

マイクロバブル水を利用した不飽和化による 液状化対策工法に関する実大規模液状化実験

IN-SITU APPLICABILITY TEST OF SOIL IMPROVEMENT WITH USING
MICRO-BUBBLES AGAINST SOIL LIQUEFACTION

永尾浩一¹・末政直晃²・畔上洋一³・中澤博志⁴・神宮司元治⁵・岡庭一憲⁶

Koichi NAGAO, Naoaki SUEMASA, Yoichi AZEGAMI, Hiroshi NAKAZAWA,
Motoharu ZINGUJJI, Kazunori OKANIWA

¹正会員 工修 佐藤工業 株式会社 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10)

²正会員 工博 武蔵工業大学 工学部都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

³学生会員 工修 武蔵工業大学 工学部都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

⁴正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁵正会員 工博 独立行政法人 産業技術総合研究所 (〒305-8565 茨城県つくば市東1-1-1)

⁶学生会員 工学 武蔵工業大学 工学部都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

A micro-bubble is an independent bubble of 10~100 μ m in diameter. A soil improvement method injecting the micro-bubbles into ground was newly developed, which may provide a cost-effective and a simple countermeasure method against soil liquefaction. Although it is well known that soil resistance to liquefaction increases as the saturation degree of the soil decreases, it has been difficult to lower the saturation degree of ground homogeneously. A technique using micro-bubbles, however, can be expected to solve the problem because the micro-bubbles can easily permeate into voids between sand particles.

In-situ applicability test in Ishikari, injecting water mixed with micro-bubbles was conducted. The test consisted of the injecting micro-bubbles into the ground and the liquefaction experiment by controlled blasting for improved ground. Based on these test results, the feasibility of the micro-bubble injection method were examined in the paper.

Key Words : Micro bubble, Soil liquefaction, Unsaturated sand, Liquefaction strength

1. はじめに

東海・南海・東南海地震の到来が危惧されその損害は数百兆円にも上るといわれている。しかしこのような被害を防ぐには同等規模の予算が必要である。堤防や埋立地など港湾施設においても対策を必要とする領域が広範囲であり、低価格である割に高性能である対策工法が求められる。飽和度低下による液状化対策工法¹⁾はこれまで低コストという長所から広範囲での液状化対策工法として有効な工法になり得るとされてきたが、実用化に向けての検討が少なく、実地盤での実証例が少ないことが課題であった。マイクロバブル(以下MB)は、直径が約10~100 μ mの微細な気泡であり地盤内を効率よく改良を行える可能性がある。本研究は、MBを利用した不飽和化による液状化対策工法の効果を確認することを目的とし、平成19年10月に北海道小樽市石狩湾新港にて行

われた制御発破による人工液状化実験『実物大の空港施設を用いた液状化実験』²⁾において、実地盤にMBを含んだ水溶液を混入した際の地盤飽和度の変化、ならびに発破による人工液状化時の改良・未改良地盤の挙動を調査することにより、本工法の液状化対策としての効果の検証を行った。

2. MB混入工法の既往の研究

著者らはこれまで工法の有効性の確認を目的とし、室内にてMBの生成、豊浦砂を用いた1次元円筒砂供試体への混入実験及び混入後の液状化強度試験を行った³⁾。

MBを発生方法として、気液二相流体混合せん断方式、細孔方式、超音波方式など様々な方法があるが、本研究では図-1に示す筑波大学京簾ら⁴⁾開発の渦崩

壊を利用したタービン翼型気泡発生ノズルを使用した装置にてMBを生成することとした。本装置はMB気泡生成時に圧力をかけることで、高濃度のMB空気溶存水（MB水）を生成出来る。なお、本装置で生成したMBの気泡径は10～80 μ mの範囲にあり平均径30 μ mであった。また、セル圧400kPaノズル給気圧200kPaの条件で生成したMB水の大気圧開放下での溶存酸素量D0は16.0mg/l（水温20℃）であった。

また、1次元円筒砂供試体への混入実験では直径7.35mm、高さ30cmの亚克力製円筒容器に飽和させた相対密度約60%の豊浦砂供試体を作成し、上記のMB生成装置で生成したMB水（セル圧400kPaノズル給気圧200kPa）を通水させることにより、飽和度が約70～80%低下することを確認した。

一方、MB水を混入した砂地盤の液状化強度試験は繰返し三軸試験により行った。豊浦砂で作成した相対密度60%の直径5cm、高さ10cmの供試体にMB水を通水し、飽和度を80%とした後、繰返し载荷を行った。試験によりMB水を混入し不飽和化した供試体の液状化強度は飽和砂に比べ増加することが確認され、飽和度が80%である供試体の液状化強度は飽和砂のその1.7倍程度となることが分かった。

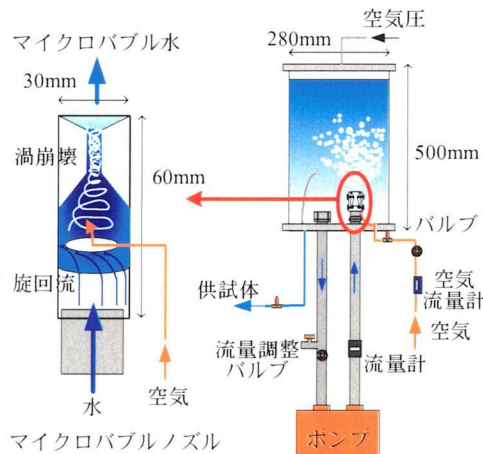


図-1 MB水生成装置

の空港施設への影響や経済的な液状化対策方法の検討など行ったものである。

本研究は共同研究の一つとして参加し、図に示す試験領域の左側中央付近にてMB水を混入した液状化対策工法の実地盤における施工実験を行った。

実験は①MB水混入試験、②発破を用いた液状化実験の2つに分け、①混入実験はMB水の混入が室内実験同様に地盤の飽和度を低下させ改良出来るかどうか調査した。②液状化試験では、MB水改良・未改良領域の飽和度の違いにより、発破による液状化時の地盤変化を調べ、液状化対策効果を検証した。

(2) 地盤条件

試験を実施した石狩湾新港の地層構成、土質諸量を表-1、2に、粒径加積曲線を図-3に示す。試験箇所は平成18年以降に埋立てられた地盤であり、地表部からN値1～8の埋土（砂質土）Fs、N値3～12の砂質土層As1、これらの下位にN値8～20の砂質土層As2が分布しており、N値20以下の非常に緩い細砂質土で構成される。地下水位はGL-2.5m付近であった。

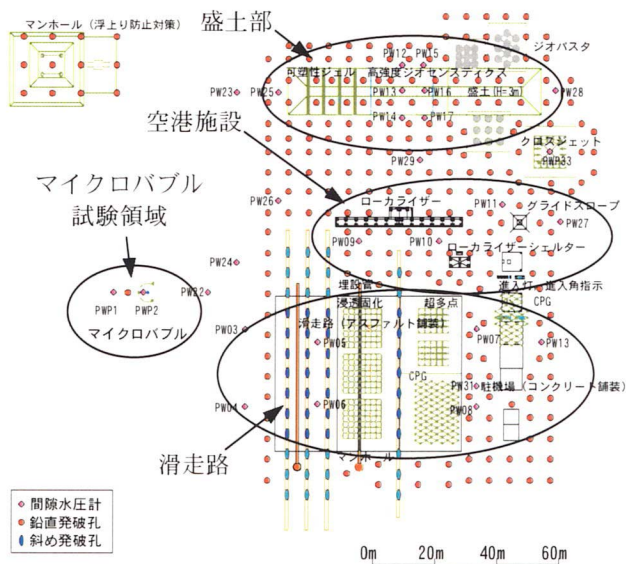


図-2 人工液状化実験全体図

3. 実地盤MB水混入実験

(1) 実験概要

平成19年10月北海道小樽市の石狩湾新港予定地にて『実物大の空港施設を用いた液状化実験』が行われた。試験全体平面図を図-2に示す。実験は国土交通省が独立行政法人港湾空港技術研究所に実験を委託し、延べ41機関、30項目の共同研究として実施されたもので、図に示すように実地盤上に滑走路などの空港施設を再現し、液状化対策を施した地盤に対し、地中に設置した爆薬による発破の衝撃力により地震動を与えることで地盤を液状化させ、液状化時

表-1 地質構成

地層名	層厚(m)	N値
Fs	埋土（砂質土）	4.3～5.7
As1	砂質土	1.3～4.0
As2	砂質土	12.9～16.5
		8～20

表-2 埋土土質諸量

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.689
細粒分含有率 F_c (%)	20.2
50%粒径 D_{50} (mm)	0.14
飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	1.8
間隙比 e	1.111

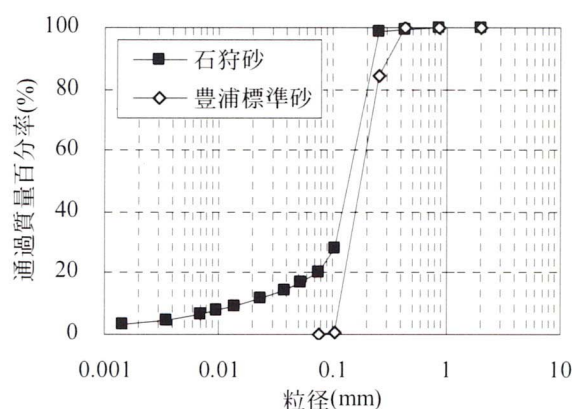


図-3 粒径加積曲線

(3) MB水混入試験概要

実地盤へのMB混入概要図を図-4に示す。MB水生成装置は図-1の室内MB生成装置を実地盤用に大きくしたもので、最大圧1.49MPa、内容量0.12m³の耐圧タンク、MB発生ノズル（京簾から開発）、循環用高揚程ポンプ、コンプレッサーからなり、圧力下でのMB生成が可能である。MB水は揚水孔から地下水を汲み取り耐圧タンク内に充填し、タンク圧400kPa、空気流入圧500kPaの下で約10分間タンク内の水を循環させることにより、MBを発生させ生成を行った。MB水生成完了後、混入孔よりMB水混入を行うとともに改良地盤内の地下水位低下とMB水の浸透を促すため、同時に揚水ポンプにより地下水の汲み取りを行った。

図-5に実地盤試験配置および深度を示す。MB水改良領域は半径3mの円形状を想定し、中央に揚水孔（管長L=5m塩ビφ100mm全深度ストレーナ管）、周囲3箇所にMB水混入孔（管長L=5m塩ビφ75mm先端1mストレーナ管）を設けた。また、MB水混入孔の設置の際、混入時の管周りからの混入水の吹き出しを防止するため、MB混入管周りの隙間にベントナイトペレットを入れ埋め戻しを行った。

計測は混入時および混入後の地盤の飽和度を調べる目的で土壌水分計（ADR、ADR-ECO）による体積含水率 θ 測定、ベンダーエレメント（以下BE）による弾性波速度測定及び比抵抗探査を行った。また、混入時の地盤変化や地盤の挙動の把握には、間隙水圧計PWPと地表面沈下計測を改良・未改良領域で行った。計測番号と設置深度を表-3に示す。

(4) MB 混入試験結果・考察

MB 水混入は MB 混入孔より混入圧 400kPa、流量 18ℓ/min（1 孔当たり 6ℓ/min）で行った。また混入直前の大気圧開放下での MB 水の溶存酸素量 DO は 14.0mg/ℓであり、室内実験の 16.0mg/ℓと同程度となり、現場でも十分な空気溶存量を有する MB 水を生成することを確認した。なお、揚水孔からの地下水汲み取り量は 7～8ℓ/min 程度であった。また、混入時において地盤のボイリングや管周りからの混入水の噴き出しなどが懸念されたが、今回の混入では

それらの現象は見られなかった。

図-6 に ADR、ADR-ECO から求めた飽和度 S_r と混入量の結果を示す。なお、 S_r は ADR、ADR-ECO により体積含水率 θ を測定し、次式より算出した。

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{e}{1+e} \cdot S_r \quad (1)$$

ここで、 θ ：体積含水率（%）、 V_w ：水の体積（m³）、 V ：土の体積（m³）、 e ：間隙比、 S_r ：地盤飽和度（%）とする。

ADR-ECO1は混入時に S_r が増加する傾向になった。これは揚水孔の影響を受け密度が変化したと考えら

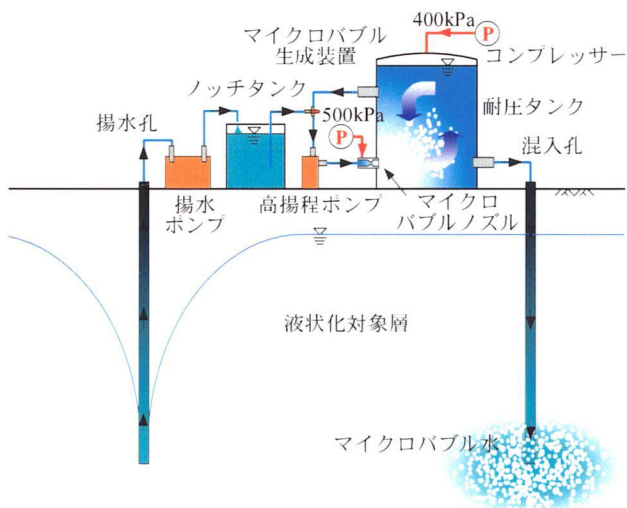


図-4 MB混入概要図

表-3 計測項目

計測項目	計測No	計測深度
飽和度	ADR	GL-4.0m
	ADR-ECO1	GL-4.0m
	ADR-ECO2	GL-2.0m
	BE	GL-2.2m
間隙水圧	PWP1	GL-4.0m
	PWP2	GL-4.0m

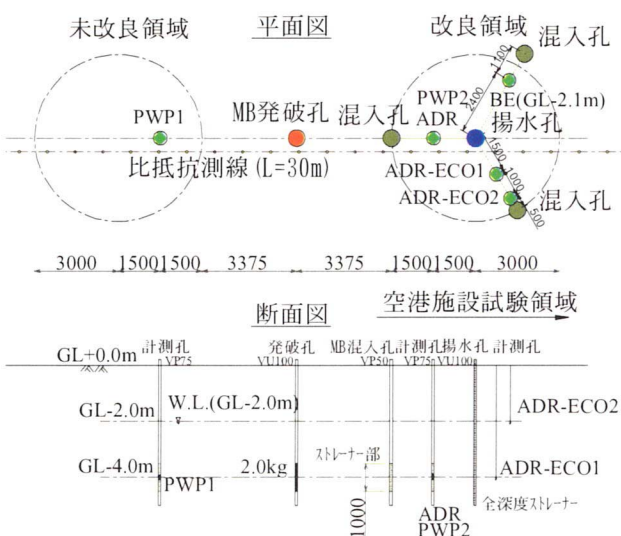


図-5 実地盤試験配置図

れる。また、ADR と ADR-ECO2 では S_r の低下はあまり見られなかった。BE においても B 値が 0.75, S_r が 99.9% と高い値になった。ここで、MB 水の地盤中での浸透範囲を球状に浸透すると仮定すると、浸透半径は下式より求められる。

$$R = \sqrt[3]{\frac{75Q_u}{\pi n}} \quad (2)$$

R : 浸透半径 (m), Q_u : MB 混入量 (1 孔当たり 2.7m^3), n : 地盤の間隙率 (52.6%) とすると $R=1.1\text{m}$ となり、混入位置から計測位置までの距離は 1.5~2.0m であり MB 水が計測位置まで浸透し到達せず飽和度の低下に到らなかった可能性がある。

図-7 に混入時の比抵抗探査結果を示す。図より揚水孔付近では、水位低下による抵抗値の変化が見られたが、MB 混入孔付近では計測結果にほとんど変化は見られなかった。また、比抵抗変化率による飽和度低下の値は揚水孔付近で 12~16% 程度であった。

(5) 発破を用いた液状化実験

発破による人工液状化実験は未改良領域と改良領域との中央の位置 (深度 GL-4m) に 2kg のエマルジョン系含水爆薬 1 発を設置し発破を行った。装薬位置を図-5 に示す。なお、発破実験は石狩湾新港で行われた『実物大の空港施設を用いた液状化実験』の発破工の 1 部 (図-2 参照 点火は全体 261 孔 583 発の最終発破) である。

計測は発破による液状化時の地盤挙動の把握のため、図-5 に示す改良・未改良領域での地盤の過剰間隙水圧測定および地表面沈下計測、比抵抗探査を行った。なお、沈下計測は図-8 に示す●の位置で、発破直後、3 時間、1 日、4 日、7 日、18 日後の沈下量を測定した。また、発破終了後、地表面の状況について観察し、噴砂、クラック等を確認した。

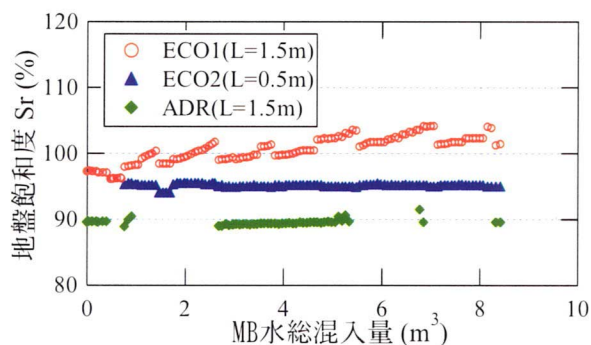


図-6 飽和度計測結果

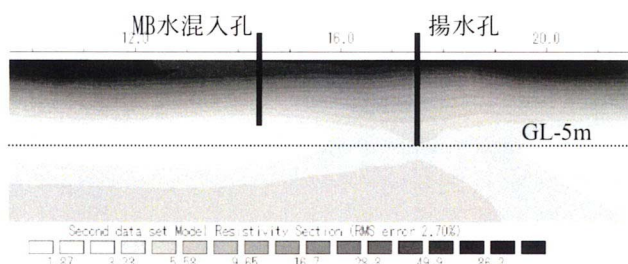


図-7 比抵抗探査結果

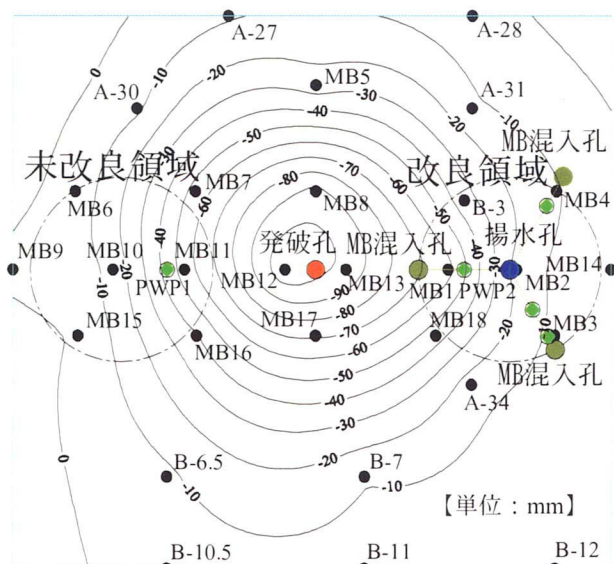


図-8 沈下計測位置と発破18日後沈下分布図

(6) 液状化試験結果・考察

沈下計測結果を図-9、図-10 に示す。また、図-8 に発破 18 日後の沈下量分布を示す。沈下は発破直後に全沈下量の約 80% 沈下し、その後 2 週間で収束した。沈下分布は発破孔を中心とし同心円状に広がり、改良部と未改良部で最大 60mm 程度の沈下があり、両者の差は見られなかった。また、発破後は噴砂跡が見られ、発破孔を中心とし円状に地盤にクラックが発生した。形状は沈下分布に類似しており、中心部の地盤が液状化し沈下したため、周辺地盤に引張力が作用し、ひび割れが発生したと考えられる。

図-11、図-12 に PWP1 (未改良領域)、PWP2 (MB 改良領域) での発破時の過剰間隙水圧変化を示す。結果は計測時のノイズを補正するため、前後 100 個の隣接平均を取り検証を行った。なお、対象地盤の有効上載圧 σ_v' は地下水位 GL-2.5m とし、密度検層の試験結果より 53.5kPa となった。

空港施設領域の発破開始後、発破による振動により水圧は徐々に上昇した。PWP2 の方が PWP1 より少し大きくなっているが、これは空港施設領域までの距離が PWP1 が約 50m に対し、PWP2 が約 39m と近く、より大きい振動を受けたためと考えられる。

MB 発破により間隙水圧は一気に上昇し、有効応力 σ_v' 付近 (PWP1 で 44.6kPa, PWP2 で 41.3kPa) まで上昇した。MB 発破による過剰間隙水圧の上昇量は PWP1 が 41kPa, PWP2 が 35kPa と PWP2 の方が小さくなり、その後水圧が消散する過程において両者とも同じ水圧値になることから、MB 水混入による地盤の飽和度低下が過剰間隙水圧の上昇を抑制し、有効応力の低下を遅らせた可能性がある。しかし、改良による過剰間隙水圧の低減はわずかであり、十分な液状化強度の増加は得られなかったと推測される。

一方、図-13 に発破前後に行った比抵抗の変化率は MB 発破により地表面付近で少し変化が見られる程度で、液状化は発生していないと推測され、改良・未改良でほとんど差は見られなかった。

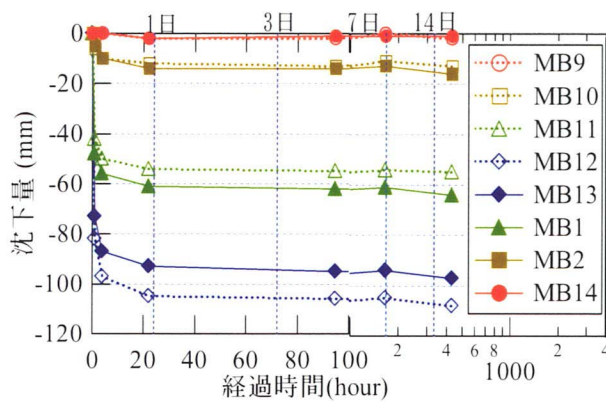


図-9 沈下時系列変化

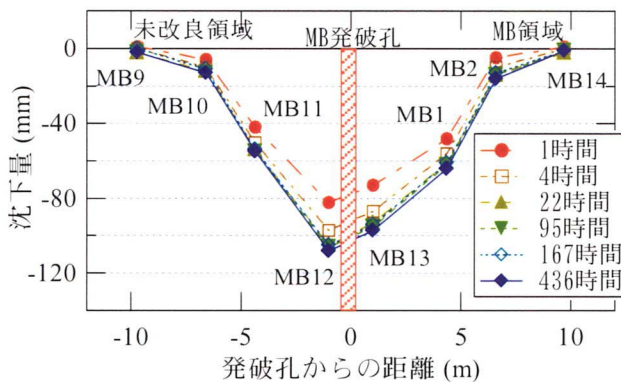


図-10 沈下断面変化

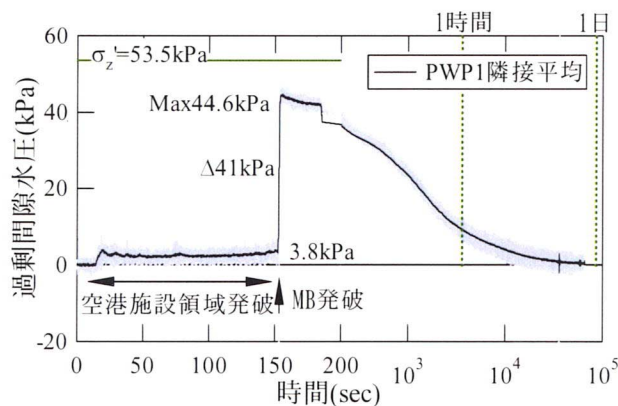


図-11 未改良部過剰間隙水圧計測結果

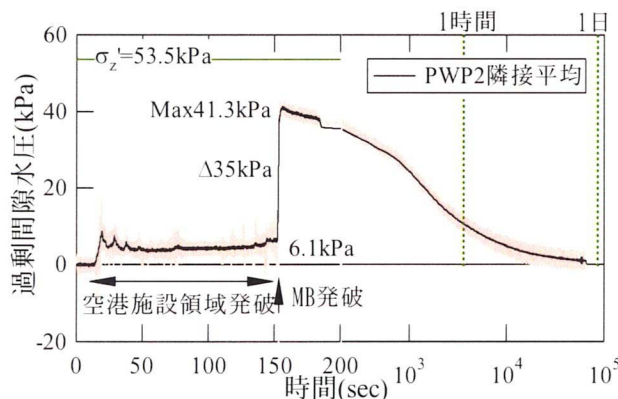


図-12 MB改良部過剰間隙水圧計測結果



図-13 比抵抗探査結果(変化率)

4. 現地砂模型地盤 MB 水混入実験

(1) 実験概要

実地盤における MB 水混入実験において、土壌水分計などの計測結果からは飽和度の低下が確認できなかった。しかし、発破を用いた液状化実験の結果から、過剰間隙水圧の抑制が見られ、土壌水分計に反応しない範囲で飽和度の低下があったと考えられる。また、より効率の良い改良を行うためには、少ない MB 水混入量でも十分な飽和度低下効果を得られる混入方法を検討する必要がある。既往研究⁵⁾より地盤への MB 水混入の直前でさらに MB を発生させる装置 (MB 復元装置) を用いることで、少ない混入量で飽和度低下出来ることから、石狩砂での飽和度低下程度と MB 復元装置による飽和度低下効率を検証するため、実地盤実験で用いた MB 生成装置を用い、石狩砂模型地盤への MB 水混入実験を行った。試験装置を図-14 に示す。実験は内径 75mm 高さ 300mm のアクリル製円筒容器 (Column) を用い、実地盤と同程度の湿潤密度 $\rho_t = 1.6 \text{ g/cm}^3$ の地盤を作成し、飽和させた後、MB 水混入による飽和度 S_r の低下を調査した。さらに実地盤実験と同地盤条件にするため、供試体の背圧 B.P を 50kPa とし、混入 MB 水も現場で使用した装置を用い生成した。なお、 S_r は Column の重量変化を測定し下記の式より算出した。

$$S_r = \frac{V_w}{V} \times 100 = \frac{V_w - \Delta W \cdot \rho_w}{V_v} \times 100 \quad (3)$$

ここで、 S_r : 地盤の飽和度 (%), V_w (m^3) : 間隙水の体積, V_v (m^3) : 間隙の体積, ΔW (g/min) : 重量変化 (g), ρ_w : 水の密度 (g/cm^3) である。

試験条件を表-4 に示す。試験は実地盤実験と同様に直接 MB 水を混入したケースと、混入直前に MB 復元装置を使用したケースを実施し、混入方法の違いが飽和度低下効果に与える影響について検討した。

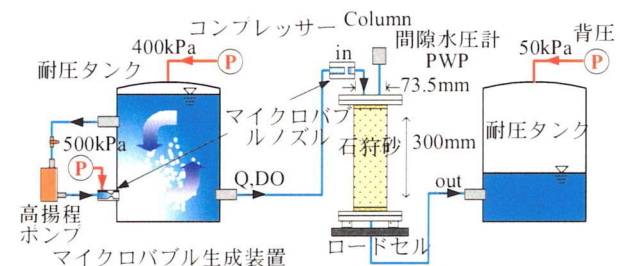


図-14 模型実験概要

表-4 試験条件

	CASE1	CASE2
湿潤密度 $\rho_t(\text{g/cm}^3)$	1.57	1.56
間隙比 e	1.04	1.05
間隙の体積 $V_v(\text{cm}^3)$	552.31	554.19
間隙水の体積 $V_w(\text{cm}^3)$	543.17	547.4
MB復元装置	なし	あり
背圧 B.P (kPa)	50	50

(2) 実験結果・考察

図-15 に MB 水混入体積と飽和度の変化を示す。CASE1 は現場混入実験と同様の方法で MB 水混入を行ったものである。飽和度 S_r は混入と同時に徐々に低下し最終的に 85%程度まで低下した。MB 復元装置を用いた CASE2 では CASE1 より 1/10 程度の混入量で $S_r=85\%$ に達し、最終的に $S_r=78\%$ 程度まで低下した。これより石狩砂（実地盤）においても MB 復元装置を用いることで、高濃度空気溶存水を直接混入した場合に比べ飽和度低下効率が高まると考えられる。実施工においても MB 水を地盤に混入する直前に MB 復元装置を設置することが有効である。

一方、実地盤実験での改良の対象とした地盤は揚水孔を中心に半径 3m 領域である。MB 水の混入は GL-4m から行い、地下水位は GL-2.5m 程度であったことから、GL-4m 地点を基準として上下方向 1.5m、揚水孔を中心とした半径 3m の円柱形の領域を改良対象とすると改良対象地盤の間隙体積は 45m^3 となる。ここで、実地盤実験で混入した MB 水の総混入体積は 8m^3 程度であり、これを模型地盤での混入量に換算すると $Q=100\text{cm}^3$ となる。よって、図-15 に示す通り混入量 100cm^3 ではほとんど飽和度が低下せず混入量が少なかったことが分かる。

しかし、前述の実地盤実験で MB 改良領域でわずかながら間隙水圧の上昇が抑制され、その後の水圧の消散過程において未改良領域と同程度の水圧値となることから、混入孔付近など部分的に飽和度が低下している箇所が、発破衝撃による間隙水圧の上昇を抑制した可能性がある。今後、この事象については室内にて検証を行う予定である。

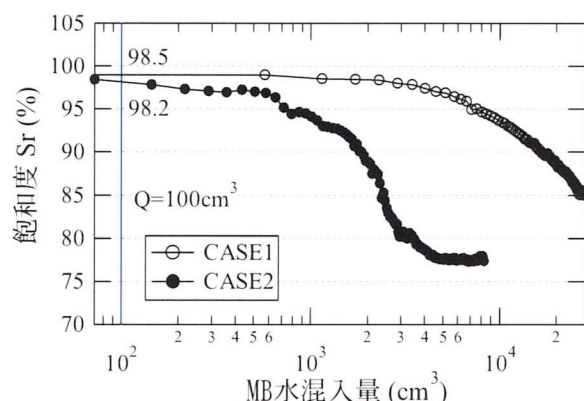


図-15 混入量と飽和度低下の関係

5. まとめ

本論で得られた結論を以下に示す。

- ① 本試験方法で実地盤の地下水を汲上げ空気溶存度の高い MB 水を生成することが出来、ボイリングや割裂などにより混入水が噴き出しすることなく安全に混入出来ることを実証した。
- ② MB 水改良地盤と未改良地盤での発破による人工液状化実験により、地表面沈下などの地盤挙動について大きな差は見られなかったが、MB 領域においてわずかではあるが過剰間隙水圧の上昇が抑制され改良効果を期待できる。
- ③ 実地石狩砂を用いた室内実験の結果、実地盤実験では MB 水の混入量が少なく十分に飽和度を低下させることが出来なかったと判断される。また実地盤実験においても MB 復元装置により少ない流量で効率的に飽和度を下げることが出来ると考えられる。

これらの結果より、今後効率の良い施工方法が望まれるほか、混入範囲、混入量などの設計法を確立するための検討が必要である。

また、MB の耐久性、計測方法に関しても、今回十分な結果が得られなかったことから、実地盤試験箇所での事後調査および室内実験により明らかにしていく予定である。

謝辞：本研究は『実物大の空港施設を用いた液状化実験』共同研究の1つであり、実験を行うにあたり各共同研究機関ならびに筑波大学京藤敏達教授、(株)建設技術研究所山田早恵香氏、駿河銀行水上雄哉氏をはじめ関係者の方々に協力を得た。ここに謝辞を述べる。

参考文献

- 1) 岡村未対：空気注入による安価な液状化対策工法，土と基礎，Vol.54 No.7, pp.28-30, 2006.
- 2) 菅野高弘，中澤博志：空港施設の液状化挙動に関する制御発破を用いた現場実験，第8回空港技術報告会，pp.1-6, 2007.12.
- 3) Nagao K., Azegami Y., Yamada S., Suemasa N. and Katada T.: A micro-bubble injection method for a countermeasure against liquefaction, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper ID 1764, pp.392, 2007.
- 4) 山田麗徳，坂入信之，金子公久，京藤敏達：空気吸い込み渦の崩壊に伴う微細気泡の生成，日本流体力学会年会 2005 講演要旨集，AM05-24-002, 2005.
- 5) 永尾浩一，前田幸男，末政直晃：マイクロバブル水混入工法による地盤の液状化対策工に関する検討実験，佐藤工業技術研究所，No.32, pp21-25, 2007.