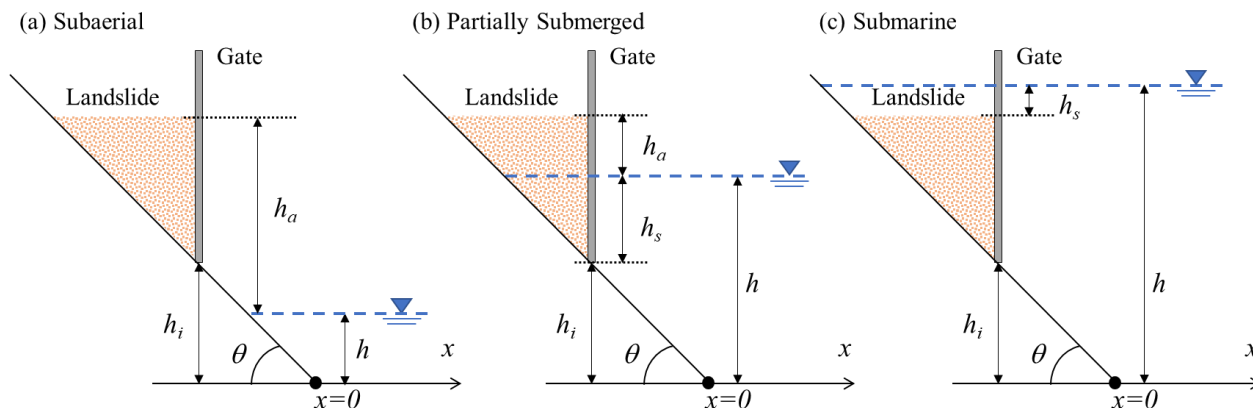


図 2 解析に用いたパラメタの定義

3. 研究結果

全 96 ケースの解析を実施する前に、メッシュサイズと地すべり塊（解析ではニュートン流体として表現）の動粘性係数の数値を決定するための感度分析を実施した。感度分析は、次の条件を有する半没水地すべり津波を対象として実施した（ $\theta=45^\circ, m=10\text{ kg}, h=0.5\text{ m}, h_i=0.4\text{ m}, h_a=0.08\text{ m}, h_s=0.1\text{ m}$ ）。水槽全体に設定するメッシュサイズは 0.02 m , 0.01 m , 0.005 m の 3 種類、地すべり塊の動粘性係数は $1.0\times 10^{-2}\text{ m}^2/\text{s}$, $1.0\times 10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}$, $1.0\times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ の 3 種類を用意し、これらの組み合わせに基づく合計 9 ケースの解析を実施した。図 3 に、感度解析の結果として得られた水位変動量（ η ）の時系列変化を示す。各列はメッシュサイズ（左から順に 0.02 m , 0.01 m , 0.005 m ），各行は波高計（上から順に WG1,

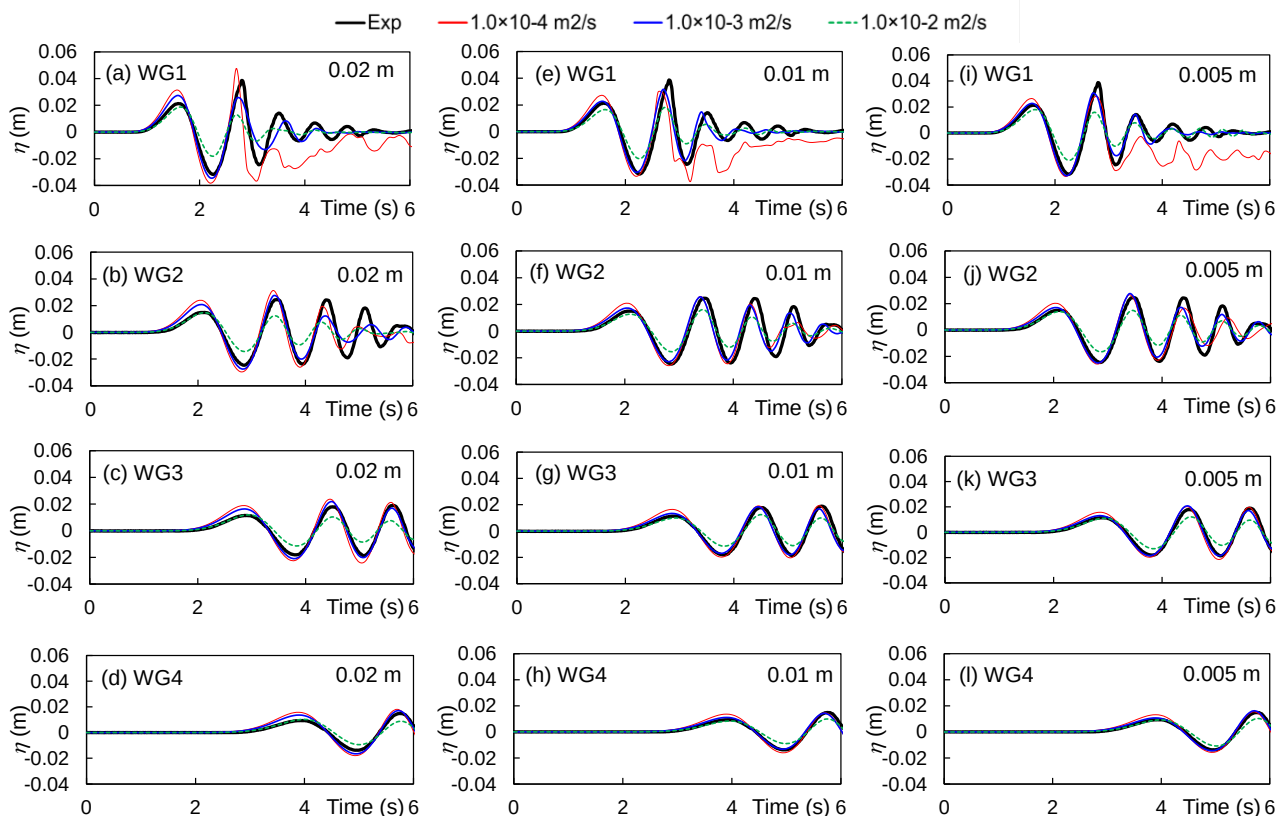


図 3 異なるメッシュサイズおよび動粘性係数における水位時系列の解析結果の比較：(a)～(d)メッシュサイズ 0.02 m , (e)～(h) 0.01 m , (i)～(l) 0.005 m

WG2, WG3, WG4) を示し、各グラフに 3 種類の動粘性係数での解析結果を併せて示している。同図より、波高計の位置が地すべり斜面から遠くなるほど、実験結果と解析結果の一致度が高くなる傾向が確認できる。また、メッシュサイズの違いによる影響を見ると、0.02 m の場合は、0.01 m および 0.005 m の場合と比べて、実験結果との誤差がやや大きくなることが明らかとなった。一方で、メッシュサイズ 0.01 m と 0.005 m の解析結果にはほとんど差異が認められなかった。これらの結果を踏まえ、計算精度と解析効率のバランスを考慮し、本研究の全 96 ケースの解析には 0.01 m のメッシュサイズを用いることに決定した。動粘性係数については、本感度解析で用いたケースにおいては、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ が実験結果との整合性が最も高かった。しかし、その後の検討により、解析条件によっては他の動粘性係数の方が実験結果との整合性が高い場合もあることが判明した。そこで全 96 ケースの解析では、動粘性係数を $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ の 3 種類に変化させたキャリブレーション解析を個別に実施し、最も高い予測精度を示した結果を最終的な解析結果として採用することとした。この際の精度評価の指標には、第 1 波の最大水位についての実験結果と解析結果の平均絶対パーセント誤差 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) を用いた。

図 4 は、地すべり塊の動粘性係数を各ケースでキャリブレーションして得られた全 96 ケースにおける水位の比較結果を示している。左列には第 1 波の最大水位 (a_{c1}/h)、中央列には第 1 波の最小水位 (a_{t1}/h)、右列には第 2 波の最大水位 (a_{c2}/h) の結果を示している。各図には 4 つの波高計 (WG) の結果を全てプロットしている。図の最上段は全 96 ケース (合計 384 プロット) の結果を示し、2 段目以降では斜面角度別 (上から 45° , 30° , 60°) に解析結果を示している。

同図から、まず第 1 波の最小水位 (a_{t1}) は全体的に過小評価となる傾向が確認された (図 4b)。これは動粘性係数の設定を、第 1 波の最大水位 (a_{c1}) の予測精度を基準に行った影響によるものと考えられる。また、第 2 波の最大水位 (a_{c2}) の解析結果は、全体的にばらつきが大きく (図 4c)、特に半没水地すべりのケースでは、すべての斜面角度において過小評価の傾向が顕著であった。なかでも斜面角度 30° のケースでその傾向が最も強く現れた。一方で、海底地すべりのケースでは多くのプロットが実線 (完全一致ライン) 付近に集中しており、解析結果が比較的安定していることが分かった。陸上地すべりの場合は、斜面角度が小さいほど第 2 波の最大水位が過小評価されるが、斜面角度が大きくなるにつれて実線付近に近づき、斜面角度 60° では逆に過大評価となる傾向が確認された。

次に、地すべり津波の形態ごとに解析精度を定量的に評価するため、各ケースにおける平均絶対パーセント誤差 (MAPE) を算出した結果を表 2 に示す。同表に示す通り、陸上、半没水、海底地すべり津波における第 1 波の最大水位 (a_{c1}) の MAPE は、それぞれ 16.3%, 16.5%, 25.9% であった。陸上および半没水地すべり津波の結果を見ると、MAPE は第 1 波の最大水位 (a_{c1}) で最も小さく、第 1 波の最小水位 (a_{t1})、第 2 波の最大水位 (a_{c2}) の順に誤差が増加する傾向があることがわかった。一方で海底地すべりでは、第 1 波の最大水位 (a_{c1}) の誤差が最も大きく、第 1 波の最小水位 (a_{t1}) の誤差が最も小さいという、陸上および半没水地すべりとは異なる傾向が示された。このことから、地すべり形態の違いが、津波の水位予測精度に明確な影響を及ぼしていることがわかった。

斜面角度ごとの解析精度を比較すると、斜面角度が 60° の場合、陸上および半没水地すべり津波では誤差が最大となる一方、海底地すべり津波では誤差が 20% 以下に収まることになった。また、半没水地すべりにおいては、斜面角度 45° での第 1 波最小水位 (a_{t1}) の MAPE が最も高く、斜面角度 60° では逆に第 1 波最小水位の MAPE が最も低いなど、斜面角度による精度の変動が顕著に見られることがわかった。

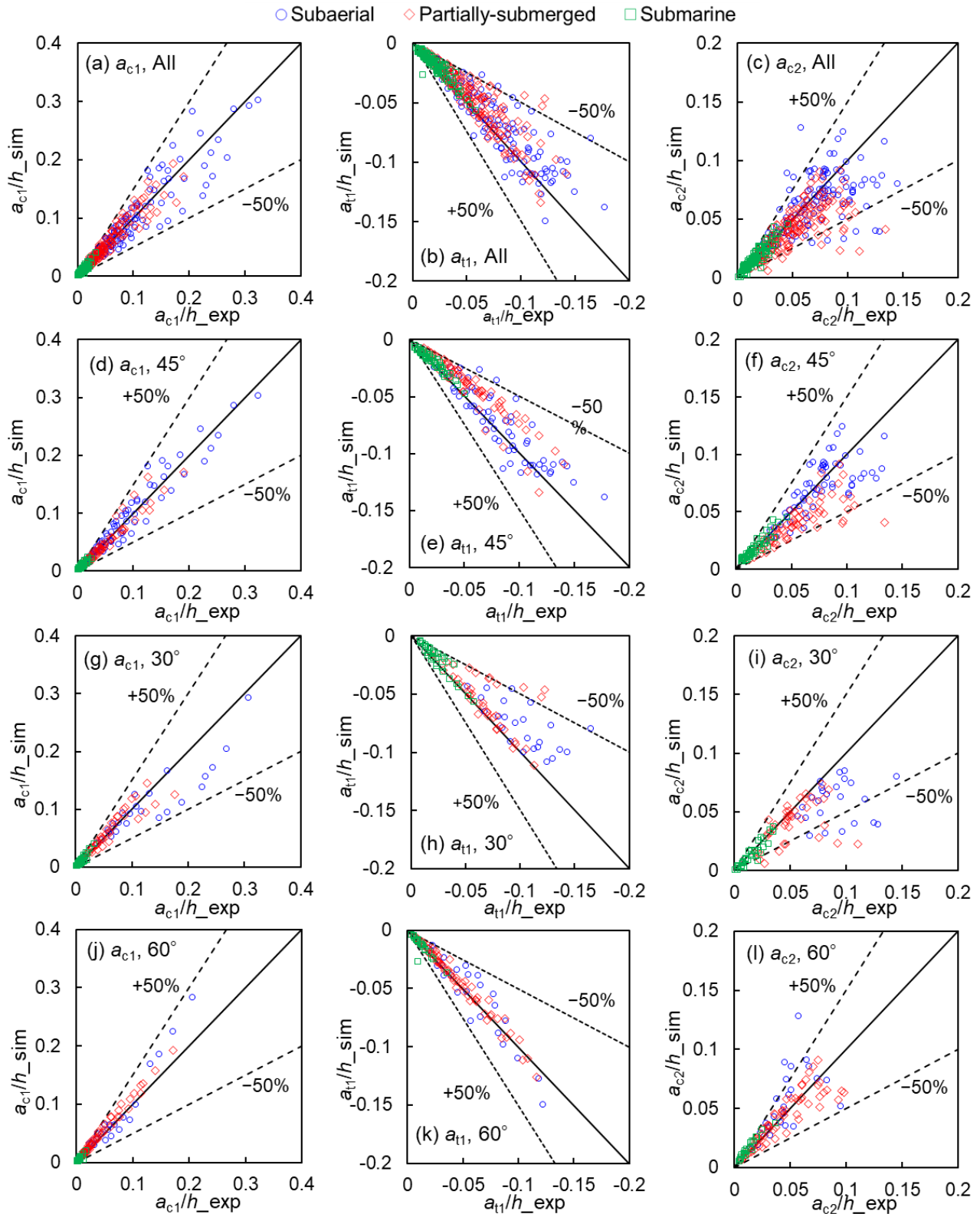


図 4 実験結果と解析結果の最大水位・最小水位の比較：青丸は陸上，赤菱形は半没水，緑四角は海底地すべりの比較結果を示す。実線は完全一致を，点線は 50% の誤差範囲を示す。

表.2 最大水位・最小水位に関する平均絶対パーセント誤差 (MAPE) の比較

	Subaerial	Partially submerged	Submarine
a_{c1} for all	16.27	16.45	25.87
a_{c1} for 45°	15.06	12.85	27.14
a_{c1} for 30°	16.89	15.97	27.60
a_{c1} for 60°	18.66	20.35	19.57
a_{t1} for all	18.58	18.15	15.58
a_{t1} for 45°	16.19	27.35	12.99
a_{t1} for 30°	23.09	17.93	21.05
a_{t1} for 60°	20.06	9.09	14.06
a_{c2} for all	24.10	21.66	20.93
a_{c2} for 45°	17.12	26.38	16.81
a_{c2} for 30°	33.03	24.05	25.52
a_{c2} for 60°	32.61	15.45	25.13

図 5 に、動粘性係数をキャリブレーションして得られた全 96 ケースについて、周期・波長・波速に関する実験結果と解析結果の比較を示す。同図では左列から順に、第 1 波の周期 (T_{c1})、波速 (C_{c1})、波長 (L_{c1}) の結果を表している。ここで周期は、各波高計 (WG) における第 1 波と第 2 波の波頂到達時間の差から算出した。波速は、隣接する波高計間の距離を第 1 波の波頂が通過する時間で割って求め、波長は、隣接する波高計間で算出された波速とそれら波高計における周期の平均値の積として算出した。図 5 の上段には全ての斜面角度の結果を示し、2 段目以降は、斜面角度別 (上から順に 45°, 30°, 60°) の結果を示している。これらの MAPE を表 3 に示した。

図 5 および表 3 示す通り、地すべり形態を問わず、全体として周期・波速・波長の MAPE は水位の MAPE よりも低く、数値解析によって良好に再現されていることが分かった。特に海底地すべり津波では、第 1 波の周期 (T_{c1}) のプロットがほぼ実線上に集中しており、OpenFOAM が海底地すべり津波の周期を高い精度で再現できることが確認された。実際、表 3 を見ると、海底地すべり津波における周期 (T_{c1}) の MAPE は 4.7% と非常に低い値を示している。一方、陸上地すべり津波の場合、周期は水位より高精度で再現されているものの、斜面角度が緩やかになるほど過小評価する傾向が認められた。波速 (C_{c1}) に関しては、海底地すべり津波が最も高い MAPE を示し、次いで半没水地すべり津波、陸上地すべり津波の順に低下した。この傾向は周期 (T_{c1}) とは逆であり、周期では陸上地すべり津波が最も高い MAPE を示していた。波長 (L_{c1}) については、周期と波速を掛け合わせて算出される特性上、周期の MAPE が最も低かった海底地すべり津波と、波速の MAPE が最も低かった陸上地すべり津波の中間に位置する半没水地すべり津波で最も低い MAPE (9.1%) が得られた。

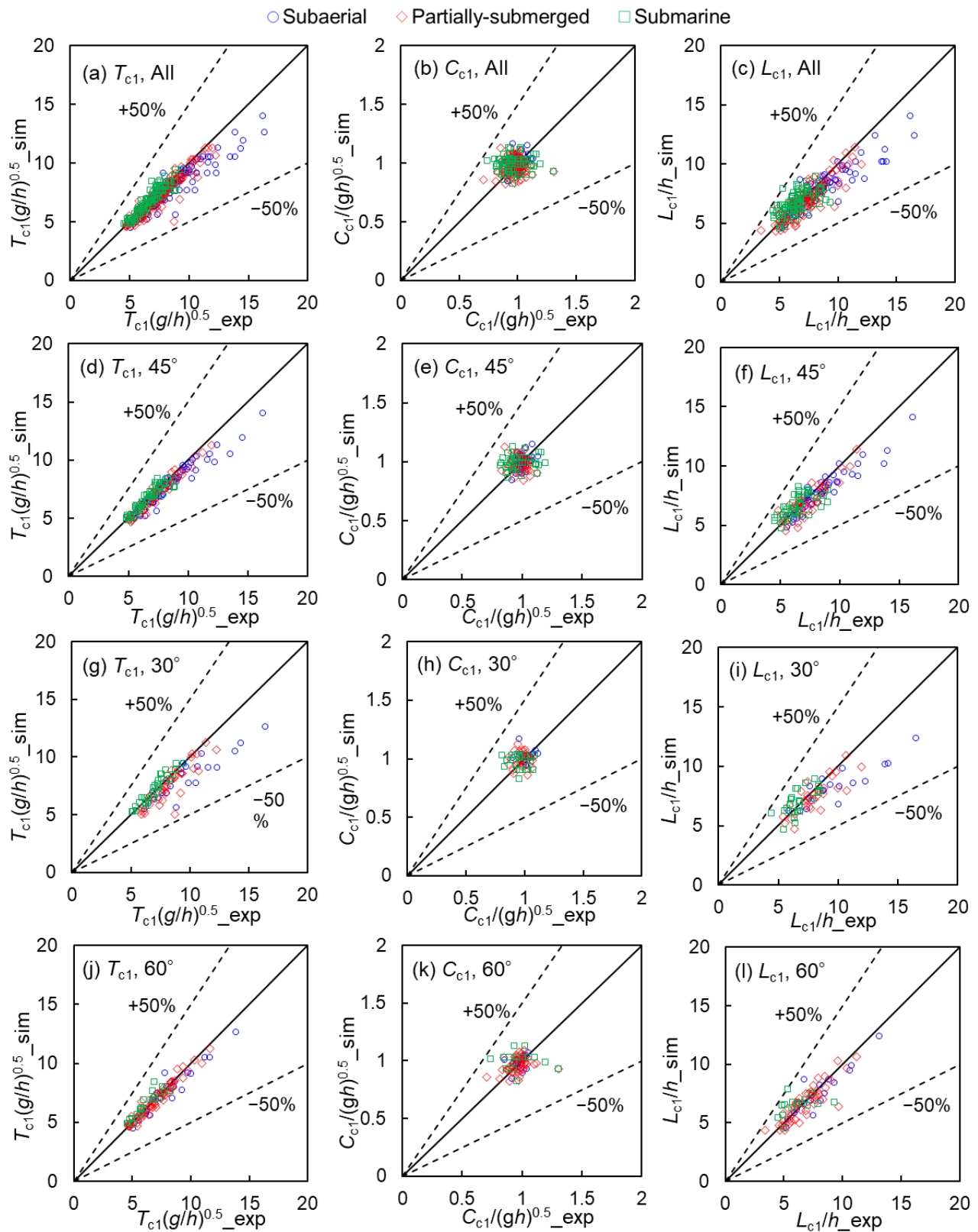


図 5 実験結果と解析結果の周期（左列），波速（中央列），波長（右列）の比較：実線は完全一致を，点線は 50% の誤差範囲を示す。

表3 周期、波速、波長に関する MAPE の比較

	Subaerial	Partially submerged	Submarine
T_{c1} for all	9.08	5.63	4.69
T_{c1} for 45°	7.98	5.05	3.96
T_{c1} for 30°	13.62	8.75	4.95
T_{c1} for 60°	7.29	4.27	6.32
C_{c1} for all	4.78	6.96	9.98
C_{c1} for 45°	4.81	7.52	9.32
C_{c1} for 30°	4.72	6.41	9.19
C_{c1} for 60°	4.77	6.74	13.10
L_{c1} for all	10.22	9.10	12.18
L_{c1} for 45°	9.05	8.83	10.95
L_{c1} for 30°	15.04	9.81	11.78
L_{c1} for 60°	8.32	8.92	16.26

これまでの解析結果を踏まえ、地すべり津波の生成・伝播機構をより詳細に分析するため、回帰式を導出した。具体的には、解析で得られた第1波の最大水位、第1波の最大水位発生時の水平方向流速の鉛直分布（WG1 地点）、および第1波の最大水位の減衰率を目的変数とし、各無次元パラメータを説明変数として多変量回帰分析を実施した。以下に、各目的変数について導出した回帰式を地すべり形態ごとに示す。まず、第1波の最大水位（ a_{c1} ）について得られた回帰式を式（1）～（3）に示す。

$$\frac{a_{c1_subaerial}}{h} = 0.718M^{1.323}A^{-0.619}I^{0.537}(\tan\theta)^{0.275}X^{-0.351} \quad (1)$$

$$\frac{a_{c1_partially\ submerged}}{h} = 0.447M^{1.210}S^{-0.331}I^{0.591}(\tan\theta)^{0.107}X^{-0.351} \quad (2)$$

$$\frac{a_{c1_submarine}}{h} = 0.970M^{1.273}S^{1.431}I^{-0.037}(\tan\theta)^{-0.449}X^{-0.043} \quad (3)$$

次に、第1波の最大水位発生時の水平方向流速（ v_x ）の鉛直分布（WG1 地点）について得られた回帰式を式（4）～（6）に示す。

$$\frac{v_{x_subaerial}}{\sqrt{gh}} = 0.251M^{1.083}A^{-0.889}I^{1.051}(\tan\theta)^{0.213}Z^{0.225} \quad (4)$$

$$\frac{v_{x_partially\ submerged}}{\sqrt{gh}} = 0.180M^{1.029}S^{-0.434}I^{0.231}(\tan\theta)^{0.105}Z^{0.213} \quad (5)$$

$$\frac{v_{x_submarine}}{\sqrt{gh}} = 0.459M^{1.147}S^{-0.004}I^{1.303}(\tan\theta)^{0.061}Z^{0.211} \quad (6)$$

ここで、新たに導入した無次元パラメータ（ $Z = z/h$ ）は、水底を基準とした水底からの相対鉛直高さである。最後に、第1波の最大水位の減衰率（ AR ）の回帰式を式（7）～（9）に示す。ここで減衰率は、WG1 地点の第1波最大水位を基準としたもので、WG1 地点の第1波最大水位と各地点（WG2～WG4）の第1波最大水位との差をWG1 地点の第1波最大水位で除した値として算出している。

$$AR_{subaerial} = 0.075M^{-0.407}A^{0.800}I^{-1.936}(\tan\theta)^{-0.336}X^{0.673} \quad (7)$$

$$AR_{partially\ submerged} = 0.028M^{-0.383}S^{-0.120}I^{-0.622}(\tan\theta)^{0.045}X^{0.654} \quad (8)$$

$$AR_{submarine} = 0.066M^{-0.212}S^{-0.083}I^{0.268}(\tan\theta)^{0.708}X^{-0.018} \quad (9)$$

図6に各目的変数について、解析結果（横軸）と回帰式から算出した予測値（縦軸）を比較した結果を示す。左列が陸上地すべり、中央列が半没水地すべり、右列が海底地すべり津波に対応している。同図より、地すべり形態や目的変数にかかわらず、多くのプロットが誤差50%以内に収まっていることが確認できる。この結果は、第1波の最大水位、その最大水位発生時の水平方向流速の鉛直分布、

および第 1 波の最大水位の減衰率が、地すべりの初期条件を示す各無次元パラメータと強い関連性を持ち、それらのパラメータから推定可能であることを示している。すなわち、複雑な 3 次元数値解析を実施しなくても、地すべりの初期条件からこれらの物理量を簡易的に推定できる可能性を示唆しており、今後の地すべり津波解析の効率化に大きく貢献する知見であると考えられる。

各回帰式のパラメータ係数について比較すると、第 1 波の最大水位および最大水位発生時の水平方向流速においては、相対地すべり重量 (M) が最も大きな係数を示しており、地すべり形態によらず、重量が津波の規模や流速を決定する最も支配的な要因であることが明らかとなった。一方、第 1 波の減衰率に関しては、全ての地すべり形態において相対地すべり重量 (M) の係数は比較的小さい傾向が確認された。これらの結果は、地すべり津波が、地すべり重量が大きくなるほど大きな津波と流速を発生させ、さらに津波の減衰が起こりにくくなるという共通の特性を有していることを示している。斜面角度 ($\tan \theta$) の影響に着目すると、陸上および半没水地すべりでは斜面角度が急になるほど第 1 波の最大水位が大きくなる傾向が見られた。一方、海底地すべりでは逆に斜面角度が緩やかなほど津波が大きくなるという特徴が明らかとなった。相対流下方向距離 (X) の係数についても、海底地すべりでは顕著に小さく、第 1 波の伝播に伴う減衰が陸上および半没水地すべりよりも小さいことを示している。この傾向は、第 1 波の減衰率に関する回帰式において、相対流下方向距離 (X) の係数が海底地すべりではほぼゼロに近い値を示していることから裏付けられる。流速の鉛直分布に関する解析では、全ての地すべり形態で水面に近いほど流速が大きくなる傾向 (Z の係数が正) が確認された。また、その原因については更なる解析が必要であるが、半没水地すべりの場合には、相対位置 (I) の影響が陸上および海底地すべりと大きく異なる傾向を示したことも新たな知見として得られた。

4. まとめ

既往の地すべり津波実験⁹⁾の再現解析を網羅的に実施した結果、水位の解析精度には地すべり形態による明確な影響があることが明らかになった。具体的には、陸上および半没水地すべり津波では第 1 波の解析精度が高いのに対し、海底地すべり津波では第 2 波の解析精度が高くなる傾向が確認された。一方で、周期・波速・波長については地すべり形態にかかわらず良好な解析精度が得られることがわかった。また、多変量回帰分析の結果、第 1 波の最大水位、その最大水位発生時の水平方向流速の鉛直分布、および第 1 波の最大水位の減衰率のいずれもが、地すべりの初期条件を表す各無次元パラメータと強い関連性を持つことが示された。特に、地すべりの初期条件と流速との間に明確な関連性が実証されたことは、本研究が世界で初めて明らかにした新しい知見であり、地すべり津波研究の発展に大きく寄与する成果である。これらの結果は、複雑で計算負荷の高い 3 次元数値流体解析を用いずとも、簡易的に水位・流速を推定できる可能性を示唆しており、今後の地すべり津波解析技術の効率化に繋がる重要な成果でもある。導出した回帰式の係数を地すべり形態ごとに比較すると、地すべり重量が最大水位や流速、減衰率に最も大きく影響する共通の因子であることがわかった。一方で、斜面勾配の影響や津波の減衰過程については、海底地すべり津波と陸上・半没水地すべり津波の間に明確な差異が存在することも示された。このように、地すべり形態ごとに津波の生成・伝播機構が定量的に異なることが明らかになったことで、沿岸域における防災対策の策定に際し、より精緻で現実的なリスク評価が可能になることが期待される。なお、当初計画では、実験で対象としていない低角度 ($\sim 5^\circ$ 程度) の斜面の解析を新たに実施する予定であったが、実験で実施された比較的低角度 (8°) のケースの再現解析を行った結果、十分な解析精度が得られなかった。そのため、本研究では当初 60 ケースを予定していた再現解析対象を 96 ケースへと拡大し、比較的勾配が急な斜面を網羅的に解析することで解析精度を担保し、信頼性のある回帰式の導出を優先した。したがって、本研究で得られた

成果は、急勾配の斜面における地すべり津波現象を対象とする範囲ではあるが、その信頼性は高く、地すべり津波研究および防災対策において有用な基礎的知見として位置づけられると考える。

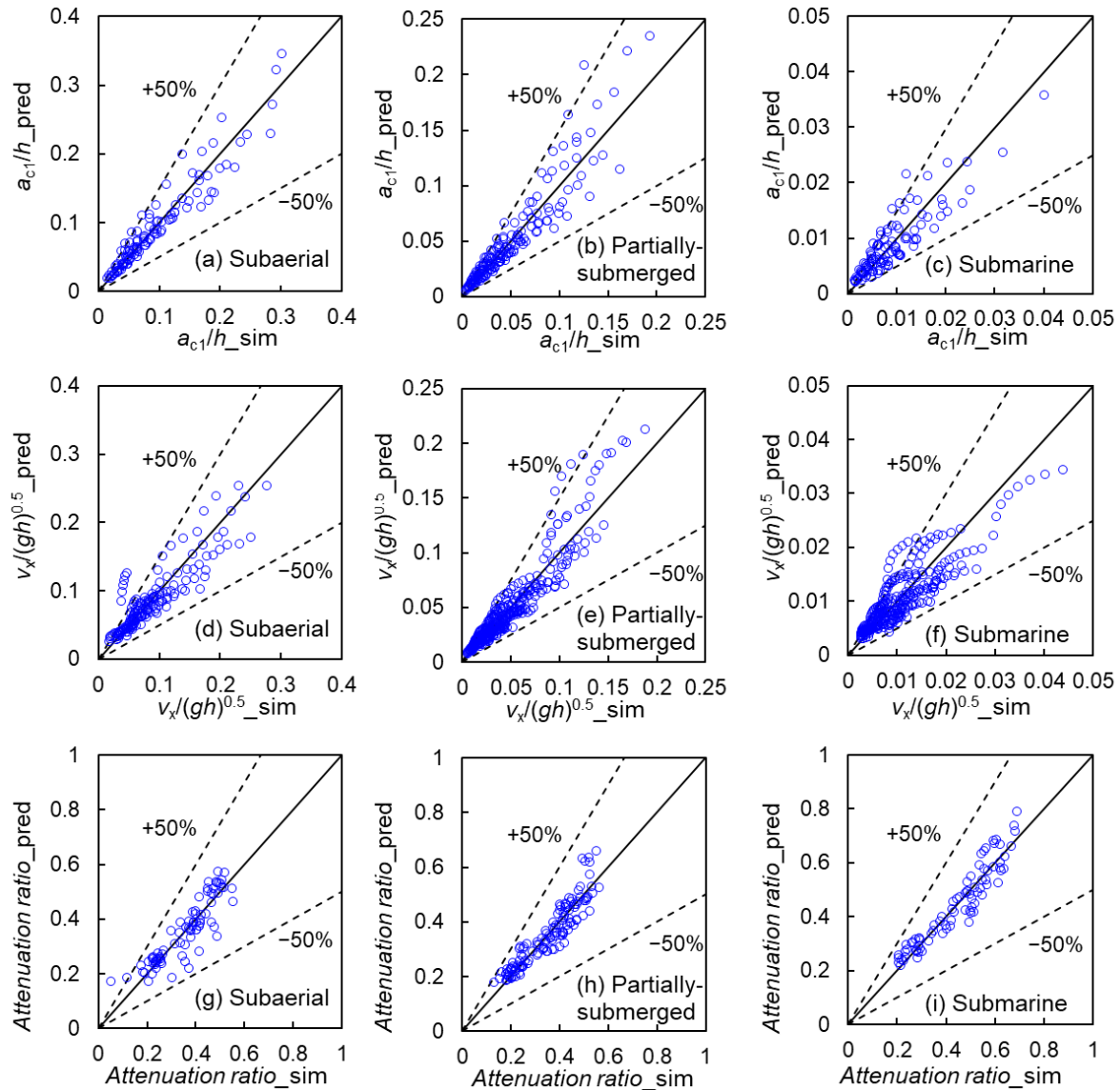


図 6 OpenFOAM による解析結果と各予測式による推定値の比較：実線は完全一致を、点線は 50%の誤差範囲を示す。

5. 参考文献

- 1). Aránguiz, R., et al. (2020). The 2019 Sulawesi tsunami in Palu city as a result of several landslides and coseismic tsunamis. *Coastal Engineering Journal*, 62(4), 445–459.
- 2). Arikawa, T., et al. (2018). Coastal subsidence induced several tsunamis during the 2018 Sulawesi earthquake. *Journal of Disaster Research*, 13, sc20181204.
- 3). Takabatake, T., et al. (2019). Field survey and evacuation behaviour during the 2018 Sunda Strait tsunami. *Coastal Engineering Journal*, 61(4), 423–443.
- 4). Yanagisawa, H., Abe, I., & Baba, T. (2024). What was the source of the nonseismic tsunami that occurred in Toyama Bay during the 2024 Noto Peninsula earthquake? *Scientific Reports*, 14, 18245.
- 5). Takabatake, T., et al. (2020). Physical modeling of tsunamis generated by subaerial, partially submerged, and submarine landslides. *Coastal Engineering Journal*, 62(4), 582–601.

AE 法と耐震工学の融合による地震後の橋梁用ゴム支承の 損傷度評価指標の開発

立命館大学理工学部 准教授 川崎佑磨

1. 背景と目的

1995 年に発生した兵庫県南部地震以降、積層ゴム支承（以下、ゴム支承と記す）は橋梁に積極的に採用されるようになった。しかし、兵庫県南部地震から 25 年以上が経過し、ゴム支承の経年劣化が顕在化している。また、ゴム支承が供用されている間は、交通振動や使用環境による負荷、地震が起こったときの変形などによって、内部損傷が発生する。あるいは将来的に発生する可能性がある。近年では、2011 年の東北地方太平洋沖地震でゴム支承の破断が初めて報告された。また、2016 年に発生した熊本地震においてもゴム支承の破断が報告されており、2024 年に発生した能登半島地震においても写真-1 に示すように、ゴム支承の破断



写真-1 T 橋のゴム支承破断事例

を確認した。上述したゴム支承の破断原因として、ゴム支承の内部に存在する損傷領域に大きな負荷が加わったことが考えられる。しかし、ゴム支承は全体が被覆ゴムで覆われており、目視で内部損傷が存在しているかどうかを判断することができない。そのため、地震に伴う大きなせん断ひずみを経験して破断しなかったゴム支承について、性能に基づく取り替えの必要性やそのタイミングを判断することは非常に難しい。そのような判断をするためのゴム支承の検査方法や維持管理に関する明確な手法が確立されていないのが現状である。著者らの既往研究では、ゴム支承に対して、せん断変位が 100%, 200%, 300% のせん断試験を行った。そして、せん断試験の前後で交通振動を模擬した繰返し圧縮載荷試験を実施し、AE 計測を行った。しかし、せん断試験で与えられたせん断変位は実際に供用されているゴム支承に対して加わったせん断変位とは異なるものであった。また、ゴム支承の残存耐震性能と得られた AE データとの関係性については検討されていなかった。

そこで本研究では、ゴム支承に与えるせん断変位として、地震模擬波形を与えた。この地震模擬波形は、過去に実際にゴム支承が破断した場合の地震波形を模擬した波形である。地震模擬波形を与えた後に実施した性能確認試験で得られた残存耐震性能と、せん断試験を経験したゴム支承に対して繰返し圧縮載荷試験を行ったときに得られた AE データとの関係について検討した。

2. 手法の概要

AE とは、アコースティックエミッション（Acoustic Emission）の略で、固体が変形あるいは破壊する際に、それまで蓄えていたひずみエネルギーが解放されて、その一部が弾性波（AE 波）として放射される現象と定義されている。本研究で用いた AE 法の適用方法を図-1 に示す。ゴム支承に対して繰返し圧縮載荷試験を実施し、そのときにゴム支承内部にある損傷によって発生した空隙が開閉す

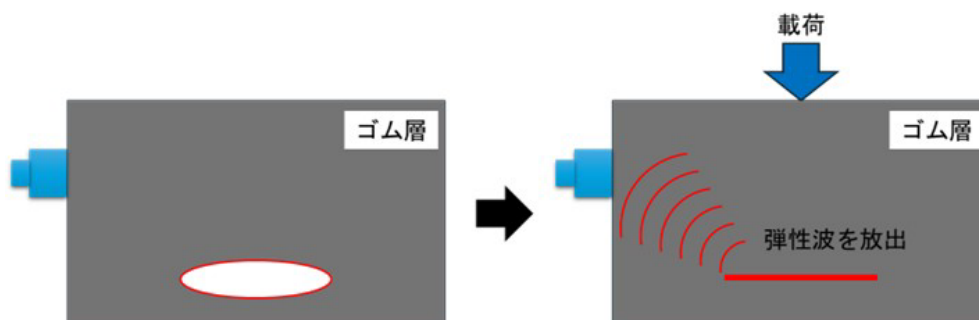


図-1 ゴム支承内部の AE 波検出イメージ

ることで放出された弾性波をゴム支承表面に設置した AE センサで検知し、AE 波形などの AE 信号を取得することを想定している。AE 信号波形は、AE センサからの出力信号波形である。AE 波形の例を図-2 に示す。AE ヒット数とは、検知した AE 信号数で AE 信号のひとかたまりを 1 ヒットとする。本研究では、RMS 値を使用するが、RMS 値とは、包絡線検波した値を二乗して相加平均し、その平方根をとった値である。AE 信号の実効値は AE 信号の大きさを表すとともに、特に連続型 AE の場合には AE の発生率を評価できるものとされており、連続型 AE が多く検出される本研究において有用であると考えられる。

地震波形について、紙面の都合上、以下に簡潔に説明する。熊本地震による免震橋のゴム支承破断事例に着目し、実際の地震動を模擬した波形を解析により作成した。ゴム支承を有する単柱 RC 橋脚モデルに対し、KiK-net 益城 (KMMH16) における 2016 年熊本地震の強震観測を入力地震動として地震応答解析を実施し、ゴム支承の時刻歴相対変位波形を算出した。地震応答解析には、非線形時刻歴応答解析プログラム TDAP III を用いた。数値積分法は Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$) を用いて、積分時間間隔は 0.01 秒とした。本解析モデルは、道路橋の耐震設計に関する資料に掲載されている免震橋梁を対象としてモデル化した。ゴム支承を有する単柱 RC 橋脚モデルに対し、熊本地震の強震観測を入力地震動として地震応答解析を実施し、ゴム支承の時刻歴相対変位波形を算出した。算出したゴム支承の時刻歴相対変位波形の主要部より、勾配変化点の座標値（時間、相対応答変位）をいくつか選択し、相対応答変位をゴム支承の高さで除することでせん断ひずみに変換し、実験用せん断ひずみ時刻歴波形を作成している。最大せん断ひずみは、175%、250%になるように振幅倍率を調整した。実際に与えたせん断ひずみの時刻歴を図-3、図-4 に示す。

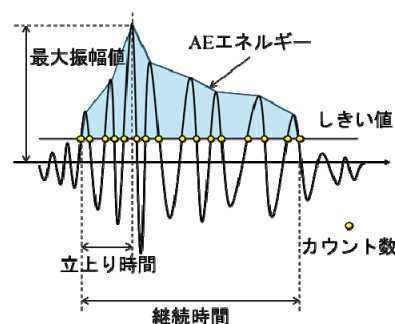


図-2 AE 波形とパラメータ

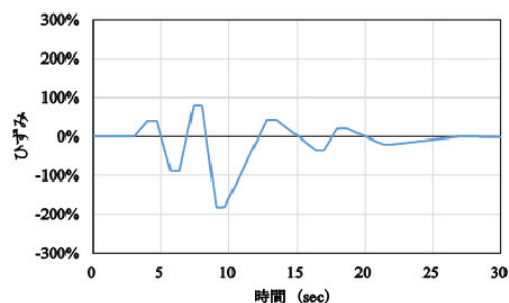


図-3 せん断ひずみ時刻歴 (175%)

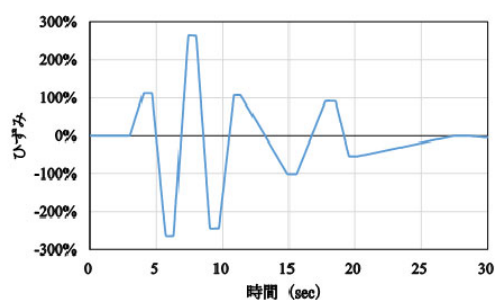


図-4 せん断ひずみ時刻歴 (250%)

表-1 供試体諸元

寸法	250mm×250mm×96mm
上下鋼板 (SM490A)	32mm×2 枚
内部鋼板 (SS400)	3.2mm×5 枚
ゴム (HDR-S, G=1.2N/mm ²)	5mm×6 層
一次形状係数	S ₁ =12.00
二次形状係数	S ₂ =8.00

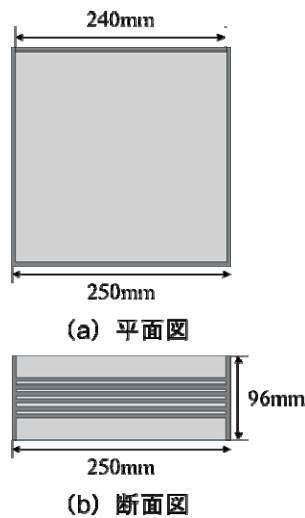


図-5 供試体概要

表-2 試験の流れ

試験内容	試験内容
要素試験	地震模擬波形 (250%) 載荷
繰返し圧縮載荷試験・AE 計測①	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測⑤
性能確認試験①	性能確認試験⑤
地震模擬波形 (175%) 載荷	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測⑥
繰返し圧縮載荷試験・AE 計測②	性能確認試験⑥
性能確認試験②	地震模擬波形 (175%) 載荷
地震模擬波形 (250%) 載荷	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測⑦
繰返し圧縮載荷試験・AE 計測③	性能確認試験⑦
性能確認試験③	地震模擬波形 (250%) 載荷
性能確認試験③'	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測⑧
繰返し圧縮載荷試験・AE 計測④	性能確認試験⑧
性能確認試験④	地震模擬波形 (250%) 載荷
	繰返し圧縮載荷試験・AE 計測⑨
	性能確認試験⑨

3. 実験概要

本研究では HDR を使用して実験を行った。供試体は合計 3 体使用したが、本報告書ではそのうちの 1 体について概要ならびに結果を報告する。その 1 体は、本研究の前に「要素試験（以下、要素試験供試体とする）」と呼ばれる試験を前に経験しており、すでにある程度損傷を抱えていると思われる供試体である。HDR の平面図・断面図を図-5、供試体諸元を表-1 に示す。供試体の試験の流れを表-2 に示す。地震模擬波形載荷⇒繰返し圧縮載荷試験・AE 計測⇒性能確認試験を基本的に 1 セットとして実験を実施した。しかし、要素試験供試体の 4 回目と 6 回目の AE 計測については、性能確認試験の影響を確認するため、直前に地震模擬波形載荷は行わなかった。事前に行われていた要素試験の概要を表-3 に示す。一般的に、せん断ひずみ 250%が設計限界変位で、ゴムのハードニング現象が起こるとされており、300%が破断の可能性が高くなる。そのため、事前に受けた要素試験はせん断ひずみ 300%を受けており、内部損傷を複数内在している可能性が高いと思われる。なお、外観上に支承の変形や表面のひび割れは確認されていない。

残存耐震性能を算出するために、繰返し圧縮載荷試験・AE 計測の後に性能確認試験を実施した。性能確認試験内容を表-4 に示す。性能確認試験はゴム支承の出荷前には必ず実施されている。2～10 サイクル目の結果から、残存耐震性能を評価する指標として用いられる等価剛性と等価減衰定数を算出した。水平荷重－せん断変位曲線の例を図-6 に示す。また、等価剛性の算出式を式 (1)、等価減衰定数の算出式を式 (2) に示す。

$$K_{eq} = \frac{F_{max} - F_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi F_{max} X_{max}} \quad (2)$$

表-3 要素試験の概要

ひずみ (%)	加振変位 (mm)	鉛直荷重 (kN)	鉛直変位 (mm)	加振周波数 (Hz)	加振回数 (回)
70	21.0	5~10	固定	0.076	11
175	52.5			0.031	11
250	75.0			0.022	6
300	90.0			0.018	2

表-4 性能確認試験の概要

ひずみ (%)	加振変位 (mm)	鉛直荷重 (kN)	鉛直変位 (mm)	加振周波数 (Hz)	加振回数 (回)
175%	52.5	345.6	固定	0.5	11

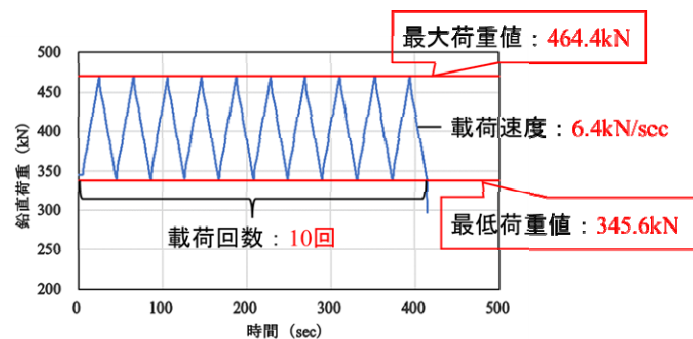
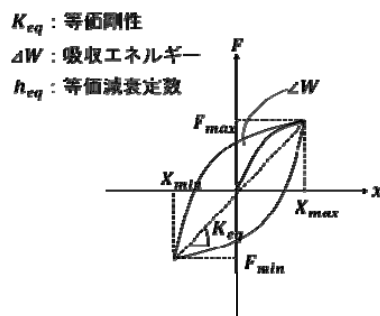


図-6 水平荷重-せん断変位曲線の例 図-7 繰返し圧縮荷重試験で与えた鉛直荷重履歴

本研究では、実橋梁においてゴム支承が受ける交通振動を仮定して、繰返し圧縮荷重試験を実施した。繰返し圧縮荷重試験の荷重履歴を図-7に示す。最低荷重値から最大荷重値までを10回の繰返しサイクルで荷重した。最低荷重値は、死荷重相当の支承設計値が面圧 6MPa に相当する圧縮力とされているため、本供試体では 345.6kN (=240mm×240mm×6MPa) に設定した。最大荷重値は、既往研究では、荷重面が 180mm×180mm の供試体に対して、50%繰返し圧縮荷重試験では 206.6kN としている。この値はゴム支承の一次形状係数によって決まる許容最大圧縮応力度から算出された 259.2kN から最低荷重値 153.6kN (面圧 6MPa から算出) を引いて得られた値 105.6kN の 50%を 153.6kN に加えることで算出している。今回は死荷重が 2.25 倍になっていることから、最大荷重値を 464.4kN とした。

AE センサは共振周波数 60kHz の共振型センサを 8 個使用した。AE センサの設置箇所を図-8 に示す。ゴム材料は引張に弱いため、ゴム支承内部で最も大きな引張応力を受け、脆弱であると考えられる箇所に設置している。しきい値は 40dB よりも低く設定するとノイズを検出したため、40dB に設定した。得られた AE 現象のうち、AE パラメータのカウント数が 1、AE エネルギーが 0、平均周波数が 30kHz~90kHz 以外の AE 現象は分析対象外のデータとして除去し、最初に 345.6kN を超えるまでの時間に発生した AE 現象も、対象時間外として除去した。

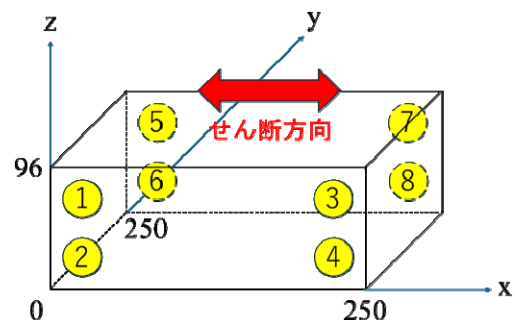


図-8 AE センサの設置位置

4. 実験結果と考察

等価剛性と等価減衰定数を算出し、それらの値から供試体の安全度評価を試みた。等価剛性の設計値との差(%)を横軸、等価減衰定数の設計値との差(%)を縦軸にとった散布図を図-9に示す。なお、図中には本報告では取り上げない他の2種の供試体も混在している。等価剛性・等価減衰定数の両方が設計値から10%以上低下している場合を危険領域(図-9中の赤色部分)、等価剛性・等価減衰定数のどちらか一方が設計値から10%以上低下している場合を注意領域(図-9中の黄色部分)とした。設計値から10%低下している場合を基準として定めた理由は、道路橋支承便覧において、高減衰積層ゴム支承の実験データに基づく設計モデルの検証で、設計値に対する実験値の基準として10%を用いていたからである。要素試験供試体は性能確認試験③'で注意領域に入り、性能確認試験⑤で危険領域に入っていることが分かる。要素試験供試体は破断しておらず、外観上変化は確認できていないが、免震支承としての機能を十分に果たせない可能性が考えられる。

要素試験供試体の累積AEヒット数・RMSの推移を図-10に示す。横軸の番号の下にある内容は、各回のAE計測前に実施したせん断試験内容と最大せん断ひずみを表している。地震模擬波形(175%)载荷後のAE計測②の結果では、その前に実施したAE計測①と比較して、累積AEヒット数は増加し、RMSは上昇した。最大せん断ひずみ175%はゴム支承の出荷前に必ず実施される性能確認試験と同等であり、一般的には175%で損傷が進展あるいは新しい損傷が発生する可能性は低い。しかし、このような結果となったのは、本研究より前に実施された要素試験の影響があったと考えている。すなわち、要素試験で最大せん断ひずみ300%を受けているため、すでにゴム支承内部には損傷が存在している可能性が高い。内部損傷がない状態で175%のせん断ひずみを受けても損傷が進展することは考えにくい、内部損傷がある状態で175%のせん断ひずみを受けると損傷が進展する可能性も考えられる。このことは、性能確認試験のみを実施してAE計測を行ったAE計測④とAE計測⑥からもいえる。前述した安全度評価でも、AE計測④後の性能確認試験④で注意領域に入り、AE計測⑥後の性能確認試験⑥で危険領域に入っていることから、損傷が進展したことで、残存耐震性能が低下した可能性が考えられる。地震模擬波形(175%)後に実施したAE計測⑦の結果では、その前に実施したAE計測⑥と比較して、累積AEヒット数は増加したが、RMSは低下した。これは上述した地震模擬波形(175%)後の傾向とは異なる。累積AEヒット数が増加していることから、微小な空隙は増加していると考えられ、RMSが低下していることから、損傷領域の進展も想定される。地震模擬波形载荷を何度も受けたことによって、同じ地震模擬波形(175%)を受けた場合でも内部損傷の進展の様子が変化したことが考えられる。地震模擬波形(250%)载荷後のAE計測③、AE計測⑤、AE計測⑧、AE計測⑨では、それぞれの前の

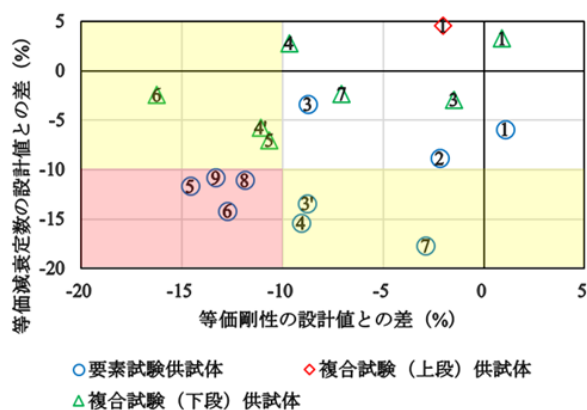


図-9 等価剛性・等価減衰定数の設計値との差

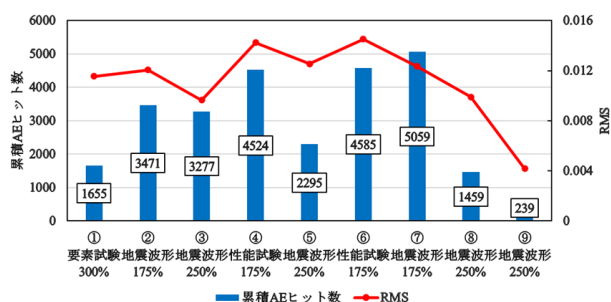


図-10 累積AEヒット数とRMSの推移

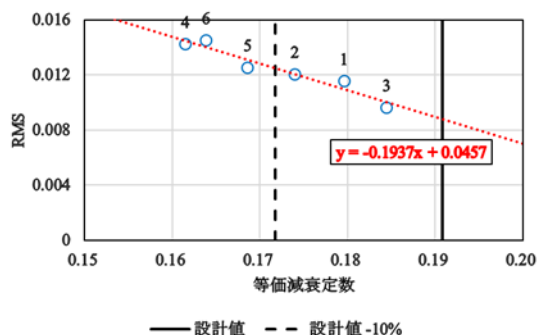
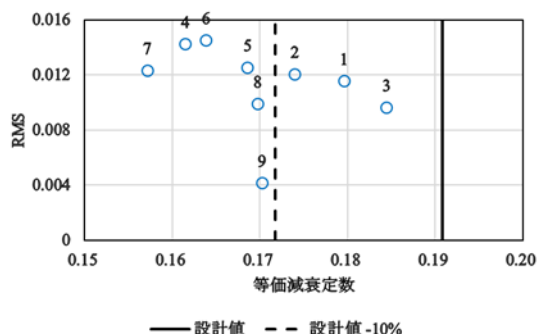


図-11 等価減衰定数と RMS の関係

図-12 AE 計測⑥までの等価減衰定数と RMS の関係

AE 計測結果と比較して、累積 AE ヒット数は減少し、RMS は低下した。損傷した状態でせん断ひずみ 250%を経験したことで損傷領域が拡大したと考えられる。微小な損傷が一つの大きな空隙となったことで、累積 AE ヒット数が減少し、損傷領域が拡大したことで、空隙が十分に開閉しなくなり、RMS が低下したと考えられる。特に、AE 計測⑧と AE 計測⑨では、累積 AE ヒット数が大きく低下し、RMS が大きく低下していることから、上述した損傷進展の傾向が顕著に表れていると考えられる。安全度評価においても危険領域に入っていることから、要素試験供試体は破断の危険性が極めて高いと予想される。要素試験供試体の等価剛性と累積 AE ヒット数、等価剛性と RMS、等価減衰定数と累積 AE ヒット数、等価減衰定数と RMS の関係を確認した。ここでは紙面の都合から、等価減衰定数と RMS の関係を図-11 に示す。等価減衰定数と RMS に一定の相関が確認できた。AE 計測結果に着目すると、内部損傷による空隙が少ない場合だと圧縮荷重時における空隙の開閉が少ないが、内部損傷による空隙が多い場合には圧縮荷重時における空隙の開閉が多くなる。このことから、内部損傷による空隙が多くなるほど AE 発生率を評価できるパラメータである RMS が増加したと考えられる。残存耐震性能に着目すると、内部損傷による空隙が少ない場合だとせん断変形時に摩擦が多く発生するが、内部損傷による空隙が多い場合には比較的せん断変形時に発生する摩擦が減少する。このことから、図-12 に示すように AE 計測⑥までは、内部損傷による空隙の数あるいは体積が増加することで、ゴム同士の摩擦によって発生する熱エネルギーが減少し、振動による運動エネルギーを十分に熱エネルギーに変換できず、等価減衰定数が低下したと考えられる。しかし、AE 計測⑦以降は相関関係を確認することができなくなった。これは損傷領域が拡大したことで、鉛直荷重によって空隙が十分に開閉しなくなったことが原因であると考えている。したがって、相関関係が確認できなくなることが内部の損傷領域拡大を示唆する可能性があると考えられる。

5. まとめ

要素試験供試体は、性能確認試験⑤までは試験を重ねるごとに等価剛性が低下したが、性能確認試験⑥、性能確認試験⑦では等価剛性が上昇した。要素試験で一次ハードニング状態になり、その後の地震模擬波形荷重によって二次ハードニング状態に移行したと考えられる。安全度評価において、性能確認試験③'で注意領域に入り、性能確認試験⑤で危険領域に入った。要素試験供試体は破断しておらず、外観上変化は確認できていないが、免震支承としての機能を十分に果たせない可能性が考えられる。AE 計測では、AE 計測⑦以降から等価減衰定数と RMS 値の相関が取れなくなった。損傷領域が拡大したことによって、空隙が十分に開閉されず、繰返し圧縮荷重試験によって RMS 値が小さくなったことが要因と考えられる。したがって、AE 計測によるパラメータを確認すれば、性能確認試験で得られる等価減衰定数を推定できる可能性を示した。一方で、寸法効果、現地での適用性なども検討課題である。

災害時の最適な避難経路を示すためのドローンを用いたシステム

(SEN) の作成

和歌山工業高等専門学校環境都市工学科 准教授 横田恭平

1. 背景・目的

日本は地理的・地質的条件から自然災害のリスクが極めて高い国である。四方を海に囲まれ、国土の多くが山岳地帯であり、河川は急勾配であることから、洪水や土砂災害の危険性が常に存在する。また、日本列島には多数の活断層やプレート境界が分布し、全国どこでも地震が発生する可能性がある。特に、今後30年以内に南海トラフ地震や首都直下地震が発生する確率は約70%とされており、甚大な被害が想定されている。さらに、気候変動の影響により台風や豪雨が激甚化・頻発化し、毎年のように全国各地で大規模な水害が発生している¹⁾。これらのことから今まで以上に防災・減災対策を施していく必要がある。

しかし自然災害の発生頻度が高い国であるにもかかわらず、防災や減災に対する意識が十分ではない状況が見受けられる²⁾。内閣府が令和4年の9月1日から10月9日にかけて行われた「防災に関する世論調査」によると、「自然災害への対処などを家族や身近な人と話し合ったことの有無」については、1,791人中、36.9%の約660人が話し合いを行っていないと回答した。その主な理由は、「話し合うきっかけがなかったから」が58.1%、「自分や家族、身近な人の身の回りで自然災害が起きたとしても、家族や身近な人とすぐに連絡が取れると思うから」が20.3%、「話し合う時間がなかったから」が18.0%という結果であった（複数回答）。次に「防災訓練への参加、または見学の有無」については、1,791人中、37.5%の約670人が参加、または見学をしたことがないと回答した。その理由は、「具体的な日時・場所、申し込み方法がわからないから」が38.3%、「時間がなかったから」29.2%、「特に理由はない」が21.9%、「関心や興味がなかったから」が15.6%であった（複数回答）。「特に理由はない」や「関心や興味がなく」で多くの回答があったことから、防災に対する意識が低い状況が確認できる。

近年、日本国内における日本人国内観光客や外国人観光客は年々増加傾向にある。国内の防災意識が不足している中、観光先においても防災のことを周知させることは非常に困難である。実際、観光者を対象としたアンケートによると観光者の8割以上が観光地での避難場所の知識がないと回答しており（図-1）、被災リスクを考えたことがあるかという質問に対しては、約7割の観光客が考えたことがないと回答して

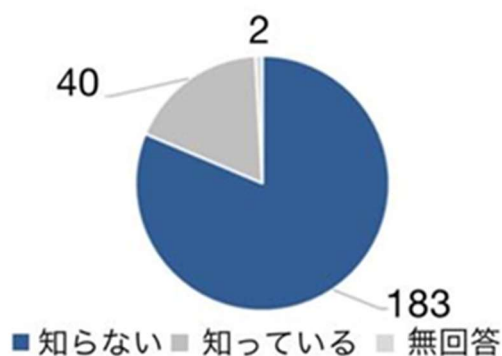


図-1 避難場所知識に関する回答[人]

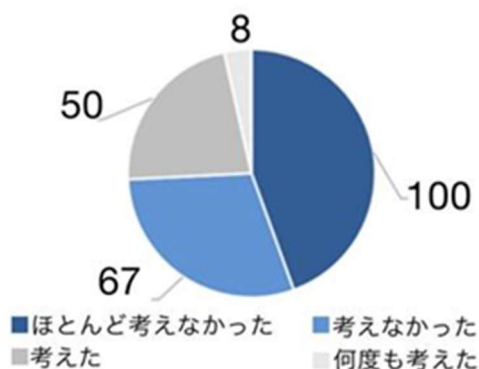


図-2 被災リスク認知に関する回答[人]

いる(図-2)³⁾。和歌山県の観光地である白浜町で行われたテレビの街頭インタビューでも避難場所を知らないという意見があげられていた⁴⁾。

このような人々は観光中に被災した場合、土地勘がなく避難すべき場所がわからない、その土地の災害特性の知識が乏しい、などの要因から災害の被害が大きくなる可能性が高くなると考えられる。これらの人々に対しても分かるような避難方法を提案する必要がある。その対策として2015年から白浜町では、観光客に対しての避難訓練を行うようになった⁵⁾。しかしながら、この避難訓練は毎日行われるものではないため、日々異なる観光客が訪れる観光地においては、避難訓練を実施した日に訪れた観光客にしか効果がない。白浜町の避難訓練に参加した人に調査した結果、避難訓練参加者の半数が「避難看板などから避難場所までへのルートがすぐにわからなかったと回答している。このことから、避難訓練を通じて避難経路を確認しておくことは非常に重要といえる。

以上のことから、観光地は「観光客が観光地の避難場所を知らないこと」と「土地勘のない不特定多数の観光客への防災対策の難しさ」という2つの課題をかかえている。毎日異なった不特定多数の人が訪れる観光地の特性から、事前にすべての観光客に避難場所までの経路を教えるという事は不可能に近い。よって、事前に避難場所の経路を教えることも重要であるが、災害が起こった時に素早く、正確に、わかりやすく観光客を避難場所へと案内できる「事後対策型」の防災設備を設置する方が有用であると考えられる。この「事後対策型」とは、現在の防災対策の主流である、「避難訓練」や「ハザードマップ」などの事前に避難場所を教えるという「事前対策型」と異なり、災害発生直後に避難場所を教え、そこまで案内するという全く新しい発想である。「事前対策型」では、全ての避難場所の経路を把握することは不可能である。私たちは通学や通勤、旅行など様々な理由で毎日多くの移動を行っており、その移動中に地震などの災害が発生することは十分にありえることであり、避難場所を知らない場所で被災した場合、「事前対策型」では対応することができない。対して「事後対策型」は災害発生直後に避難場所を教えるので、事前に避難場所の知識をつける必要がなく、避難場所を把握していない場所でも対応することができる。特に、観光地などの避難場所を把握しにくい場所で大きく活躍する。また、少子高齢化が進み、物事を覚えにくい高齢者が多くいる現代社会において、高齢者に避難場所を覚えてもらうことは難しいことであり、避難場所を覚える必要がない「事後対策型」は現代社会に適した、新しい防災の形だといえる。

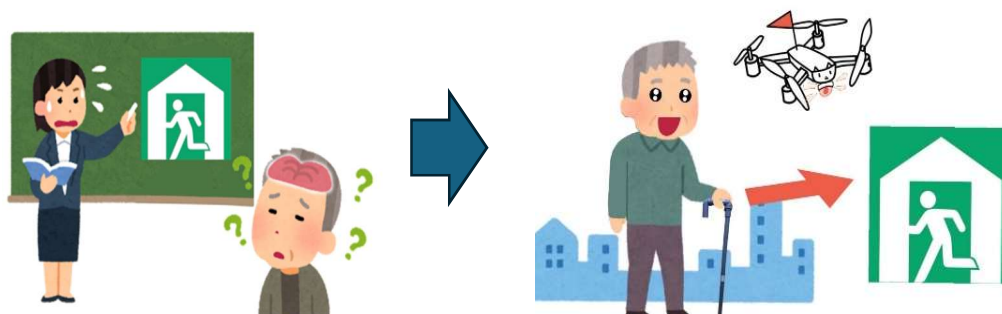


図-3 「事後対策型」導入前後の高齢者の比較

その設備として考案したのが「SEN (Sky Evacuation Navigator)」である。「SEN」は災害の発生を検知すると、ドローンが自動で飛行を開始し、避難場所まで案内するシステムである。これまでの災害時の情報収集方法としては、人工衛星による地形情報の取得や有人ヘリによる撮影があげられるが、広範囲の被災状況の把握と人の搜索が主目的であり、前者ではリアルタイム性や詳細情報の取得が、後者では運用コストや2次災害の危険性が課題であった。そのため、小型で解像度の高いカメラを有し、比較的低コス

トで運用できるドローンの活用が研究されている。久保らは要配慮者の避難を想定した避難支援システム構築に関する基礎的研究として、自律飛行ドローンを用いた避難誘導・監視に関する実験を行い、有用性を確認している⁶⁾。鈴木らは地震火災時において、避難場所に誘導するリアルタイム避難誘導の必要性を指摘し、避難リスクの評価及び低減方策について数理的なモデル化を行い、シミュレーションモデルによる実験の下、避難誘導による避難リスクの低減効果を明らかにした⁷⁾。鈴木らは人とドローンによる移動を協調させることで、地域自治体に根差したドローンによる避難者の誘導支援法について提案し、シミュレーションにて検証した⁸⁾。このようにドローンを活用した避難誘導に関する研究は、被害拡大の抑制や速やかな復旧・救援活動のために行われている。さらに永井らは今後の外国人観光客の避難誘導の一助となる知見を得ることを目的とし、アンケートによって観光施設等では「人による避難誘導」「標識等サイン整備」を行うことが重要であり、“Safety tips”の普及が大切ということを示している⁹⁾。大窪らは観光地において一斉に避難する震災時を想定し、避難シミュレーションモデルを用いて避難経路の検討を行っている¹⁰⁾。このように観光客を対象にした避難誘導の研究もある。しかし観光者を対象とし、ドローンを用いた避難誘導の研究は少ない。

以上の背景より、本研究の目的は、「観光客が観光地の避難場所を知らない」と「土地勘のない不特定多数の観光客への防災対策の難しさ」という 2 つの観光地の課題を解決するため、災害発生後に避難場所まで案内するという、新しい防災の形である「事後対策型」の方法を提案することである。そして、「事後対策型」の防災対策のモデルケースとして「SEN」を世間に浸透させ「事後対策型」の防災対策の一部となるようなシステムを構築する。

2. 方法

DJI Mavic 3 Pro (DJI 製、機体サイズ 400mm、400mm、100mm) (写真-1) というドローンを購入し、自動飛行検証、現地調査、避難誘導所要時間測定、「SEN」適正運用地調査の 4 つの検証を行い、「SEN」の運用が可能かどうかの検証を行った。内閣府の「政府機関等における無人航空機の調達等に関する方針について」¹¹⁾ より、飛行・撮影情報の外部への漏洩や、他人の機体の乗っ取りといった、サイバーセキュリティ上の懸念について、十分な対応策を講じることが必要とされ、市街地を飛ばすには内閣府が購入を推奨している国内産のドローンを購入する必要がある。しかし、予算の都合上国内産のドローンを購入することができず、市街地を飛行させることができないため、自動飛行検証及び避難誘導所要時間測定は和歌山高専内の校庭で、現地調査はドローンを飛行させず、歩いて調査を行った。



写真-1 DJI Mavic 3 Pro

2-1. 調査地の特徴

本研究の対象は和歌山県にある高野山、白浜町、新宮市とする（図-4）。これらは和歌山県内でも観光客が多い地域である。高野山（和歌山県伊都郡高野町高野山）については、標高約 1,000m 級の峰々に囲まれた山上盆地に広がる、1200 年以上に渡り多くの人々の信仰を集め発展した宗教都市である。あたりは林に囲まれ、自然に恵まれた土地であるが、土砂災害のリスクがある。また、12 月ごろから積雪が激しく、非常に寒冷な土地である。2014 年度には 1,414,668 人もの観光客が訪れ、その内 54,511 人が外国人観光客であった¹²⁾。

次に白浜町（和歌山県西牟婁郡白浜町）は、和歌山県南部に位置し、美しい海岸線を有し、「日本の快水浴場百選」にも選ばれている海水浴場の白良浜があり、さらには温泉も有名である。温暖な土地で風が強く、さらに海岸部に位置するため津波の被害を大きく受ける恐れがある。2019 年度には 1,017,000 人もの観光客が訪れ、その内 74,000 人が外国人観光客であった¹³⁾。

最後に新宮市（和歌山県新宮市）については熊野川の河口部に位置し平野の広がるエリアと山間部が共存している土地であり、熊野速玉大社や神倉神社、阿須賀神社などが有名で、熊野信仰の中心地で多くの観光客が訪れる場所である。直接的な津波被害は比較的少ないが、熊野川の津波遡上による浸水被害が想定されている。

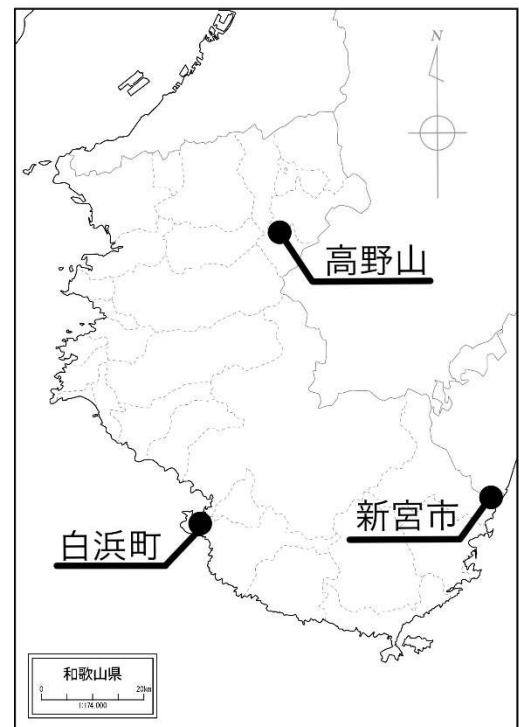


図-4 研究対象地

2-2. 自動飛行検証

自動飛行検証については DJI Mavic 3 Pro に搭載されているウェイポイントという機能を使用した。ウェイポイントの手順としてまず、自動飛行させたいルートを一度手動で飛行させ、曲がり角や大きなカーブなど大きく進路を変える点にウェイポイントを設定する。ウェイポイント設定後、自動飛行中の速度を設定でき 1 ㎥から 0.1 ㎥ずつ細かく調整することが可能である。飛行速度設定後、飛行開始ボタンを押すと、設定したポイントを指定の速さで自動飛行を行うことができる（写真-2）



写真-2 自動飛行設定画面
（ドローン操縦器）

本研究ではこれらの機能を用いて以下の検証を行った。

最初に飛行速度に関する検証を行った。人の平常時の歩行速度の平均は 0.8～1.0 ㎥¹⁴⁾であり、災害避難時には平常時より歩く速さが早くなると予測できるため、ドローンの飛行速度を 1.2 ㎥、1.4 ㎥、1.6 ㎥、1.8 ㎥、2.0 ㎥と変えて検証を行った。次に飛行高度に関する検証を行った。飛行高度については、避難中にドローンを見上げながら歩くため、あまりに高いと足元を見ることができず、つまづくなどして危険が伴うことが予測されるため、どのくらいの高さが最適なのか高度 2m、3 m、4 m、5 m、6 m の低空飛行内で飛行高度を変え検証を行った。最適な飛行速度、飛行

高度を導き出した後、最適速度、高度を飛行時のドローンで、避難誘導時に最適なドローンと避難者と距離の検証を行った。ドローンの飛行位置を変えながら、最も見上げながら歩きやすい距離を決定した。各検証は4人で行い、話し合いを通じて、適正速度、位置を決定した。最後に観光地想定飛行テストを行った。設定した観光地の飛行ルートの高さ、距離を Google Earth で調べ、和歌山高専の運動場でそのルートを分割して再現しながら飛行させることで、疑似的に観光地での飛行テストを行い、飛行ルートを完走するまでバッテリーが保つかどうかの検証を行った。再現飛行ルートは白浜町の白良浜から、避難場所に登録されている白浜町役場とする（写真-3）。その飛行ルートを5つに区切り、それぞれを区間1から区間5とし、各区間の総合計は約500mとした。



写真-3 再現する飛行ルート（和歌山県白浜町）

2-3. 現地調査

ドローンを用いて観光地で実際に避難誘導を行う際には、事前に飛行ルートを現地で設定しておく必要がある（写真-4）。加えてそのルートを実際に飛行させ、問題がないのかを確認する必要がある。しかしながら本研究で使ったドローンは観光地に持ち込むことができないため、ドローンを飛ばすときに建物や電線などに接触するといった、ドローンを用いる場合の注意点の確認をしておく必要がある。そこで高野山、白浜町、新宮市の現地踏査を行い、状況を確認した。確認する前に、事前に各市区町村のハザードマップと Google Earth を参考に飛行ルートの設定を行った。ハザードマップを参照し、有名な観光地をスタート地点に設定し、スタート地点から近く、安全な避難場所をゴール地点とし、飛行ルートの設定を行った。飛行ルートを設定した現地に赴き、設定したルートを歩きながら飛行の障害となる物と飛行時の留意すべき点を確認した。



写真-4 飛行ルート設定例

2-4. 避難誘導所要時間測定

ドローンが災害の発生を検知してから自動飛行を開始し、避難場所に向け飛び立ち、観光客などの避難誘導を行い、そして避難場所に到着するまでの時間を計測する。災害発生の検知は、緊急地震速報を受信したときとする。本検証では、緊急地震速報は、地震発生の1分後に受信するものとした。検証は、和歌山高専内で行い、建物といった障害物などの状況（現地踏査の結果）や標高など考慮した避難ルート（写真-3 が想定したルート）で行った。さらに検証方法として、スタート地点からハザードマップにおいて浸水想定区域外に位置する安全圏である区間3の終点（標高26m 地点、総距離約260m）まで避難誘導を行うのに必要な時間の計測を行った。

2-5. 「SEN」適正運用地区調査

一概に観光地と言っても多種多様な観光地がある。山間部に位置するもの、沿岸部に位置するもの、都

市部に位置するものなどが例として挙げられ、発生する災害も地震、津波、土砂災害、洪水、台風、ゲリラ豪雨、火山噴火など様々である。どのような観光地が「SEN」の運用に適しているかを検証した。

「SEN」は災害が発生してから案内を開始するという特性上、突発的に生じる災害や、予兆から被害が生じるまでの時間が短い災害とは相性が悪いと考えられる。各災害の予兆から被害発生までの時間を調べ「SEN」と相性が良い災害を選定することにより、「SEN」の運用に適した観光地を決定した。

3. 結果・考察

3-1. 自動飛行検証結果・考察

ウェイポイント機能を使用し、自動飛行を行った結果、安定して自動飛行を行うことに成功した。飛行は開けた校庭で行い、最大風速 13 %下でも問題なく飛行できた。飛行速度に関しては、1.6 %がちょうどよく、周りを確認しながら避難できる最適な速度だった。1.2~1.4 %では遅く、1.8~2.0 %では早く感じた。1.6 %は成人男性が小走りするくらいの速さであり、老人や子供には少し早い速度となっている。速度を遅くすると、一刻を争う避難誘導に遅れが生じてしまうのでどこまで譲歩するか検討する必要がある。

飛行高度に関しては、3.5~4m ほどの飛行高度が最適である。3m 以下ではドローンが避難者にぶつかる可能性があり、5m 以上はかなり見上げながら歩く必要があり、危険であった。飛行高度の比較を写真-5に示す。飛行位置に関しては、ドローンとの距離が約 10m の時が歩きやすく、ドローンを見失わない最適な距離であった。最適距離の様子を写真-6 に示す。この最適飛行距離は、他の人にも見やすい角度なのかを考察する。170cm の成人男性が高さ 4m 距離 10m のドローンを見上げる目線の角度は約 13 度となり、総産研の「高齢者・障害者感覚特性データベース」の視標検出視野(視標の検出率)¹⁵⁾によると視標の離心角が 13 度の時の若齢者の検出率は 75%以上である事が分かった。また、車いすに乗っている高齢者や子供の目線は約 1m であるので、高さ 4m 距離 10m のドローンを見上げる目線の角度は約 17 度となる(図-5)。



写真-5 飛行高度：2m（左）、4m（真ん中）、6m（右）



写真-6 最適ドローン飛行位置

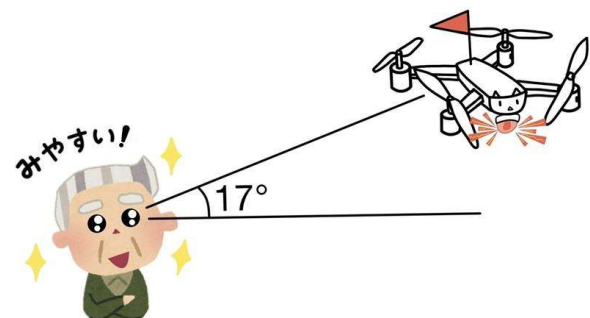


図-5 高齢者の目線からドローンまでの角度

同じように検出率を調べると、視標の離心角が17度の時の高齢者、若齢者の検出率は共に75%以上である事が分かった。検出率は対象物の見やすさを示しており、最適ドローン飛行位置は誰にとっても見やすい位置であると考えられる。最後に観光地想定飛行テスト結果を示す。飛行を行った想定飛行ルートは合計約500mでドローンのバッテリーは100%から38%まで減少した。今回用いたDJI Mavic 3 Pro では800m以上の飛行は難しいと考えられる。

3-2. 現地調査結果・考察

現地調査を行った高野山、白浜町、新宮市の結果を表-1に示す。

表-1 現地調査結果

高野山	・歩くぶんには問題ないが、上空には高く成長した木の枝が茂っており、ドローンが飛行困難な道が多くあった（写真-7）。 ・土砂災害の対策工事が施してあった（写真-8）。
白浜町	・建物間が狭く、風などで少しルートがずれると、ドローンが墜落する恐れがある（写真-9）。 ・電線が多くあった（写真-10）。電線は5m以上の高さが必要とされており¹⁶飛行高度、飛行ルートに注意が必要。 ・町の電柱に避難先を示す簡易的な看板があったが、看板同士の距離が離れていたり、矢印が示す方向が曖昧だったり、看板のみでの避難が困難だった（写真-11）。 ・ハザードマップを見ると白良浜付近には2つの避難場所があった（写真-12）。しかし、現地に行くと地震発生時には白浜町役場（下の避難場所）に避難するようにと書かれていた。このようにハザードマップだけでは推奨されている避難場所を把握することができなかった。 ・さらに、写真-12の上に示されている避難場所に行くと、高所ではあるが、ここが避難場所だと示すものなく、ただの道路であった（写真-13）。
新宮市	・電線が多くあり飛行ルート及び、飛行高度の見直しが必要（写真-14）。 ・熊野川周辺には分かりやすい避難看板があったが、海岸線沿い（王子ヶ浜）付近に避難看板がなかった。 ・各地にある観光マップに避難場所の記載がなかった。 ・ハザードマップに乗っている王子ヶ浜からの最短の避難場所が線路に阻まれて、行くことができず、短時間で避難することができなかった。



写真-7 飛行を阻害する木の様子（高野山）



写真-8 土砂災害対策工の様子（高野山）



写真-9 墜落のリスクを示した図（白浜町）



写真-10 電線の様子（白浜町）



写真-11 避難看板の位置関係（白浜町）
（黄丸は避難看板、緑丸は避難場所）

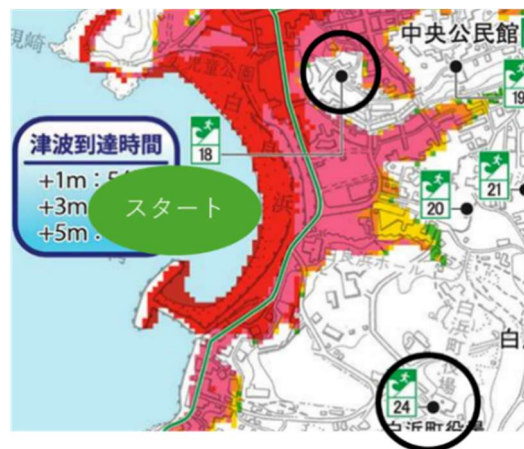


写真-12 白浜町ハザードマップ



写真-13 写真-12 の上の避難場所の様子
(白浜町)



写真-14 電線の様子 (新宮市)

高野山、白浜町、新宮市は共通して上空に電線や木などの障害物があり、5m 以上の飛行は難しいが、「3-1 自動飛行検証」より、最適飛行高度は3.5～4m となっているので、問題なく避難誘導は行えると考えられる。また、観光客にとって、ハザードマップだけでは避難行動に必要な情報を十分に提供できないことが明らかとなった。地元住民は地域に対する知識が豊富であり、ハザードマップを参考にして迅速な避難が可能だが、観光客はその土地についての知識が乏しく、ハザードマップのみでは適切な行動が取れないという課題が浮き彫りとなった。加えて、観光地における避難看板の不足は、観光客が避難経路を特定する際の大きな障壁となっている。避難看板は重要な避難情報源であるが、適切な数を適切な場所に配置されていなければ、その効果は薄れてしまう。このことは、防災対策において観光客向けのより具体的な情報提供が必要であることを示唆しており、「事後対策型」の防災システムである「SEN」の必要性を再確認することができた。

3-3. 避難誘導所要時間測定 結果・考察

白浜町の白良浜において、安全圏まで避難誘導を行うのに 3 分 52 秒を要した。260m の避難誘導で約 4 分なので、5 分ほど時間があれば大半の避難場所への避難誘導が行えると考えられる。

表-2 避難誘導所要時間測定結果

地震発生からの経過時間	発生事象と到達状況
0 分	地震発生
1 分 00 秒	緊急地震速報を検知し、避難誘導を開始
1 分 51 秒	区間 1 の終点 (標高 10m) に到着
2 分 44 秒	区間 2 の終点 (標高 17m) に到着
3 分 52 秒	区間 3 の終点 (標高 26m) に到着 (安全圏に到着)

3-4. 「SEN」適正運用地調査結果・考察

「SEN」適正運用地調査結果を表-3に示す。

表-3 「SEN」適正運用地調査結果

災害の名称	災害の特徴	「SEN」との相性
地震	地震発生とともに建物の倒壊などの被害が生じるため、「SEN」との相性が悪い。火災などの地震後の2次災害時の運用には適していると考えられる。	▲
津波	地震によって発生し、地震発生後から津波到達までは数分～数時間と地域によって大きく異なる。避難誘導を行う時間を考慮して、地震発生から津波到達まで5分以上ある場所での「SEN」運用は適していると考えられる。	○
土砂災害	地震、大雨などによって発生する。地震の場合、軟弱な地盤は地震発生と同時に崩れ、被害が生じる。避難誘導までの時間がないため「SEN」の運用には適していないと考えられる。	×
水害	洪水、台風、ゲリラ豪雨などの水害は大雨を伴うので、ドローンを飛行させることが困難であるため、「SEN」の運用には適していないと考えられる。	×
噴火	噴火が発生後すぐ、数キロ圏内には落石による被害が発生し、その後数時間で各地に降灰が発生する。降灰時の避難誘導に関しては「SEN」の運用には適していると考えられるが、火山灰がドローンの飛行にどのような影響をもたらすか不明瞭なため、「SEN」の運用は噴火後すぐに限定されることが考えられる。	▲

「SEN」適正運用地調査より「SEN」は津波が発生する土地での運用が適していることが分かった。現地調査を行った土地では白浜町や、新宮市などの海辺の観光地での運用が適していると考えられる。南海トラフ地震の発生後から津波の第一波到達まで白浜町は3分、新宮市は4分そして串本町では2分となっている¹⁷⁾。どれも5分より早く到達してしまっており避難誘導を行う時間が十分にとることはできないと考えられる。しかし、運用開始直後から高台へと避難誘導を行うので全くの無駄というわけではなく避難場所を探す時間をなくすことができ、より多くの人の命を救うことができる。津波以外にも、運用状況が限定されるが、地震と噴火時にも運用することができると考えられる。しかし大雨によって派生する災害は突発的に起こるものではないため、大雨の中ドローンを飛行させることができないので「SEN」を運用することができない。

4. まとめ

災害意識が十分に浸透しきっておらず、観光客も多い現代日本において、従来の防災対策である「事前対策型」の防災だけでは全ての人に避難場所を教えることは不可能である。そこで現代社会に適した新しい防災の形である避難場所の知識を事前につける必要がない「事後対策型」の防災対策を考案し、そのモ

デルケースとしてドローンを用いた避難誘導システム「SEN」の開発を行う。本活動では「SEN」の運用の可能性について確かめるため、自動飛行検証、現地調査、避難誘導所要時間測定、「SEN」適正運用地調査の4つの検証を行った。各検証から「SEN」の最適運用法が見出され、実現性が十分にあると実証することができた。

自動飛行については、今回は観光地でドローンを飛行させることが出来なかったが、実用化した際には、避難ルートを一度手で電線などの障害物を避けながらドローンを飛ばしウェイポイントを設定することにより、円滑に自動飛行が可能となる。飛行高度4m、飛行速度1.6m/s、飛行距離10mを維持することで、電線を避けつつ安全に避難誘導を行うことができる。

適正運用地については主な災害が津波、運用状況によっては地震、噴火の観光地と相性がよく、特に地震発生から津波到達まで5分以上ある観光地での運用に適している。

また、現地調査より、ハザードマップだけでは避難行動に必要な情報を十分に得ることができないことが明らかとなった。事前に観光地のハザードマップを確認してから現地に行ったが、ハザードマップだけでは避難場所の行き方が分かりにくく、現地にある避難看板も分かりにくかった。事前にハザードマップを確認していても避難が困難であったため、災害が発生しパニック状態の事前知識のない観光客が避難看板のみで素早く避難することは難しい。和歌山県の観光地はこのような状況であるため、「SEN」の必要性を再確認でき、「事後対策型」の防災システムの有用性を証明することができた。

参考文献

- 1)国土交通省防災減災対策本部. 1. 防災・減災が主流となる社会の必要性. 国土交通省, 2020, <https://www.mlit.go.jp/river/bousai/bousai-gensaihonbu/2kai/pdf/siryou01-2.pdf>, (参照 2025-2-21)
- 2)内閣府大臣官房政府広報室. 防災に関する世論調査（令和4年9月調査）. 内閣府, 2023, <https://survey.gov-online.go.jp/r04/r04-bousai/>, (参照 2025-3-4)
- 3)酒井宏平・豊田祐輔・鐘ヶ江秀彦：観光客の防災意識に影響する要因に関する研究-世界遺産姫路城を事例に-, 歴史都市防災論文集, Vol. 12, 2018, (参照 2025-3-4)
- 4)NHK 和歌山 HP, “人気の観光地 土地勘のない観光客 防災対策は”, <https://www3.nhk.or.jp/lnews/wakayama/20230517/2040014579.html>, (参照 2023-8-16)
- 5)全国町村会 HP, “和歌山県白浜町／災害に強い「観光のまち」を目指して～観光客の生命を守るために～”, <https://www.zck.or.jp/site/forum/1328.html>, (参照 2023-8-16)
- 6)久保菜・妹尾大輝・吉田秀典. ドローンを用いた要配慮者の 避難支援システム構築に関する基礎的研究. AI・データサイエンス論文集. 土木学会, p. 466-473, 2023.
- 7)鈴木雄太. 火災情報の不完全性を考慮した地震火災時のリアルタイム避難誘導に関する基礎的研究. 筑波大学, 博士論文, 2021.
- 8)鈴木学・浜克己・村尚彦. 協調ドローンを用いた避難誘導支援システム. 計測自動制御学会論文集. 計測自動制御学会, p. 24-30, 2020.

9)永井勇輝・山本和清・宮崎渉・鈴木一帆・友枝萌子・阿久津 研介. 津波災害時における観光施設等の外国人観光客への避難誘導に関する研究. 環境情報科学論文集. 環境情報科学センター, p. 193-198, 2019.

10)大窪健之・紺谷渉・金度源・林倫子. 国宝松本城の震災時における観光客の避難誘導計画. 歴史都市防災論文集. 歴史都市防災研究所, p. 167-174, 2017.

11)首相官邸ホームページ. 政府機関等における無人航空機の調達等に関する方針について.内閣府, 2020, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/pdf/siryou15.pdf>, (参照 2025-3-25)

12) 宗教法人金剛峯寺.和歌山県高野町における総本山金剛峯寺文化観光拠点計画.文化庁, https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunka_gyosei/bunkakanko/pdf/93093801_20.pdf?utm_source=chatgpt.com, (参照 2025-3-25)

13) 一般財団法人アジア太平洋研究所.DMO のインバウンド誘客の取り組みとその効果(2)-マーケティング・マネジメントエリアに着目した分析：和歌山県の事例から-, https://www.apir.or.jp/research/post15693/?utm_source=chatgpt.com, (参照 2025-3-25)

14) 岐阜新聞デジタル,教えてホームドクター歩行速度と寿命, <https://www.gifu-np.co.jp/articles/-/2483> (参照 2025-3-25)

15)総産研.「高齢者・障害者感覚特性データベース」視標検出視野(視標の検出率), https://scdb.db.aist.go.jp/db/vision/field_rate.html, (参照 2025-3-25)

16)公益社団法人日本電気技術者法人.電気設備技術基準・解釈（その後）電線路に関する規制, <https://jeea.or.jp/course/contents/11105/>

17) 時事ドットコムニュース.【南海トラフ巨大地震】被害想定まとめ（2025 年版）, https://www.jiji.com/jc/tokushu?id=nankai_trough_earthquake_risk_2025&g=ert#goog_rewarded

ゴム繊維くずを有効利用した高靱性人工地盤材料の開発

香川高等専門学校建設環境工学科 教授 荒牧憲隆

1. はじめに

近年の気候変動に起因する豪雨と洪水によって土構造物の被害が頻発しており、ため池堤体などの土構造物において耐震および豪雨対策の総合的な強化が進められている¹⁾。しかし、ため池は、住宅地や道路など近接している場合も多く、簡便で効率的な補強技術、経済的かつ迅速な耐災補強工法の開発の検討が重要な課題となっている。一方で、ため池では、定期的に泥土を浚渫する必要がある。この泥土を処分することなく、有効利用方法についても実用化が進められ、ため池本来の機能確保が環境的側面からも実施されている。このような状況を踏まえ、ため池などの土構造物の機能向上を環境的かつ効率的に図るために、材料面および環境面から豪雨・洪水対策を同時に解決できる総合的な技術的取り組みを行うことが重要となる。

本研究では、近年問題となっている老朽化したため池の地震や豪雨への高耐久化対策において、環境に配慮した土構造物補強技術の開発を目指すものである。この中で、本研究課題では、建設発生土、産業廃棄物あるいは低利用資源を選択し有効利用することで、要素試験を中心とした力学特性を検討し、多様な材料の高付加価値化を図る高靱性人工地盤材料の開発することを目的としている。

2. 研究の方針

申請者は、これまで、廃棄物や建設発生土の地盤工学的有効利用に関する検討等に取り組んできた。この中で、現在、地域企業からの相談を受け、古紙や再生プラスチックなどのリサイクル資源を用いた短繊維補強土技術について検討を行ってきた²⁾。土構造物の補強土工法に関する技術は、近年盛んに研究が行われている。この技術において、繊維材と固化材を用いた補強土工法は研究実績もあり、実用化も進められている。しかし、その中で用いられる繊維材は、既製品の繊維材料が中心である。

本研究では、高靱性人工地盤材料の開発を目的としているが、地盤材料の高靱性化を検討するに当たり、ゴム繊維くずの利用を試みる。このゴム繊維くずは、廃タイヤをチップ化にするときに排出される産業廃棄物である。この廃タイヤなどから製造されたゴムチップの有効利用は、地盤材料³⁾やコンクリート⁴⁾への適用が試みられ、ある一定の成果が得られている。しかし、廃タイヤの有効利用に当たって、再度、繊維状の廃棄物が排出されることはあまり知られておらず、その有効利用までは検討されていない。ゴムの特徴として、柔軟性、復元性があり軽量であることから、チップ上で地盤材料へ適用性については有用性が確認されているが、繊維状になったときの人工地盤材料の力学特性については未解明であり、明らかにする必要がある。

本研究での検討内容は以下に示すとおりです。まず高靱性人工地盤材料の開発にあたって、土質材料には、カオリン粘土や珪砂を利用する。リサイクル繊維資源として、廃タイヤからゴムチップ製造時に排出されるゴム繊維くずを利用する。

まず、粘性土軟弱地盤の地盤改良工法や高含水比の泥土の有効利用を念頭に置き、室内試験から補強材として、ゴム繊維くずの有効利用の可能性について検討する。材料特性は、一軸圧縮試験および標準圧密試験より、粘性土から構成される人工地盤材料の静的力学特性を明らかにする。それぞれの試験において、以下の点に着目し、実施する。

試験前には、粘土もしくはゴム繊維混合土供試体を、予圧密装置にて 100kN/m^2 の予圧密を行う。

①標準圧密試験

- ・圧縮特性の検討
- ・圧縮・除荷による復元力の検討

次に、緩い砂地盤での液状化対策工法を念頭に置き、室内試験から補強材として、ゴム繊維くずの有効利用の可能性について検討する。材料特性は、②非排水三軸圧縮試験および③非排水繰返し三軸試験より、砂質土と混合した人工地盤材料の静的および動的力学特性を明らかにする。加えて、④上向き鉛直浸透流に対する浸透破壊試験も実施した。

②三軸圧縮試験

供試体の作製は、ウェットタンピング法にて行う。

- ・ゴム繊維混合土の非排水静的せん断特性の把握

③非排水繰返し三軸試験

供試体の作製は、②と同じ。

- ・繰返し荷重を受けるゴム繊維混合土の過剰間隙水圧、変形特性の把握
- ・ゴム繊維混合土の液状化強度特性

④上向き鉛直浸透流に対する浸透破壊試験

- ・ゴム繊維混合土のパイピングやボイリングに対する抵抗性の把握

最後に、これらを取りまとめ、総合的な評価を行い、ゴム繊維くずの地盤材料への有効利用の適否について評価する

3. 研究結果

3.1 実験に用いた試料

本研究で使用するゴム繊維材は、本来、コンクリートにおける細骨材の代替材、もしくは地盤材料への混合材として利用する廃タイヤをゴムチップ化した時に生成された副産物である。そのため、ゴムチップ同様、軽量な材料となっている。それぞれの粒子密度は、ともに 1.208Mg/m^3 になっている。ゴム繊維およびゴムチップの外観を、写真-1 に示す。

圧密試験や一軸圧縮試験で使用する土質試料は NSF カオリン(2.725Mg/m^3)であり、細粒分を主とした粘性土ある。非排水三軸圧縮試験および非排水繰返し三軸試験で使用する土質材料は、豊浦砂(2.653Mg/m^3)である。豊浦砂は、不純物が少なく、粒度は均質である。NSF カオリン、豊浦砂、ゴムチップの粒径加積曲線を図-1 示す。使用したゴムチップは、砂質土の粒度で、粒径 2mm 以上の礫分が 38% 含有されているのが特徴的である。

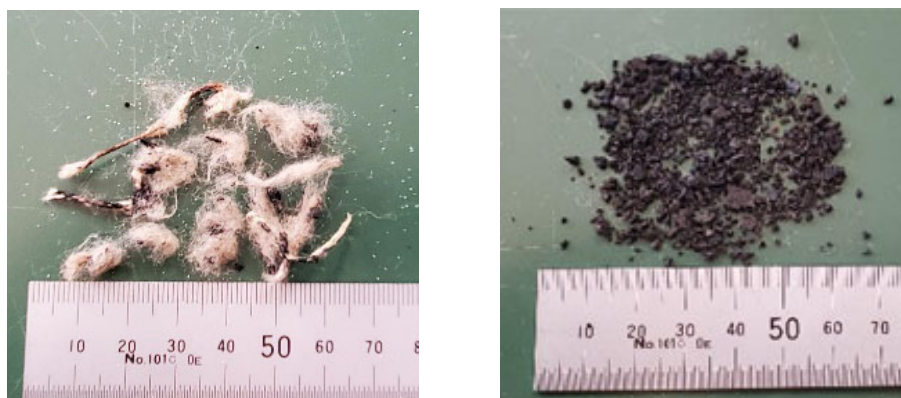


写真-1 ゴム繊維(左)とゴムチップ(右)

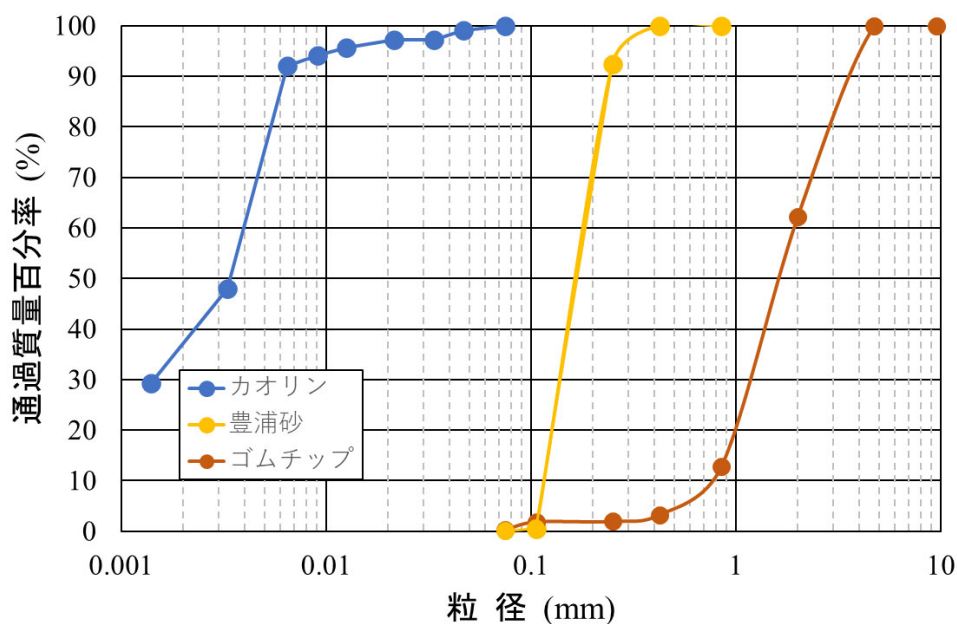


図-1 本研究で使用了材料の粒径加積曲線

3.2 本研究で行った実験方法および条件

3.2.1 ゴム繊維混合粘性土

(1) 圧密試験

実験に使用した材料は、NSF カオリン単体の無補強土、NSF カオリンの乾燥質量に対してゴムチップ混合率を 10%，ゴム繊維混合率を 1.5%混合した 3 種類を対象とした。それぞれの供試体は、軟弱地盤を想定して、カオリンの乾燥質量をベースに含水比を 96%（液性限界の 1.5 倍）で初期状態として固定し、作製した。それぞれ圧密試験前に、予圧密装置（直径 100mm×高さ 300mm）にて 2 日間 100kN/m^2 で圧密させた。これにより、供試体は応力履歴を受けた状態となる。圧密後、試料を取り出し、直径 60mm×高さ 20mm の供試体を作製し、圧密試験を行う。

圧密試験は、標準的な方法で行うケースと、載荷・除荷工程を複数回行う 2 ケースについて実施した。後者の載荷・除荷工程は、10, 20, 40, 80, 40, 10, 40, 80, 160, 320, 160, 10, 160, 320, 640, 1280, 640, 10kN/m^2 とした。各圧密圧力段階で 24 時間圧密している。

(2) 一軸圧縮試験

実験に使用した材料、ゴムチップやゴム繊維材の混合率、供試体作製方法は、(1)と同様である。供試体は、直径 50mm×高さ 100mm である。一軸圧縮試験は、軸ひずみ速度 $1.0\%/min$ を標準として、連続的に供試体を圧縮する。

3.2.2 ゴム繊維混合砂質土

(1) 圧密非排水三軸圧縮試験 (CU 試験)

実験に使用した材料は、豊浦差のみの無補強土、豊浦砂の乾燥質量に対してゴムチップ混合率を 5%，ゴム繊維混合率を 5%混合した 3 種類を対象とした。それぞれの供試体は、豊浦砂の相対密度 $D_r=40\%$ を基準とし、ウェットタンピング法により作製した。供試体は、直径 50mm×高さ 100mm である。供試体作製時、豊浦砂の初期含水比は 5%程度とした。CU 試験は、供試体を脱気水で通水後、B 値 0.96 以上を確認し、供試体の飽和化を図る。その後、拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kN/m}^2$ で圧密を行う。圧密終了後、非排水条件で軸ひずみ速度 $0.1\%/min$ を標準として、連続的に供試体を圧縮する。試験は軸ひずみ 15%を超えた時点で終了する。

(2) 非排水繰返し三軸試験

実験に使用した材料、ゴムチップやゴム繊維材の混合率、供試体作製方法は、(1)と同様である。拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kN/m}^2$ であり、圧密終了後、周波数 0.05Hz の正弦波を加えて行った。試験は、軸ひずみ両振幅 DA が 5% を超えた時点で終了する。

(3) 上向き鉛直浸透流における浸透破壊試験

実験に使用した材料は、豊浦差のみの無補強土、豊浦砂の乾燥質量に対してゴム繊維混合率を 5% 混合した 2 種類を対象とした。それぞれの供試体は、豊浦砂の相対密度 $Dr=40\%$ を基準とし、ウェットタンピング法により作製した。供試体は、直径 $100\text{mm} \times$ 高さ 100mm である。供試体作製時、豊浦砂の初期含水比は 5% 程度とした。試験装置（写真-2 参照）は供試体へ水道水を供給する貯水槽、供試体へ通水する浸透破壊試験装置モールドから構成される。供試体下部への流量と水圧を測定するため流量計を貯水槽とモールド間に設置した。本試験は、貯水槽を段階的に上昇させることにより、貯水槽と供試体上部との動水勾配を段階的に増加させ、浸透破壊の発生に伴い急激に流量が増加する時の動水勾配を測定する試験である。実験終了時に、表層部の土粒子の上下動、噴砂現象の変化を目視より観察した。



写真-2 浸透破壊試験装置の概観

3.3 検討結果および考察

3.3.1 ゴム繊維混合粘性土

繰返し載荷・除荷での圧密試験より、図-2 に NSF カオリンの、図-3 にゴム繊維混合粘性土の $e - \log p$ 曲線を示す。

図-2 より、NSF カオリンのみの場合、最初の除荷点となる圧密圧力 80kN/m^2 まで、間隙比の著しい減少は認められなかった。これは、圧密降伏応力となる予圧密圧力 100kN/m^2 以下で、弾性的な挙動を示すためであると考えられる。その後、圧密圧力 10kN/m^2 まで除荷を行うが、間隙比は初期状態まで回復することはなかった。そして、圧密圧力 320kN/m^2 まで再載荷において、圧密圧力の増加に伴い、間隙比が著しく低下している。この間隙比の低下率は、初期の圧密圧力 80kN/m^2 までの間隙比の減少率よりも大きい。これは、予圧密圧力 100kN/m^2 を超えた圧密圧力で載荷したため、カオリンが塑性的な挙動を示したためと推察される。圧密圧力 320kN/m^2 で、再度、除荷を行うが、間隙比が回復することはほとんど認められなかった。さらに、再載荷を圧密圧力 1280kN/m^2 まで行ったところ、圧密圧力 320kN/m^2 以降、間隙比は著しく低下する。また、前段階の除荷後の間隙比減少率、すなわち圧縮指数は同程度であることが分かる。最後に、圧密圧力 1280kN/m^2 で除荷を行った場

合、圧密圧力 80kN/m^2 、圧密圧力 320kN/m^2 での除荷時と比較して、間隙比の増加すなわち体積膨張は、大きかった。

図-4 より、ゴム繊維 10%混合粘性土において、最初の除荷点となる圧密圧力 80kN/m^2 まで、間隙比は、ほぼ同じ割合で低下している様子が認められる。その後、圧密圧力 10kN/m^2 まで除荷すると、間隙比は回復することはなかったが、わずかに増加した。また、このケースでは予圧密圧力 100kN/m^2 を載荷しているにもかかわらず、NSF カオリンのケースとは異なり、明確な圧密降伏応力は確認できなかった。これは、ゴムチップの弾性力の影響だと考えられる。圧密圧力 1280kN/m^2 までの載荷過程で間隙比は、指数関数的に減少している。圧密圧力 320kN/m^2 で、再度除荷を行うと、間隙比の増加が認められた。最後に、圧密圧力 1280kN/m^2 で除荷を行った場合、圧密圧力 320kN/m^2 での除荷時と比較して、同程度の接線勾配すなわち体積膨張は同程度である。この $e - \log p$ 曲線において、全載荷過程の接線勾配は初期の圧密圧力からほぼ同じである。また、ゴムの混合状態が繊維状であっても、チップ状の場合と同様に除荷時には体積の膨張傾向が認められた。

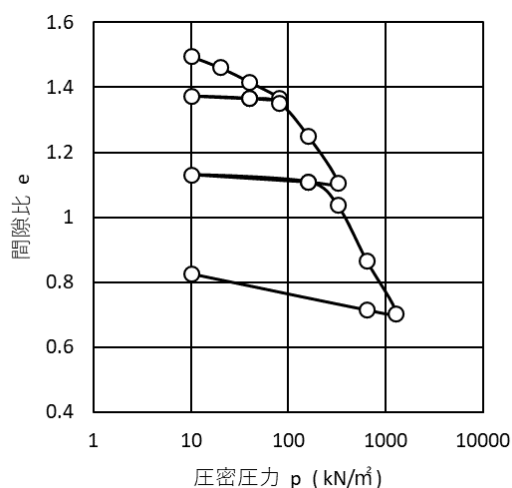
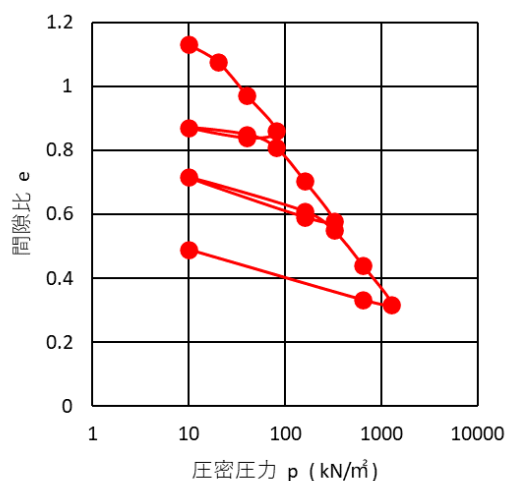
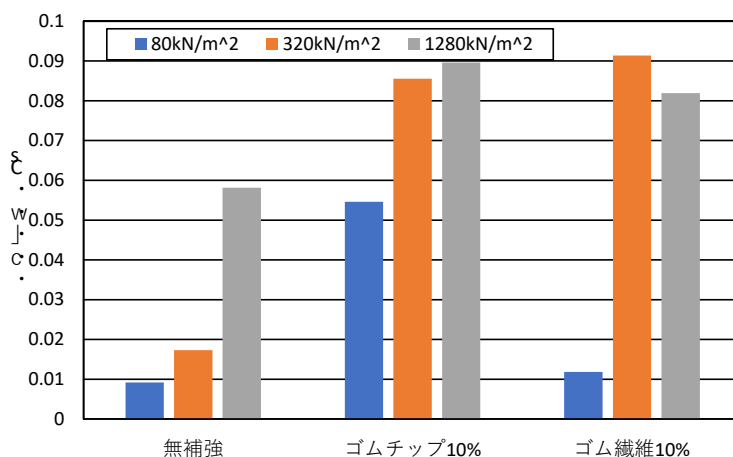
図-2 カオリンの $e - \log p$ 曲線図-3 ゴム繊維混合土の $e - \log p$ 曲線

図-4 に、各材料における圧密試験の除荷時の膨張指数 C_s をまとめた。NSF カオリンの場合、除荷開始時の圧密圧力が増加すると、膨張指数も増加している。ゴムチップ 10% 混合粘性土において、除荷開始時の圧密圧力 80kN/m^2 での膨張指数は、他の 2 試料に比べ、最も高い。除荷開始時の圧密圧力が増加すると、膨張指数も増加しているが、除荷開始時の圧密圧力 320kN/m^2 と

1280kN/m^2 では大きな差が認められなかった。ゴム繊維 10%混合粘土では、除荷開始時の圧密圧力 80kN/m^2 での膨張指数は、NSF カオリンの膨張指数と同程度で、圧密圧力 320kN/m^2 と 1280kN/m^2

図-4 各土質材料の膨張指数 C_s

の除荷時の膨張指数は、ゴムチップ 10%混合粘性土の膨張指数と近似した値となった。ゴム繊維 10%混合粘土の圧密特性は、低圧密領域では NSF カオリンと、高圧密応力域ではゴムチップ 10%混合粘性土と類似した挙動を示す。ゴムの弾性力により、復元力が大きくなったため、膨張指数が大きくなったと考えられる。ゴム繊維およびゴムチップを混合すると、無補強と比較して復元力が働き、膨張効果が得られることが分かった。

3.3.2 ゴム繊維混合砂質土

(1) 圧密非排水圧三軸圧縮試験 (CU試験)

まず、相対密度 $Dr=40\%$ の豊浦砂とゴム繊維混合砂質土について、CU試験より得られた軸差応力・軸ひずみ関係について述べる。図-6 に軸差応力・軸ひずみ関係を示した。相対密度 $Dr=40\%$ の豊浦砂では、载荷初期より軸ひずみの発達に伴い軸差応力も徐々に様子が認められる。これに対し、ゴム繊維混合砂質土では、ある軸差応力に達するまで軸ひずみがほとんど生じておらず、その後、軸差応力の増加とともに軸ひずみが大きく発達している様子が認められる。軸ひずみ 1~3%の発生領域では、豊浦砂、ゴム繊維混合砂質土ともに、せん断挙動は類似した傾向を示すが、ゴム繊維混合砂質土では、その後、豊浦砂と比較して、軸差応力の増加率が大きいことが分かる。両者ともに明確な軸差応力のピークは認められないが、ゴム繊維混合砂質土の軸ひずみ 15%時の軸差応力は、豊浦砂の軸差応力の 1.4 倍程度となっている。

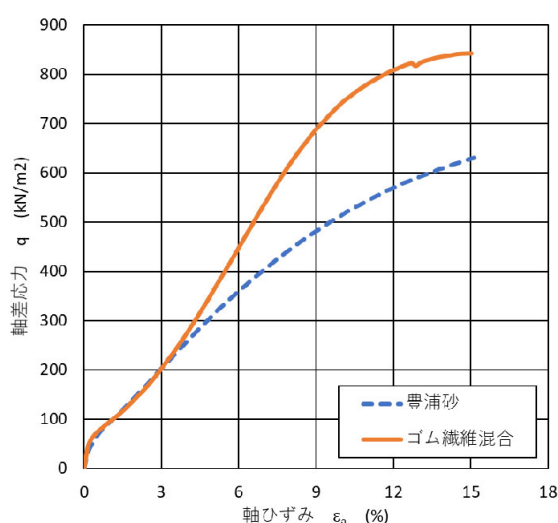


図-6 CU試験より得られた軸差応力・軸ひずみ関係

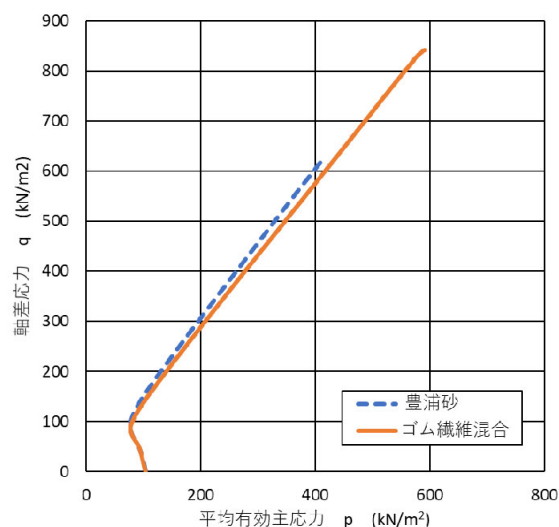


図-7 CU試験より得られた有効応力径路

次に、CU試験より得られたそれぞれの土試料の有効応力径路について、図-7 に示した。豊浦砂では、せん断初期において、有効応力が減少し、収縮的な挙動を示している様子が認められる。その後、有効応力は、ある特定の値で減少から増加に転じている。この有効応力が減少から増加に転じる点は、豊浦砂が収縮傾向から膨張傾向へ移行する変曲点であり、変相点と呼ばれる。有効応力が膨張傾向へと移行すると、有効応力は、初期拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kN/m}^2$ より大きな値まで回復し、膨張性の挙動を示している。ゴム繊維混合砂質土においても、同様な非排水せん断挙動を示している。変相点の軸差応力、平均有効主応力もほぼ同じである。しかし、有効応力は、大きな値まで回復し、豊浦砂のケースよりも、顕著な膨張性の挙動が認められる。これらのことから、砂質土にゴムチップを混合することで、靱性が発揮され、供試体は粘り強さがより増すことが分かった。

(2) 非排水繰返し三軸試験

豊浦砂，ゴムチップ混合砂質土，ゴム繊維混合砂質土について，非排水繰返し三軸試験より得られた過剰間隙水圧比，軸ひずみ両振幅の変化について示す。図-8 には，それぞれの試料の過剰間隙水圧比と繰返し回数（回）の関係を示している。なお，ここでは，試料間の比較のため，類似した繰返し応力振幅比 $0.220 \sim 0.235$ を適用した結果となっている。最初に，過剰間隙水圧比 $u/\sigma'_c = 1.0$ 付近に到達する，すなわち液状化が発生する繰返し回数は，ゴムチップ混合砂質土，豊浦砂，ゴム繊維混合砂質土の順で，増加していることが認められる。繰返し回数 1 回目に着目すると，豊浦砂とゴムチップ混合砂質土は，過剰間隙水圧比 $u/\sigma'_c = 0.2$ 程度であるのに対し，ゴムチップ混合砂質土では $u/\sigma'_c = 0.4$ と大きくなっている。豊浦砂では，繰返し回数 3 回以降，過剰間隙水圧の増加率が大きくなり液状化に至っている。一方，ゴム繊維混合砂質土では，過剰間隙水圧の増加率は，他の試料と比較して小さく，過剰間隙水圧の発生を抑制している様子が認められる。次に，図-9 には，それぞれの試料の軸ひずみ両振幅 DA と繰返し回数（回）の関係を示している。どの試料も，ある特定の繰返し回数に達するまで，軸ひずみ両振幅はあまり発生していない。豊浦砂とゴムチップ混合砂質土では，その後，急激に軸ひずみ両振幅が増加し，液状化に至っている。ゴムチップ混合砂質土では，繰返し回数 20 回程度まで，軸ひずみ両振幅は緩やかに増加し，その後，他の試料と比較して，軸ひずみ両振幅の増加率は小さく，徐々に増加している様子が認められる。ゴム繊維の混合することで，ゴム繊維と砂粒子との摩擦や絡み合いのより，繰返し载荷に対し，間隙水圧やひずみの発生を抑制しており，繊維の靱性を発揮した粘り強い改良効果が発揮されている。

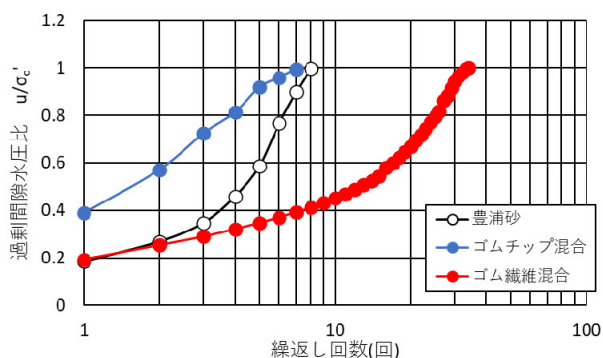


図-8 過剰間隙水圧比と繰返し回数の関係

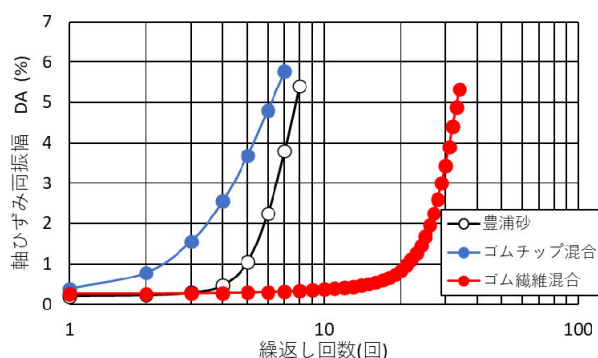


図-9 軸ひずみ両振幅と繰返し回数の関係

図-10 には，豊浦砂ならびにゴムチップ混合砂質土の液状化強度曲線を示した。ゴム繊維混合砂質土の液状化強度曲線が上方に位置しており，液状化抵抗が，豊浦砂に比べ高いことが分かる。ゴムチップ混合砂質土は，ゴム繊維混合土が繰返し回数 20 回程度で液状化する時の応力比 0.239 と同等な繰返し応力比 0.235 で繰返し回数が 8 回であった。ゴムチップ混合土は豊浦砂のみと大きな差は見られなかった。ゴム繊維を混合すると液状化が起こりにくいことが確認できた。

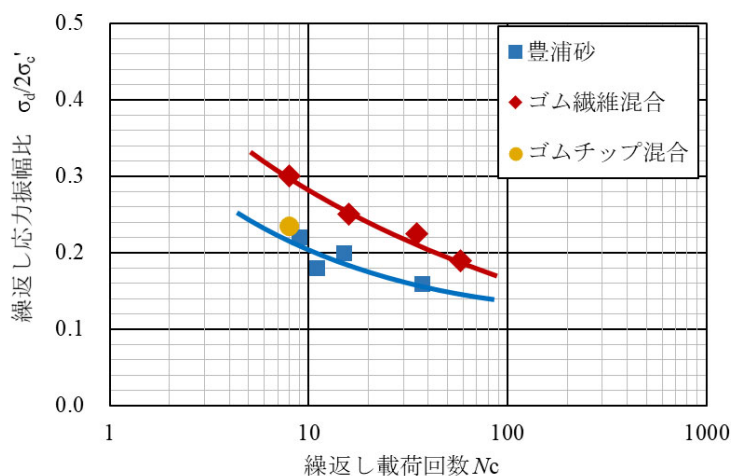


図-10 液状化強度曲線

砂と廃ゴム繊維材との摩擦・付着または絡み合いによって液状化抵抗が増加したと考えられる。ゴム繊維の混合により抑制効果があることが認められた。

(3)鉛直浸透流による浸透破壊試験

豊浦砂，ゴム繊維混合砂質土について，鉛直浸透流による浸透破壊試験より得られた流量と動水勾配の関係について図-10 に示す。豊浦砂の場合，動水勾配が $i=0.8$ までは，時間当たりの流量は非常に少ない様子が認められる。動水勾配が $i=0.9\sim1.0$ の間で流量が急激に増加していることから，ボイリングもしくはパイピングが発生し，供試体は浸透破壊が発生したと考えられる。なお，浸透破壊発生後も流量は増加する傾向が確認された。ゴム繊維混合砂質土の場合，豊浦砂が浸透破壊を発生する動水勾配 $i=0.8\sim1.0$ でも流量は非常に少ない。また，この傾向は，動水勾配 $i=1.7$ まで継続する。その後，動水勾配 $i=1.7\sim2.0$ の間で，流量が急激に増加したことからボイリングもしくはパイピングが発生したと考えられる。浸透破壊後も流量は増加し続けている様子が認められる。

供試体の浸透破壊の発生に伴い急激に流量が増加した際の動水勾配を i_f とすると，豊浦砂では $i_f = 0.8$ ，ゴム繊維混合砂質土では $i_f = 1.7$ となる。このことから，ゴム繊維を混合することで浸透破壊抵抗性として無補強時に比べると 112.5%増加したことになる。ゴム繊維を混合すると，土粒子が遊離する状態になりにくくなるため，浸透破壊に対する粘り強さが発揮されたと推察される。

3.4 まとめ

本研究より得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 軽量のゴム繊維を土に混合することで，軽量の人工地盤材料の作製が期待できる。
- 2) 圧密試験の結果より，ゴム繊維や，ゴムチップを混合させると沈下抑制効果や膨張効果が確認できた。
- 3) 非排水繰返し三軸試験の結果より，砂質土にゴム繊維を混合させると，過剰間隙水圧ならびに変形の発生抑制効果があることが明らかになり，液状化強度も補強効果が確認できた。
- 4) 鉛直浸透流の浸透破壊試験の結果より，ゴム繊維を混合させると耐浸透破壊性が向上することが明らかとなった。
- 5) 粘性土，砂質土にゴム繊維を混合することで，ゴムの材料特性である弾性力と，繊維材としての靱性が向上する補強効果が確認された。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた 豪雨地盤災害に対する地盤工学の課題 - 地盤工学からの提言-，pp.77～119, 2019.
- 2) 例えば，荒牧憲隆，新川裕也，平田佐介，Batmunkh Enkh Orgil：繊維系廃棄物を有効活用した短繊維混合補強土の力学特性と耐浸食性に関する実験的研究，ジオシンセティックス論文集，pp.39-46, 2022.
- 3) 例えば，御手洗義夫，安原一哉，菊池喜昭，Ashoke Kumar KARMOKAR：古タイヤゴムチップを固化処理土に混合した新しい地盤材料の開発と力学的特性，土木学会論文集C，63 巻, 3 号, pp. 881-900, 2007.
- 4) 例えば，若林学，丸山武彦：コンクリート分野における廃タイヤの再利用に関する研究，コンクリート工学論文集，2004, 15 巻, 3 号, pp.39-45, 2012.

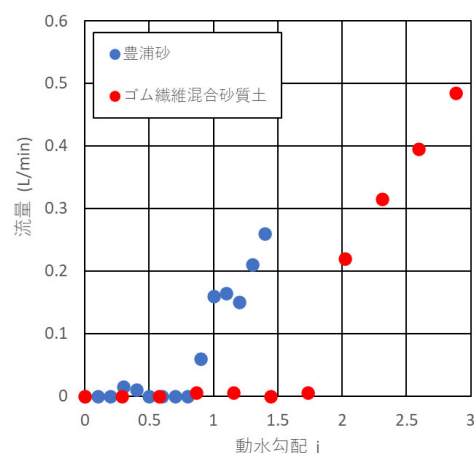


図-10 浸透破壊試験より得られた流量と動水勾配の関係

橋梁部材のコンクリートに生じたひび割れ自己治癒に関する研究

神戸市立工業高等専門学校都市工学科 教授 水越睦視

1. はじめに

道路橋床版の伸縮装置の取り替え時に施工した超速硬コンクリートにセメントの水和熱や温度差による膨張伸縮が原因でひび割れが発生する事例がみられる。また、高欄コンクリートでも、膨張材の添加や誘発目地を施工しているにも関わらず誘発目地間でも、ひび割れの発生が認められる。そこで、これらのひび割れを自己治癒させることを考えた。わが国でもコンクリートの自己治癒に関する技術として、炭酸化合物や膨張材などの混和材を添加したもの、バクテリアが生成する炭酸カルシウムを利用した技術、短繊維を混入し、ひび割れ界面に架橋した繊維に析出物を固定化させ修復する技術などがある。

本研究は、道路橋床版の伸縮目地部の取り替え時に施工した超速硬コンクリートにおよび高欄部のコンクリートに発生したひび割れを自己治癒させ、床版内部への水の浸入を防ぎ耐久性の向上を図ることを目的とする。これまでの報告の多くは、ひび割れ断面は完全に水中に浸漬、あるいはひび割れ断面の片面から水分が吸収される状況においての自己治癒効果の検証がほとんどである。橋梁部材のように常時、水分が供給されない状況において、ひび割れの自己治癒効果を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

超速硬コンクリートに用いた使用材料および物理的性質を表1に示す。セメントは、道路橋床版の伸縮装置取替時のコンクリート配合を対象としており、超速硬セメントを用いた。自己治癒材は混和材型(AD)と繊維型(MC)の2種類を用いた。ADはカルシウムサルフォアルミネート(CSA)系膨張材、ジオマテリアル、炭酸基系化学添加材を混合したセメント組成物である。MCは細径で異形断面を有するため一般的なポリプロピレン繊維に比べて比表面積が大きく、繊維の表面に改質処理を施していることから、炭酸カルシウムの析出しやすい状況を形成し、セメント粒子も捕捉しやすい。

高欄コンクリートに用いた使用材料および物理的性質を表2に示す。自己治癒材としてポリビニルアルコール繊維(PVA繊維)を用いた。極性基であるOH-基を持つPVA繊維を用いることで、より良好な自己治癒性能を示すことが明らかにされている¹⁾。PVA繊維を用いたモルタルでは、0.3mm程度までのひび割れが自己治癒されることが確認されており、特にPVA繊維を用いることで良好な自己治癒性能を示すことが明らかにされている²⁾。また、フライアッシュ(FA)を用いたコンクリートにおいて、ポゾラン反応による自己治癒効果が確認されている³⁾。自己治癒現象のメカニズムは、ポゾラン反応による反応析出物の生成や CaCO_3 の析出などが挙げられるが、最も影響が大きいとされるのは CaCO_3 であることが確認されている⁴⁾。

2.2 コンクリートの配合

超速硬コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表3に示す。高欄コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表4に示す。

2.3 試験項目および試験方法

スランブ試験は、JIS A 1101に準拠し、空気量試験は、JIS A 112に準拠して実施した。

自己治癒効果を評価するために透水試験を行った。透水試験用の供試体は、VU 菅(呼び径 ϕ 100mm)を長さ 50mm に切断したものを型枠として使用して作製した。供試体数は 1 配合あたり 10 個とした。供試体には貫通ひび割れを導入した。ひび割れ幅をクラック幅測定器にて表面 3 点、底面 3 点の計 6 点にて測定し、ひび割れ幅の平均値が $0.15 \pm 0.05\text{mm}$ になるようひび割れを導入した。次に、50mm の水頭が確保できるように ϕ 10mm 程度の穴を開けた VU 菅を使用し、供試体と VU 菅および下部 VU 菅はビニルテープでシールし、漏水のないことを確認した。水頭 50mm の条件下でひび割れ部に 1 分以上通水させてから測定を開始した。養生条件は、水中養生(W)、半水中養生(HW)、わが国に気候を考慮した 7 日のうち 1 日を水中、6 日を気中とする乾湿繰返し養生(DW)とした。なお、養生温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ とした。透水試験の状況を図 1 に示す。

自己治癒によりひび割れ部を埋めた析出物の分析は、走査型電子顕微鏡(SEM)による形態観察およびエネルギー分散型 X 線分光器(EDS)による元素組成分析を実施した。

表 1 超速硬コンクリートに用いた使用材料および物理的性質

水	W	水道水(密度: $1.00\text{g}/\text{cm}^3$)
セメント	C	超速硬セメント(密度: $2.98\text{g}/\text{cm}^3$)
細骨材	S	硬質砂岩砕砂(表乾密度: $2.61\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 2.88, 吸水率: 2.01%)
粗骨材	G	硬質砂岩砕石(最大寸法: 20mm, 表乾密度: $2.68\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 6.78, 吸水率: 1.00%)
凝結遅延剤	SET	セメントメーカー指定品
高性能減水剤	SP	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
自己治癒混和材	AD	カルシウムサルフォアルミネート(CSA系膨張材), ジオマテリアル(Geo-Materials), 炭酸基系化学添加材を混合したセメント組成物
自己治癒繊維材	MC	細径異形ポリプロピレン短繊維, 密度: $0.91\text{g}/\text{cm}^3$, 繊維長: 15mm, 繊維直径: 0.028mm, 繊度: 5.4dtex, 水分率 34.8%

表 2 高欄コンクリートに用いた使用材料および物理的性質

W	水道水(密度: $1.00\text{g}/\text{cm}^3$)
C	普通ポルトランドセメント(密度: $3.15\text{g}/\text{cm}^3$)
FA	JIS II 種(密度: $2.25\text{g}/\text{cm}^3$)
S	硬質砂岩砕砂(表乾密度: $2.63\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 2.81, 吸水率: 1.67%, 骨材の微粒分量: 3.5%)
G	硬質砂岩砕石(最大寸法: 20mm, 表乾密度: $2.66\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率: 6.77, 吸水率: 1.14%, 骨材の微粒分量: 0.2%)
PVA	ポリビニルアルコール繊維(密度: $1.3\text{g}/\text{cm}^3$, 直径: $660\mu\text{m}$, 繊維長: 30mm, ヤング係数 $23.0\text{kN}/\text{mm}^2$, 引張強度: $900\text{N}/\text{mm}^2$, 切断伸度: 9.0%)
SP	ポリカルボン酸系(標準形)
AE	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤(I 種)

表 3 速硬コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

自己治癒材の種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP C×(%)	SET C×(%)	フレッシュ試験結果		
			W	C	S	G	自己治癒材			スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
AD	35.6	39.7	155	425	689	1075	10(内割)	2.0	0.7	8.0	1.1	28.7
MC	35.6	45.0	185	520	718	900	3(外割)	2.5	0.7	10.0	1.1	27.0
PL	35.6	39.7	155	435	394	1080	-	2.0	0.7	7.0	1.4	29.4

表 高欄コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

コンクリート ...	W/B (%)	s/a (%)	PPF (vol.%)	(kg/m ³)						B×(%)	外割(kg/m ³)	フレッシュ試験結果		
				W	C	FA	EX	S	G			スランプ (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)
PVA	50	46	0.3	165	330	-	-	828	984	1.0	3.9	13.0	5.6	23.0
PVA-FA	50	46	0.3	165	297	33	-	823	979	1.0	3.9	13.0	5.5	26.0
PVA-EX	50	46	0.3	165	310	-	20	831	984	1.0	3.9	10.0	5.8	23.8



図 1 透水試験の状況

3. 試験結果および考察

超速硬コンクリートの自己治癒性能

初回ひび割れ導入直後のひび割れ幅と透水量の関係を図 1 に示す。図より、ひび割れ幅が大きくなるほど透水量が多くなる傾向がうかがえる。同じひび割れ幅でも透水量に差があるのは、ひび割れ形状や粗骨材の位置の影響と考えられる。初回ひび割れ導入後の透水試験において、C 養生、養生における全ての供試体で透水量は 0.1 とした。自己治癒材なしの供試体でも自己癒効果が認められた。図 2 に透水量 0.1 となった供試体の自己治癒状況例を示す。

図 3 に 4 種類の養生の中で 8 日後の透水が認められ、養生における透水比(ひび割れ導入後の透水量/ひび割れ導入直後の透水量)とひび割れ幅の関係を示す。図より、透水が抑制される供試体もあるが、ひび割れ幅が 0.1mm 以上でも透水抑制ができない供試体も、ひび割れ幅が 0.1mm を超えると、その傾向が顕著となった。図 4 ではひび割れ幅が 0.1mm 以上でも透水比が大きいものも幾つかある。自己治癒材配合である供試体と、ひび割れ幅が 0.1mm を超える供試体とを比べると自己治癒効果は小さいといえる。

再度ひび割れを導入し、ひび割れ幅を大きくした後、図 5 に再ひび割れ透水試験を実施した。図 6 に再ひび割れ

れ導入 29 日後の DW 養生における透水比とひび割れ幅の関係を示す。図より、MC、AD においても完全に透水を抑制できていないものの、AD では、PL よりも透水比が小さくなっている傾向がうかがえる。MC については、PL と同程度の透水比の供試体が多く、PL と同程度の自己治癒性能となっている。

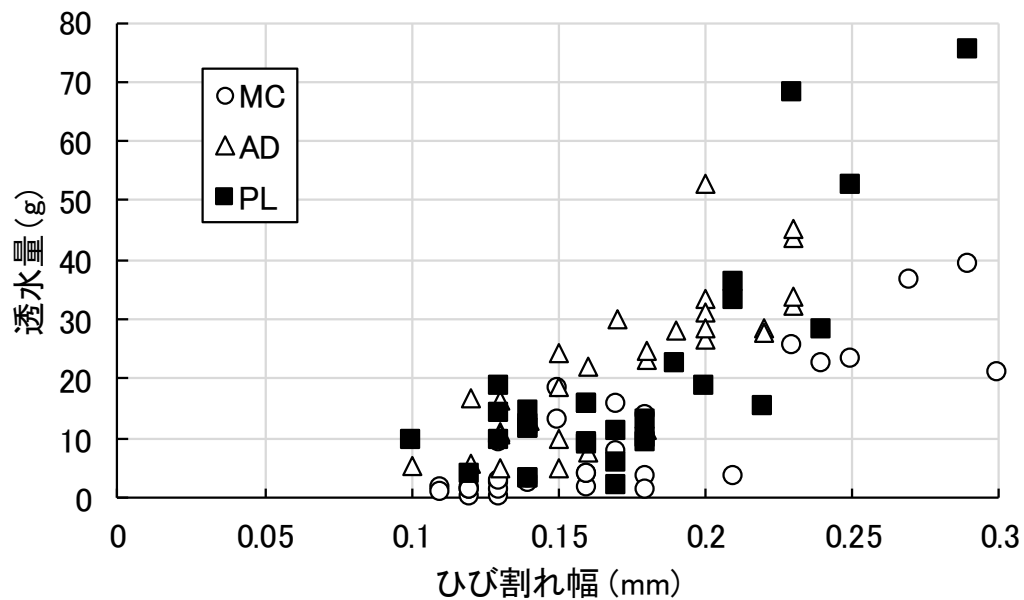
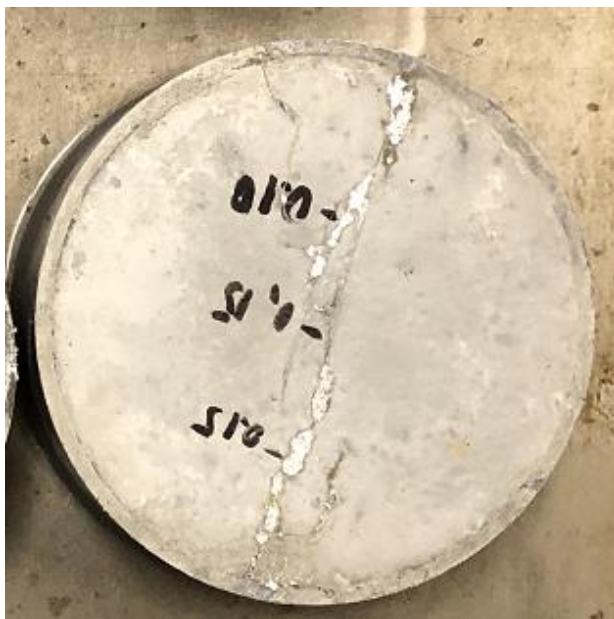


図 2 初回ひび割れ導入直後のひび割れ幅と透水比の関係



自己治癒材 AD 配合 (HW 養生)



自己治癒材 MC (HW 養生)

図 3 AD および MC の自己治癒状況例 (透水量 0)

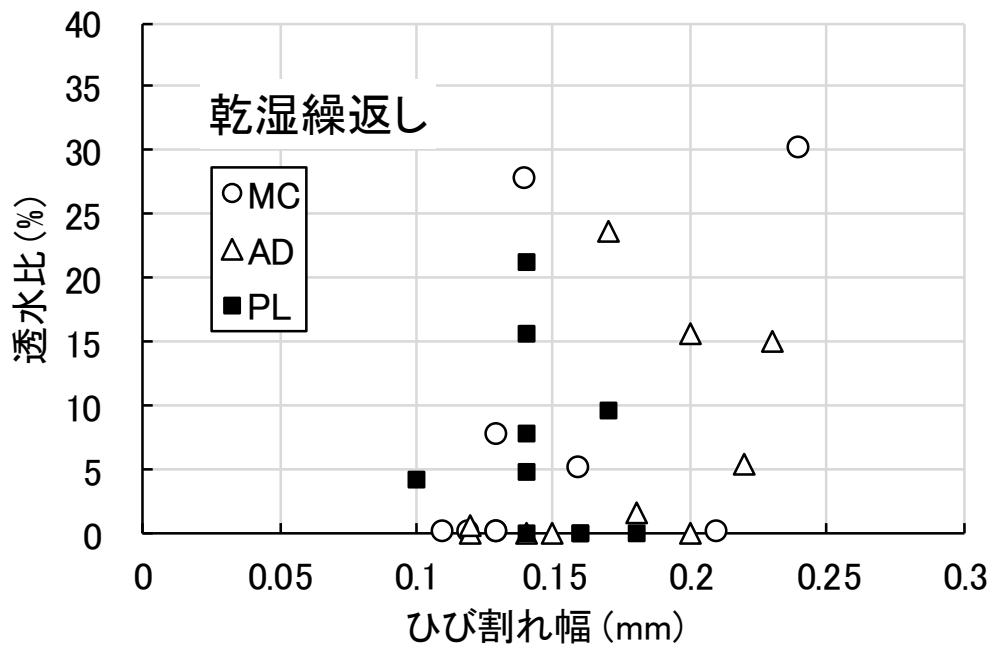


図4 透水比とひび割れ幅の関係 (DW 養生, ひび割れ導入 38 日後)

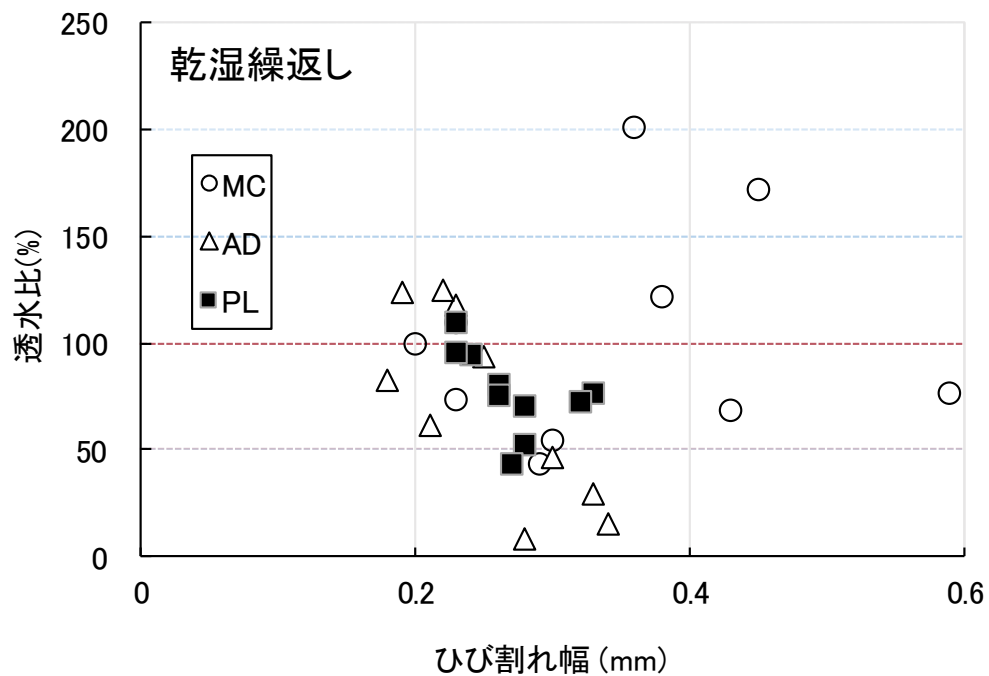


図5 再びび割れ導入 29 日後の DW 養生における透水比とひび割れ幅の関係

3.2 高欄コンクリートの自己治癒性能

高欄コンクリートでは、初回ひび割れ導入 70 日後の透水試験の結果において、PVA-FA の 1 体のみで僅かな透水が認められたが、その他の全ての供試体で透水量は 0 となった。

橋梁高欄の置かれている状況に近い、乾湿繰返し養生(DW 養生)について以下に考察する。超速硬コンクリートと同様に、ひび割れ導入から 28 日後の透水比((測定した透水量 w)/(ひび割れ導入直後の透水量 w_0))により評価することとした。ひび割れ導入後 28 日および 63 日後のひび割れ幅と透水比の関係を PVA について図 6 に、PVA-FA を図 7 に、PVA-EX は図 8 に示す。これらの図より、ひび割れ導入後 28 日、63 日の透水比から、自己治癒材料の自己治癒効果を判断すると PVA が最も効果があると判断できる。ひび割れ幅 0.15~0.2mm の範囲では、他の配合に比べて透水比は小さく、ひび割れ幅が 0.2~0.25mm の範囲でも、PVA-FA に比べて透水比は小さいことがわかる。

以上より、PVA に FA を追加し、ポズラン反応による生成物によるひび割れ充填を期待したが、乾湿繰返し養生においては、FA の効果は認められなかった。また、PVA に EX を追加し、膨張材に含まれる酸化カルシウム (CaO) が水 (H_2O) と反応して、水酸化カルシウム (CaOH_2) になる過程で、水酸化カルシウム結晶が成長し、ひび割れを充填する効果を期待したが、ひび割れ幅 0.15mm 以下において、PVA に比べて効果があると思われたが、顕著な自己治癒効果の差は認められなかった。

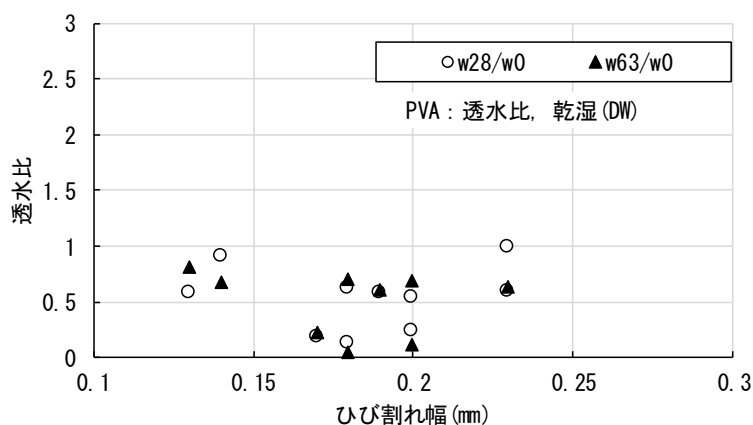


図 6 PVA の透水比とひび割れ幅の関係

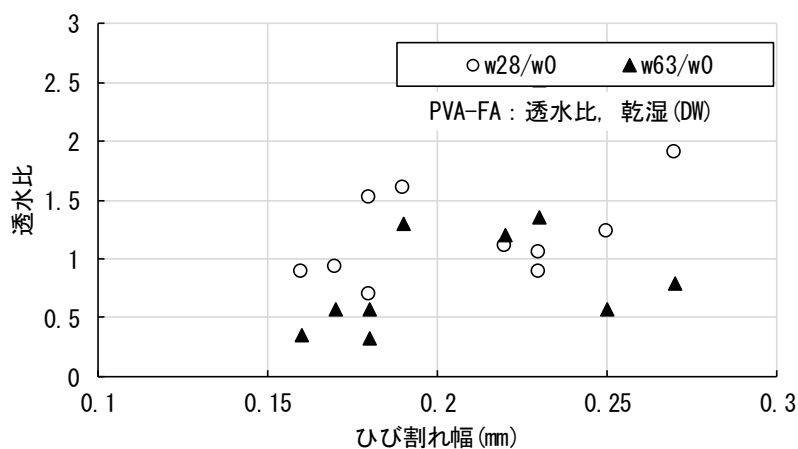


図 7 PVA-FA の透水比とひび割れ幅の関係

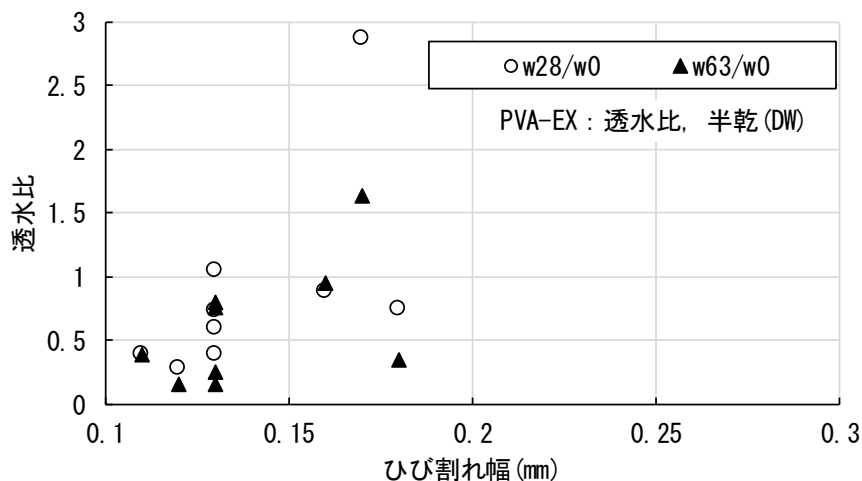


図8 PVA-EX の透水比とひび割れ幅の関係

3.3 自己治癒によるひび割れ充填部分における析出物の形態観察

超速硬コンクリートの AD 配合および MC 配合のひび割れ充填部分の SEM 写真を各々図 9、図 10 に示す。これらより、AD と MC では、ひび割れ部を充填していた白色物質の結晶の形態に大きな差異はなかった。一部では細長い繊維状組織の生成も認められ、これの生成組織が自己治癒に寄与したものと考えられる。

高欄コンクリートの PVA 配合の SEM 写真(300 倍)を図 11 に、1000 倍を図 12 に示す。白色物質は、立方体をはじめとした角張った形状の結晶が認められ、結晶同士が融合したような組織も確認された。PVA 配合と PVA-FA 配合、PVA-EX 配合の形態にも SEM 観察からは大きな差異はなかった。

EDS による元素組成分析から、超速硬コンクリートと高欄コンクリートでは、成分に違いがみられたが、同一コンクリート間では配合による大きな違いはなかった。超速硬コンクリートでは、主に Al を主成分とし、副成分として、C, Na, Si, S, K, Ca が確認された。高欄コンクリートでは、主成分として Ca と C を含み、副成分として Na, Mg, Al, Si, K が確認された。



図9 SEM写真(超速硬 AD, 1000 倍)

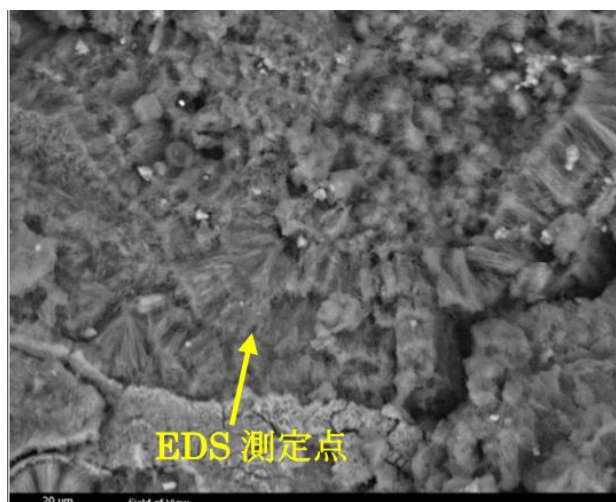


図10 SEM写真(超速硬 MC, 1000 倍)

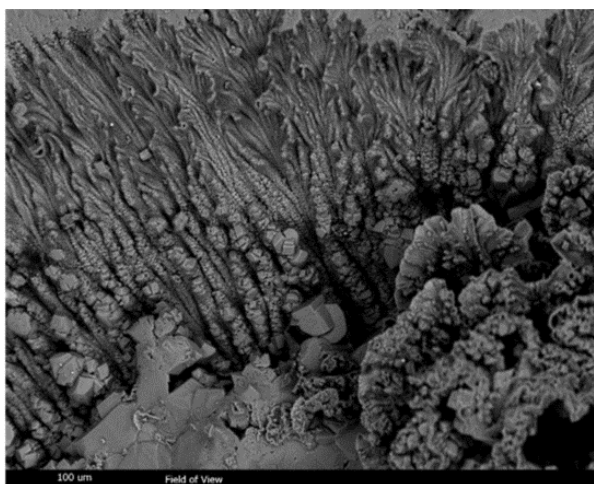


図 11 SEM写真（高欄 PVA，300 倍）

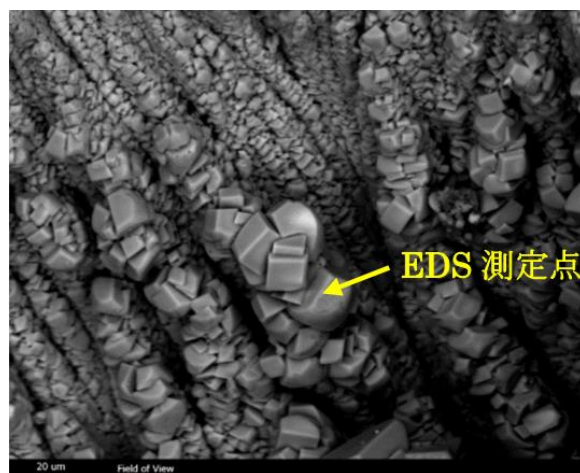


図 12 SEM写真（高欄 PVA，1000 倍）

4. 結論

超速硬コンクリートでは、AD、MC、PL とともにひび割れ導入 28 日後で水中養生，半水中養生では，全供試体でひび割れの自己治癒が確認されたが，わが国の気候を考慮した乾湿繰返し養生では，AD、MC でもひび割れからの透水を遮水することはできなかった。ただし，PL に比べると自己治癒効果は高い傾向がうかがえた。再ひび割れ導入から 29 日後では，DW 養生において，自己治癒材料を混和した MC、AD においても完全に透水を抑制できていないものの，AD では，PL よりも透水比が小さくなることがわかった。課題として，AD を添加した場合は強度発現が遅延すること，MC を添加した場合は，PL 配合と同じ単位水量ではスランプが小さくなり，単位水量を 30kg/m^3 増加しなければならない結果となった。

高欄コンクリートでは，超速硬コンクリート同様に，水中養生，半水中養生のように常に水分の供給がある状態に比べて，現場環境を想定した乾湿繰返し養生では自己治癒性能は劣ることがわかった。しかしながら，ひび割れの発生から材齢が経過するに伴って自己治癒効果が発揮されることが確認された。また，PVA 繊維に加えてフライアッシュあるいはカルシウムサルフォネート系膨張材を混和しても，自己治癒性能の向上に乾湿繰返し養生では効果が確認されなかった。

自己治癒によるひび割れ充填部分における析出物の形態観察から，結晶組織が生成され，ひび割れを充填していることが確認された。

参考文献

- 1) 芳賀匠，崔希燮，井上真澄：PVA繊維混入によるコンクリートの複合的自己治癒の性能評価に関する基礎的研究，平成26年度土木学会北海道支部論文報告集，第71号，E-12，2014.
- 2) 国府田まりな，三橋博三，西脇智哉，菊田貴恒：合成繊維を用いたFRCCのひび割れ自己修復に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.76，No.667，pp.1547-1552，2011.
- 3) 濱幸雄ほか：フライアッシュを用いたコンクリートの自己修復効果，セメント・コンクリート，Vol.782，pp.38-43，2012.
- 4) 佐々木 悠，寺田 健悟，五十嵐 豪，西脇 智哉：PVA繊維を用いたFRCCの耐凍害性と自己治癒性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol37，No.1，pp.1321-1326，2015.

液状化による地盤大変形および対策工の評価シミュレータの開発

京都大学経営管理研究部 教授 肥後陽介

1. はじめに

日本では近年、地震や豪雨による大規模な地盤災害が頻発しており、これらは多くの場合、地盤の大変形を伴う。大変形により生じる地盤災害は、インフラの破壊や経済損失に直結し、社会的影響が極めて大きい。このため、地盤の大変形挙動を適切に予測する解析技術の高度化が強く求められている。

地盤変形の解析手法には、直接法と離散化法が存在する。前者は極限解析や安定解析といった理論的手法により簡略モデルを用いるのに対し、後者は連続体または離散体に分割し数値的に解析を行う。特に、連続体を対象とする有限要素法（FEM）は地盤工学分野で広く利用されているが、大変形問題ではメッシュ歪みが発生し、解析精度と安定性に問題が生じる（Sulsky et al., 1994）。

これに対し、Material Point Method（MPM）は、マテリアルポイントと計算格子を組み合わせることで大変形に対応可能な解析手法として注目されている。従来の MPM は主に単相系地盤を対象としていたが、地盤は実際には水と空気を含む多相系材料であるため、多相連成解析の拡張が不可欠である。

本報告では、固・液・気の三相を考慮した新たな三相 2-Point MPM 定式化を紹介する。本手法は、固液相を独立したラグランジュ粒子でモデル化することで、固液相間の相対移動を考慮しつつ、移流項の発生を回避する特徴を持つ（Bandara & Soga, 2015）。さらに、本手法の適用性を検証するために数値解析を行い、不飽和盛土における地震時液状化挙動の再現性を評価する。

2. 従来研究と本研究の位置づけ

Material Point Method（MPM）は、もともと流体計算手法である Particle-In-Cell（PIC）法を固体力学に応用する形で（Sulsky et al., 1994）提案された。MPM は、マテリアルポイントにより質量・履歴情報を保持しつつ、背景格子上で支配方程式を解く手法であり、大変形問題においても高い数値安定性を維持できる。初期の MPM では、粒子が格子をまたぐ際に数値振動が生じる問題が指摘されたが、Bardenhagen らにより Generalized Interpolation Material Point（GIMP）法が提案され、これにより数値安定性が大幅に向上した（Bardenhagen & Kober, 2004）。

地盤は水と空気を含む多相系材料であるため、多相連成解析への拡張が試みられてきた。固液二相系の解析としては、Zhang らによる u-p 定式化（Zhang et al., 2009）、Jassim らによる液相加速度を考慮した定式化（Jassim et al., 2013）がある。不飽和三相系への拡張としては、Higo らが MPM と有限差分法（FDM）を連成した解析手法を提案し（Higo et al., 2010）、さらに動的問題への適用も行っている（Higo et al., 2015）。

一方、相間移流を適切に取り扱うために、2-Point 定式化が提案された（Bandara & Soga, 2015）。これは、固相と液相を別々のラグランジュ粒子で離散化することにより、相間移流項を消去し、質量保存則を各相ごとに厳密に適用できる特徴を持つ。特に、移流の数値的不安定性が問題となる大変形問題において、2-Point 定式化は大きな利点を有する（Soga et al., 2015）。

三相系においては、以下の 3 パターンの定式化が考えられる。

- (i) 1-Point 定式化（全相を一つの粒子で表現）、
- (ii) 2-Point 定式化（固液相を別粒子、気液相を共通粒子で表現）、
- (iii) 3-Point 定式化（全相を別粒子で表現）。

しかし、通常の地盤工学現象において気液相間の力学的相互作用は小さく、3-Point 定式化は過剰なモ

デル化となる。このため、本研究では三相 2-Point 定式化に基づく MPM 解析手法を提案し、その有効性を検討する。

3. 三相 2-Point MPM の定式化と特徴

本研究では、地盤の構成相である固体、液体、気体を考慮した三相連成問題に対し、三相 2-Point 定式化に基づく Material Point Method (MPM) を提案する。この定式化では、固相粒子と気液共通粒子の 2 種類のマテリアルポイントを用いる。固相は従来の MPM と同様にラグランジアンで追跡し、気液相は 1 つの共通粒子により表現することで、気液相間の移流を簡略化している。一方、固液間の移流は移流項無しにラグランジアン的に自然に扱われるため、大変形時においても数値安定性を確保できる。この考え方は、Bandara & Soga (2015) により固液二相系に対して提案された u-U 定式化に基づいている。なお、本報告書では文量の制限と解析結果に重点を置いた報告とするため、一切の数式を省略した。定式化の詳細については、参考文献を参照されたい (Higo et al. 2025)。

3.1 支配方程式の概要

支配方程式は、以下の構成で導かれる【Uzuoka & Borja, 2012】：

- 固相・液相・気相を混合した全体の運動方程式
- 液相の運動方程式
- 気相の運動方程式
- 液相の連続式
- 気相の連続式

固相と液相の間には Darcy 流れによる相互作用力が仮定され、気液間の相互作用は無視している。この簡略化により、一般的な地盤挙動の範囲では十分な精度を確保できると考えられる。また、骨格応力を応力変数とし、不飽和土の効果を反映するため、サクションに依存する水分特性曲線 (van Genuchten 式) と透水・透気係数モデル (Mualem 式) を組み込んでいる【van Genuchten, 1980】【Mualem, 1976】。

3.2 計算アルゴリズムの概要

三相 2-Point MPM では、以下のアルゴリズムで時間積分を行う：

- 各相粒子から格子点へ質量・運動量・圧力情報をマッピング
- 格子上で運動方程式および連続式を陽解法により時間積分
- 計算された加速度・圧力変化量を粒子に逆マッピング
- 粒子座標、速度、応力、飽和度、間隙率等を更新

特に固液間移流を回避しているため、粒子間での移動量が大きい場合にも計算の安定性が高い。この特性は、大変形を伴う液状化や地盤崩壊のような現象の再現において大きな利点となる。

4. 提案手法の検証解析例

本章では、提案する三相 2-Point MPM の定式化と離散化手法の妥当性を検証するため、一相系、二相系、三相系の典型的な数値例題について解析を行った。ここでは、最も重要かつ新規性の高い三相系の例題について報告する。

提案する三相 2-Point MPM の不飽和土の水理特性再現性を検証するため、Liakopoulos (1964) による Del Monte 砂を用いた一軸排水実験を対象に数値解析を行った。実験では、砂柱に一定流量の水を供給して飽和状態とした後、上端の給水を停止し、底部からの自然排水を観測した。異なる高さ位置におけるサクション (負の間隙水圧) が時間の経過とともに測定された。数値モデルでは、初期状態で水・空気両相の圧力をゼロとし、固相・流体相それぞれにセルあたり 4 粒子を配置した。境界条件として、側面は全相

固定、底面は固相を固定し、流体相は自由に排水可能とした。

使用した物性値は以下の通りである：土粒子密度： 2000 kg/m^3 ，水の透水係数： $4.41 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ，空気
の透気係数： 0.010 m/s ，ヤング率： 1300 kPa ，ポアソン比： 0.4 。また、飽和度とサクシジョンの関係には
Schrefler and Scotta (2001) に基づくモデル式を用いた。

解析結果（図-1）では、排水に伴うサクシジョンの増大傾向が観察され、実験結果および先行 FEM 解
析結果【Schrefler and Scotta, 2001】と概ね良好な一致を示した。特に、サクシジョンの時間的な増加傾向や、
排水流量の変化が適切に再現された。一方で、解析がさらに進んだ最終段階において、流体粒子のセル間
移動に起因する数値的不安定性が現れ、解析を 80 分程度で終了した。この現象は提案手法を含む粒子法
特有の問題であり、今後の課題である。

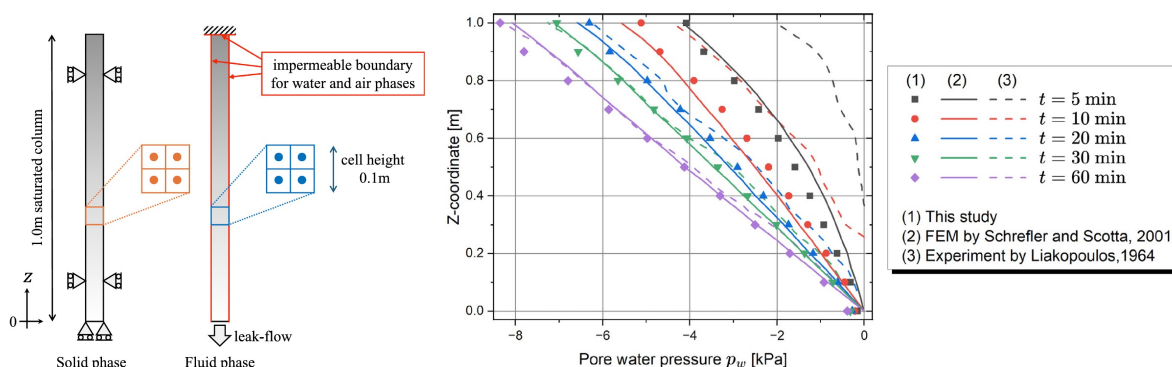


図-1 三相系検証例題：1次元排水問題におけるサクシジョン深度分布の時間変化

5. 不飽和盛土の液状化解析

本章では、提案手法の適用性検証として、不飽和盛土における地震時液状化挙動を対象とした数値解
析を実施する。特に、ドレーン施工の有無が液状化抑制に及ぼす影響を比較検討した。

5.1 ドレーン無しの場合

解析モデルは、図-2 に示すように基礎地盤上に不飽和盛土を造成し、モデル幅 26m、高さ 5m とした。
固相粒子は格子幅 0.5m の背景格子上に配置し、全体で約 1 万個の粒子を用いた。初期間隙比は 0.673、
飽和度は 60%とし、地下水位は基礎地盤表面に設定した。入力地震動は図-3 に示す強震動を与え、動的
解析を実施した。Rayleigh 減衰と人工減衰を導入し、数値安定性を確保した。

液状化を表現可能な構成式として、繰返し弾塑性構成式 (Oka et al. 1999, LIQCA 液状化地盤研究所
2015) を用いた。材料パラメータを表-1 に、繰返し三軸試験のシミュレーション結果の一例を図-4 に示
す。本研究では、仮想的な盛土および基礎地盤として珪砂 7 号を用いている。繰返しせん断によって、有
効応力が減少すると共に軸ひずみが増加する挙動を表現できている。

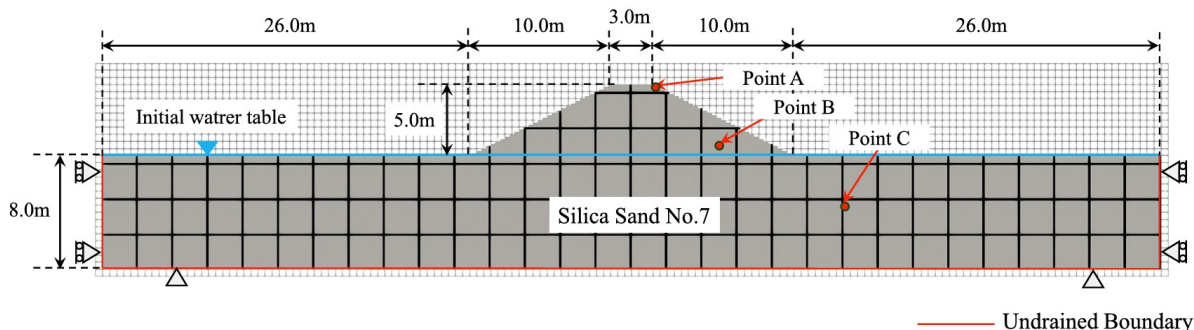


図-2 解析モデル（ドレーン無し）

図-2 解析モデル（ドレーン無し）

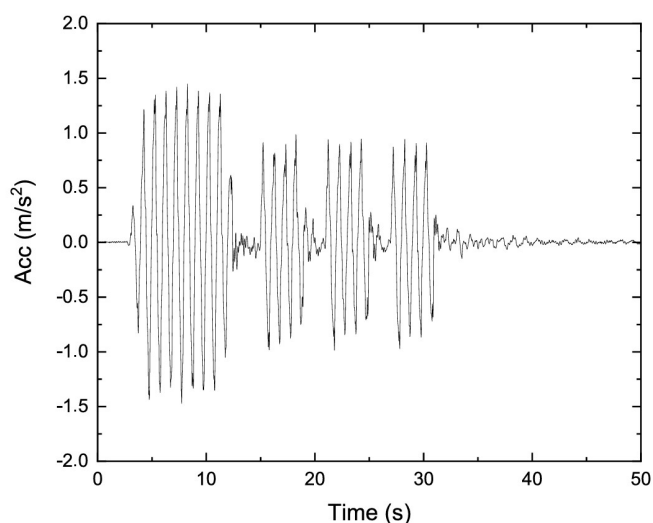


図-3 解析モデル（ドレーン無し）

パラメータ名	珪砂 7 号	ドレーン材
密度 ρ (Mg/m ³)	1.99	1.99
透水係数 k^l (m/s)	1.3×10^{-3}	0.1
初期間隙比 e_0	0.673	0.673
圧縮指数 λ	0.025	0.025
膨潤指数 κ	0.0025	0.0025
無次元化初期せん断係数 G_0 / σ_{m0}	908	908
擬似過圧密比 OCR^*	1.0	1.0
変相応力比 M_m^*	0.909	0.909
破壊応力比 M_f^*	1.511	1.511
硬化関数中のパラメータ B_0^*	1500	1500
B_1^*	20	-
C_f	0	-
基準ひずみ (塑性剛性) γ_r^{P*}	0.015	-
基準ひずみ (弾性剛性) γ_r^{E*}	0.100	-
ダイレイタンシー係数 D_0^*	1.0	-
n	9.0	-
異方性消失のパラメータ C_d	2000	2000
透気係数 k^a (m/s)	0.1	-
初期飽和度 S_{r0}	0.60	-
水分特性曲線のパラメータ α, n'	2.0, 4.0	-
残留飽和度 S_{re}	0.22	-

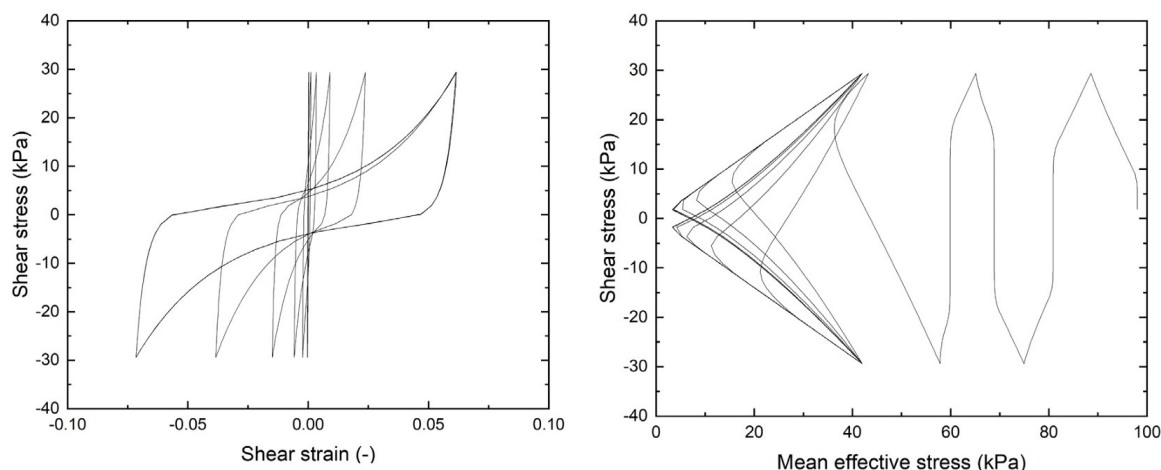


図-4 解析モデル（ドレーン無し）

解析結果として過剰間隙水圧比の分布図を粒子の変位とともに図-5 に示す。15 秒から 20 秒にかけて、盛土全体に液状化が発生し、盛土が沈下していく様子がシミュレーションされていることが分かる。液状化による堤体沈下と基礎地盤の左右方向への拡がりが見られ、堤体の安定性低下メカニズムが可視化できた。最終的に盛土は完全に崩壊し、地盤面は 0.70m 上昇した。珪砂 7 号という液状化しやすい仮想的な地盤であるため、ここまで著しい変形が生じているが、提案手法の液状化に伴う大変形挙動のシミュレーション能力を示すことができた。

5.2 ドレーン有りの場合

同じ解析モデルに対して、盛土内部に間隔 2m で設置した垂直ドレーンを導入した（図-6）。ドレーン部分の透水係数は 1.3×10^{-1} m/s に設定し、周辺地盤と明確に区別した。図-7 に示す通り、ドレーン設置部周辺では間隙水圧の上昇が抑制された。最終的に盛土は崩壊してしまったものの、これにより、ドレーンが効果的に排水を促進し、液状化発生範囲を縮小していることが確認できた。

また、液相粒子の変位ベクトル（図-8）からは、ドレーンに向かって間隙水が集中的に移動し上部へ排水されている様子が観察される。これは、固相粒子の変位と異なる挙動であり、固液間の相対変位が表現されていることから、透水性の大きく異なる地盤への高い適用性を示すことができた。

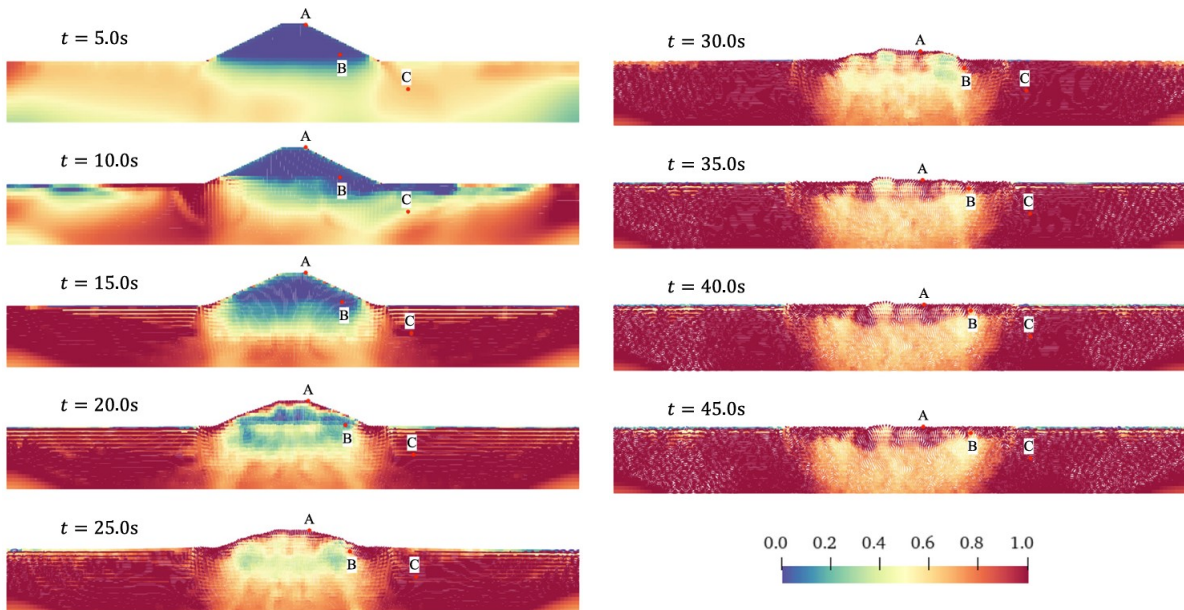


図-5 過剰間隙水圧比分布図（ドレーン無し）：初期値 0.0、液状化 1.0

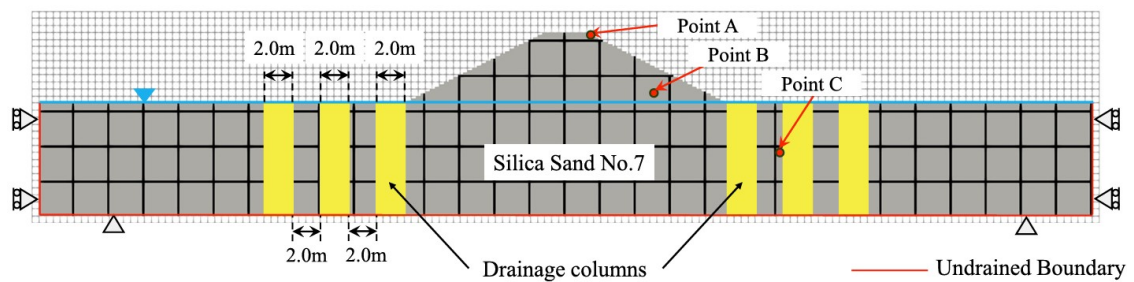


図-6 解析モデル（ドレーン有り）

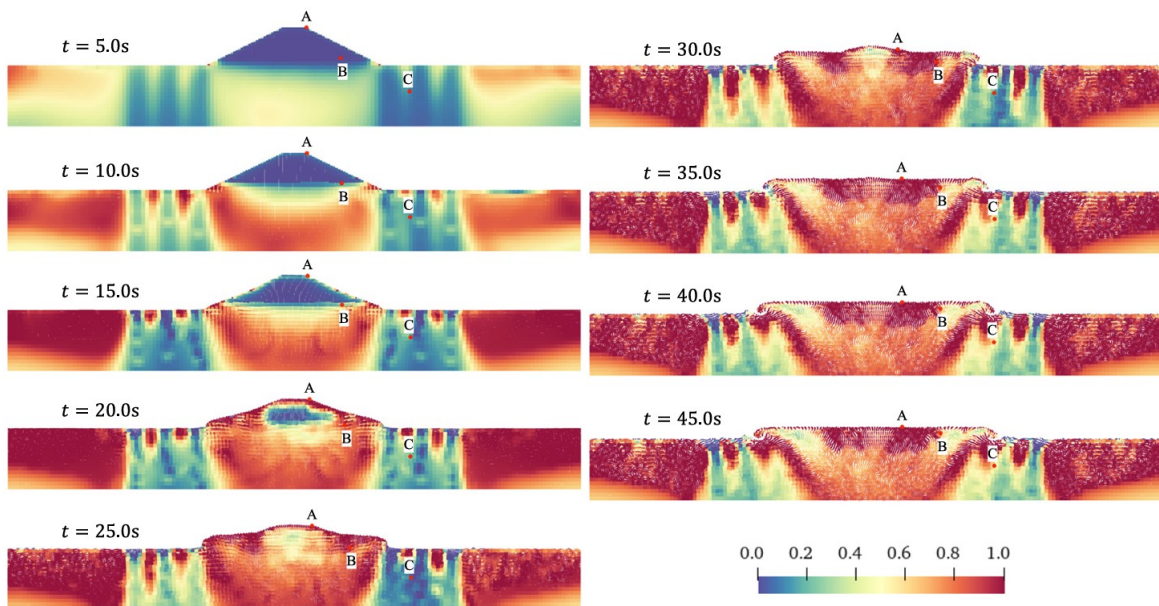
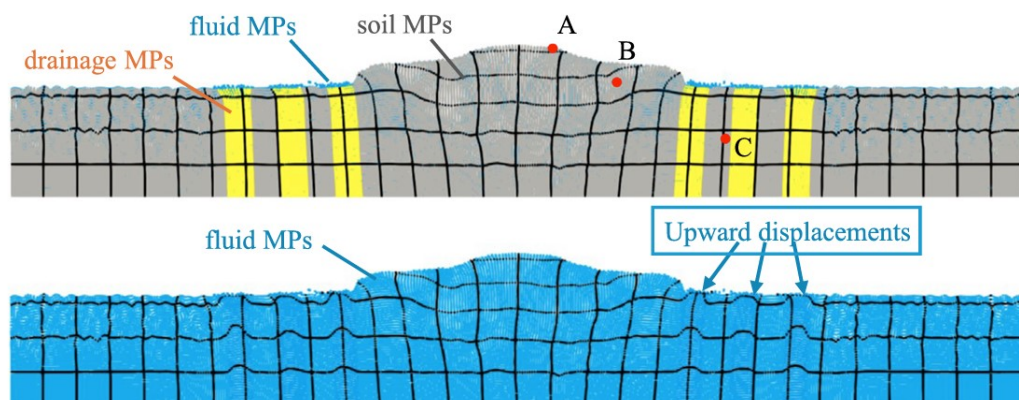


図-7 過剰間隙水圧比分布図（ドレーン有り）：初期値 0.0、液状化 1.0

図-8 固相粒子（上）液相粒子（下）の変形図（ $t=25.0$ ）

5.3 実験結果との比較

提案手法の妥当性検証のため、旧建設省土木研究所（2000）の実施した遠心模型実験の結果のシミュレーションを試みた。図-9 に示す通り、盛土および基礎地盤は江戸崎砂で、盛土の載荷部に高透水の砂利層の存在する地盤を解析した。江戸崎砂の構成式パラメータは既往の文献（LIQCA 液状化地盤研究所 2015）と同じものを用いた。その他、境界条件、入力地震動等の解析条件は 5.1, 5.2 と同様である。

図-10 に解析で得られた粒子変位と実験で得られた変形図を比較する。解析結果では、盛土部が大きく沈下し砂利層とともに基礎地盤の方向に変位しているが、実験と比べて変位を過大評価している。さらに、盛土粒子と砂利粒子の沈下は不均一であり実験結果と大きくことなり、実験結果の再現には至らなかった。この原因としては、構成式パラメータの設定にあると考えられる。今後は、江戸崎砂のパラメータを再検討すると共に、砂利層のパラメータ（現在は透水係数を 100 倍にした以外は江戸崎砂と同じパラメータを使用）を詳細に決定する必要がある。

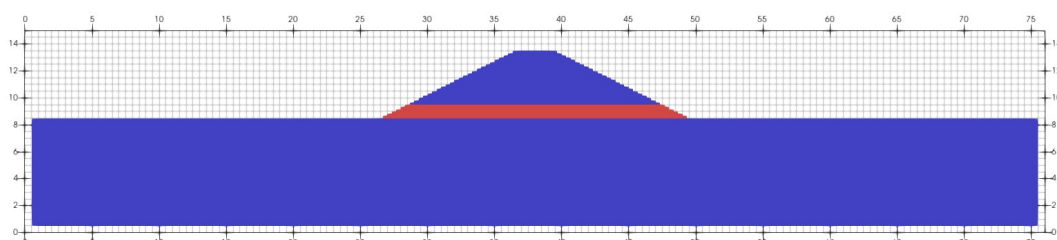


図-9 解析モデル（土木研究所 2000）

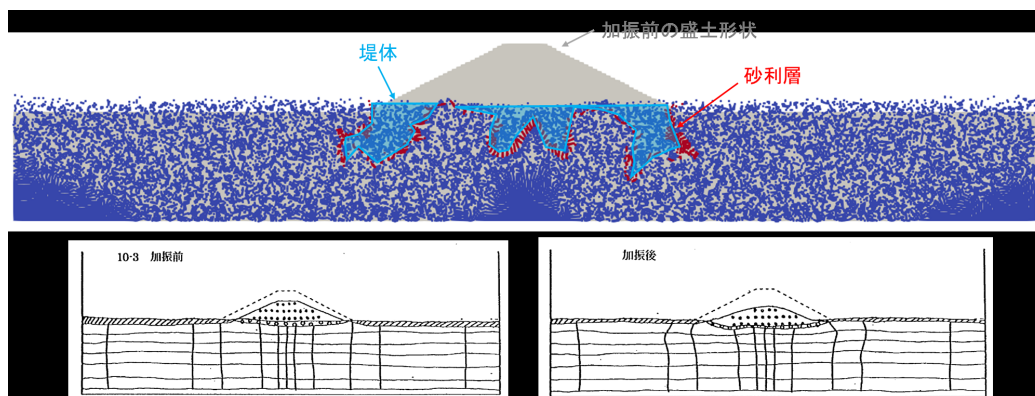


図-10 解析結果（粒子変位）と実験結果の比較

6. 結論と今後の課題

本研究では、固・液・気の三相を考慮した三相 2-Point 定式化 Material Point Method (MPM) を提案し、不飽和盛土の液状化解析への適用を試みた。提案手法では、固相と液相を独立したラグランジュ粒子で離散化することにより、固液相間の移流を排除しつつ、固有の履歴依存性を保持することが可能となった。

三相系の典型的な排水問題に対する数値検証においては、理論解とある程度の良い一致が確認され、定式化と離散化の妥当性が示された。また、不飽和盛土における地震時液状化解析に適用した結果、ドレーン設置による液状化抑制効果や、間隙水移動の可視化など、提案手法の有効性が示された。

一方で、実験結果との比較解析では、不飽和盛土部の過大な圧縮が生じるなど、構成式パラメータの適用性に課題が認められた。このことは、不飽和土に固有な体積変化挙動やサクション効果を、より正確にモデル化する必要性を示唆している。

現時点では、実験結果の実現象の再現にとどまったが、提案手法は以下の点において既存手法と比べて有利であると言える。

- 固相と液相の支配方程式を解く $u-U$ 法であるため、通常の $u-p$ 法で考慮されない移流項あるいは相対加速度を考慮しており、透水性の高い地盤での解析が可能である点
- 相対加速度を考慮した $u-w-p$ 法などによる有限要素法では解析が困難な液状化に伴う大変形を解析可能である点

以上より、提案手法は、今後の大規模地盤災害予測や耐震設計への応用に向け、有力な基盤技術となる可能性を有している。

今後の課題としては、以下が挙げられる。

- 不飽和条件下での応力-ひずみ特性に適合した構成式パラメータの最適化
- 高度な粒子間補間技術（例：APDI 法）との組み合わせによる精度向上
- 実験データとの比較を通じた提案手法の実証と適用範囲の明確化
- FEM や 1-Point MPM との系統的な比較による、2-Point 定式化の利点と限界の整理

参考文献

- Bandara, S., Soga, K. : Coupled deformation-flow analysis of partially saturated soils in finite deformation regime, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 39, No. 3, pp. 290- 313, 2015.
- Bardenhagen, S. G., Kober, E. M. : The generalized interpolation material point method, Computer Modelling in Engineering and Science, Vol. 5, No. 6, pp. 447- 495, 2004.
- Higo, Y., Oka, Y., Kimoto, S., Morinaka, Y., Goto, Y., Chen, Z. : A coupled MPM-FDM analysis method for multiphase elasto-plastic soils, Soils and Foundations, Vol. 50, No. 4, pp. 515- 532, 2010.
- Higo, Y., Nishimura, S., Oka, F. : Dynamic analysis of unsaturated embankment considering the seepage flow by a GIMPFD coupled method, Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, pp. 1761- 1766, 2015.
- Higo, Y., Takegawa, Y., Zhu, F., and Uchiyama, D., A three-phase two-point MPM for large deformation analysis of unsaturated soils, Computers and Geotechnics, Volume 177, Part A, January 2025, 106860, 2025.
- Jassim, I., Stolle, D., Vermeer, P. A. : Two-phase dynamic analysis by material point method, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 37, No. 15, pp. 2502- 2522, 2013.
- Kiriyama, T., Higo, Y. : Arbitrary particle domain interpolation method and application to problems of geomaterial deformation, Soils and Foundations, Vol. 60, No. 6, pp. 1422- 1439, 2020.

- Liakopoulos, A. C. : Transients of water motion in unsaturated porous media, University of California Publications in Engineering, Vol. 55, 1964.
- Mualem, Y. : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, Vol. 12, No. 3, pp. 513- 522, 1976.
- Schrefler, B. A., Scotta, R. : A fully coupled dynamic model for two-phase fluid-saturated porous media, Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, Vol. 6, No. 4, pp. 401- 418, 2001.
- Soga, K., Alonso, E., Yerro, A., Kumar, K., Bandara, S. : Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method, Géotechnique, Vol. 66, No. 3, pp. 248- 273, 2015.
- Sulsky, D., Chen, Z., Schreyer, H. L. : A particle method for history-dependent materials, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 118, pp. 179- 196, 1994.
- Uzuoka, R., Borja, R. I. : Dynamics of unsaturated porous media: governing equations and numerical algorithm, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 89, No. 3, pp. 293- 318, 2012.
- van Genuchten, M. T. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, pp. 892- 898, 1980.
- Zhang, H. W., Wang, K. P., Chen, Z. : Material point method for dynamic analysis of saturated porous media under external contact/impact of solid bodies, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 198, No. 17- 20, pp. 1456- 1472, 2009.
- 建設省土木研究所：法先固化改良による盛土の耐震対策効果に関する動的遠心模型実験報告書，土木研究所資料，第 3688 号，平成 12 年 3 月，2000.

デジタルツインとゲームエンジンを活用した暑熱環境リスクの可視化

関西大学 環境都市工学部 教授 安室喜弘

1 研究目的

1.1 背景

近年、地球温暖化やヒートアイランド現象などの影響により、熱中症患者数並びに死亡者数が増加傾向にある¹⁾。職場での熱中症患者数は、2017 年から 2023 年にかけて建設業が全業種中で最高を記録し 886 件に上る。同期間中、建設業における熱中症による死亡事故は 54 件であり、これも各業種の中で最多となっている²⁾。熱中症は命に関わる病気であるが、個人が発生リスクや予防法を知ること

で簡単に回避できる可能性が高い。熱中症防止のための指標としては、暑熱環境指標である WBGT(Wet Bulb Globe Temperature)³⁾ が広く用いられている。これは、米軍の演習における熱中症を予防する目的で提案された指標で、ISO7243⁴⁾ (JIS Z 8504⁵⁾)にて規格化されており、労働環境や日常環境における指針として認められている⁶⁾。環境省は WBGT を Web 上で公開し⁷⁾、図-1 に示すような基準で、熱中症予防を啓発しているが、このような指標は都市域を単位とした数値であり、更新頻度も 1 時間単位であるため、建設現場に代表されるような屋外活動の環境内での具体的な場所ごとのリスクの認識には結び付き難い。特に、施設や現場の管理者は、来訪者や作業者に与える環境のリスクを的確に把握することが必要である。しかし、多数の WBGT 計測器を広範囲に配置し情報を集約するような方法にも限界があり、多くの現場では、個々人が自らの経験に従って判断し、対処しているのが実情である。また、人体への熱ストレスは日射だけでなく湿度や風等の気象要素にも大きく影響されるため、特に湿度の高い日本の夏は、特有の過ごし難さとなっている⁸⁾。実際に、晴天時以外に熱中症が発生する可能性も決して低くなく、例えば、2024 年 7 月から 8 月に大阪府下では熱中症警戒アラートが 30 回出され、そのうち 7 回は雲量 7 以上であった⁹⁾。本研究では、熱中症リスクが必ずしも晴天時に限って高いわけではないことに注目し、天空の雲量パラメータによって地表の日射量が決まるようなモデルを導入し、地物によってできる陰影を考慮しながら、様々な空模様の下で暑さ指数分布を推定する方法を考案する。

暑さ指数 (WBGT)	注意すべき 生活活動の目安
危険 (31以上)	すべての生活活動で おこる危険性
厳重警戒 (28～31) ※1	
警戒 (25～28) ※2	中等度以上の生活 活動でおこる危険性
注意 (25未満)	強い生活活動で おこる危険性

図-1 WBGT 値に関する注意喚起(環境省 HP^{注4)})

1.2 関連研究

WBGT は気温、湿度、輻射熱の関係から算出され、輻射熱の測定には黒球温度計を必要とする。岡田らは全天日射量、風速、乾球温度の公開気象データを説明変数として黒球温度を推定した¹⁰⁾。安室らは、地表に置いた標準反射板上で日射や陰影を撮影した写真の画素値と全天日射量との相関を求め、写真画像を大域照明(Global Illumination; GI)を用いた 3 次元 CG に置き換えて、画素毎に全天日射量を推定し、さらに岡田らの方法で WBGT を推定した¹¹⁾。角田らは、リアルタイムに GI を運用できるゲームエンジンを用い、基本的な気象情報を Web で参照することで、時間と場所を問わずに暑さ指数分布を可視化し、一般ユーザに Web 上でストリーミング配信するシステムを提案した¹²⁾。GI

は、多様な光の経路を考慮して、拡散や相互反射などの光の授受を光学的・物理学的に取り扱う CG 技術で、植生や建築物等の地物を含めた日射状況の写実的な表現が可能である¹³⁾。しかし、安室や角田の手法では、時刻と緯度経度で定まる太陽高度だけで日射条件を設定するため、基本的に快晴状態が想定できる場合のみ適用できる。晴天から曇天にかけて、無限に変化する雲量によって散乱する太陽光の影響を表現できず、快晴以外の様々な天空状況下で生じる熱中症リスクに対応できないことは大きな課題である。

2 本研究の方針

本研究では、既往研究の課題に対して、ゲームエンジンにおけるシーン内に雲を発生させ、快晴以外の天空光を表現することで、様々な天候時の地表での暑さ指数を推定することを考える。図-2(上段)に示すように、地表への全天日射量に影響を及ぼす主たる要素は、直達日射量として直接太陽から到達する光と、天空全体から降り注ぐ天空日射である。天球の雲量が増えると、雲の層における透過・散乱を経て地表に届く光の経路が複雑化し、直達日射量が減少し、天空日射の割合が増加する。ここでは、簡単のため、ゲームエンジンの天空光環境設定(図-2(下段))において、雲が天空を占める割合(Cloud Coverage: 以下 CC)と雲の層の厚さ(Layer Height Scale: 以下 LHS)をパラメータとする。気象条件と地表での日射量の実測値を取得しておき、これらの組合せをゲームエンジンで再現できるように、これら2つの雲のパラメータを設定することで、特定の気象情報から、地表での日照量を推定が可能になると考えた。日照量が推定されれば、既往の研究^{11, 12)}で用いられる処理に基づいて黒球温度推定および WBGT 推定につなげられる。パラメータの設定方法としては、図-3 に示すように、CC を雲量の値から、LHS を基本的な気象情報を入力値として日射量を出力値とする回帰モデルを作成し、推定された日射量と対応する値を事前に決定しておくことで行う。本研究で提案する処理フローを図-4 に示す。本手法では、ユーザは暑熱リスクを知りたい日時と場所を入力するものとする。ユーザ入力に対応する 3D データと基本的な気象情報を、角田らの先行研究¹²⁾と同様に、それぞれ 3D データサーバと気象サーバから



図-2 天空光の模式図(上段)とゲームエンジンによる様々な雲量・時間帯の天空照光環境設定(下段)

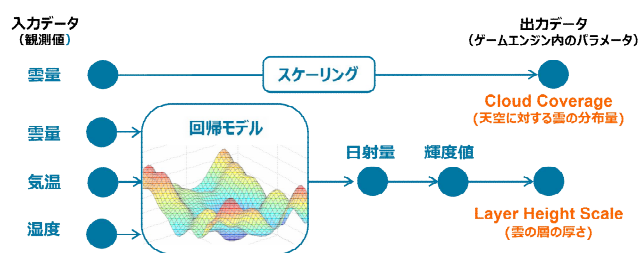


図-3 雲のパラメータ決定モデルのデータフロー

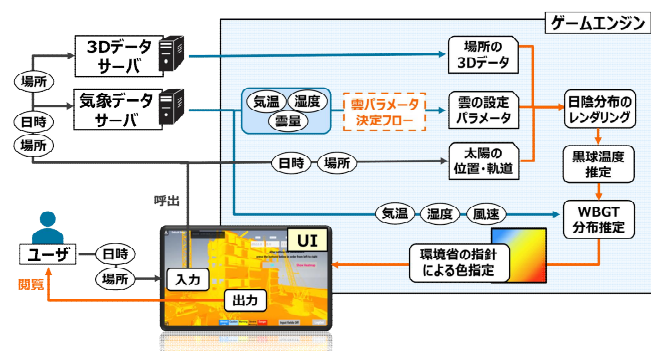


図-4 提案手法のフローチャート

取得するものとする。周囲の地物の影響を受けにくい開けた場所での代表地点において、全天日射量を回帰モデルで推定し、その直達日射量を再現する雲のパラメータ値を設定することで、対象地域の日陰分布を CG で描画し、周囲全体の日射状況を表現する。このように生成される CG の画素に対して、既往研究¹¹⁾の処理により黒球温度推定および、気温(乾球温度)・湿度(湿球温度)・風速の各参照値を適用することで画素毎に WBGT を推定する。推定値に応じて、環境省が示す図-1 の 4 段階の指標に対応した色を補間して色付けしたヒートマップ状のテクスチャマッピングで CG を生成する。気象データとして、気象庁が提供している予測データや、OpenWeather 社が提供する Open Weather Map API¹⁴⁾により国内や、世界各地の気温、湿度、風速、雲量の各データが自動的に取得可能である。3D データとしては、国土地理院により公開されている 3D データや、角田らの先行研究¹²⁾により、公開情報を元にした 3D データが使用できるものとし、ユーザは日時・場所を指定することで、様々な天空条件下における暑さ指数分布の閲覧が可能となる枠組みである。



図-5 計測地点(関西大学千里山キャンパス)(上段)と 3 次元データ(下段)



図-6 データを 5 分割した交差検証過程

3 研究の経過

3.1 回帰モデルの構築

本研究では、雲量が異なる天候において、気温・湿度・雲量を説明変数として全天日射量日射量を推定するための回帰モデルを構築するために、2023 年 6 月下旬から 9 月下旬にかけて、様々な雲量での天気において、吹田市関西大学の悠久の庭(図-7)で測定し収集した気象データを使用した。それぞれデータ構成として、乾球温度・湿球温度・黒球温度・湿度・日射量・照度・風速・雲量を計測し、データ数は 102 組であった。回帰モデルの構築において、容易に公開情報が入手可能な気温・湿度・雲量を説明変数とし、目的変数を日射量として設定した。モデル構築では、線形回帰・回帰木・SVM・ガウス過程回帰・カーネル近似回帰・ニューラルネットワークの各手法で構築したモデルを比較した。図-6 に示すように、各手法でモデルを構築しデータを 5 分割して 1/5 のデータを訓練とテストに切り替えて交差検証を行い、スコアの RMSE と決定係数を算出した。そのうち、図-6 に示すガウス過程回帰が最

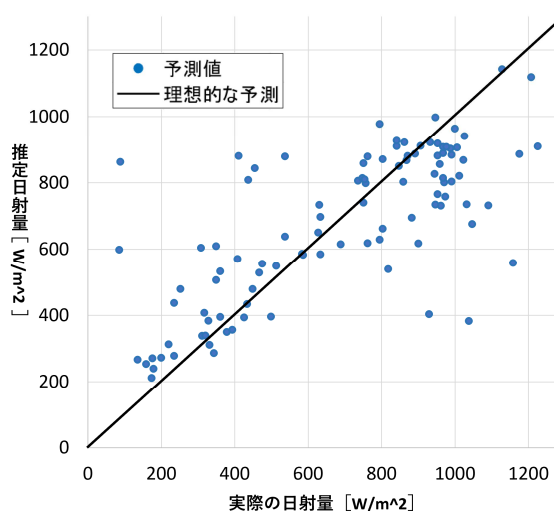


図-7 日射量の推定結果

も精度が高かった。ガウス過程回帰は小規模なデータセットに適しており、推定される関数は一つの関数ではなく、関数の分布として得られるため、推定の不確実性も含めて表現することができる¹⁵⁾。モデルの精度としては、RMSE(Root Mean Squared Error)=207.8, 決定係数 R2=0.55 となった。

3.2 暑熱リスクの可視化

本稿では、暑熱リスクの指標であり WBGT 値の推定実測値の比較をより正確に行うために、実測地点の地物に基づく 3D モデルを作成した。本研究では、実測地点である関西大学の悠久の庭において、地上型レーザスキャナを用いて詳細な測定を実施した。取得した点群データに対してメッシュ処理を施し、高精度な 3D モデルを生成した(図-7(下段))。実環境の地物を忠実に再現しているため、実際の陰影状況を再現することが可能になり、推定 WBGT の精度の信頼性を向上できる。

リアルタイム GI による CG 描画が可能なゲームエンジンとして Unreal Engine5(以下 UE)¹⁶⁾を用いて、UE 内の太陽光の最大照度(lux)を設定し、標準拡散反射板と同様の表面反射特性を設定した地物の 3D モデルで日照状況を CG 描画した。UE 内での雲の詳細設定には Ultra Dynamic Sky のライブラリ(以下 UDS)を用いた。日時と当該地域の緯度経度を指定し、公開されている気象情報から雲のパラメータを設定する。雲量 0~100 の値を 0~2.2 にスケールを正規化して CC に入力し、気温・湿度・雲量から回帰モデルを通して決まる推定日射量と一致するように LHS を設定することで、天空状態を決定することが可能となった。これを基に決まった地表の陰影状況(図-8)に対し、角田らの方法¹²⁾と同様に、CG の画素ごとに WBGT 値を推定し、ヒートマップ状のテクスチャにより、身の回りの熱中症リスクを表示された(図-9)。同図の中で、雲量が増えた曇り空の下では、地表の陰影の境界が曖昧になった

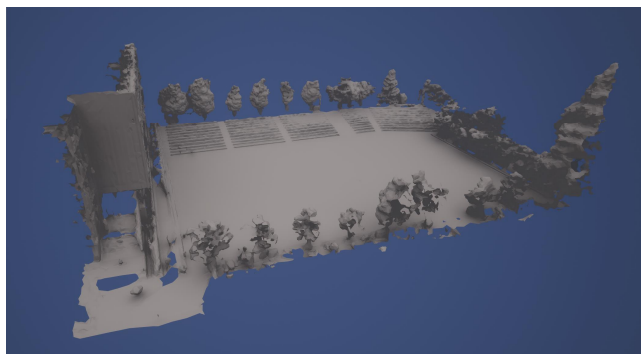


図-8 地表の陰影 CG



図-9 WBGT ヒートマップ

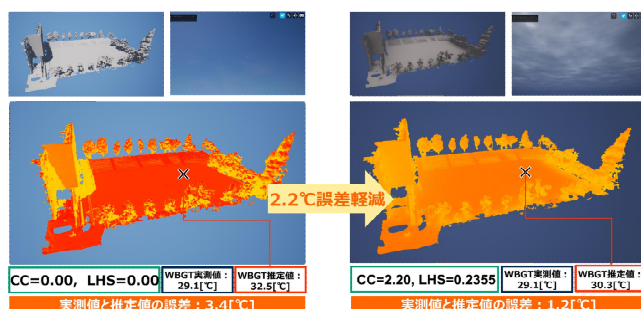


図-10 2023/9/2/11:11, 乾球温度: 35.7[°C],

湿球温度: 24.7[°C], 風速: 1.03[m/s], 雲量: 100 での比較

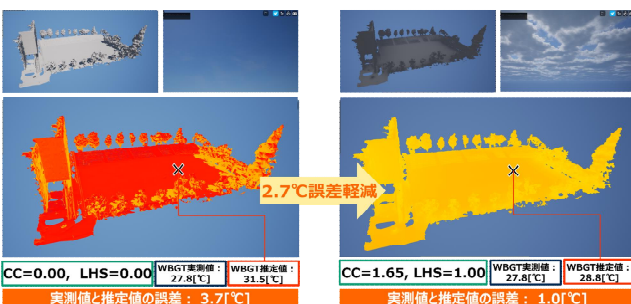


図-11 2023/9/6/12:26, 乾球温度: 32.3[°C],

湿球温度: 24.8[°C], 風速: 2.06[m/s], 雲量: 75 での比較

状況で、密度の高い WBGT による暑さ指数分布が表示できている。

4 結果

4.1 回帰モデルの精度

天空での雲の存在を考慮していない角田らの方法と提案手法とで、WBGT 推定の精度比較を行った。実測を行った地点を含む関西大学キャンパスの 3 次元モデルをゲームエンジン内に用意し、同条件で比較した例を図-10 と図-11 に示す。Open Weather Map API で得られる基本気象データとして、2023 年 9 月 2 日 11 時における乾球温度：35.7℃、湿球温度：24.7℃、風速：1.03m/s、雲量：100 を入力とした場合、角田らの既往手法では、実測値よりも 3.4℃高く WBGT が推定されているのに対し、提案手法では、+1.2℃まで誤差が低減された(図-10)。同様に、雲量：75 の 2023 年 9 月 6 日 12 時では、既往手法で+3.7℃の誤差に対して、提案手法で+1.0℃まで誤差に抑えられたことが分かった(図-11)。誤差が低減され、赤色から橙色～黄色に表示が変わったとはいえ、依然、嚴重警戒から警戒という指標に相当するため、曇天下での暑熱リスクへの注意喚起として適切である。

今回取得した計測データ全体に対して、得られた回帰モデルで推定される日射量から算出された WBGT の推定値を実測値と比較した結果を図-12 に示す。全体として平均誤差は実測値より 1.4℃(標準偏差 0.55℃)程度高く推定されていたことが確認された。この誤差は、暑熱リスク提示としては安全側ではあるものの、回帰モデルの精度を向上が望まれる。誤差の原因は、計測したデータが全て瞬間値である点とデータ不足が挙げられる。また、同じ雲量値の時間帯においても、地表 1 点での計測では、図-13 に示すように、雲の流れに従って日差しが刻々変わるため、日射量は時間的に大きく

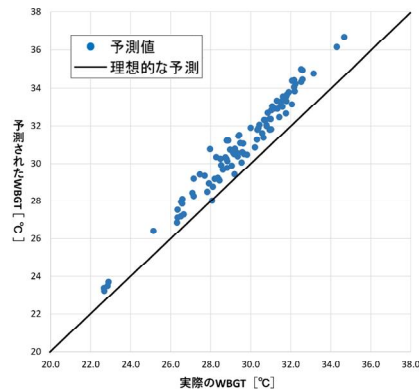


図-12 推定日射量から推定された WBGT 値

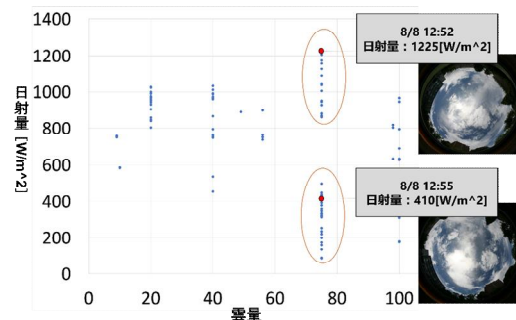


図-13 同じ状況下においての日射量の違い

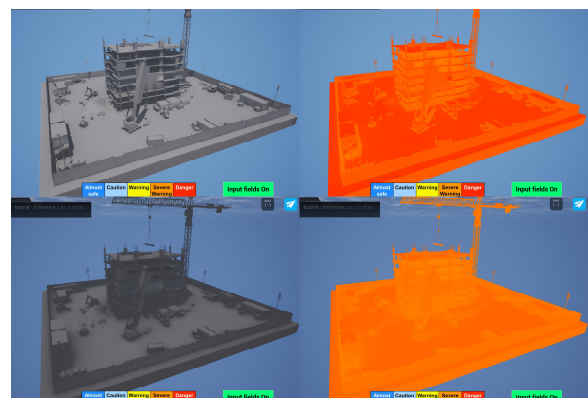


図 14 仮想的な建設現場でのシステムの適用例

(上段 2023/6/29/11:34, 乾球温度：35.6[℃],
湿球温度：25.8[℃], 風速：4.20[m/s], 雲量：40)
(下段 2023/6/29/12:26, 乾球温度：35.5[℃],
湿球温度：25.7[℃], 風速：3.60[m/s], 雲量：75)

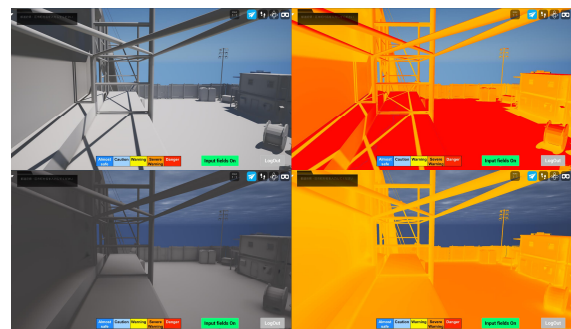


図-15 作業者目線での日射状況(左列)と WBGT 分布(右列)

変動する場合がある。このような天空での雲の分布や計測値の時間変動を考慮して、今後データを増やす必要があると考える。

4.2 個別現場へのシステムの適用例

BIM のデータや設計資料などを基に建設現場の 3D モデルが利用可能となるという想定の下、提案システムを適用した例を図-14 に示す。このシステムでは、現場の位置(緯度、経度)や日時を指定することで、管理者は作業現場の所望の時間帯の暑熱リスクを把握することが可能となる。また、図-15 に示すように、足場のような作業者の動線上における暑熱状況を可視化可能であることから、管理者が作業現場の暑熱リスクを細部まで把握できる可能性を示している。これにより、作業対象箇所のスケジューリングや、簡易的な庇蔭を増やすなどの熱中症への具体的な対策を講じることができる。また、可視化結果は、スマートフォンやタブレット等で容易に共有でき、現場で各人が確認し対応することにも繋がると考える。特に、本手法により、盛夏以外の季節の変わり目や、1 日の中での気圧配置の変化において、気温の数値以上に体感的に蒸し暑い状況で、熱中症リスクを見逃すことなく定量化できることから、建設作業環境等での健康・安全管理面に寄与できるものと期待する。

4.3 グローバルな都市データへの適用例

ここでは、多機能な CG モデリング・レンダリング用のフリーソフト Blender の Blender GIS アドオンを使用して、公開されている海外の都市への適用を図った。このアドオンを使用すると、ウェブから直接地理データを取得し(図-15 ①)、汎用的な 3 次元モデルデータとして OBJ 形式でエクスポート可能である。一般的な GIS データ形式を Blender にインポートし、NASA SRTM ミッションから実際の標高データを取得するオプションにより OpenStreetMap データ(建物、道路など)をリクエスト可能(図-15 ②)である。地形データに対して、建物などの構造物のデータを追加して入手し、OBJ 形式の 3 次元データに付随する mtl 形式のファイルにて標準拡散板の反射特性を設定することで、反射率や色彩などの表面材質を本手法に整合させて適用できる(図-15 ③)。本事

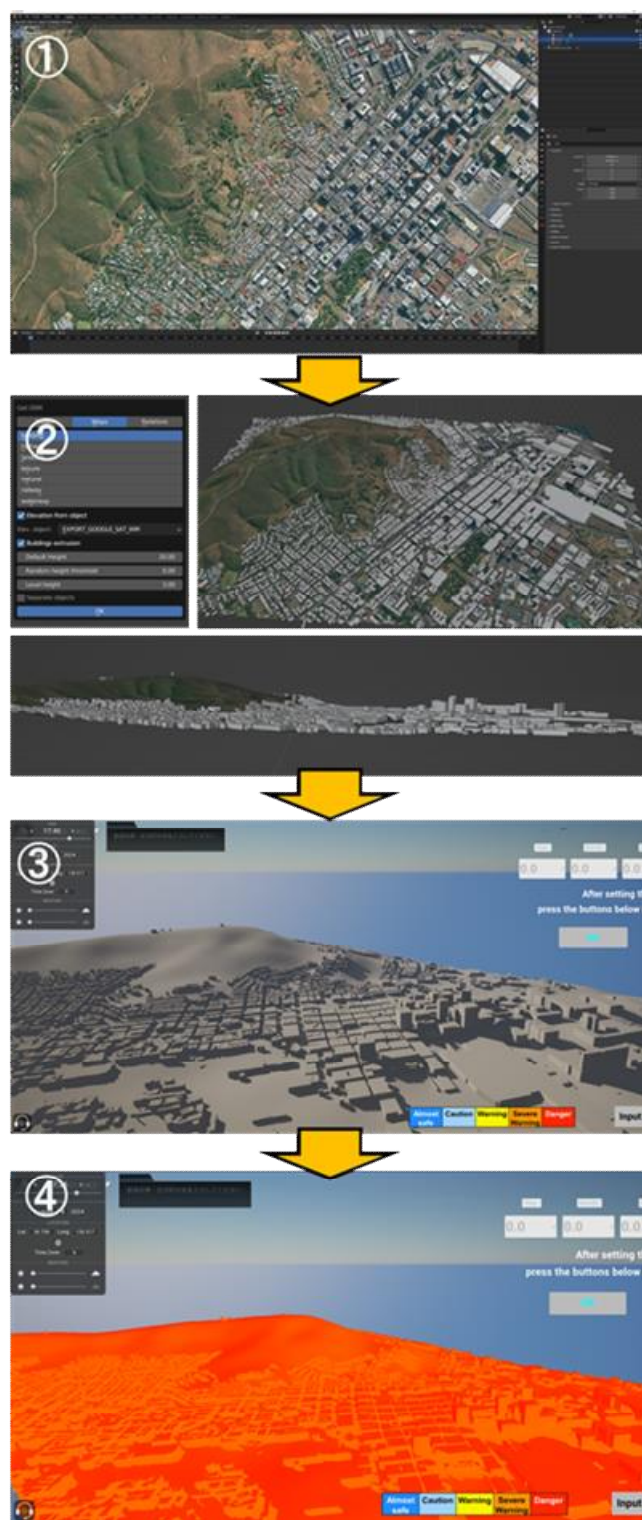


図-16 海外の 3 次元データに本手法を適用した例：

例では、南半球のヨハネスブルグのデータにて実行できることを確認した(図-15 ④)。

4.4 結論

本研究では限られた気象情報を基にゲームエンジン内の雲量設定パラメータを決定するモデルを構築し、天空光環境を再現することで様々な空模様の下で暑さ指数分布を面的に推定することを可能にした。現在、本稿で用いている各気象データの瞬間値の代わりに、時間的ばらつきを考慮したデータ収集を進め、回帰モデルの精度向上を図っている。また、ゲームエンジンでの雲の

パラメータは、推定された日射量が地表での標準拡散版の色と同じ RGB 値となるように、手動で探索した過程がある。この過程の自動化に向けては、太陽からの直達日射と、天球に存在する雲により拡散されてあらゆる方向から到達する天空光日射とに分解して数値化¹⁷⁾することで、ゲームエンジンでの光源設定を簡単化する方法の検討を進めている。さらには、現状では、地物の 3D モデルの特性(例：葉の透過率)は現在考慮していないため、これらのパラメータを実測値により精緻化することについても研究を進める予定である。

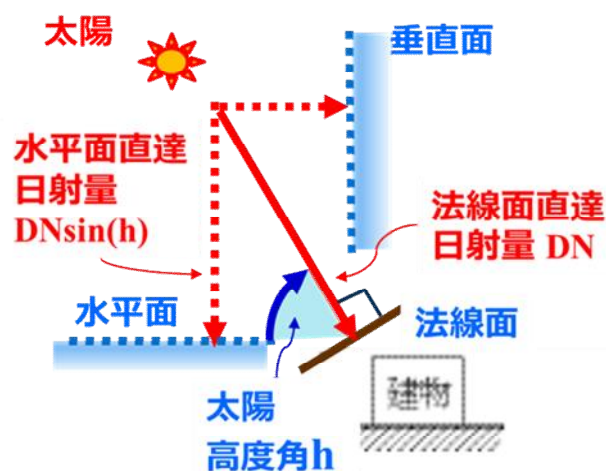


図-17 直達日射量

参考文献

- 1) 厚生労働省：熱中症による死亡数 人口動態統計（確定数），
<<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/tokusyuu/necchusho20/index.html>>，（入手 2024.10.21）
- 2) 厚生労働省：熱中症による死傷者数の業種別の状況（2018～2022 年） p2，
<<https://www.mhlw.go.jp/content/11200000/000900487.pdf>>，（入手 2024.10.21）
- 3) Control of Heat Casualties at Military Training Centers：American Medical Association Archives of Industrial Health ,Vol. 16, pp. 302-316, 1957.
- 4) International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment：Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. ISO7243: 2017.
- 5) 日本産業規格：熱環境の人間工学—WBGT(湿球黒球温度)指数を用いた熱ストレス評価. JIS Z8504: 2021 [JIS Z8504: 2021 Ergonomics of the thermal environment -- Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index]
- 6) 日本生気象学会：日常生活における熱中症予防指針 Ver.4：<<https://seikishou.jp/committee/>>，（入手 2024.10.21）。
- 7) 環境省：熱中症予防サイト，<<https://www.wbgt.env.go.jp/>>，（入手 2024.5.19）。
- 8) 一般財団法人 日本気象協会：“熱中症ゼロへ「熱ゼロ研究レポート：外国出身者に聞いた「日本の暑さ」に関する調査 第2弾”<<https://www.netsuzero.jp/netsu-lab/lab04>>（入手 2024.10.21）
- 9) 気象庁：「過去の気象データ・ダウンロード」<<https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/>>（入手 2024.10.21）
- 10) 岡田 牧, 岡田 益己, 日下 博幸：岡田・日下の黒球温度推定式の広域適用とパラメータ調整，ヒートアイランド学会論文集，Vol.8, pp.13-21, 2013. [Okada, M., Okada, M. and Kusaka, H.:Parameter Adjustment and Application to an Extension Area of Okada and Kusaka's Formula for the Black Globe Temperature, Journal of Heat Island Institute International , Vol.8, pp. 13-21, 2013.]

- 11) 安室 喜弘, 市原 和幸, 西浦 佑紀, 池川 大哉, 林 倫子, 尾崎 平 : 3DCG を用いた WBGT の推定とその適用, 土木学会誌 G, Vol. 74, No. 6, pp. II-1-III-8, 2018. [Yasumuro, Y., Ichihara, K., Nishiura, Y., Ikegawa, D., Hayashi, M. and Ozaki, T.: 3D CG-based Estimation Method of WBGT and its Application, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers G*, Vol. 74, No. 6, pp. II-1-III-8, 2018.]
- 12) 角田 直嵩, 尾崎 平, 窪田 諭, 檀 寛成, 安室 喜弘 : リアルタイム GI による屋外環境の暑熱リスクの可視化, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 22, 22-22016, 2023.[Sumida, N, Ozaki, T., Kubota, S., OkaDan H., and Yasumuro, Y.: Visualization of Heat Risks in Outdoor Environment Using Real-time Global Illumination in Game Engine, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 79, No. 22, 22-22016, 2023]
- 13) 倉地紀子 : CG Magic:レンダリング, オーム社, 2007.
[Kurachi, N: CG Magic: Rendering, Ohm Company, 2007.]
- 14) OpenWeather 社 : Open Weather Map API <<https://openweathermap.org/>>(入手 2024.10.21)
- 15) 赤穂昭太郎 : ガウス過程回帰の基礎, システム/制御/情報, Vol.62 , No.10, pp.390-395, 2018.
- 16) UnrealEngine , < <https://www.unrealengine.com/ja>>, (入手 2024.10.21)
- 17) D.G. Erbs, S.A. Klein, J.A. Duffie, Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation, *Solar Energy*, 28, pp. 293-302, 1982.