

河川護岸の耐震強化対策と 高圧噴射複合攪拌工法の適用

嵯峨 弘喜・齋藤 邦夫・鈴木 孝一・西尾 経

首都圏をはじめ各地で地震に強い川づくりを目指し、堤防の耐震性向上が図られている。東京都東部を流れる荒川と中川の間位置する中堤護岸では、老朽化や地盤沈下に対応した改修工事が実施され、鋼管矢板を用いた耐震強化が行われている。当該工事では、新設鋼管矢板の受働側である河川内から既設構造体と改良地盤の一体化を図る方法として、機械攪拌と高圧噴射攪拌工法の複合技術による地盤改良工法（NETIS 登録 No. KT-070064-A）が適用された。その結果、同工法は1工種で新設鋼管矢板と改良体の密着一体化に優れ、かつ鋼管矢板に対しても十分低変位施工が可能であることが確認された。

キーワード：地盤改良、深層混合処理工法、高圧噴射攪拌工法、河川護岸、耐震強化、低変位、密着施工

1. はじめに

人口や資産、社会経済活動の中核機能などが集中する首都東京およびその周辺部は、洪水や地震などの自然災害によって、壊滅的な被害が発生する恐れがある。このため、堤防・護岸等の河川工作物の補強、耐震性向上が緊急に求められている。また、災害が発生した際でも、通船等の可能な河川域の確保や防災船着場の確保の面からも重要な課題である。

河川護岸の高潮・洪水対策と耐震性強化を目的に、東京都東部を流れる荒川と中川の間位置する中堤護岸に於いて、新設鋼管矢板の河川内受働域側を固結工法による地盤改良が実施された。

本報は、護岸の改修に採用した台船式大口径高圧噴射攪拌工法（以下、WHJ工法〔Waterfront Hybrid Jet Mixing Method〕と略記する）と同工法により鋼管矢板と改良体を密着・一体化して護岸構造の耐震性向上を図った施工事例について述べる。

2. 事業計画の概要

荒川は、首都圏の埼玉県および東京都を流れ東京湾に注ぐ一級河川である。その下流部の人口密度は、全国の一級河川の中で最も高い数値を示し、人口や資産が極度に密集している。また、下流域の大部分が東京湾の平均潮位以下にあるため、自然災害等により破堤すると、大災害を引き起こすことが懸念されている。

首都圏の河川では、地震に強い川づくりを目指し、

堤防の耐震性の向上が鋭意図られている。同時に、震災後の河川管理施設の復旧資材や緊急物資輸送を行うための緊急用河川敷道路の整備も進められている。

中堤は、並行する荒川と中川の境界をなす延長約7kmの背割堤である。写真—1は弧を描く中堤を示しており、直上は首都高速中央環状線として利用されている。同堤は、完成後約20年が経過し、現況の護岸は老朽化と併せて地盤沈下による変形が進んでいる。このため、鋼管矢板杭の設置による護岸整備とその耐震補強強化、変形個所の補修などを行う改修工事が計画された。ただし、その工事は、別途東京都が中川左岸を護岸耐震補強するために江戸川競艇を一時休止させる措置が取られ、これに合わせて実施された。工事区間は、競艇場前後の延長約1,500mである。



写真—1 荒川と中川間の中堤

3. 地盤改良による耐震強化対策の概要

(1) 地盤改良工法の選定

(a) 従来工法の施工方法

護岸の耐震性強化は、護岸法先に矢板を打設し、そ

の受働土圧領域を地盤改良し、矢板と地盤改良体との一体化を図る。これにより護岸の耐震性を構造的に強化すると共に地震時の液状化を抑制する方法が一般に行われている。

しかしながら、従来の地盤改良では、はじめに矢板背面の受働域部を機械攪拌工法で先行改良し、次いで機械攪拌翼では施工不能な矢板近傍の隙間部を高圧噴射攪拌工法で間詰する施工法が採用されている。すなわち矢板と改良体を一体化させるには、機械攪拌工法と高圧噴射攪拌工法による2段階の施工が必要となり、工期の短縮とコスト縮減が課題となっていた。

(b) 機械攪拌と高圧噴射攪拌を用いたハイブリッド型地盤改良工法の選定

前述の通り、護岸の耐震化は、機械攪拌と護岸際の間詰め補助工として高圧噴射攪拌の2工法での施工となる場合が多い。一方では、地盤改良においても施工効率の向上と経済性を高めることが常に求められる。このような背景から、大規模施工に優れた機械攪拌工法と、構造体との密着施工が可能な高圧噴射攪拌工法の両者の特徴を有効的に活用した複合技術による地盤改良工法であるWHJ工法の適用が検討された。

図-1は、既設護岸に対して従来施工法と本工法を用いた場合を比較した計画例である。同図(a)は従来施工法による場合であり、地盤改良は鋼管矢板背面で機械攪拌工法と高圧噴射攪拌工法の2工程となっている。

一方、図-1(b)に示すWHJ工法は、機械攪拌と外周改良域を超高圧噴射で攪拌・混合するハイブリッド工法であり、大断面改良でしかも護岸構造体との密着施工と改良体相互のラップ施工を1工程で実現できる。そのため、大幅な作業性の効率化と経済性の向上が図れる¹⁾。

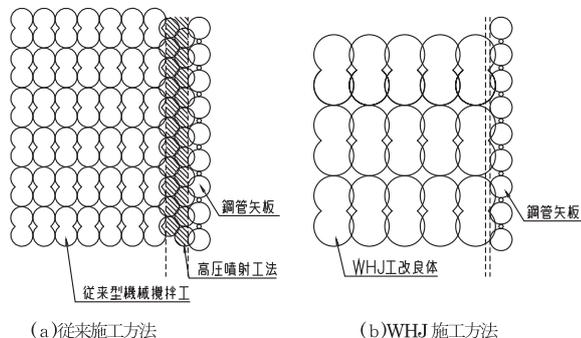


図-1 WHJ 施工による既設護岸の密着施工例

(2) WHJ 工法の改良メカニズムと特徴

図-2はWHJ工法の改良メカニズムを模式的に表している。二軸式で機械攪拌翼先端部の噴射ノズルか

ら固化材スラリーを $p = 40 \text{ MPa}$ もの超高圧大容量のジェット噴流にして吐出する。このジェット噴流により地盤は瞬時に切削され、同時に対象土は固化材と強制混合攪拌され、直径 $\phi 1.6 \sim 2.3 \text{ m}$ の大口径改良体が造成できる。しかも、機械攪拌翼外側の外周部は、超高圧ジェット噴流による混合攪拌であることから、護岸矢板と密着性が高く一体化することや、改良体相互のラップ施工等も容易である。すなわち、WHJ工法は、間詰補助工の必要性が無く単一工種施工となり、工期の短縮と施工コストの縮減を図ることができる。また、WHJ工法は、水上から施工できる台船方式の深層混合処理工法であり、施工に十分な足場が確保できない河川域あるいは河口に面した海域等においても施工が可能である。写真-2はWHJ工法の施工機械の全景である。当該現場のように高速道路の橋梁ピアと近接した施工現場でも、攪拌軸に排土スクリュロッドを装備することで、固化材スラリーの噴射量に見合う原土量を排土し、地盤変位を抑制できる。また、変位の動態観測と併せて排土量を調整ができる正回転・逆回転混合制御機能があるため、施工時に発生する地盤変位の抑制制御が可能である²⁾。

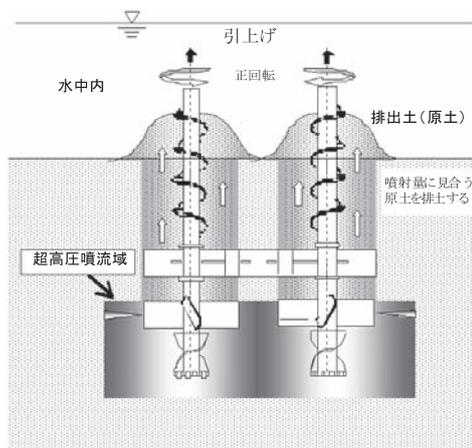


図-2 WHJ 工法の改良メカニズム概要図



写真-2 WHJ 工法と護岸施工状況

(3) WHJ 工法の施工仕様

(a) 適用土質と WHJ 改良径の設定

表一 1 に WHJ 工法による標準改良径を示す。超高压噴射攪拌を基本原理とするため、設定改良径は対象土の粘着力、 N 値により異なる。改良径は $\phi 1.6 \sim \phi 2.3 \text{ m} \times 2$ 軸，改良断面積 $A = 4 \sim 8 \text{ m}^2$ である。従来の二軸式機械攪拌工法の $\phi 1.0 \text{ m} \times 2$ 軸式の場合の改良断面積 $A = 1.5 \text{ m}^2$ に比べ、3～5 倍となる。また、攪拌軸間の幅も $B = 1.4 \sim 2.0 \text{ m}$ に変更できるため、適用条件に応じて様々な改良仕様の選択が可能である。対象土の適用範囲は標準的には粘性土は $S_u \leq 70 \text{ kN/m}^2$ ，砂質土では $N \leq 20$ としている。

表一 1 適用土質と改良径の設定

対象土質		改良径 D (m)	改良断面積 A (m ²)
砂	$N \leq 10$	2.1m × 2 軸	6.81
	$10 \leq N \leq 20$	1.9m × 2 軸	5.56
粘性土	$S_u \leq 30 \text{ kN/m}^2$	2.3m × 2 軸	8.08
	$30 < S_u \leq 40 \text{ kN/m}^2$	2.1m × 2 軸	6.81
	$40 < S_u \leq 50 \text{ kN/m}^2$	1.9m × 2 軸	5.56
	$50 < S_u \leq 70 \text{ kN/m}^2$	1.6m × 2 軸	3.92

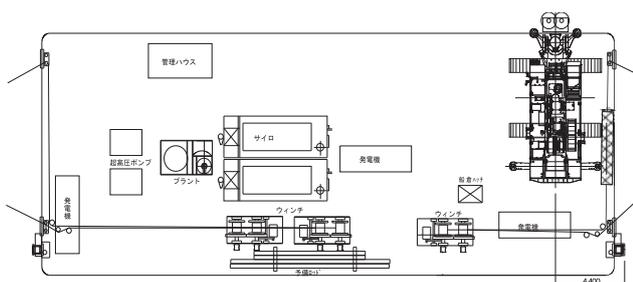
* WHJ 攪拌翼径 $\phi 1.0 \text{ m}$ の場合

(b) 施工管理システム

本工法の攪拌混合は超高压噴流体による対象地盤の切削破壊・混合攪拌が主体である。施工時には、固化材スラリーの吐出圧力，吐出量，改良時間および回転数等を計測管理できる集中管理制御システムである。また，改良深度管理では潮位差も補正可能である。

(c) 機械構成

WHJ 工法は，台船上に改良施工機本体の三点支持式杭打機を搭載した方式であり，水上施工が可能なのも特徴の一つである。図一 3 はその標準的な搭載方法である。台船上には，WHJ 施工機本体，スラリープラントを搭載している。使用する台船は，搭載する施工機種，搭載質量，施工域により選定されるが，通常では 700 t 級台船を用いる場合が多い。



図一 3 WHJ 施工機の台船搭載例

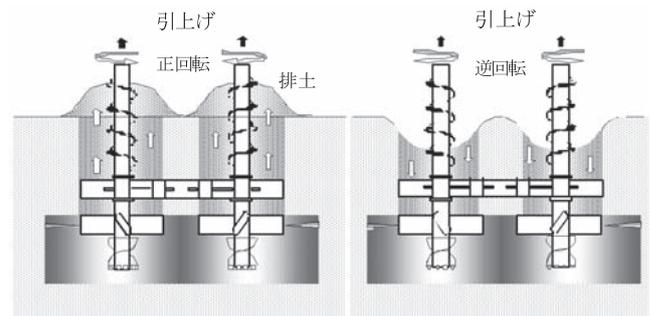


写真一 3 台船上に搭載した WHJ 施工機全景

台船の設備には，WHJ 本体のほかに台船移動のためのウインチ設備，施工位置の固定のためのスパッドが装備される。また，施工杭の位置設定のために，GPS またはトータルステーションを用いる。写真一 3 は，WHJ 施工機の台船上の搭載例である。

(d) 施工時の環境影響軽減

鋼管矢板等の既設護岸前面側から地盤改良施工を行う場合には，改良体と既設護岸との密着施工による一体化が求められる。しかし，構造物に近接した施工によっては，地盤変位を及ぼす場合も考えられる。WHJ 工法では，回転軸に排土用のスクリュロッドを装着しており，回転軸を正回転と逆回転の比率を組み合わせることで，排土量が調節でき，施工時の地盤変位を抑制することが可能である。図一 4 は WHJ 施工時の正回転と逆回転による排土制御模式図である。機械攪拌工法では，改良時の回転方向を一方向に決めているのに対し，WHJ 工法では，変位制御のために軸回転を切替えることで，WHJ 攪拌翼先端装置部の超高压ジェット噴流の方向も同時に切り替わる。改良品質は回転方向に無関係であるから，施工能率を制限することなく，通常施工のままで行うことができる。排出土率は，混入固化材液量に対し，標準的には約 100% である。また，排出土は原土のみで固化材の混入がなく，水質の汚染等は生じない。WHJ 工法は単相式高压噴射攪拌方式であり，エアを併用しないため，



図一 4 正回転と逆回転による排土制御模式図

排出土は水中内で拡散することなく、施工が可能である。

4. WHJ 工法による護岸耐震補強工事施工事例

(1) 工事概要

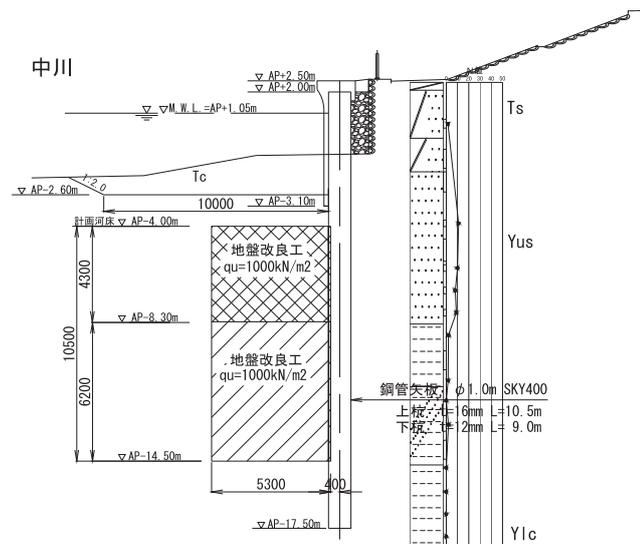
東京都東部に位置する荒川と中川の中間の中堤は、河口から延長約 7 km にわたる背割堤形式による護岸である。中堤は完成後約 20 年が経過し、老朽化や地盤沈下による変形が進んでいる。

本工事は、東京都が中川左岸の護岸耐震補強を実施するために江戸川競艇を一時休止させることから、対岸の中堤でも同様に改修を進めるものである。工事区間は、競艇場の前後の延長約 1,500 m を整備対象とする。

中堤における護岸の整備は、鋼管矢板杭の打設による補強、変形個所の補修などを行うものである。地盤改良施工において、中堤内の地盤改良域は、陸上部側からの地盤改良施工に十分な足場が確保できないため、水上から台船施工が可能な WHJ 工法を選定した。

(2) 地盤概要

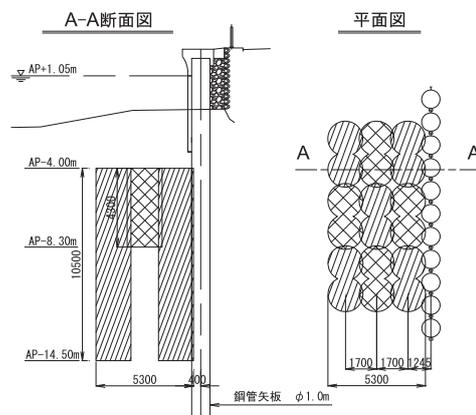
図一五は土質柱状図と WHJ 工法の地盤改良断面図である。河口から測点 4 km 付近の対象土質は、現況河床から AP-8 m 付近までは $N = 2 \sim 14$ の非常に緩いシルト質細砂で構成されている。また、AP-8 m 以深では、含水比 $w = 44 \sim 51\%$ 、砂分含有量 50 ~ 60% の砂質シルトで、粘着力 $S_u = 28 \sim 64 \text{ kN/m}^2$ である。



図一五 土質柱状図と WHJ 改良位置

(3) 地盤改良計画

図一六は WHJ 改良体の配置図である。本工事では、河川内に新たに打設された鋼管矢板の前面部に 3 列の WHJ 改良体を配置した。改良径の形状は $\phi 1.9 \text{ m} \times 2$ 軸とした。改良形式は、改良長の異なる 2 つの仕様の改良体を交互に配置した。改良上部の AP-4.0 ~ -8.3 m は受働抵抗向上を目的に改良長 $l_1 = 4.3 \text{ m}$ 、改良率 $a_p = 89\%$ である。また、AP-4.3 ~ -14.5 m は堤体の安定確保の目的から改良長 $l_2 = 10.5 \text{ m}$ 、改良率 $a_p = 47\%$ の杭式改良とした。改良体配置は、改良体相互および鋼管矢板と改良体との密着一体化が図れる配置とした。



図一六 WHJ 改良体の配置図

(4) 施工概要

(a) 施工仕様

表一 2 は本工事の施工延長 390 m の WHJ 施工における施工数量である。また、表一 3 は WHJ 施工の施工仕様である。設計強度は $q_u = 1,000 \text{ kN/m}^2$ とした。この場合の固化材混入量は、 $a_w = 166 \text{ kg/m}^3$ で、改

表一 2 WHJ 施工数量

区分	貫入長	改良長	空打ち長	本数
1	6.0m	4.3m	1.7m	144 本
2	12.4m	10.5m	1.7m	201 本

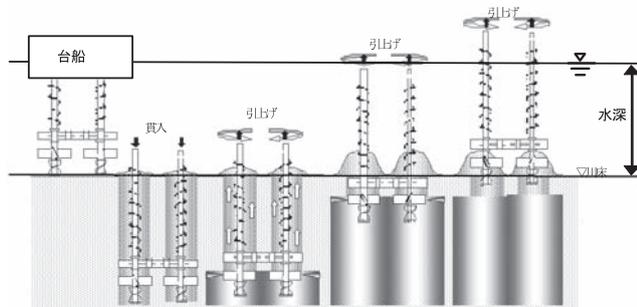
表一 3 WHJ 施工仕様

項目	施行仕様
改良径	$\phi 1.9 \text{ m}$ (軸間 1.7 m)
改良断面積	$A=5.56 \text{ m}^2$
改良時間	4 分 / m
使用固化材	ケミコ C-201
水・固化材比	W/C=1.0
材料混入量	$a_w=166 \text{ kg/m}^3$
設計強度	$q_u=1,000 \text{ kN/m}^2$

良時間は $t = 4 \text{ 分/m}$ とした。設定改良径は、対象土質の N 値および粘着力から判断し改良径 $\phi 1.9 \text{ m}$ 、軸間幅 1.7 m で改良断面積は $A = 5.56 \text{ m}^2$ の連珠形状である。鋼管矢板と WHJ 攪拌翼先端部との距離は、 25 cm の離隔距離である。このときの鋼管矢板と超高压ジェット噴流域との密着幅は、 10 cm である。

(b) 施工方法

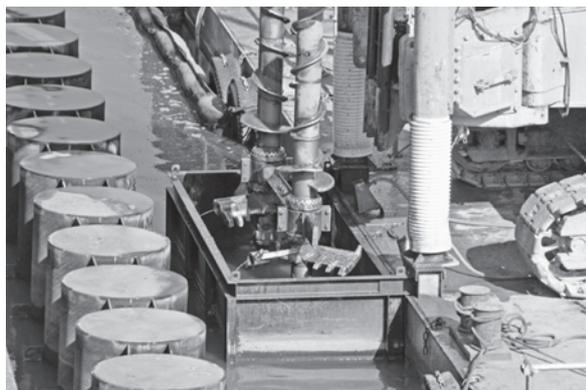
図一七に WHJ 工法の施工手順図を示す。WHJ 処理機を搭載した台船を施工位置に移動する。トータルステーションにより施工杭の位置を計測し、台船を固定する。WHJ 攪拌装置と施工管理システムを作動させ、所定深度まで貫入する。WHJ 超高压ポンプを所定の圧力、吐出量に設定した後、定速回転で引抜き改良する。なお、改良時に新設護岸および近接構造物の



図一七 施工手順図



写真一四 中堤地区 WHJ 施工状況



写真一五 鋼管矢板との密着施工状況

変位が懸念されたため、WHJ 攪拌装置の軸回転を正回転、逆回転の組合せ制御により、排土量をコントロールし、変位を管理値内に抑制した。写真一四は WHJ 工法の施工状況である。また、写真一五は既設鋼管矢板への WHJ 改良体の密着施工による一体化を図るための位置セット状況である。

(5) 施工結果

(a) 現場改良強さ

表一四は WHJ 改良後の現場改良強さ q_{uf} の結果である。各改良杭の現場改良強度は、改良長 $l_2 = 10.5 \text{ m}$ 仕様の上層、中層および下層とも平均 $q_{uf} \geq 2,300 \text{ kN/m}^2$ で、設計強度を満足している。また、現場改良強度の変動係数は $V = 13 \sim 21\%$ と混合性能が高いことが確認された。また、改良杭体相互のラップ部の改良強度は、上、中、下層のいずれも $q_{uf} \geq 2,300 \text{ kN/m}^2$ であり、外周改良体とほぼ同等の強度であることが確認された。

表一四 WHJ 改良体の現場改良強度結果

採取位置	改良体 NO.	現場改良強さ $q_{uf}(\text{kN/m}^2)$				杭平均	変動係数 $V(\%)$
		1	2	3	平均		
上層部 (AP-4m)	A	2674	2861	1917	2484	2314	20.2
	B	1803	1961	2666	2143		
中層部 (AP-8m)	A	3127	2385	2900	2804	2533	21.3
	B	1702	2899	2186	2262		
下層部 (AP-12m)	A	2377	2781	2994	2717	2577	12.6
	B	2340	2168	2802	2437		
上層部	CとD (ラップ部)	2662	1837	2475	2325		
中層部		2445	3189	2560	2731		
下層部		3107	2963	2230	2767		

(b) 環境への影響

施工時の鋼管矢板への変位抑制の方法として、攪拌翼回転を正回転から逆回転に切替える深度位置を改良下端部から 3 m 改良位置とした。それ以浅の改良層は、逆回転にて行う方法が最も変位の少ない施工方法であった。その結果、地盤改良後における鋼管矢板の変位量は $\delta < 2 \text{ mm}$ と小さく、変位制御した施工が可能であった。また、水中施工時の水質汚濁等に与える環境影響は認められなかった。

5. まとめ

本事業は、地震に強い川づくりを目指し、堤防の耐震強化として、中堤の護岸の老朽化や地盤沈下に伴う改修工事を実施し、護岸の耐震補強を地盤改良によって行った一例である。地盤改良工法は、耐震強化を図る上で、地盤強化の観点から必要な施工方法である。

また、既設構造体と地盤改良体との一体性を保つことは、護岸構造体としての耐震性の向上を図る上で重要である。今後の耐震補強に向け、本適用事例を応用し、さらに震災に強い川づくり等に貢献できるものと考えらる。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 嵯峨弘喜, 鈴木孝一, 西尾経, 高桑一輝: 機械攪拌と高圧噴射攪拌を用いたハイブリッド地盤改良工法—WHJ工法による既設護岸の耐震向上対策の施工事例—, 平成21年度建設施工と建設機械シンポジウム, pp.171~174, 2009.11
- 2) 鈴木孝一, 西尾経, 田中信哉, 松岡大介, 齋藤邦夫: SDM工法(高速低変位深層混合処理工法)—機械攪拌併用高圧噴射攪拌による地盤変位の抑制制御型工法の概要と施工事例—, 基礎工, vol.37, pp.88~90, 2009.5



[筆者紹介]

嵯峨 弘喜 (さが ひろき)
国土交通省
関東地方整備局荒川下流河川事務所
小名木川出張所長



齋藤 邦夫 (さいとう くにお)
中央大学 研究開発機構長 理工学研究所長
理工学部 教授
工学博士



鈴木 孝一 (すずき こういち)
小野田ケミコ(株)
取締役 専務執行役員 営業本部長
技術士(総合技術監理部門・建設部門)



西尾 経 (にしお わたる)
小野田ケミコ(株) 技術本部
執行役員 技術本部長

平成21年度版 建設機械等損料表

■内 容

- ・ 国土交通省制定「建設機械等損料算定表」に基づいて編集
- ・ 損料積算例や損料表の構成等をわかりやすく解説
- ・ 機械経費・機械損料に関係する通達類を掲載
- ・ 各機械の燃料(電力)消費量を掲載
- ・ 主な機械の概要と特徴を写真・図入りで解説
- ・ 主な機械には「日本建設機械要覧(当協会発行)」の関連ページを掲載

■ B5判 約730ページ

■ 一般価格

7,700円(本体7,334円)

■ 会員価格(官公庁・学校関係含)

6,600円(本体6,286円)

■ 送料 沖縄県以外 600円

沖縄県 450円(但し県内に限る)

(複数お申込みの場合の送料は別途考慮)

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>