

S 2. 橋梁のコンクリート床版防水システムに関する研究

(一社) 日本建設機械施工協会 ○ 榎園 正義
 (一社) 日本建設機械施工協会 谷倉 泉
 (一社) 日本建設機械施工協会 三浦 康治

1. はじめに

道路橋の RC 床版の疲労損傷には水の影響が大きいことが、松井らの研究¹⁾で明らかになっている。すなわち、RC と床版上面に水を張って疲労試験を行った場合、床版の疲労寿命は 1/100 以下になることが示されている。また、積雪寒冷地では凍害や凍結防止剤（塩化ナトリウム）散布による塩害の影響で、床版の上側鉄筋が腐食し、コンクリートの層状はく離が発生している。このように、道路橋の RC 床版の耐久性には水の存在が深く関わっている。このことから、床版防水の必要性が認識され、床版防水層が施工されるようになってきた。しかし、紫桃らの調査²⁾によると、シート防水は施工後 5 年程度で防水機能がなくなることや、瀝青塗布防水は施工初期に防水機能がなくなるものがあることなどが報告されている。

日本の防水層の規準は、昭和 62 年に「道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料」³⁾が道路協会から出版されて以降、長く改訂されてこなかったが、平成 14 年の道路橋示方書⁴⁾の改訂で、全てのアスファルト舗装の橋梁には防水層等を設けることになり、平成 19 年 3 月に「道路橋床版防水便覧」⁵⁾が制定された。この便覧では、防水層の種類とその説明、および要求性能を照査する方法が示されている。適切な要求性能を設定し、それを適切な試験法で照査すれば、防水層の性能はある程度保証できるという考えである。しかし、防水は防水層のみで機能するものではなく、床版上面の下地処理、防水層、舗装を含めた全体システムとして始めて機能するものである。このことから、厳密な防水システムを導入しているドイツ、イギリス、スイス等の事例も参考にして、土木学会鋼構造委員会において床版防水システムのあるべき姿が検討され、「道路橋床版防水システムガイドライン(案)(2012 年 6 月)」が刊行された。

本稿では、このガイドラインの概要を紹介すると共に、施工技術総合研究所の防水シ

テムへの取り組みについて紹介するものである。

2. 防水層の種類

我が国における床版防水材料は、シート系床版防水層（流し貼り型、加熱溶着型、常温粘着型）、塗膜系床版防水層（アスファルト加熱型、ゴム溶剤型、反応樹脂型等）等、様々な種類の防水材料が存在しており、床版防水便覧では、現在の防水材料を下記のとおり分類している（図-1 参照）。各々の防水層に応じて、その構成や特性も異なるため、あらかじめ施工方法、施工手順、施工条件などを勘案した上で材料の選定を行う必要がある。

一般に、床版防水システムの断面構成は、図-2 のように①コンクリート床版、②プライマー層、③床版と防水材との接着層、④防水材、⑤防水材と舗装との接着層、⑥舗装に区分される。材料の種類によっては、各層を兼ねる材料も存在する。

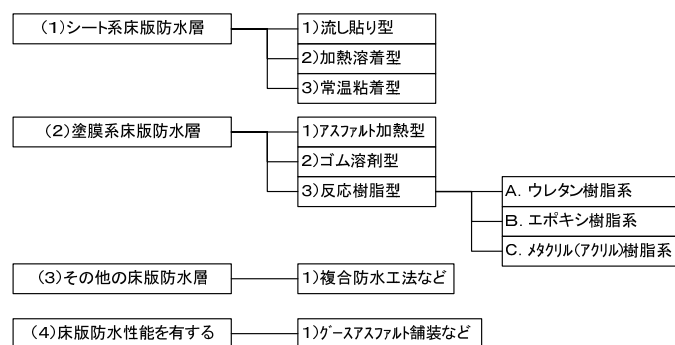


図-1 床版防水材料の分類

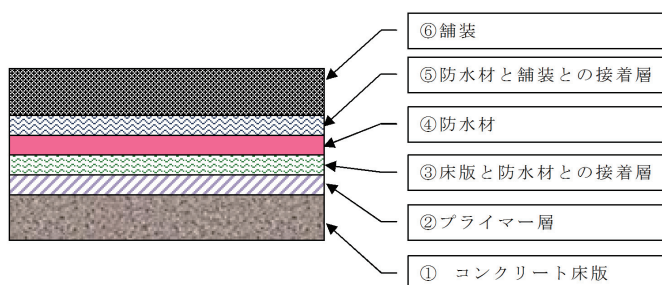


図-2 床版防水システムの一般的な断面構成

3. 床版防水システムの要求性能

道路橋床版防水システムの要求性能と性能照査に関しては、“性能照査型設計法”を基本とした。要求性能を設定するにあたっては、欧州道路橋床版防水システム調査、および我が国の現状を参考にした。要求性能は、表-1 に示すように材料性能、初期性能、耐久性能、排水性および維持管理性に大別されている。

表-1 床版防水システムの要求性能一覧

性能種別	性能が要求される段階・時期	要求性能
防水材料の材料性能	材料の製造・運搬 材料の製造から供用終了までの期間	① 防水材料の品質安定性 ② 防水材料の環境安全性
床版防水層の初期性能	床版防水層の施工直後（初期性能1） アスファルト舗装の施工後（初期性能2）	③ 下地と防水層の接着性 ④ 施工性 ⑤ 膨れ抵抗性 ⑥ はがれ抵抗性 ⑦ 局部変形性 ⑧ 舗装後の防水性 ⑨ 舗装後の接着性・せん断抵抗性 ⑩ 水浸後の接着性
床版防水層の耐久性能	供用中	⑪ 温度変化および薬品負荷抵抗性 ⑫ 輪荷重繰返し負荷抵抗性 ⑬ ひび割れ開閉負荷抵抗性 ⑭ 凍結融解負荷抵抗性 ⑮ 繰返しせん断負荷抵抗性
排水性	供用中	⑯ 排水性
維持管理性	供用中	⑰ 維持管理性（復旧性）

3.1 材料性能

床版防水システムを構成する各材料（床版防水層および排水設備に用いる各材料）は、製造されてから施工されるまでの間に、貯蔵時の温度変化や移送時の振動などによって材料が変質しない①品質安定性、ならびに製造・施工から長年月を経た場合でも、人体や環境に対して十分な②環境安全性を備えている必要があり、これらの性能が確認される。

3.2 初期性能

初期性能は、供用開始前の床版防水層に求められる性能で、さまざまな下地条件や環境条件下で床版防水層が施工された場合でも、所定の性能を保持することが求められる。初期性能は、床版防水層が施工された直後に求められる性能（初期性能1）と、工事用機械の走行に伴う負荷や、加熱アスファルト混合物の熱影響、および骨材の押込み等の影響を受けるアスファルト舗設直後に求められる性能（初期性能2）に分けられる。

これら初期性能の各項目は、接着性、施工性、膨れ抵抗性、はがれ抵抗性、局部変形性、防水性、せん断抵抗性などである。

3.3 耐久性能

供用中の床版防水は、交通荷重、環境条件等の影響を受けた場合でも、所定の耐久性能を有していることが必要となる。このうち、床版防水層の耐久性能としては、表-1 に示すように、輪荷重繰返し負荷抵抗性や外気温、コンクリー

トの強アルカリに対する抵抗性およびひび割れ開閉負荷抵抗性が重要である。

3.4 排水性

供用中の床版防水システムには、コンクリート床版や床版防水層、舗装に悪影響を与える滯水が生じないように適切に排水できる排水設備を設置し、これらの排水設備が良好に機能することが求められる。これらの排水設備は、橋梁の縦断勾配や横断勾配、ならびに曲率半径によっても、その効果には大きな差が生じるため、排水設備の選定は、これらの条件を十分に考慮することが重要である。さらに、防水層上面の境界面からの排水についても、十分配慮した構造であることが必要である。

3.5 維持管理性

床版防水システムは、計画供用期間にわたり、良好にその機能を維持管理する必要があり、そのためには適切な復旧を行いながら、所定の防水性能を維持できる性能を有する必要がある。特に重視されるのは、供用中に床版防水層の一部に劣化・損傷が見つかった場合、部分補修等による対応が容易な施工性能である。

4. 床版防水システムの性能照査

4.1 材料性能の照査

ガイドラインでは、防水材料の①品質安定性は製造業者が発行する製品品質証明書を、②環境安全性は製品安全データシート（MSDS; Material Safety Data Sheet）を、それぞれ確認することにより照査することとしている。なお、将来は我が国でも欧州のように、製品品質証明書に関して、第三者機関による認証（試験）されるケースも考えられる。

4.2 初期性能の照査

標準温度（23℃）における③下地と防水層の接着性は写真-1 に示すような建研式引張試験機を、⑨舗装後の防水層と舗装の接着性は写真-2 のような荷重制御が可能な万能試験機を用いて試験を行い、接着強度は 0.6N/mm^2 以上が求められる。④施工性については、施工要領書の確認、および試験施工による検証を推奨している。⑤膨れ抵抗性は、負荷後に、気泡やブリストリングの有無を目視確認するとともに写真-3 に示すような赤外線画像でも確認する。⑥はがれ抵抗性に関して、本ガイドラインでは、“舗装の接着層までを施工した試験体”を用いて、写真-4 に示すように防水層の上にゴム板および鋼板を載せ、載荷荷重 20kN で 1 分間保持したのち、ゴム板と鋼板を撤去した際に、防水層がはがれないことを照査する。⑦局部変形性は、通行車両等により防水層上に骨材が押し込まれても、耐荷性が損なわれないことを確認するも

のであり、円盤治具を防水材に載せて24時間静置したのち、写真-5に示すように、へこみ部と負荷のかかっていない健全部に漏斗を立てて透水量を7日間計測する。照査は平均吸水量の差で行う。

さらに、⑧舗装後の防水性は、基層アスファルト混合物打設時の骨材の押込みや、アスファルト混合物の熱による抵抗性を照査するもので、舗設温度（締固め温度）は140℃を標準とし、写真-6に示すような防水性試験機を用いる。⑨舗装後のせん断抵抗性も舗設温度は140℃とし、試験体温度23℃におけるせん断強度は0.15N/mm²以上を求めており、写真-7に示すような変位制御可能な万能試験機を用いる。⑩水浸後の接着性については、防水層内部に水が溜まった状態でも、引張接着強度をある程度保持できる性能を確認することとなっている。

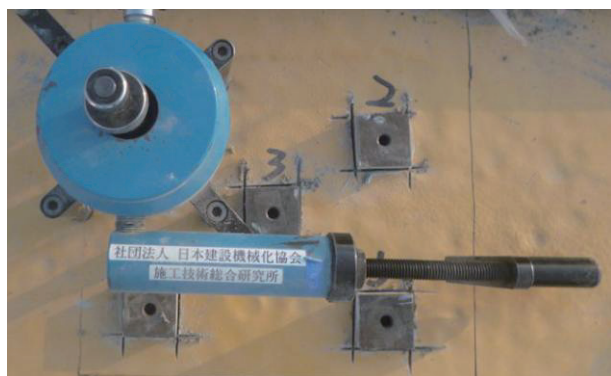


写真-1 建研式引張試験機（下地材と防水層の接着性）

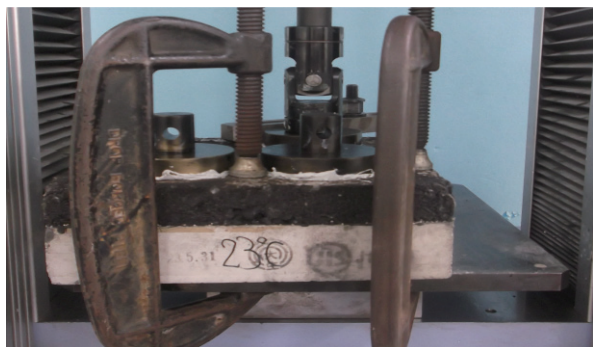


写真-2 荷重制御可能な万能試験機（舗装後の接着性）

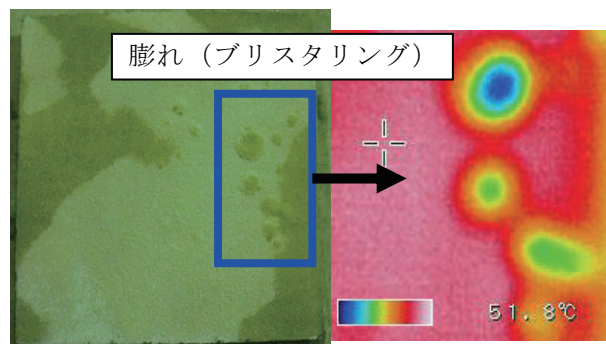


写真-3 膨れ負荷試験（赤外線カメラ画像による確認）

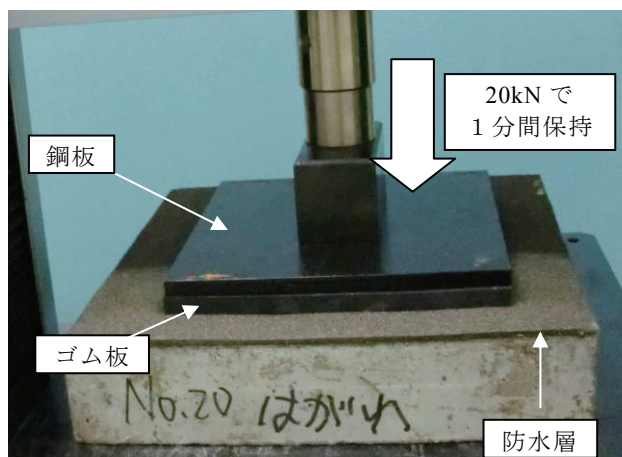


写真-4 はがれ負荷試験

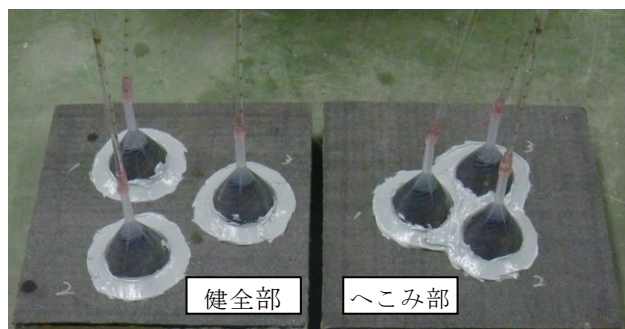


写真-5 局部変形性試験状況

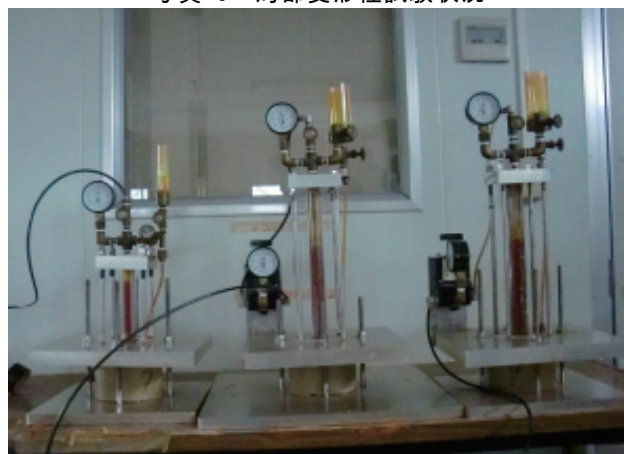


写真-6 防水性試験Ⅱ装置（舗装後の防水性）

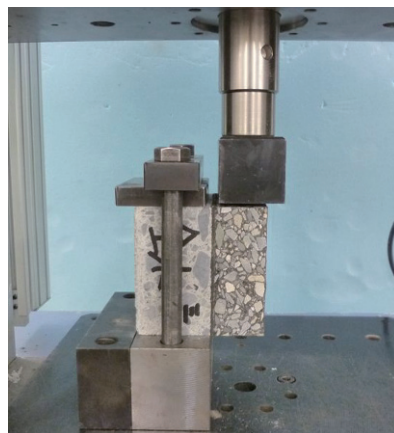


写真-7 変位制御可能な万能試験機（舗装後のせん断抵抗性）

4.3 耐久性能の照査

表-1中に示す⑪温度変化および薬品負荷に対する抵抗性は、飽和水酸化カルシウム溶液に16時間浸漬後、 -10°C （寒冷地では -20°C ）から 50°C の温度変化を30回繰り返す、抵抗性を確認する。⑫輪荷重繰り返し負荷抵抗性は、写真-8に示すような 60°C の恒温槽で120分のホイールトラッキング負荷試験によって確認する。⑬ひび割れ開閉負荷抵抗性は、欧州で最も重要な性能とみられており、性能レベルは低温のレベルで決まる。施工技術総合研究所でも写真-9に示すような試験機を用いて、 -10°C （寒冷地では -20°C ）の試験が始まっている。⑭凍結融解負荷抵抗性については、試験方法についての研究が進められている段階である。⑮繰返しせん断負荷抵抗性は、防水層の接着性能の良し悪しに関係することが確認されており、写真-10に示すような試験機が開発されている。



写真-8 ホイールトラッキング負荷試験状況

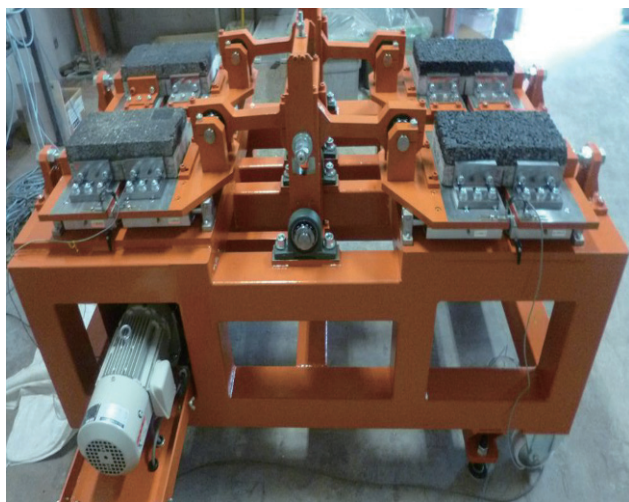


写真-9 ひび割れ開閉負荷試験機

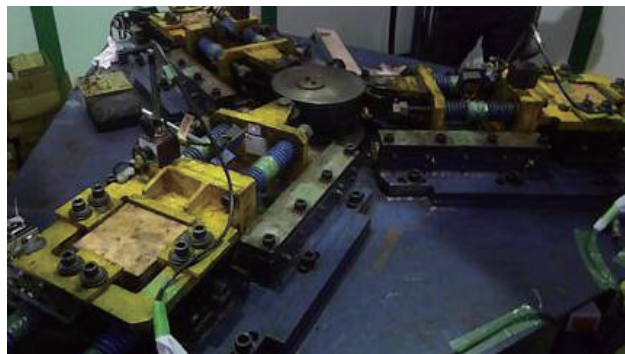


写真-10 繰返しせん断疲労試験機

5. 床版防水システムの設計

5.1 床版防水システムの選定

床版防水システムの設計では、個々の橋梁の供用環境や維持管理性などの特性に応じて、床版防水へ求める性能を設定した上で、表-1の要求性能一覧に適合する適切な材料を選択する。ただし、一般的な環境下では表-2に示すカテゴリ1～5のように、要求される性能に応じたグループ分けが行われている。

ここで、重交通路線は概ね計画交通量 4,000 台/日以上、もしくは大型車 500 台/日以上（2方向）の道路としている。また、寒冷地とは道路橋示方書Ⅰ共通編で言う寒冷な地方（北海道、東北地方など）を指し、凍結防止剤を散布する路線も寒冷地に含められる。

表-2 一般的な環境下の床版防水層の区分

区分	床版防水層に要求される性能
カテゴリ 1	材料性能、初期性能に加え、寒冷地および重交通路線に対応する耐久性
カテゴリ 2	材料性能、初期性能に加え、重交通路線に対応する耐久性
カテゴリ 3	材料性能、初期性能に加え、寒冷地に対応する耐久性
カテゴリ 4	材料性能、初期性能に加え、一般的な路線に対応する耐久性
カテゴリ 5	材料性能、初期性能

高速道路や都市部の橋梁では、補修工事を実施した時に道路利用者が受ける経済損失が大きいため、耐久性に優れたカテゴリ 2（寒冷地ではカテゴリ 1）に適合する床版防水層が要求されることが一般的である。また、地方道の場合には、一般的な耐久性を求めたカテゴリ 4（寒冷地ではカテゴリ 3）に適合する床版防水層を使うのがよいとされている。

5.2 床版防水システムの計画

床版防水の計画においては、床版全面および端部において、床版(端部)防水層を設ける必要がある。これは、床版部分のみならず、壁高欄や地覆などの端部からの漏水を防ぐためである。また、舗装の端部においては、舗装と地覆などの境界面から漏水することから、**図-3**に示すように目地材を用いて止水することが有効である。なお、端部防水層は路面より少し上まで伸ばすのが効果的である。

排水設備は、雨水などの滞留による舗装の劣化を抑制するだけでなく、万が一、防水層が防水性能を保持できなくなった場合にも、雨水などを速やかに排水することにより、コンクリート床版の劣化を極力遅らせるために設置するものである。床版上面の排水計画については、構造物の計画段階より、床版の勾配および水の流れ、排水設備などについて計画することとしている。

排水柵周辺部については、排水柵側面と床版との間から漏水することが懸念されている。このため、排水柵周辺部は特に水の浸透を防止するような配慮が必要であり、排水受け柵と床版の継ぎ目は確実に防水する必要がある。また、排水柵は、**図-4**に示すように上柵と受け柵に分離した高さ調整のできる2層構造タイプを用いることが望ましく、受け柵の据付け高さは床版面以下に施工する必要がある。

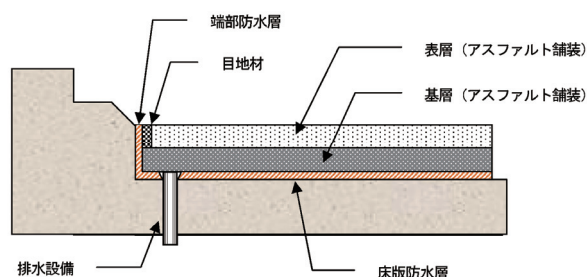


図-3 床版防水システムの標準的な構成例

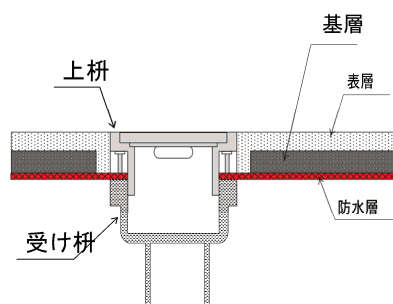


図-4 排水柵部の処理例

6. 床版防水システムの施工

床版防水システムの施工では、床版面の下地処理→床版防水システムの施工→アスファルト混合物の舗設が行われる。つまり、良好な防水システムを構築するためには、床版の下地処理、防水層、アスファルト混合物が三位一体となり、それぞれの施工が適切に行われることが重要である。そのためには、下記に留意する必要がある。

- (1)床版防水層が施工面全面で均質であり、所要の品質となるように入念に行い、長期に渡って所要の機能が発揮できるように十分配慮する。
- (2)現場には、床版防水システムの施工に関する十分な知識を有する技術者を配置する。
- (3)施工計画書は、工事開始前に事前調査を行い、材料の特性が記載された施工要領書に基づいて作成する。
- (4)施工計画書は現場に常備し、その計画書にしたがって工事を進める。工事終了後は、施工が適切に実施されたことや維持管理のために必要な事項を工事記録として記録する。
- (5)下地処理は、良好な防水システムを構築する上で最も重要である。そのため、下地処理を適切に行うためには、特に以下の点に留意することが必要である。

- ・コンクリート床版面は、床版防水層の施工前に適切に処理しておく。
- ・コンクリート床版面のレイタンスや接着を阻害する膜養生剤などの付着は、床版と床版防水層との接着性に悪影響を及ぼすため、これらの有害物を確実に除去する。
- ・コンクリート床版面にひび割れ、段差、ジャンカ、補修跡がある場合は、適切に処理する。
- ・コンクリート床版の保有水分量は、適切な値に管理する。

また、維持修繕工事では床版の疲労耐久性、耐力力の低下を抑止するため、舗装の切削については、**写真-11**に示すような大型切削機や**写真-12**に示すような中型切削機（ファインミリング等）やバックホウ等を用いて行い、床版を痛めないように注意する必要がある。なお、床版切削後の表面処理には、**写真-13**に示すようなスチールショットブラストを用いる場合が多い。

- (6)排水設備については、
 - ・排水計画を十分に把握し、施工前に現場条件の確認を行う。
 - ・排水設備を設置する際には、橋梁構造や縦断・横断勾配、施工条件等に十分留意して計画する必要がある。

(7)防水層の施工は、各工法の施工要領書および各現場の状況に対応して作成された施工計画書に従って行われる。施工は、防水工事の専門知識を持つ施工管理者の責任のもとで行われる必要がある。特に維持管理工事においては、舗装が切削されるまで床版の損傷・劣化状況やその規模等の情報が得ることが困難なため、状況に応じた対応が求められる。

(8)アスファルト混合物の舗設については、下記が重要である。

- ・地域、気象条件、交通量条件等に応じ、水密性に配慮した適切なアスファルト混合物を使用する。
- ・施工前に、仕上り高さ、実施工程等について事前に確認する。
- ・防水層の上に施す舗装は、各防水層が求める条件を満足するよう配慮して施工する。
- ・寒冷期（外気温 5℃以下）において舗設する場合には、特に防水層との付着性の確保および所定の締固め度が得られるように注意して施工を行う。
- ・アスファルト舗装と既設構造物との界面については、防水性を考慮した目地の設置を行う。



写真-11 大型切削機



写真-12 中型切削機（ファインミリング）



写真-13 スチールショットブラストによる表面処理

7. 研究所の取り組み

施工技術総合研究所では、大阪大学、大阪工業大学、NEXCO総合技術研究所をはじめとして、土木学会、寒地土木研究所、材料メーカーと共に平成11年より現在に至るまで、床版防水の性能評価手法の提案と実験的検証を行ってきた。今後も、これまでと同様に床版防水システムの性能試験の実施に加え、試験フィールドや現場での試験施工を通じ、よりよい床版防水システムの構築に向けて努力していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 松井ら：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, 1987
- 2) 紫桃ら：床版防水の性能向上に関する検討, 日本道路公団試験研究所報告 Vol.39, 2002.11
- 3) 道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料, (社) 日本道路協会, 1987.1
- 4) 道路橋示方書・同解説, (社) 日本道路協会, 2002.3
- 5) 道路橋床版防水便覧, (社) 日本道路協会, 2007.3

S 3. ICT 搭載型無人化施工機械の施工性検証試験結果について

一般社団法人 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所

鈴木 勇治

1. はじめに

集中豪雨や地震による地滑り等で、河道閉塞（以下、天然ダム）が発生し、越水による天然ダムの決壊の恐れがある場合には、緊急排水路の掘削というような応急復旧¹⁾が実施される。このような復旧対策には、二次災害防止のために無人化施工が広く採用されることが望まれる。我が国における無人化施工には 30 年もの歴史があり²⁾、雲仙普賢岳の復興工事等の様々な災害現場で採用されてきた。しかし、無人化施工の作業効率は搭乗操作よりも低いため、特に緊急的な対応を求められる応急復旧工事では、更なる作業効率の向上が求められている。

施工技術総合研究所では、国土交通省東北地方整備局および東北技術事務所の委託により、災害復旧現場で特に緊急的な対応が必要な応急復旧工事を想定し、無人化施工で広く用いられる無人化施工機械（遠隔操縦式建設機械）に ICT（情報通信技術）を活用した最適な操作支援システムの構成を検討し、施工効率の向上、安全性の確保を目指す手法として取りまとめると共に、ICT 搭載型無人化施工機械を利用した施工性検証試験を実施し、この試験施工の結果から災害復旧工における迅速性の確保に主眼を置いた活用手法をとりまとめた。

本報は、無人化施工に適用する情報化施工技術と、それを用いた災害復旧対策を実現するための検討結果および試験施工結果について述べる。

2. 目的

2.1 災害復旧現場における無人化施工のニーズ

無人化施工が、応急復旧工事に適用された代表的な事例として、平成 20 年に発生した岩手・宮城内陸地震での天然ダム対策がある。この災害では多くの天然ダムが確認されたため、全国から遠隔操縦式油圧ショベルが集められ、現地で地元の施工業者が操作技術を習得して復旧工や対策工に臨んだ。しかし、遠隔操縦に慣れることができず、搭乗施工に切り替えて実施された例や、無人化施工技術に精通した技術者や操作者が現場に存在し

なかったために通常の施工が実施された等の報告がある。被災地の地元で災害協定を結んでいる施工業者が自ら操作した無人化施工は、ほとんどの現場で確実に稼働できずに遠隔操縦熟練者を要請したのが現実であった（表-1 参照）。

表-1 岩手・宮城内陸地震での無人化施工

実施現場	A現場	B現場	C現場	D現場
対象工種	水路掘削	堰堤ボケット掘削	除石工	倒木作業
遠隔操作者	地元の施工業者	地方の熟練者	地方の熟練者	地元の施工業者
無人化施工実施期間	1週間程度	10日程度	数日	10日程度
作業現場での問題点等	走行、姿勢安定に苦労した熟練者が手配されなかった	重機足元整地に手間を要した	オペレータ要請に日数を要した	操作訓練を受けた4人の内2人は適応できなかった

これらの事例から、応急復旧工事における現状の無人化施工の問題点を整理すると、表-2 の通りとなる。

表-2 応急復旧工事での無人化施工の問題点

問題点と詳細
①無人化施工に習熟したオペレータが少ない。 ・モニタを通じた現場状況の確認に手間を要する。 ・遠隔操縦装置での操作に慣れない。
②危険区域内では丁張等の目標物を設置できず、施工の精度が確保できない。 ・掘削等での切り出し位置が特定できない。 ・施工形状を確認できない。

以上から、災害現場で復旧工として求められる現場ニーズをまとめると以下のように区分される。これらの現場ニーズに対応することで確実に効率的な災害復旧工が実現されると考える。

① 安全性に対するニーズ

操作者の二次災害を防ぐために、立ち入り禁止区域内で行う工種や作業を遠隔操縦式油圧ショベルで実施できること。

② 操作性に対するニーズ

遠隔操縦式油圧ショベルの操作が、迅速に、且

つ確実にできること。

③ 施工性に対するニーズ

立ち入り禁止区域内での作業が、極力短期間で完了すること。また、応急復旧工に求められる品質・出来形が確保できること。

2.2 施工性検証試験の目的

無人化施工は、通常施工（操作員搭乗）と比べ生産性に劣るとされている³⁾。災害復旧現場における遠隔操縦式油圧ショベルによる無人化施工の特徴と施工効率への影響を表-3に示す。この表より、「施工状況の把握」、「施工の判断」、「機体転倒の危険性の判断」についての支援を行うことが施工効率の向上を図るための課題であると言える。これら課題に対して、安全・確実に効率的な災害復旧工を実現することを目的として、無人化施工機械に ICT を搭載した操作支援方式の検討と施工性検証試験を実施した。

表-3 無人化施工の特徴と施工効率への影響

無人化施工の特徴	施工効率への影響
中継モニターや車載モニターを通じて現場や施工箇所の視認を行う。	距離感をつかみにくく、施工状況の把握に時間がかかり、施工効率が低下する。
一般に現場内に人が立ち入ることができず、丁張等による施工の目標物となるものを設置できない。	所定の形状・大きさの掘削や盛土を行うのに、勘や推量に基づいて判断することになり、施工効率が低下する。
機体の傾斜度合いを体感できない。	機体の転倒を防ぐために慎重な操作を強いられ、施工の効率が低下する。

3. ICT 搭載型無人化施工機械

施工の品質や出来形の確保と施工効率の向上のために、油圧ショベルに搭載する情報化施工技術としては、三次元マシンガイダンス（以下、MG）が考えられる。この技術は、RTK-GNSS や自動追尾 TS による測位情報を基に、油圧ショベルの自己位置を特定し、目標とする設計面および油圧ショベルのバケットの位置関係をモニタ表示するシステムである。モニタには平面表示や断面表示が可能であり、施工の場面に応じた設計面を表示できる（図-1、図-2 参照）。

この MG 技術を利用することで、現場ニーズに対して以下のような効果が期待できる。

① 安全性のニーズに対する効果

現場での丁張の設置が不要となる。また、MG 情報を利用することで地形の三次元データが取得できるので現場内での測量等の有人作業が必要なくなる。

② 操作性のニーズに対する効果

MG に現況情報や目標位置情報を与えることで、油圧ショベルの目標位置への誘導が確実にできる。また、機体の姿勢（傾斜）も明らかとなるため、安全な操縦が可能となる。

③ 施工性のニーズに対する効果

施工対象物の三次元設計情報を MG に搭載することで、施工開始直後から施工目標に合わせた施工が可能であるため、施工時間の短縮化が期待できるとともに、施工目標と油圧ショベルバケットとの位置関係がモニタ上で確認できるため、確実な施工が実現できる。

災害時の応急復旧対策工を実施することを想定した遠隔操縦式油圧ショベルの操作支援システムは、RTK-GNSS 測位システムを基本とすることが一般的である（図-3 参照）。

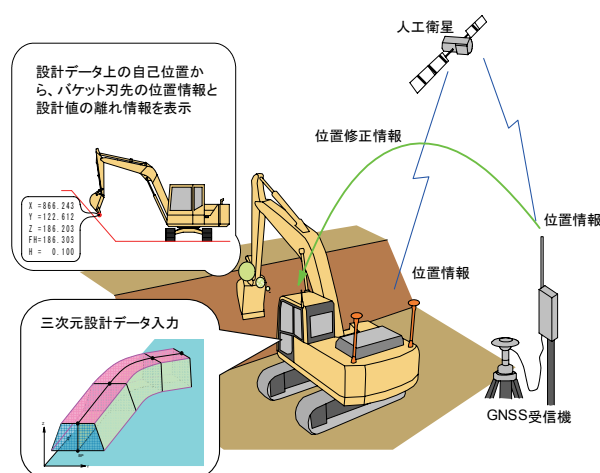


図-1 油圧ショベルのMG

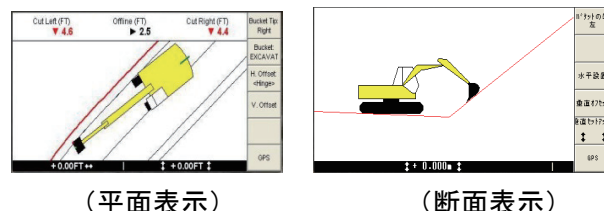


図-2 MGのモニタ表示例

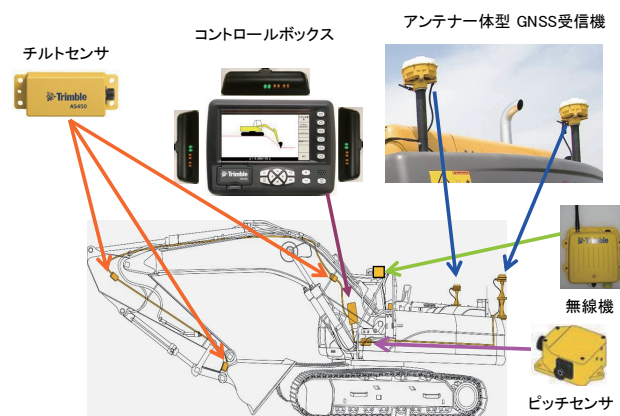


図-3 RTK-GNSS 測位MGの機器構成（移動局側）

RTK-GNSS 測位を精度良く行うには、上空に5基以上の衛星が適切な位置に配置されていることが必要となるため、山間部での現場や周囲に高い

構造物がある現場など上空の視界が妨げられる場所では測位解析が成立せず、システムが稼働しないことになる。

このような GNSS 測位が適用できない場合には、自動追尾 TS による測位（図-4 参照）を利用して三次元 MG を実施するか、機体に設置したセンサから機体の姿勢を求めて、基準位置からの高さと前後方向のみをガイダンスする二次元 MG（図-5、図-6 参照）を利用する方法がある。

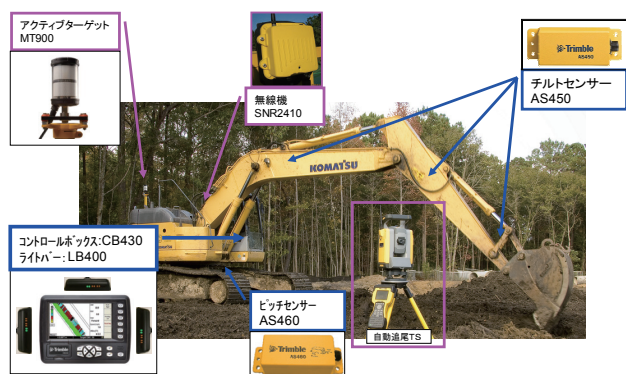


図-4 自動追尾 TS 測位の三次元 MG



図-5 二次元 MG の機器構成

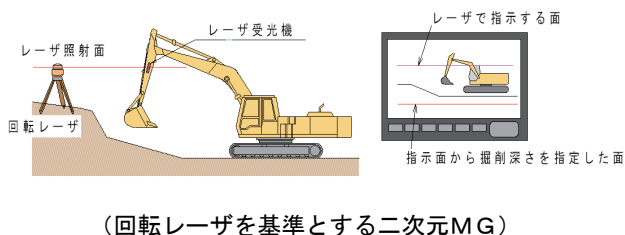
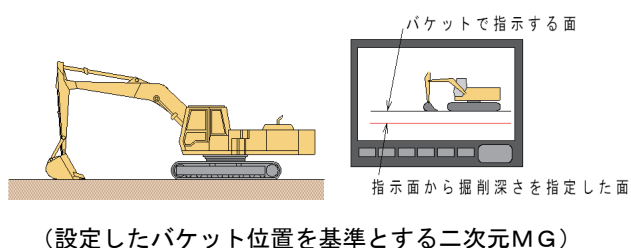


図-6 二次元 MG の概要

また、遠隔操縦を効率的に且つ確実に実施するためには、油圧ショベルに車載カメラを搭載し、更に、機体と現場との位置関係が確認できるようにする遠隔操縦式カメラ台車を利用する。車載カメラとして一般的に利用されているものは、キャビン上に1機、あるいは2機のカメラを搭載して、バケット位置の施工状況が把握できるようにしているが、機体の走行の安全性を向上するため、油圧ショベル本体前方の左右端に前方確認用のカメラを設置することが考えられる（図-7 参照）。

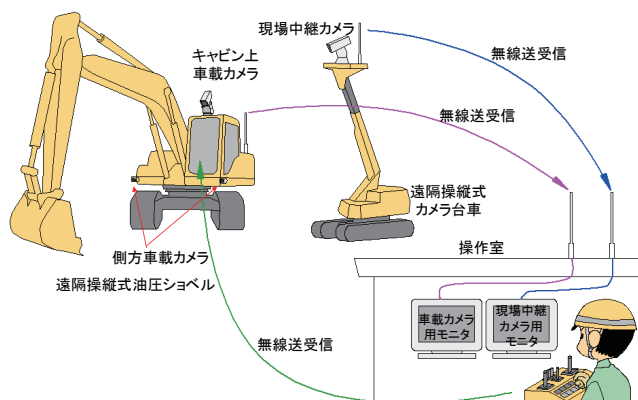


図-7 現場中継用カメラ

4. 施工性検証試験

試験施工では、MG 搭載型無人化施工の施工効率検証の他に、①MG に必要となる三次元設計データの簡易的な作成手法、②設計データ作成に必要な地形データの取得手法、③安全で確実な重機走行の確認、④施工現場での周囲の安全確認を実現するための車載カメラ配置、等を確認した。

本報では、施工効率の確認として、進入路造成試験、排水路掘削試験と、重機の姿勢を確認する安全性検証試験について報告する。

4.1 進入路造成試験

進入路造成試験は、図-8 に示す様に上り勾配の走路を幅 4m で造成を行った。なお、造成時の操作方式として、①モニタ確認による遠隔操作、②モニタ確認による遠隔操作+MG 操作 の 2 通りの方式で実施し、この作業に係わる作業時間と出来形状の精度を計測して施工効率と施工精度を検証した。

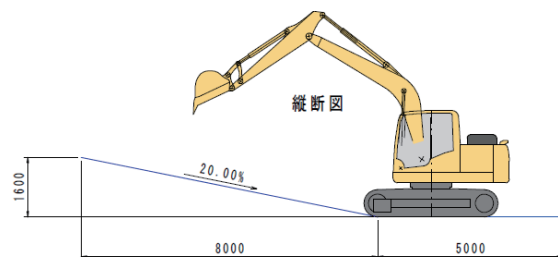


図-8 進入路造成試験モデル断面図

4.2 排水路掘削試験

排水路掘削試験は、図-9 に示す様に、溝幅 1.5m、深さ 1m の排水路を掘削すると共に、幅 1m の築堤の盛土造成を延長 2.5m にて実施した。

試験施工は、①モニタ確認遠隔操縦+MG 操作、②モニタ確認遠隔操縦、③目視確認遠隔操縦、④登場操縦 の4通りの操作方法で実施し、オペ A（遠隔操縦のベテランであるが MG 操作未経験者）とオペ B（MG 操作に慣れているが遠隔操縦の未経験者）の二人のオペレータにより、4通りの操作を各 3 ケースずつ実施し、この作業に係わる作業時間と出来形形状の精度を計測して施工効率と施工精度を検証した。

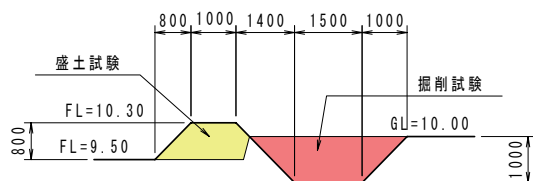


図-9 排水路造成試験モデル断面図

4.3 試験機械

(1) 遠隔操縦式バックホウ

施工性検証試験に使用した油圧ショベルは、国土交通省東北地方整備局岩手河川国道が所有する遠隔操縦式バックホウ（0.45m³級）を借用し、このバックホウに MG 機器を取り付けて実施した（写真-1 参照）。



写真-1 遠隔操縦式バックホウ

(2) MG機器

MG 機器は、選定の主な条件として、コントロールモニタ上に設計データと合わせて二次元 CAD 背景図の取込みが可能な機器で、RTK-GNSS 測位の他に、自動追尾 TS 測位が可能な機器を選定した。

二次元 CAD 背景図読み込みが可能な機器の選定理由は、三次元設計データを搭載しない場合でも二次元 CAD 背景図を取り込むことで、目標位置への誘導（走行）が可能であること、また、自動追尾 TS 測位が可能な機器は、衛星測位が不可能な場合、あるいは測位精度が低下した場合の使用

を考慮したことによる（写真-2 参照）。

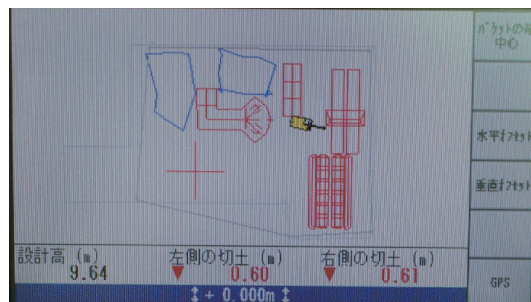


写真-2 MGモニタ表示（CAD 背景）

(3) 試験ヤード

試験ヤードは、国土交通省東北地方整備局東北技術事務所の構内とした。写真-3 に試験ヤードの航空写真を示し、図-10 に試験配置図を示す。



写真-3 試験ヤード

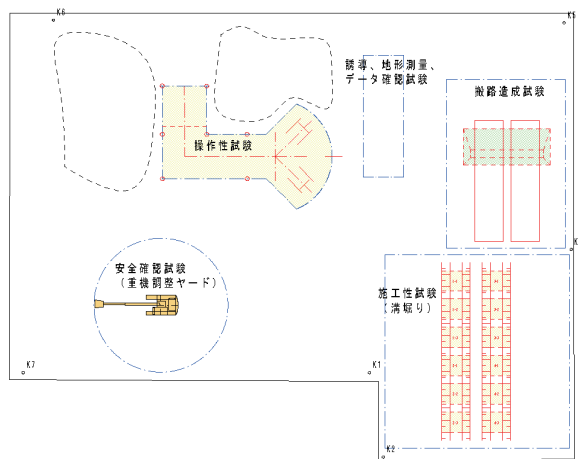


図-10 試験配置図

5. 試験結果

施工性検証試験では、MG 併用の遠隔操縦は、通常の遠隔操縦と比べ施工効率や施工精度で同等以上となり、MG による操作支援の効果が示された。

5.1 進入路造成試験

進入路造成試験については、MG を使用したケースの施工効率がモニタ確認遠隔操縦と比べて約 1.4 倍となる結果が確認された。このことは、MG のコントロールモニタに施工目標が明確に表示さ

れているため、大まかな造成の後に整形していく繰り返し施工をする必要がなく、部分的に仕上げていく施工が可能となることで、繰り返しの施工数が減少していることにある。

また、施工精度については、施工目標と出来形状との差分面積により求めた結果、精度が向上していることが確認された。

図-11 に出来形状図を、表-4 に試験結果を示し、写真-4 に試験実施状況写真を示す。

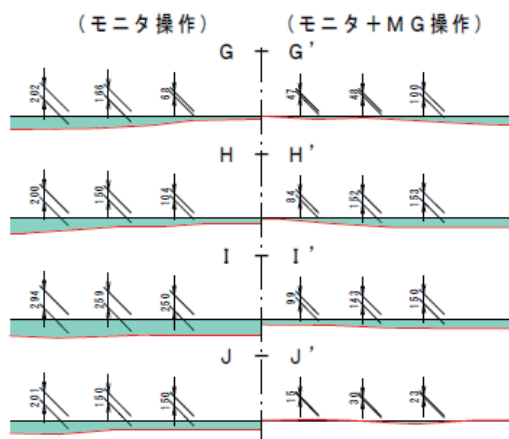


図-11 進入路造成試験出来形図

表-4 進入路造成試験結果

施工内容	ケース	施工効率*1 (時間当り施工量)	施工精度*2 (差分面積)
進入路	モニタ操作	5.08m/h	2.95 m ²
造成	MG 併用	7.10m/h	1.31 m ²

*1：時間当り進入路長さの施工量

*2：構築物の設計面と実際の出来形面との差を面積として表したものの



写真-4 進入路造成試験実施状況

5.2 排水路掘削試験

排水路掘削試験については、MG を使用したケースはモニタ確認操縦のみのケースと比較して、施工効率はほぼ同等であった。このことは、施工範囲が狭かったことで、粗掘削や粗盛土の段階がほとんどなく施工開始から繊細な操作を必要としたことにあると考えられる。表-5 に排水路掘削試験結果を示す。

また、出来形精度では、MG を使用したケースは、モニタ確認遠隔操縦よりも向上していることが確認された。このことは、施工目標が明確に示されることで精度の向上が求められることは当然である判断できる。

表-5 排水路掘削試験結果

施工内容	ケース	施工効率*1 (時間当り施工量)	施工精度*2 (差分面積)
排水路掘削・築堤	ホ ^ハ A	モニタ操作	19.1m ³ /h
		MG 併用	17.1m ³ /h
	ホ ^ハ B	モニタ操作	15.9m ³ /h
		MG 併用	18.0m ³ /h

*1：時間当りの掘削・盛土量で評価

*2：構築物の設計面と実際の出来形面との差を面積として表したものの

ホ^ハ A：遠隔操縦のベテランであるが MG 操作未経験者

ホ^ハ B：MG 操作に慣れているが遠隔操縦の未経験者

ここで、施工精度（施工目標面と出来形状との差分面積）と時間当たり施工量との関係を図-12 に示す。このグラフより、例えば施工精度の余裕幅をある程度持たせて精度を気にせず施工を実施したとすれば、MG を使用するケースは、モニタ確認遠隔操縦と比較して約 1.3 倍の施工効率の向上が期待できる。

写真-5 に試験実施状況を、図-13 に出来形状図を示す。

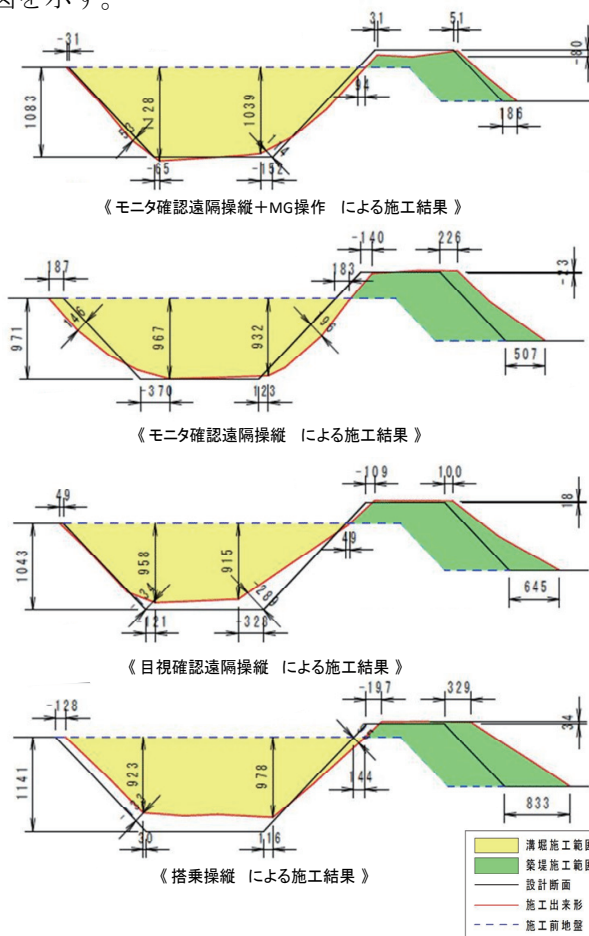


図-12 排水路掘削試験出来形図

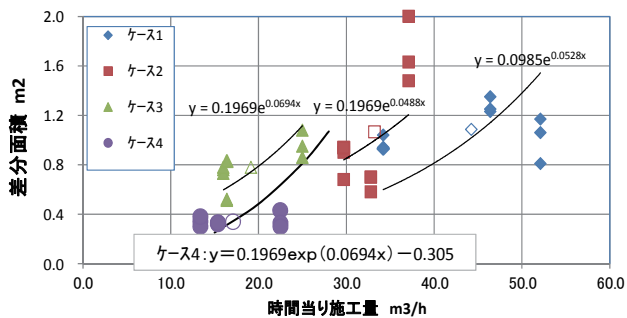


図-13 時間当たり施工量と誤差の関係



写真-5 排水路掘削試験実施状況（掘削完了時）

5.3 安全性検証試験

安全性検証試験については、MG コントローラの重機傾斜表示（図-14 参照）を確認しながら傾斜路を走行し、操作者がこの傾斜情報を見ることで確実な走行ができることを確認した。

また、機体前方左右に取り付けた側方車載カメラからの中継映像を確認することで、前方の情報が把握しやすくなることと、傾斜の情報が風景から判断できることが確認できた。なお、前方確認用の側方カメラには、写真-6 に示す様にクローラがフレーム内に映っていることが重要である。

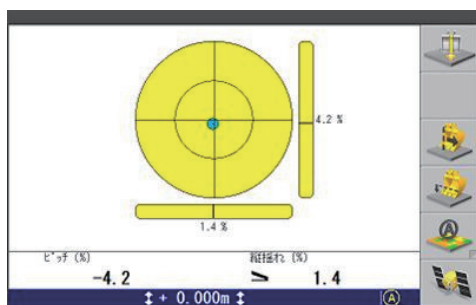


図-14 電子気泡による機体の傾斜表示例



写真-6 前方確認用側方カメラの中継映像

6. まとめ

遠隔操縦式油圧ショベルの施工および情報化施工技術は、最近では急速に普及しつつあるが、現時点ではまだ経験者が少なく、技術に関する知識を有している技術者も少ない状況である。

遠隔操縦技術については、ある程度の油圧ショベル操作経験がある操作者であれば、遠隔操縦のレクチャを数時間受けるだけで操作が可能となるが、実施工で技術を生かす場合は、例えば、ベテランオペレータにおいても、空間認知の才能が優れていない場合には遠隔操作は困難であると言われるように、操作の慣れや本質的な才能が要求される。

また、MG 技術については、最近の情報化施工の普及で経験者は増えてきているが、技術的なサポートを機器メーカーに頼っているのが現状である。そのため設計データの作成、管理や簡易なトラブルについて対応できる技術者が殆どいないのが現状である。

緊急的な災害復旧においては、遠隔操作式油圧ショベル技術と MG 技術のある程度理解して現場経験を積んだ技術者が望まれる。そのためには、設計データ作成技術、遠隔操縦技術、MG 施工技術の 3 技術に重点をおいた技術者を育成するとともに、継続的な教育を実施することが望まれる。

7. おわりに

本検討および試験施工の実施に当たりご理解とご協力を頂きました建設無人化施工協会の皆様と、本論文の執筆、発表に関しまして、国土交通省東北地方整備局東北技術事務所関係者様のご理解を頂きましたことをここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 天然ダム対策工事研究会：天然ダム対策工事マニュアル，2010.11
- 2) 古澤正紀：無人化施工に見る技術開発の歴史～情報化施工技術・ICT の先駆けとなった各種の取組み～，NETIS プラス第 2 号，pp.16～23，2011
- 3) 山元弘：建設工事における無人化施工，建設マネジメント技術，pp.17～22，2007.6

S 4. 地盤振動の伝搬経路対策と振動低減効果

(一社)日本建設機械施工協会 ○齋藤 聡輔
 (一社)日本建設機械施工協会 佐野 昌伴
 (一社)日本建設機械施工協会 設楽 和久
 (一社)日本建設機械施工協会 谷倉 泉

1. はじめに

建設工事、道路供用等により発生する地盤振動は、付近の建物に物理的被害を及ぼし、周辺住民に精神的影響を与える場合があり、工事の種別によっては問題となるケースも多い。

ここで振動低減対策の対象とした市街地における高架橋工事は、住宅や学校、病院など人口密集地区に対する地盤振動を低減することが求められている。そのため、施工現場では、工事および道路供用後の振動低減対策が必要である。この現場では、ジョイントを減らした多径間連続橋を採用するほか、新技術である回転杭施工による回転圧入鋼管杭基礎を用いるなど、沿道に対する振動発生量の低減に努めている。しかし、施工現場の近くに住宅があることや橋梁架設位置で厚層 50m の沖積粘性土層の軟弱地盤が分布していることから、さらなる、振動低減対策が必要になった。

本稿では、地盤振動の伝搬経路における振動低減対策として、入手が容易で様々な用途に用いられる鋼矢板や EPS(発泡スチロール)を振動伝搬経路の地中に設置して防振壁とした場合と、これら防振壁と空溝を組み合わせた場合の振動低減効果についてとりまとめたものである。また、その結果をもとに、施工現場における振動低減効果を予測した事例について報告する。

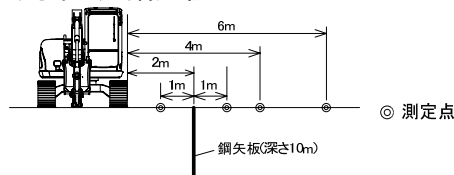
2. 振動低減対策の概要

防振壁の基本材料として、土止めや水止めに用いられる鋼矢板(Ⅲ型、水平方向延長 20.4m、深さ方向延長 10m)を使用した。さらに、振動低減効果を高めるために鋼矢板に沿って EPS(水平方向 12m、幅 0.5m、深さ 1m)か空溝(水平方向延長 20m、深さ 1m または 2m)の設置を行った。地盤振動を比較した振動低減対策の内容と測定位置を図-1 に示す。なお、各対策の比較のため、測定は同一地盤にて行った。

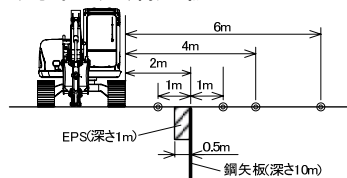
〈測定における振動低減対策の内容〉

- (対策1) 鋼矢板のみ設置した状態
- (対策2) 鋼矢板に沿って EPS を設置した状態
- (対策3) 空溝の設置のみの状態
- (対策4) 鋼矢板に沿って空溝を設置した状態

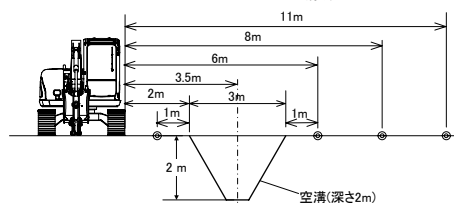
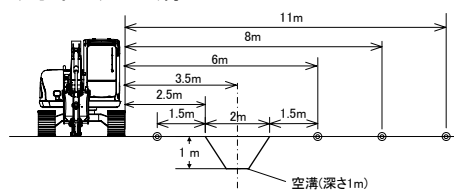
(対策 1) 鋼矢板



(対策 2) 鋼矢板+EPS



(対策 3) 空溝



(対策 4) 鋼矢板+空溝

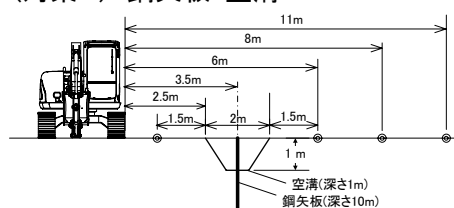


図-1 振動低減対策の内容と測定位置

3. 現地振動測定の概要

振動測定では振動源として 0.7m³ 級のバックホウを使用し、その走行時の振動を測定した。走行は、バックホウ機体側面が振動低減対策箇所の近傍の測定点から 1m 離れた位置に来るようにし、約 6m の走行範囲を前後進するものとした。バックホウの走行範囲と振動低減対策、測定点の位置を図-2 に示す。

測定点は、振動源のバックホウの機体側面より 1m の位置に 1 点、防振壁を挟んで反対側に 3 点を設置した。振動測定は、バックホウの前後進 1 往復を 1 サイクルとする連続した 3 サイクルを 1 回の測定とし、各振動低減対策について 3 回の測定を実施した。

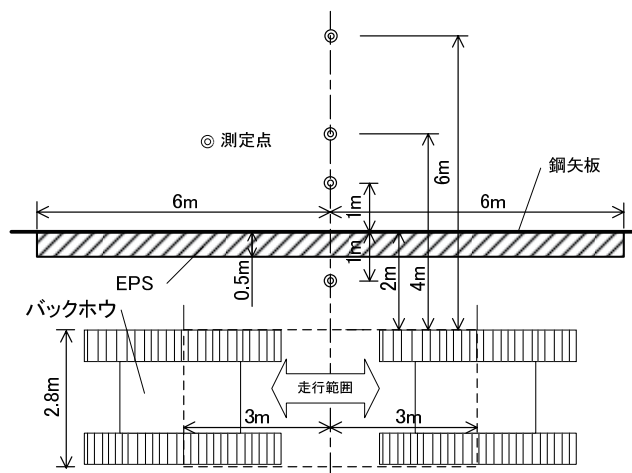


図-2 振動測定の位置 (鋼矢板+EPS)

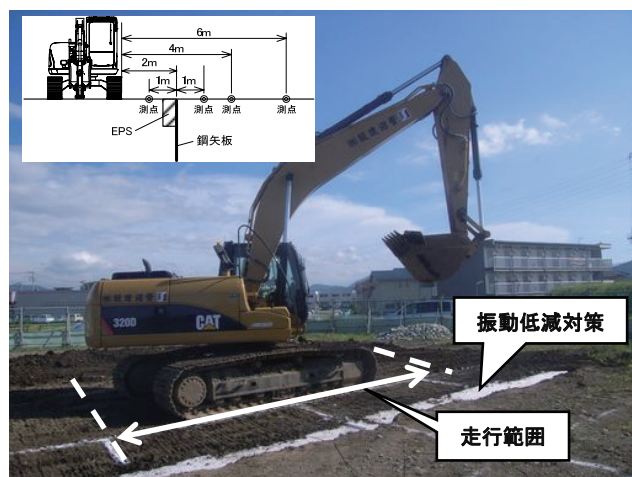


写真-1 振動測定の状況 (鋼矢板+EPS)

4. 測定結果

各振動低減対策について比較した結果は次のとおりである。

4.1 鋼矢板と EPS の振動低減効果 (対策 1, 対策 2)

対策 1, 対策 2 の各測定点における振動レベル L_{10} の低減量を図-3 に示す。同図は、バックホウの機体側面より 1m の位置の測定点を基準として、振動レベルの低減量を取りまとめたものである。この図より、対策を行った場合に振動低減量が増加していることから、対策による低減効果が確認された。対策 1 は鋼矢板から 1~4m 離れた位置で無対策の場合と比べて 3~5dB 低減していた。さらに鋼矢板に EPS を付加した対策 2 の場合では、振動低減効果はさらに 5dB 程度の向上が確認された。

4.2 空溝による振動低減効果 (対策 3)

対策 3 の空溝の深さが、1m と 2m の各測定点における振動レベル L_{10} の低減量を図-4 に示す。同図より、空溝の中心から 2.5m~7.5m 離れた位置の振動低減量は、深さ 1m (地表面の開口幅 2m) の場合で無対策の場合と比べて約 5dB であった。さらに空溝を深さ 2m (地表面との開口幅 3m) とした場合は、深さ 1m の場合と比べてさらに約 3dB の振動低減効果が向上することが確認された。

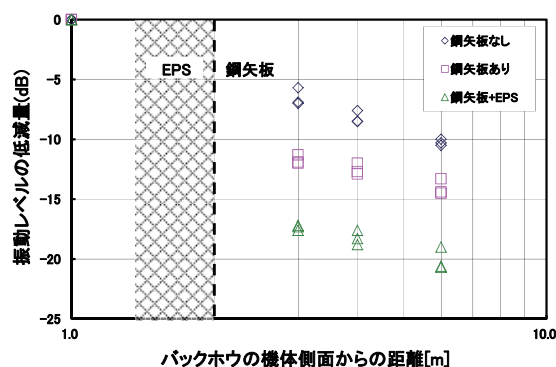


図-3 地盤振動の距離減衰の比較 (対策 1, 対策 2)

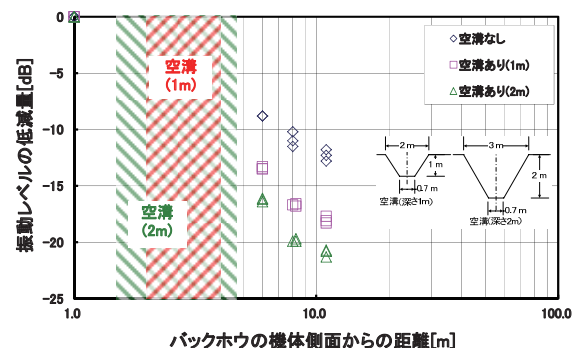


図-4 地盤振動の距離減衰の比較 (対策 3)

4.3 空溝と鋼矢板による振動低減効果(対策4)

対策4の振動レベル L_{10} の低減量を図-5に示す。同図より、鋼矢板(空溝中心)から2.5m離れた位置では、3~4dBの振動低減効果が確認された。しかし、鋼矢板からの距離が4mを超える位置では、対策の効果はあまりなく振動低減量はほぼ同じ結果となった。これは、振動低減対策の端部を回折した振動の影響を受けたものと考えられる。

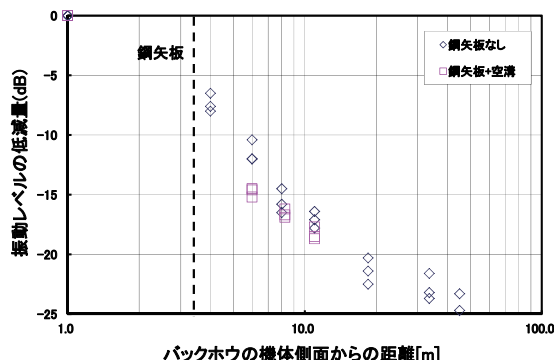


図-5 地盤振動の距離減衰の比較(対策4)

5. 検証・考察

現地振動測定の結果から、振動伝搬経路における振動低減効果の検証を行った。

5.1 周波数分析による振動低減効果

振動低減対策がない場合の各測定点の地盤振動の周波数特性を図-6に示す。同図より、振動源としたバックホウの走行による振動加速度レベルは、5Hzおよび31.5Hzの周波数が卓越しており、振動源より離れた測定点も周波数特性に変化はみられない。なお、各振動低減対策の比較では、測定下限値の30dBを下回る3.15Hz以下の周波数帯域を除いた。

(1) 鋼矢板とEPSの振動低減効果の特性

振動低減対策箇所を挟む測定点間の各周波数の振動加速度レベルの低減量について、対策1と対策2の低減効果を図-7に示す。同図の振動低減効果は、無対策の場合における各周波数の振動加速度レベルに対する低減量を比較したものである。

対策1の場合は、63Hzにおける低減効果はみられないものの、その他の周波数では低減効果が確認でき、その中でも20~40Hzで効果が大きく、他の周波数と比べて5dB程優れている。さらに対策2の場合は、80Hzを除く周波数で、鋼矢板の場合と比べて約5dBの振動低減効果の向上がみられた。

(2) 空溝の振動低減効果の特性

対策3の空溝の深さが1mと2mの場合の各周波数における振動加速度レベルの低減量を図-8に示す。深さ1mの空溝では、25~80Hzが主に低減しており、その中でも40Hzの振動低減効果が優れている。深さ2mの場合も同様に40Hzの低減効果は大きく、深さ1mの場合と比べてほぼ全ての周波

数帯域で約3dBの振動低減効果の向上がみられた。

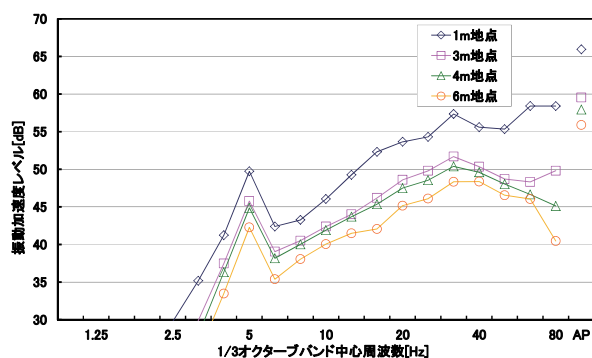


図-6 周波数特性(無対策)

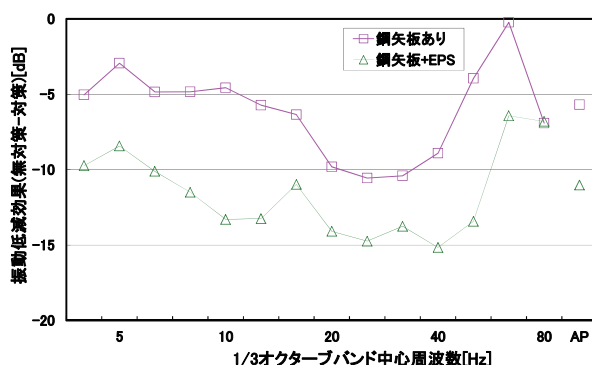


図-7 周波数による比較(対策1, 対策2)

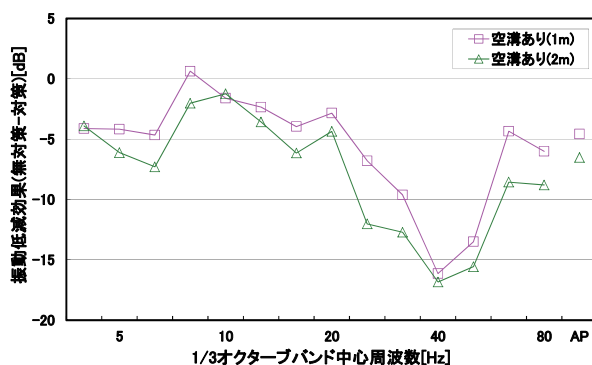


図-8 周波数による比較(対策3)

5.2 鋼矢板延長による振動低減効果の予測

民家など振動低減対策の対象となる場所や方向に対して、防振壁の設置により地盤振動の低減を図るには、防振壁の端部を回折する振動を考慮した対策を選定しなければならない。

本測定を実施した施工現場で、回転杭施工時における地盤振動の低減対策を検討するため、敷地境界における鋼矢板の設置について振動予測を行った。振動予測は、地表面を回折する振動をより低減するために必要な鋼矢板の延長距離について行った。予測地点における振動予測は、道路環境影響評価の技術手法における標準予測手法である距離減衰式¹⁾を基本とした。振動源からの距離 r (m)における振動レベル L (dB)を導くための距離減衰式の基本式は式(1)で示される。

$$L = L_0 - 15 \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) - 8.68 \alpha (r - r_0) \dots \dots (1)$$

ここで、 L_0 は基準点における振動レベル、 r_0 は振動源から基準点までの距離(5m)、 α は内部減衰係数である。予測は、予測地点が振動源から離れるほど内部減衰係数の影響が大きくなり振動低減効果が有利になると判断して、内部減衰係数を無視するものとした。振動の距離減衰は、図-3、図-4の測定結果より導いた近似式の係数を用いるものとした。回転杭施工時の振動の大きさは、オールケーシング工法における文献値²⁾を参考として、基準点における振動レベルを $L_0=65$ dBとした。

上記条件による地盤振動に対して、民家における振動低減対策として、鋼矢板を60m設置した場合の振動低減効果を予測したコンター図を図-9に示す。振動源より15m離れた位置に鋼矢板を設置することで振動低減の対象となる民家付近では、約5dBの低減効果が予測される。

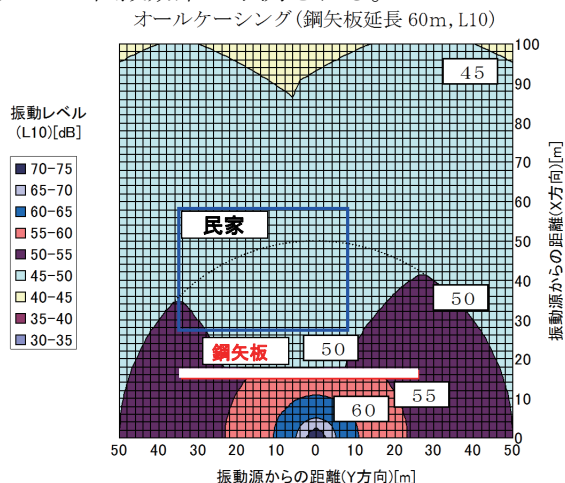


図-9 振動低減効果の予測

5.3 現場での振動低減対策とその効果

図-9では、鋼矢板を60mより更に延長することで、鋼矢板の端部から地表面を回折する振動が更に低減することが予測される。しかし、振動低減対象場所で地中を回折した振動の影響が大きくなり、振動低減効果には限界がある。

本測定を実施した施工現場では、振動源となる掘削機械の周囲に設置コストが安い空溝を設けることで振動低減対策を図り、また、重点箇所に対しては、敷地境界に鋼矢板、振動源に近い位置に表層部深さ1mの空溝を設けた。このように工事中に振動低減対策を施すことにより、施工現場周辺に対する環境対策を図ることができた。

6. まとめ

本稿において、鋼矢板、EPS、空溝を組み合わせた振動低減対策の現場振動試験の効果を検証した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 鋼矢板を振動低減対策とした場合(対策1)、振動レベル L_{10} の振動低減効果は3～5dBであり、EPSを付加した場合(対策2)では、さらに5dB低減した。周波数特性は、対策1、対策2ともに20Hz～40Hzに対して優れた低減効果がみられた。
- (2) 空溝を振動低減対策とした場合(対策3)、空溝の深さ1mの振動レベル L_{10} の振動低減効果は約5dBであり、空溝の深さ2mでは振動低減効果が約3dB向上した。周波数特性は40Hzで優れた低減効果がみられた。
- (3) 振動低減対策の設置長さが十分でない場合、防振壁の端部を回折する振動の影響が大きくなり、低減効果が低下する。振動源に対する囲い込みや設置長さを延長することにより、振動の回り込み距離を大きくすることで距離減衰による振動低減効果の向上が期待される。

7. おわりに

本稿の現地振動測定により、空溝、鋼矢板による振動低減対策が高い低減効果を発揮することがわかった。この結果が、住宅密集地など地盤振動低減が求められる建設工事および道路供用における振動低減対策の参考になればと考える次第である。

参考文献

- 1) 財団法人道路環境研究所：道路環境影響評価の技術手法 2007改定版,第2巻,pp. 330～338, 2007年
- 2) 社団法人日本建設機械化協会:建設工事に伴う騒音振動対策ハンドブック(第3版),pp.138～141, 2001年

電磁界を利用した高張力ボルトの 緩み検査センサの開発

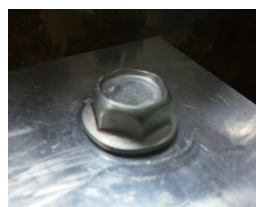
大分大学 工学部
機械・エネルギーシステム工学科
後藤 雄治



本研究の背景

高張力ボルトは大型機械や構造物、自動車等多くの
場所で使用されている。

- それらのボルトに振動や繰り返し荷重が掛かり緩みが発生する。
- 緩みが進行することにより、脱落が起これば大事故につながる。



ボルトの締め付け力を管理することは大変重要である。

現在の検査法

現在、ボルトの緩み検査法としては、打音検査法や超音波法が一般的

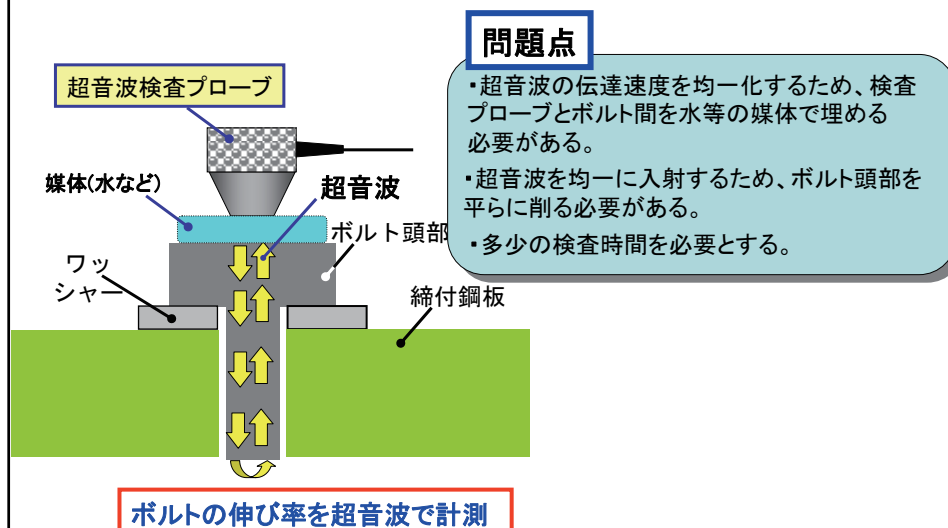
- 打音検査法は長年の熟練を必要とし、且つ定量的評価が難しい
- 超音波法は、ボルトの錆やペンキ等のコーティングが存在する場合や、刻印などによる凹凸の激しいボルトの検査への適応が難しく、測定に時間がかかる。

ボルトの緩みを高速且つ、簡便に評価が行える検査手法の開発が必要

ボルトの締付け力に伴って、ボルト頭部が圧縮され、電磁気特性が変化する

電磁現象を利用してボルトにおける緩みを検査する
手法について提案

超音波を使用したボルトの緩み検査法の概要



電磁気特性測定

Table 1 磁気特性測定条件

試験片	SCM435 and SS400
検出コイル	20 ターン 直径 = 0.1mm
SCM435(ボルト)への荷重条件	0~400MPa
SS400(締め付け鋼板)への荷重条件	0~200MPa

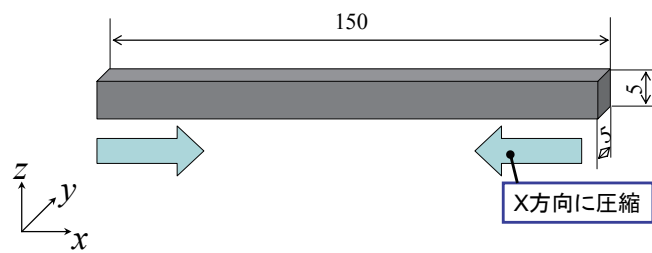


Fig. B-H曲線及び、導電率測定用試験片

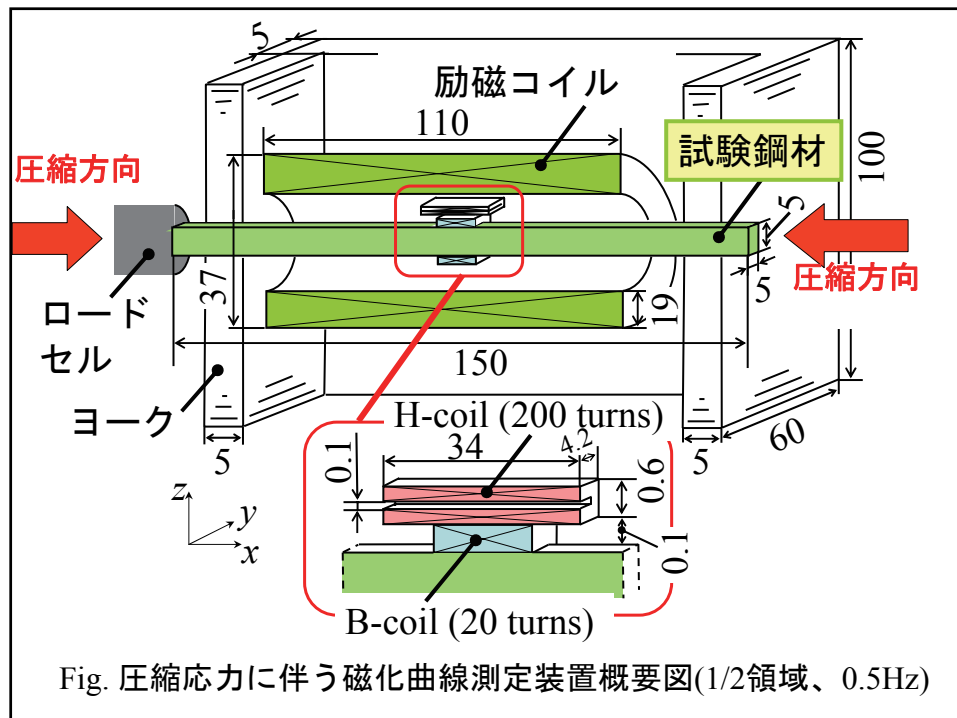
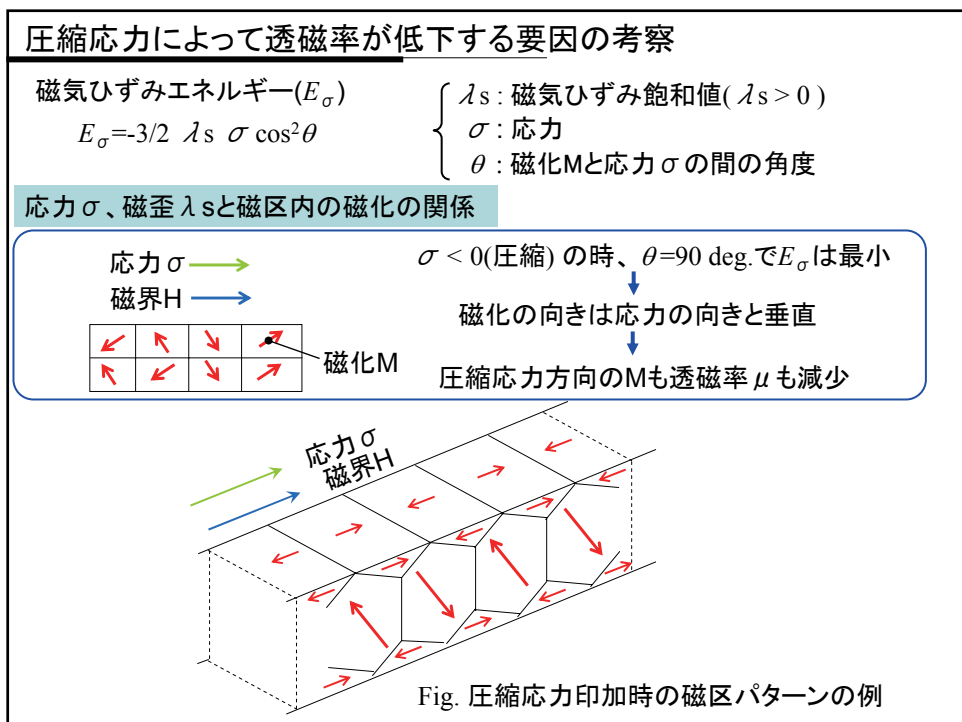
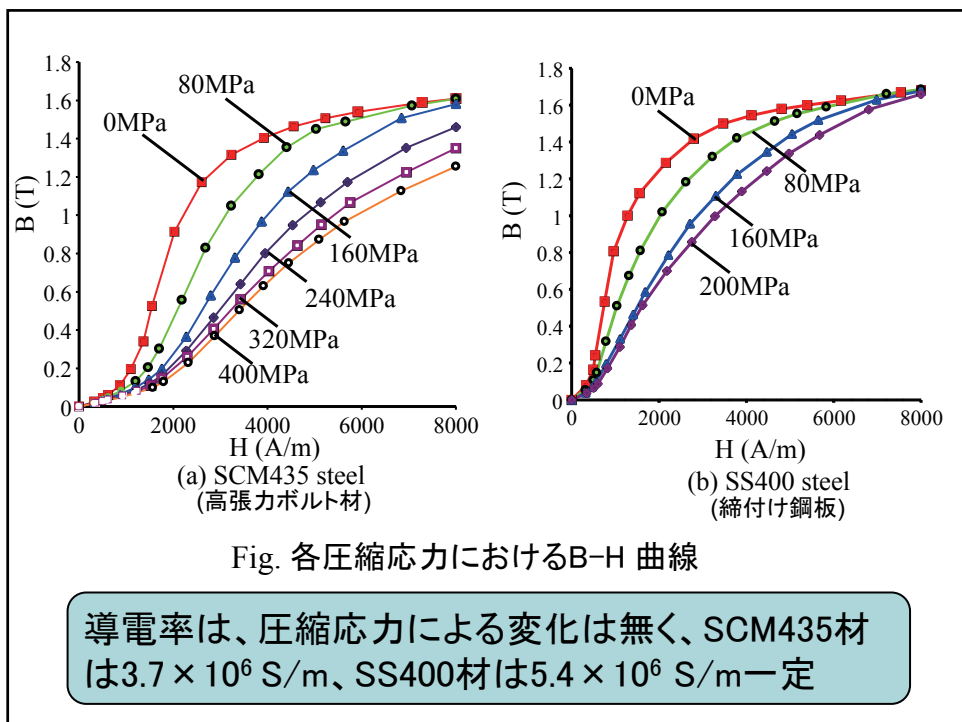
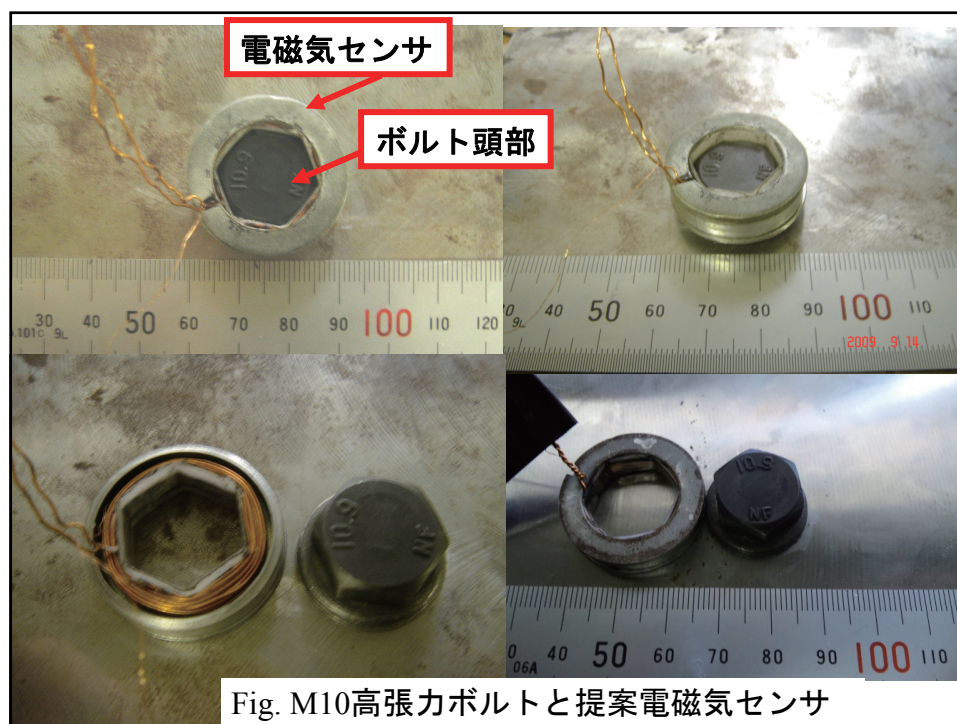
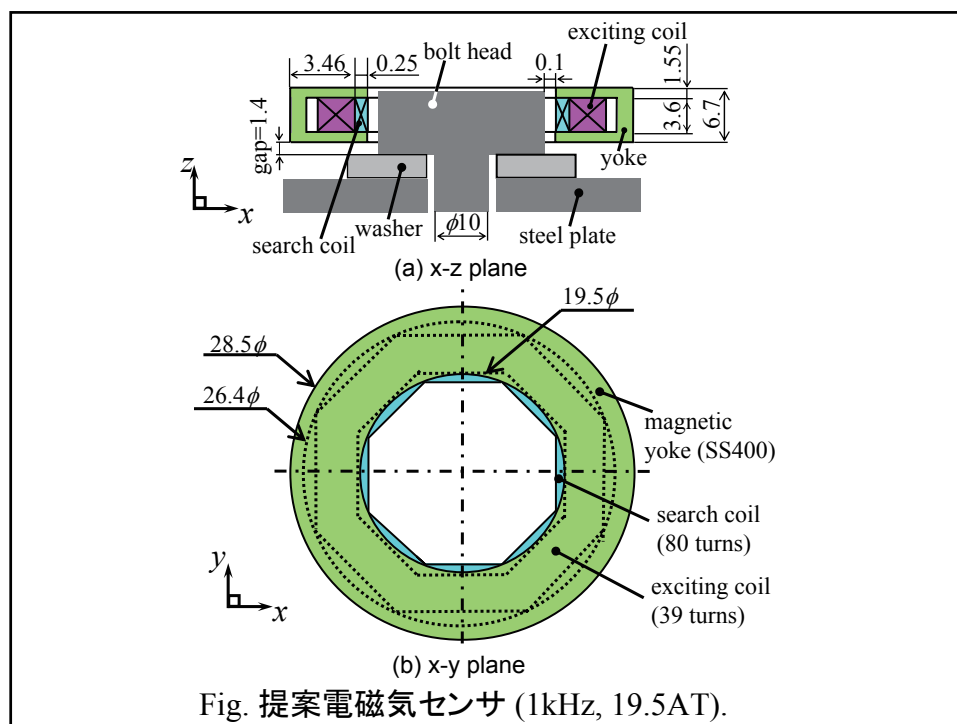
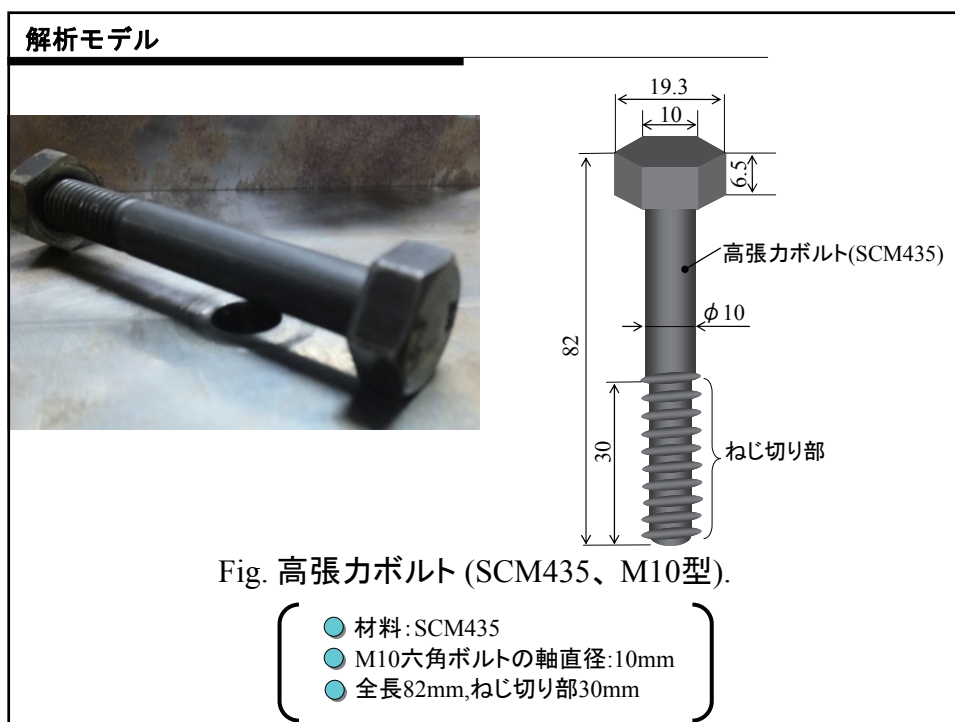
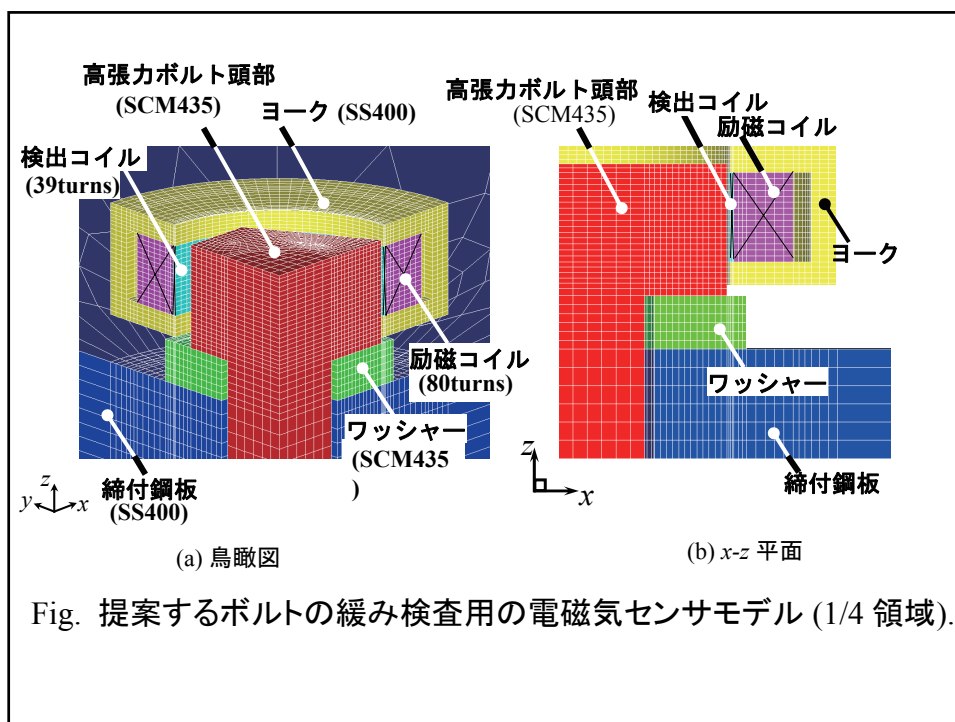


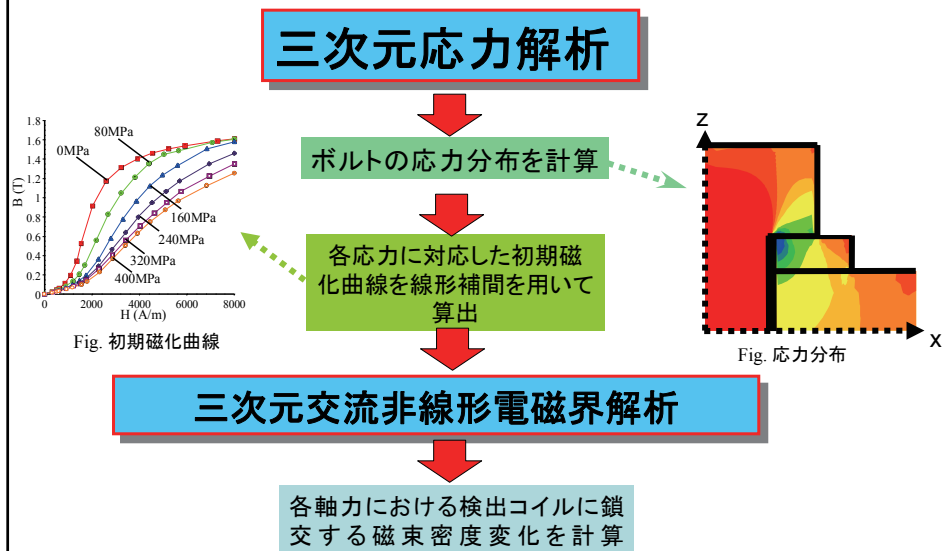
Fig. 圧縮応力に伴う磁化曲線測定装置概要図(1/2領域、0.5Hz)







応力分布を考慮した非線形電磁界解析の流れ



解析モデル

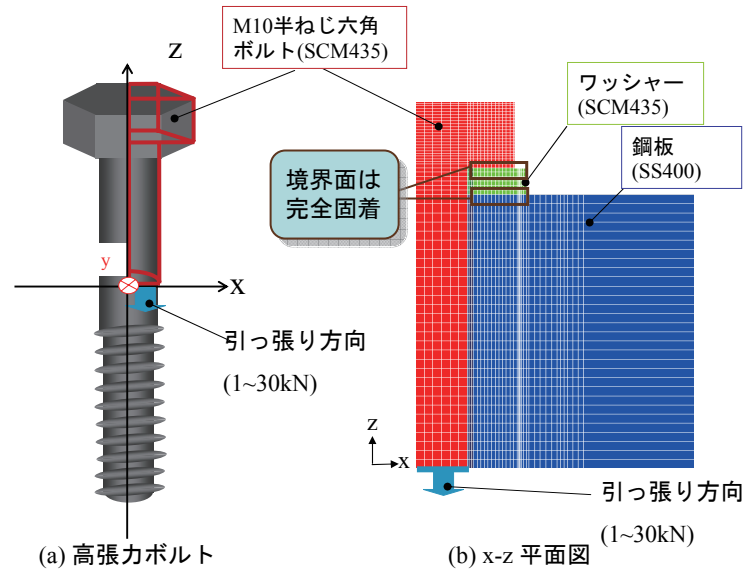


Fig. 軸力の与え方 (1/4領域)

三次元応力解析

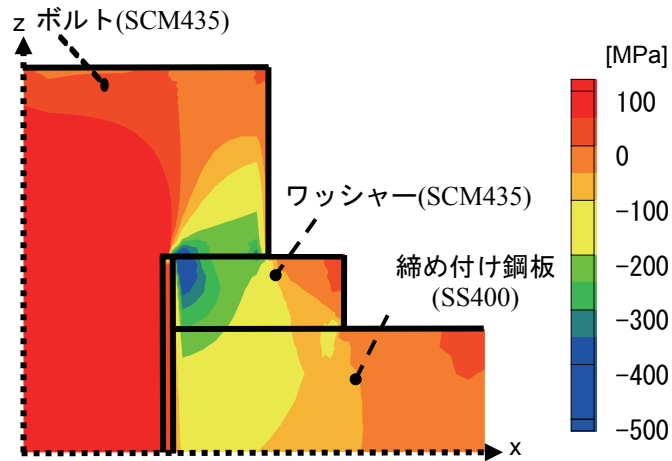


Fig. 応力分布 (σ_z , 30kN)

応力分布を考慮した非線形電磁界解析

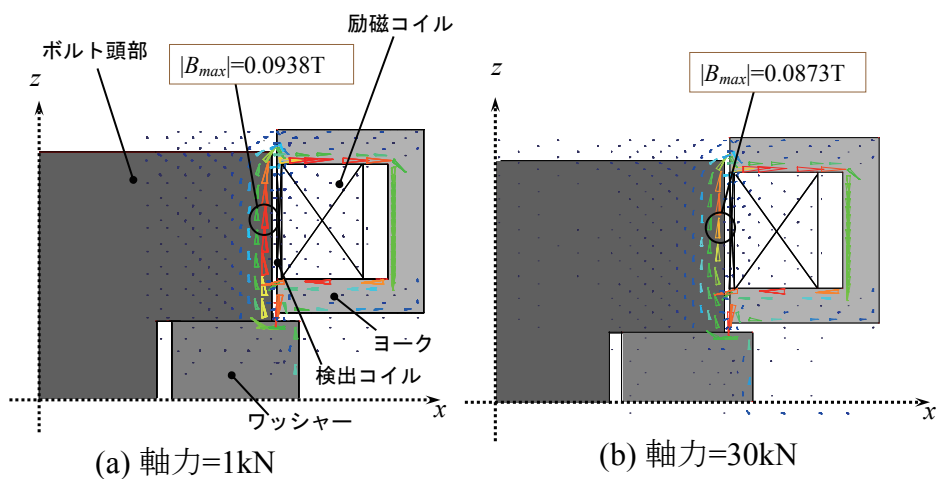


Fig. 磁束密度ベクトル分布 (1kHz, 0.5A)

磁束はボルト頭部側面へ多く分布している。また、軸力が増加するにつれて磁束密度は低下しており、 B_{max} は $6.5 \times 10^{-3}\text{T}$ 程度低下している。

検証実験

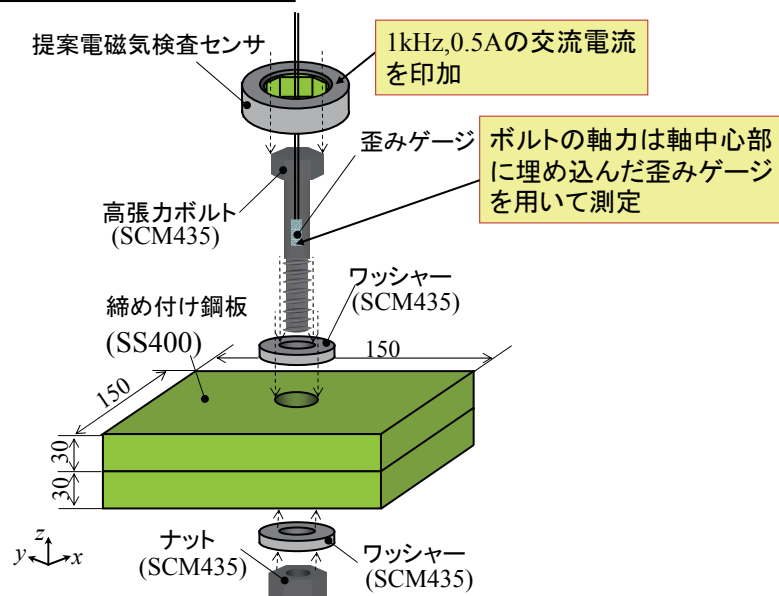


Fig. 検証実験のための単一ボルトモデル

検証実験

$$\Delta B_z = \frac{|B_z|(\text{each axial force}) - |B_z|(\text{axial force} = 1\text{kN})}{|B_z|(\text{axial force} = 1\text{kN})} \times 100 (\%)$$

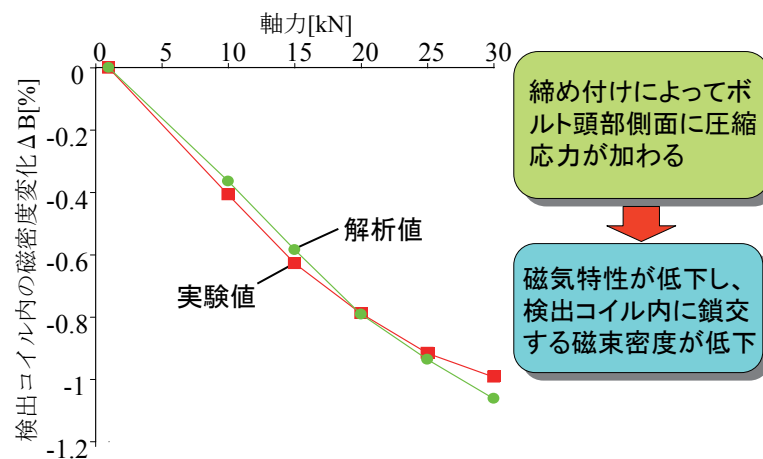


Fig. 実験値と解析値の比較 (1kHz, 0.5A一定)

締め付け平板の材料が非磁性体の場合

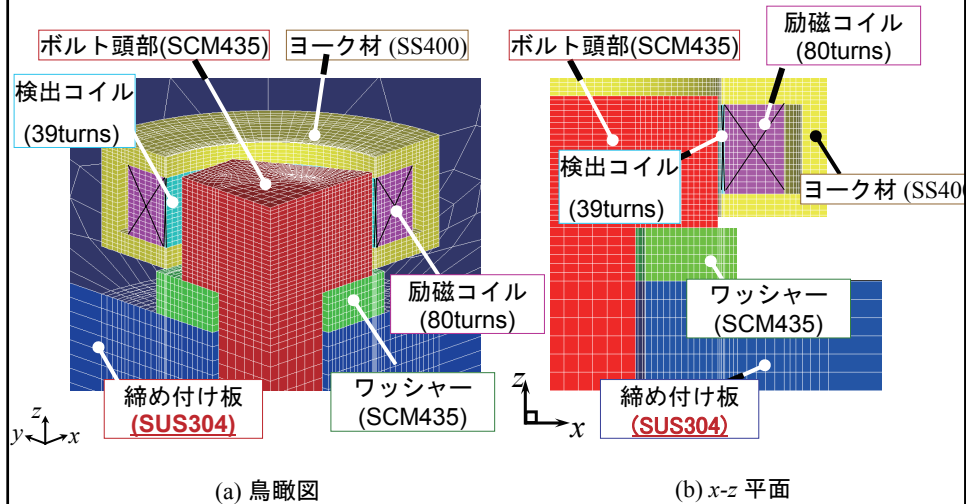
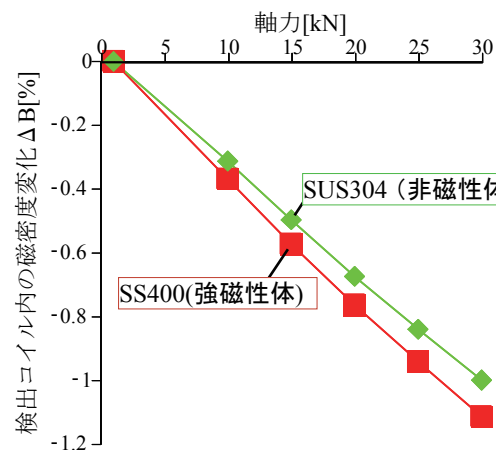


Fig. 磁界解析用メッシュ分割モデル (1/4 領域)

締め付け平板の材料が非磁性体の場合

$$\Delta B_z = \frac{|B_z|(\text{each axial force}) - |B_z|(\text{axial force} = 1\text{kN})}{|B_z|(\text{axial force} = 1\text{kN})} \times 100 (\%)$$



本提案検査センサの
磁束はボルト頭部側
面にのみ進入

締め付け材の材料に
よらずボルトの緩み
を検査できる可能性
がある

Fig. 鋼板の材料が検出信号に及ぼす影響 (1kHz, 0.5A一定)

まとめ

- 高張力ボルトに多く使用されている鋼材は、圧縮応力を受けると磁気特性が低下する。しかし、導電率は変化しない。
- 高張力ボルトの軸力が増加すると、ボルト頭部側面の透磁率が減少するため、その変化分を電磁気センサで検出することで、高張力ボルトの緩みを非破壊的に検査出来ることを確かめた。
- 本提案電磁気センサは、高張力ボルト頭部側面のみの、締め付けに伴う磁気特性変化を検出する。そのため、締め付け材が非磁性体でも強磁性体でも緩み検査が可能である。

今後の課題

- 高張力ボルトの大きさや形状変化による検討
- 高張力ボルトの腐食状態による検討
- 実現場に適用できる検査手法の確立

謝 辞

一般社団法人 日本建設機械施工協会(日本建設機械化協会)の研究開発助成制度により本研究開発を実施できましたこと心より感謝致します。

柔軟な力制御による ミニショベル掘削作業の 知能化に関する調査研究

「平成24年度建設施工と建設機械シンポジウム」発表
2012年11月7日

研究代表者：立命館大学 玄 相昊
共同研究者：(株)竹内製作所 条内健吾

はじめに

■ 背景

- ショベルは広く普及した万能作業機械
- 高度化の効果は絶大

■ 着目点

- 力仕事には力の直接制御が有効だが、オペレータの手動操作では困難
- 従来のロボット制御技術は産業用も含め、そのほとんどが「高精度位置決め」に注力

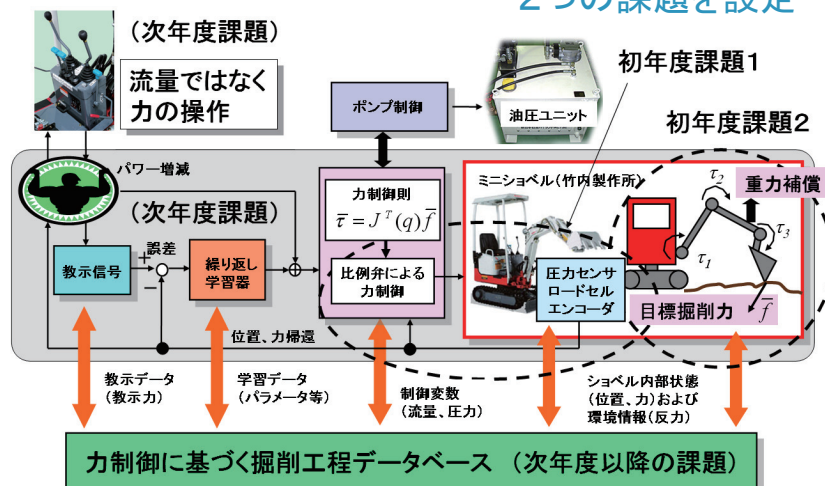
■ 研究目的

- 油圧ロボット制御技術の適用可能性の調査
- 従来システムに力制御を融合する方法の調査
- 力制御の特徴を活かした技能教示方法の調査

全体計画と助成期間中の課題



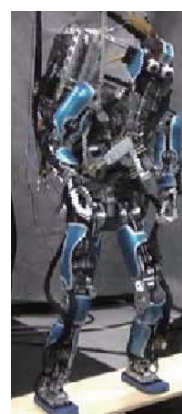
2つの課題を設定



提案のベースとなる成果



- 油圧ヒューマノイドロボットの力制御
 - 玄, 日本ロボット学会誌 vol.27, no.2, pp.178-187, 2009
- 同、不整地バランス制御
 - Hyon, IEEE TRO, vol.25, no.1, pp. 171-178, 2009
- 同、転倒回避制御
 - Hyon, et al, IEEE ICRA, 2009
- 同、運動教示・学習
 - Hyon, IEEE/ASME Mechatronics, vol.14, issue 6, pp.677-688, 2009
 - Hyon, et al, IEEE ICRA, 2008



変化する未知路面に適用しつつ
バランスをとる油圧ヒューマノイド
(JST-ICORP「計算脳プロジェクト」
における研究成果)

成果報告の内容

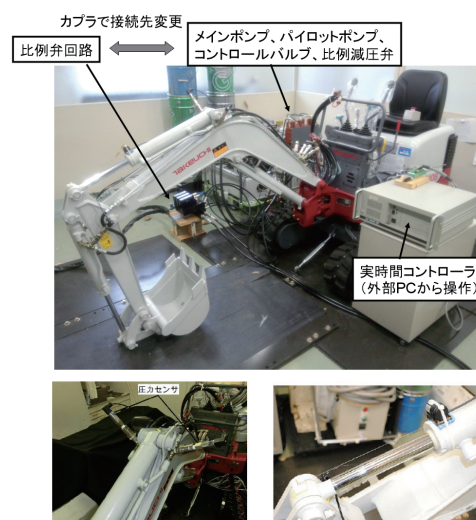


1. 実験環境の構築
2. 力制御と実験結果
3. オペレーター操作との融合方法の提案

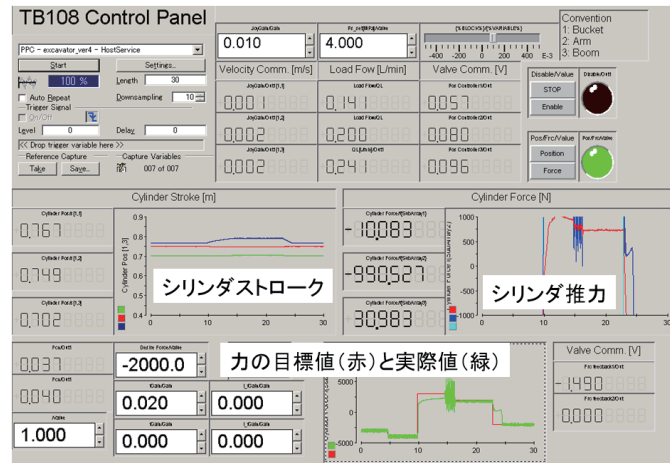
実験環境の構築



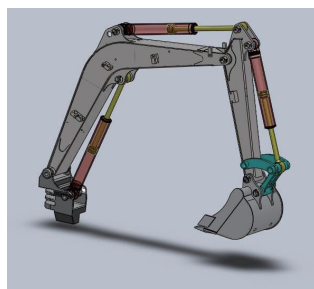
- ショベル本体
 - 竹内製作所TB108
 - フロントのみ利用
- 外部油圧ポンプ
 - 出力: 5.5 kW
 - 最高圧力: 14 MPa
- バルブ
 - 比例弁 × 3
- センサ
 - ポテンショメータ × 3
 - 圧力センサ × 6
- コントローラ
 - dSPACE社コントローラ



操作GUI



動力学シミュレータ



CADモデル



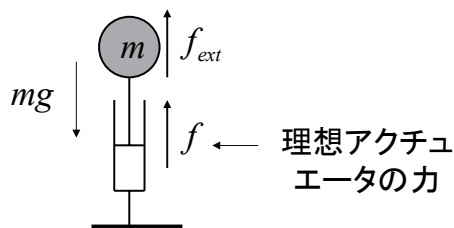
シミュレーションモデル

力制御について



■ 簡単な例

$$m\ddot{r} = f - mg + f_{ext}$$



■ 目標する挙動

$$m\ddot{r} = f_{ext}$$

or

$$\bar{m}\ddot{r} = f_{ext}$$

外部環境との自然な相互作用が可能

■ そのための発生力

$$f = mg$$

or

$$f = (m / \bar{m} - 1) f_{ext} + mg$$

力の計測が必要

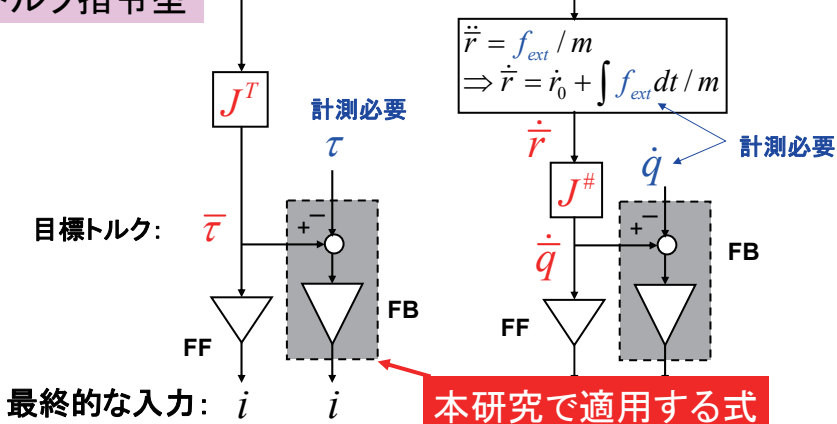
2つの実装方法



目標とする発生力 $\bar{f} = mg$

トルク指令型

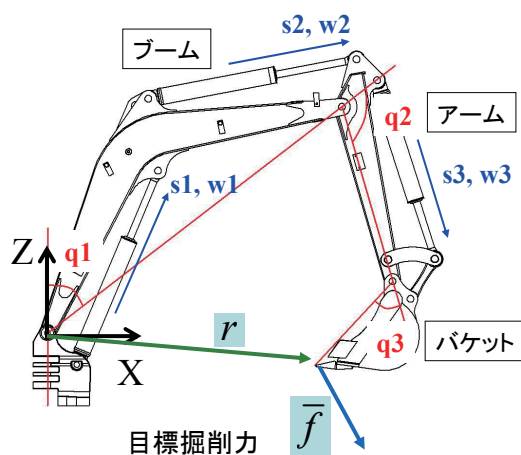
速度指令型



力制御の制御則



■ 座標系



■ 制御則

目標関節トルク:

$$\bar{\tau} = G + J^T \bar{f}$$

ここで

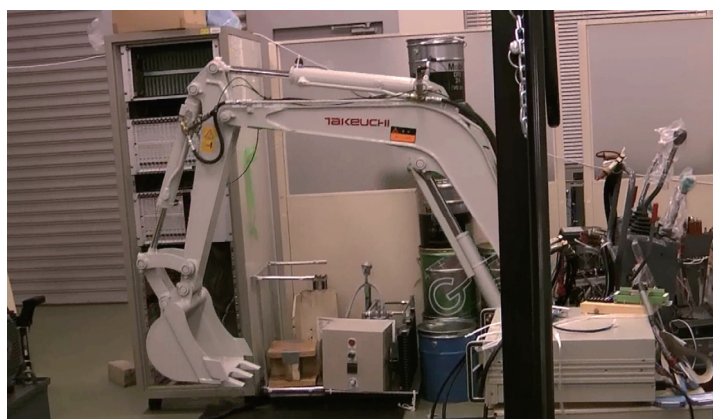
G : 重力トルク

$J = \frac{\partial r}{\partial q}$: 手先ヤコビ行列



前頁の実装方法で実現
(トルクは圧力から推定)

重力補償実験の結果



圧力は4MPa固定

自重を補償することで外力にしなやかに追従

研究目標の追加

■ 当初の目標

- シリンダの力制御
- 重力補償
- バケット先端の力制御

} 達成



■ 追加目標

- 上記に加え、**操縦者の指令**にできるだけ追従



■ 方策

- 力制御はコンピュータが担当
- 力制御と干渉しない空間に操縦者の入力を射影

解決方法(一例)

ロボティクスで良く知られた「冗長ロボット」の制御方法

$$\bar{\tau} = J^T \bar{f} + N(J^T) \tau_u$$

↑
任意のユーザー指定トルク

ただし、 $N(\cdot)$ は零化行列、 $\#$ は擬似逆行列操作

(参考)

速度制御の場合: $\bar{\omega} = -J^\# \dot{\bar{r}} + N(J^\#) \omega_u$

↑
任意のユーザー指定角速度

シミュレーション課題

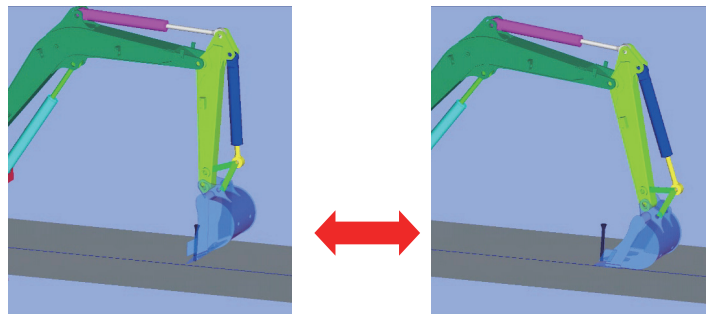


■ 課題

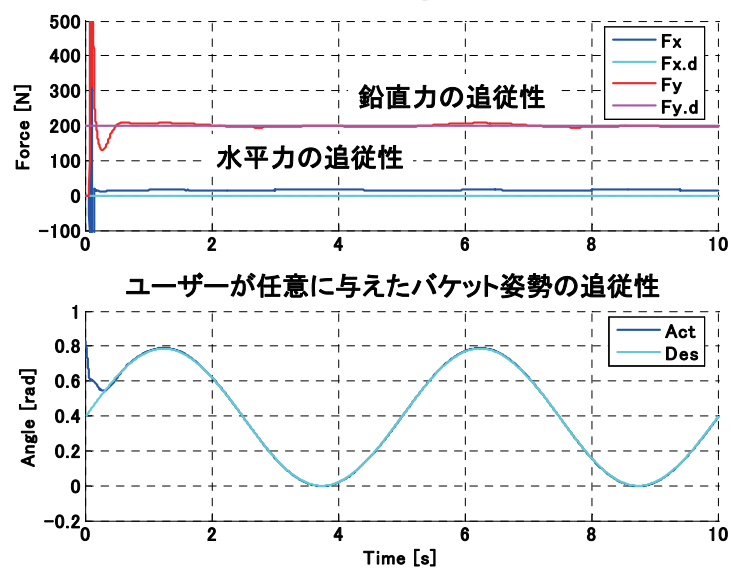
- バケット爪から鉛直真下に200Nの目標作用力
- ユーザーがバケットの姿勢を入力(SIN波とする)

■ シミュレーション条件

- 1msのルンゲクッタ法
- ヘルツの接触力モデル
- 実機で関節トルク制御可能と仮定



シミュレーション結果



まとめ



■得られた成果

- ショベル高度化研究の環境を構築
- 圧力センサを用いた力制御を実装
- 重力補償と掘削力制御に成功
- オペレータ操作との融合方法を提案

■今後の課題

- 力制御を援用したショベル高度化のためのアルゴリズム開発と実証実験
- 安価なシステムへのダウンサイジング
- 不整地重作業支援ロボットへの応用

謝 辞



本研究は日本建設機械施工協会の助成を受けて行われた研究です。深く感謝いたします。

また、研究にご協力いただきました

株式会社竹内製作所様、

ダイキン工業株式会社油機事業部様

に深く感謝いたします。

平成24年度 シンポジウム実行委員会 名簿

(委員五十音順・敬称略)

	委員名	機関名	所属・役職
委員長	建山和由	立命館大学	理工学部 環境システム工学科 教授 工学博士
副委員長	高橋 弘	東北大学	大学院環境科学研究科環境科学専攻 教授 工学博士
委員	稲垣 孝	国土交通省	関東地方整備局 企画部施工企画課長
委員	小栗賢一	西尾レントオール(株)	東京支店 アドバイザー
委員	小室 洋	キャタピラージャパン(株)	販売促進部長
委員	斉藤秀企	コマツ	開発本部 商品企画室 プロダクト・マネージャー
委員	竹内幸弘	(株)トプコンソキアボジション ジャパン	テクニカルサポート部課長
委員	竹之内博行	(一社)日本建設機械施工協会	施工技術総合研究所 技師長
委員	田中利昌	日立建機(株)	建設システム事業部 技術部 部長
委員	玉石修介	(一社)日本機械土工協会	技術委員長 工学博士
委員	中島嘉幸	(株)アクティオ	取締役 東京支店長
委員	行川恒弘	(株)前田道路	工事業本部工務部部長 機械センター長
委員	西脇徹郎	(一社)日本建設機械施工協会	標準部長
委員	藤野健一	(独)土木研究所	技術推進本部先端技術チーム 主席研究員
委員	前原信之	(一社)日本建設機械施工協会	技術部長
委員	増子文典	(株)大成建設	土木本部 機械部長
委員	溝口孝遠	コベルコ建機(株)	顧問 工学博士
委員	宮武一郎	国土交通省	総合政策局公共事業企画調整課 企画専門官

(一社)：一般社団法人

建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集（平成24年度版）

平成 24 年 10 月 26 日 印刷

平成 24 年 10 月 26 日 発行

編 集 一般社団法人 日本建設機械施工協会
発行所

〒105-0011 東京都港区芝公園 3 - 5 - 8
(機械振興会館内)

T E L (03)3433-1 5 0 1

F A X (03)3432-0 2 8 9

複製厳禁

印刷所 (株)アクセス