

技術トピック

メカニズム解明のための構造実験技術と試験設備

Experimental Technologies and Facilities to Clarify Structural Mechanisms

半谷 公 司*
Koji HANYA

計 洋 介
Yousuke HAKARI

日下 裕 貴
Hiroki KUSAKA

仲村 敏 幸
Toshiyuki NAKAMURA

清水 信 孝
Nobutaka SHIMIZU

抄 録

脱炭素社会実現に向けた政府方針により、建設の合理化ニーズはいっそう高まる。省CO₂に向けた挑戦的な構造開発も必要となり、それらの安全検証には、適切な実験が要求される。日本製鉄グループは、大規模な設備から、専用設備に至るまで、新構造に挑戦するための実験技術群を有している。建設市場の更なる発展への貢献を狙い、それらを紹介する。

Abstract

Under the carbon neutrality policy, more challenging structural development is required. Nippon Steel Corporation has developed experimental technologies for new structures ranging from large-scale facilities to specialized equipment. We will introduce them with the aim of contributing to the development of the construction market.

1. はじめに

安全で合理的な鋼構造を建設市場へ提案するためには、構造メカニズム解明を通じた構造合理性の追求が必須である。脱炭素社会に向けた政府方針により、構造合理性への要求はいっそう高まる。計算機の高度化により、数値シミュレーション技術は加速するが、新たな技術、挑戦的な構造の実現と、それらの安全検証には、実験が不可避である。適切に行われた実験結果をもって、数値シミュレーション技術が有効化するともいえる。日本製鉄グループは、最大荷重 80MN に及ぶ引張試験機や、長さ 40m に及ぶ反力床などの大規模設備や複数の専用設備を保有し、また堤防の豪雨災害を再現する設備を新設するなど、新構造に挑戦するための技術群を強化している。本報では、建設市場の更なる発展への貢献を狙い、日本製鉄グループの実験技術群を紹介する。

2. 実験技術の概要

建設分野における実験技術を図1にまとめる。引張(a)、圧縮(b)、曲げ(c)、せん断(d)が基本となる。それら荷重を複数作用させた複合実験(e)では、形鋼や鋼管など単材

を対象とする場合と、十字やト字の部分構造を対象とする場合がある。このほか、地震力を作用させる振動実験(f)や、衝撃力を加える落錘実験(g)、土圧(h)や水圧(i)を作用させる実験技術がある。

これらの実験のための設備のほとんどは、REセンター(富津)(千葉県富津市、以下、富津という)と波崎研究開発センター(茨城県神栖市、以下、波崎という)の二拠点に配置されている。両拠点の主な試験設備と反力壁の配置概要は図2の通りである。波崎には、L型の大型反力壁(図2-R1)、長尺の反力床(図2-R2)があり、実大サイズの構造体の特性の評価分析、および新たな実験方法の探索研究を中心に進める。富津には、波崎での実大サイズの検討結果を踏まえた改良案をパラメトリックに評価可能な専用設備があり、縮小サイズ実験を迅速に行う。また富津には、ジオ・ラボを新設し、水災害シミュレータなど、土中構造物の研究に特化した専用設備を配置している。

3. 実験技術および設備の具体事例

図1の分類に従い、具体的な実験技術を、その設備と合わせて以下に紹介する。全体観を示す表1も参照されたい。なお本報では、一般的な材料引張試験やシャルピー試験な

* 鉄鋼研究所 鋼構造研究部長 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

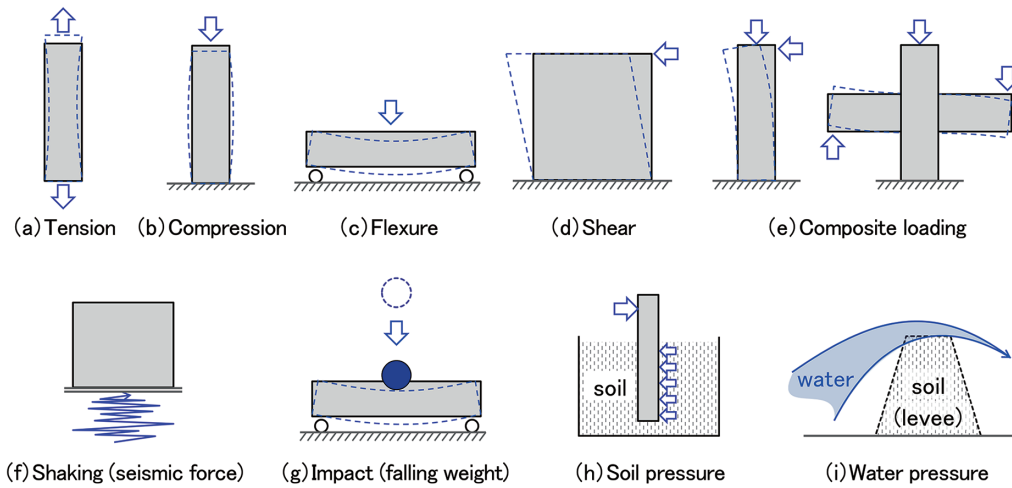


図1 構造実験の種類
Types of structural experiments

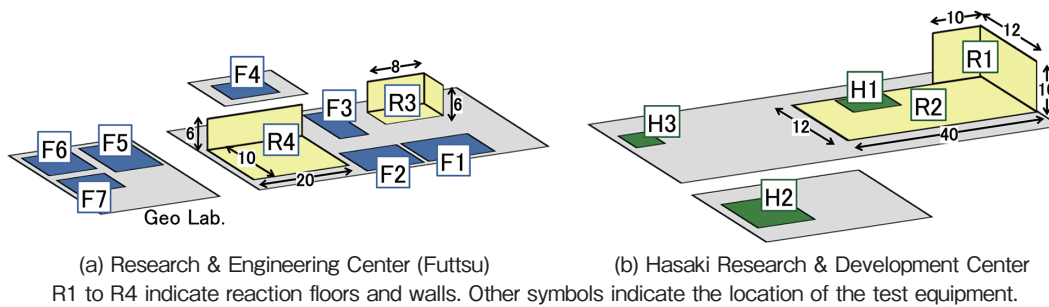


図2 試験設備の配置図
Layout of testing facilities

どは省略する。

3.1 構造実験

(a) 引張

鉄鋼材料の主たる機械的特性のひとつが引張強度であることから、社内には多くの引張試験機があり、その最大荷重は80MNに及ぶ。建設分野では材料の引張強度だけでなく、溶接やボルトで接合された部分の性能を正しく評価する必要がある。例えば、H鋼梁のフランジ端部と柱との溶接部を対象にした実験(図3)、高力ボルト摩擦接合部を対象にした実験(図4)がある。

(b) 圧縮

建設分野の構造実験の特徴としては、鋼材だけでなく、構造体の、すなわち“かたちを有する鋼材”の特性を評価する必要がある。図5は薄板軽量形鋼の圧縮座屈実験を示すが、このような薄鋼板で構成される部材を対象に構造性能を評価する際は、載荷点や支持点で局所的に壊れないように補強するノウハウが実験の成否を決める。

(c) 曲げ

建設分野では、基礎、杭、柱、梁、床、屋根、壁など、いずれも長尺製品であり、自重、地震、風、土圧、水圧な

どによる大きな曲げ力が作用する。それらを再現するための様々な曲げ実験を行っている。

照明ポールで利用される小径鋼管や、薄板軽量溝形鋼など、作用荷重が150kN以下の範囲では、図6に示す設備を利用する。試験体の支持スパンは4mであり、幅1.8mまでのパネル状の試験体も対象にできる。同設備では、1Hzまでの載荷速度による疲労試験を行うこともできる。

鋼管や形鋼のうち大型製品の評価では、5MNまでの荷重を付与できる、図7に示す設備を利用する。この設備は、材長方向に移動可能なテストベットを有し、長尺製品を載荷ジャッキの下にセットしやすいという特徴をもつ。支持スパン6m、幅1mまで試験体を対象にできる。

更に長い製品を対象とする場合は、反力床壁を利用する。図8(a)は波崎の反力床(図2-R2)を利用して、 $\phi 1.6\text{m}$ 、支点間16mの鋼管杭を対象とした曲げ実験の事例である。この反力床を利用すれば、3枚の鋼矢板を連結した状態の曲げ性能を評価することもできる(図8(b))。

10MNまでの荷重であれば、1.2mのロングストロークでの繰返し曲げ実験を行うことができる。図9に示す大型H梁の曲げ実験の事例では、ストロークの大きな繰返し曲げ力を作用させ、試験体中央に設けた溶接部の構造性能を確認している。最終的な壊れ方まで確認できることで、安全率を適切に設定でき、また挑戦的な製品改良が可能になる。

表 1 実験技術と試験設備
Experimental techniques and equipment

図番号	実験技術と試験設備	実験種別									設置			
		主な作用力 (◎), 同設備で可能な作用力 (○)									施工 実験	富 津	波 崎	
		(a) 引張	(b) 圧縮	(c) 曲げ	(d) せん断	(e) 複合	(f) 振動	(g) 衝撃	(h) 土圧	(i) 水圧				
3	H鋼梁端と柱の溶接部の引張実験	汎用大型試験機(20MN, 80MN)	◎										○	
4	ボルト摩擦接合部の引張実験	汎用試験機(4MN)	◎	○									○	
5	薄板軽量形鋼の圧縮座屈実験	汎用試験機(2MN)	○	◎										H3
6	小径鋼管の繰返し曲げ実験	小型汎用試験機(150kN)		◎	◎			○						F4
7	鋼矢板単材の曲げ実験	汎用試験機(5MN)		◎	◎			○						F1
8a	長尺鋼管杭の曲げ実験	長尺反力床(全長 40m)			◎			○						R2
8b	鋼矢板(3枚連携)の曲げ実験	長尺反力床(全長 40m)			◎			○						R2
9	実大部材の繰返し曲げ実験	1.2m ストローク試験機(10MN)		○	◎			○						H1
10	トンネルセグメントの曲げ実験	水圧バック载荷設備			◎					○				※1
11	壁パネルの面内せん断実験	パネル試験機(300kN)				◎								F3
12	鋼管杭の複合载荷実験	大型 L 型半力壁	○	○	○			◎						R1
13	十字構造の繰返し载荷実験	十字骨組载荷試験機(10MN)		○	○			◎						F2
14	十字構造の繰返し载荷実験	大型 L 型半力壁	○	○	○			◎						R1
15	ト字構造の繰返し载荷実験	大型 L 型半力壁	○	○	○			◎						R1
16	建築床部分構造の曲げ実験	長尺反力床(全長 40m)			○			◎						R2
17	ため池堤防の耐震実験	二軸振動台試験機							◎		○	○		H2
18	落石防護金網の落錘実験	落錘試験設備								◎				※2
19	鋼管杭の複合载荷実験	土中杭シミュレータ		○	○			◎			◎			F7
20	河川堤防の越水洗掘実験	水災害シミュレータ									○	◎		F5
21	鋼管杭の打設実験	地盤施工シミュレータ			○								◎	F6
22	鋼管杭の支持力確認実験	屋外実大試験ヤード	○	○	○								◎	○
23	免震デバイスの性能評価実験	免震部材試験機		○	○	○		◎						※3
24	荷重直進性を確保した载荷実験	レール付き横型試験機		◎	◎			○						※4
25	音響可視化実験	音カメラ												可搬
26	振動可視化実験	スキャン式レーザドップラー計測計												可搬

※1 は日鉄環境(株), ※2 は日鉄建材(株), ※3 は日鉄エンジニアリング(株), ※4 は日鉄テクノロジー(株), がそれぞれ保有する試験設備である。

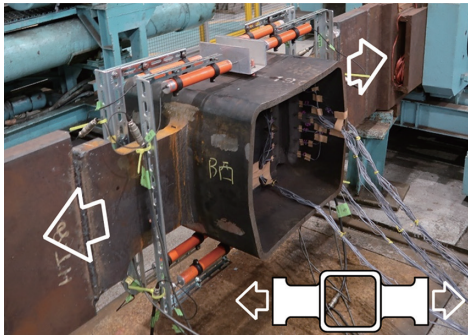


図 3 梁の端部と柱との溶接部の引張実験
Tensile test of welds between beam ends and column

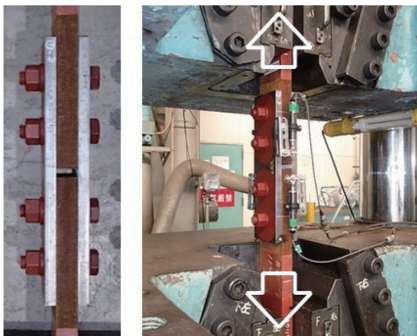
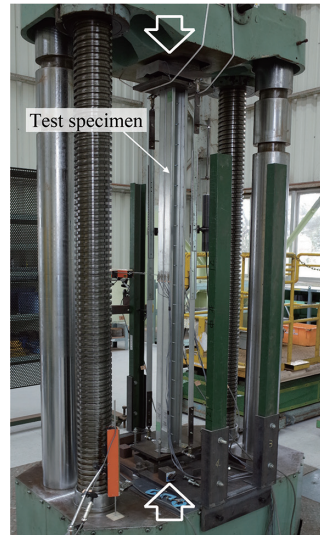
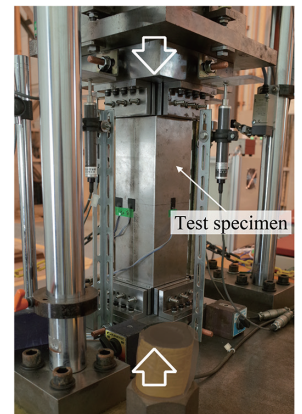


図 4 高力ボルト摩擦接合部の引張実験
Tensile test of a high-strength bolted friction joint



(a) Long column compression test



(b) Stub column test

図 5 薄板軽量形鋼の圧縮座屈実験
Compression test of light weight gauge members

特殊な曲げ実験の事例として、水圧バックを利用して载荷する方法を図 10 に示す※1。鋼殻とコンクリートの合成

※1 日鉄環境(株)が所有。

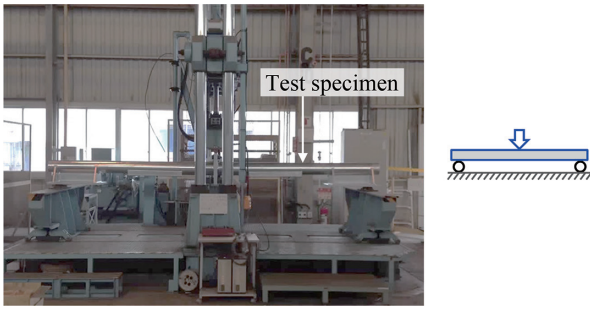


図6 小径鋼管の繰返し曲げ実験
Cyclic flexural test of small diameter pipe



(a) Testing equipment

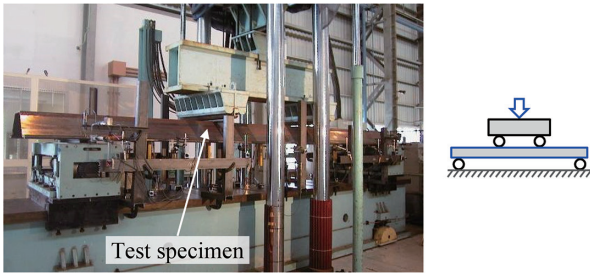
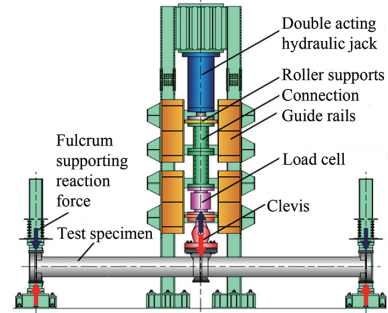
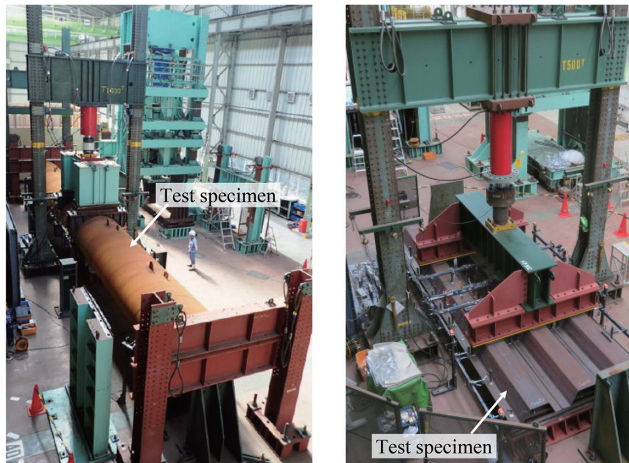


図7 鋼矢板単材の曲げ実験
Flexural test of single sheet pile



(b) Equipment configuration

図9 ロングストローク繰返し曲げ実験
Long stroke cyclic flexural experiment



(a) Steel pipe pile
(φ1.6m, L=16m)

(b) Hat-type steel sheet pile
(3 sheets connected)

図8 長尺反力床での曲げ実験
Flexural test on long reaction floor

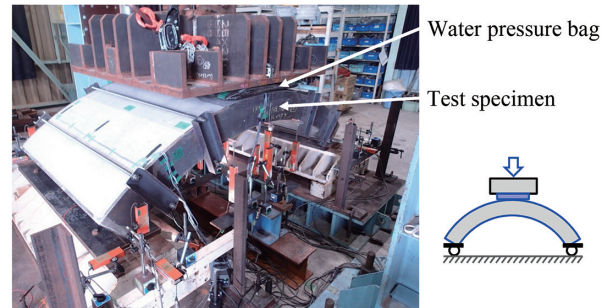
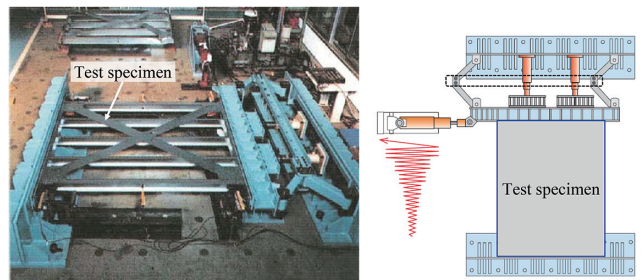


図10 水圧バックを利用したトンネルセグメントの曲げ実験^{*1}
Tunnel segment flexure test using a water pressure bag

構造としてトンネル隔壁を構成する合成セグメントでは、集中荷重を作用させると、内部コンクリートが部分的に破壊し、実現象を確認できない場合がある。水圧バックを介して試験体へ力を加える方法により、土圧を適切に再現できる。



(a) Testing equipment

(b) Loading conditions

図11 壁パネルせん断実験
Wall panel shear test

(d) せん断

建築物の壁を活用して、地震力を吸収する技術は様々ある。低層住宅向けの技術として、薄鋼板を加工した軽量で耐震性の高い壁構造の開発を進めてきた。図11は、その専用設備である。壁を水平に設置し、300kNまでのせん断力を繰返し付与できる。実際の作用力を再現するためのパ

ンタグラフを備えており、また壁への鉛直力を同時に作用させることもできる。

(e) 複合力

これまで一種類の外力を作用させる実験技術を紹介してきたが、実際の構造物には、図1(e)のように、複数の外力

が同時に作用する。それらを適切に再現するための実験技術を以下に紹介する。

図12は杭の頭部を対象にした複合載荷実験の例である。この実験は反力壁(図2-R1)を利用している。実現象を再現するために、構造体の上下を逆にして反力床の上に設置している。

また図13は、柱梁接合部十字骨組を対象とする専用設備であり、柱への軸力10MN、梁への曲げ力3MNを同時に載荷できる。地震力を静的に再現する繰返し載荷が可能で、実験結果として図13(b)のような構造特性が得られる。

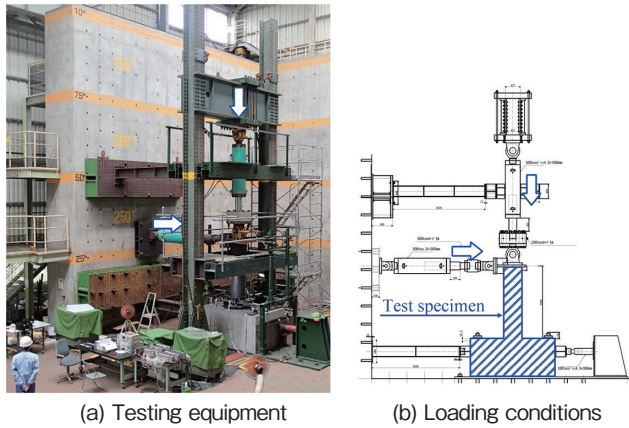


図12 杭の複合載荷実験(上下反転して設置)
Combined loading test of steel pile (installed upside down)

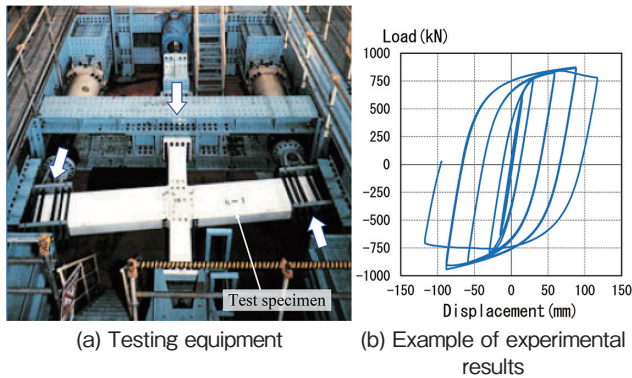


図13 柱梁接合部の十字骨組実験
Cross-frame loading test of column-beam joint structure

この設備では対応できない更に大きな構造を対象にする場合は、反力壁(図2-R1)等を活用する。柱梁接合部を十字構造、ト字構造として取り出して載荷した事例を図14、図15に示す。

実大サイズの実験ニーズは増加傾向にある。図16は、建築床構面(図16(a))の一部を取り出し、床に作用する荷重を複数ジャッキで再現(図16(b))した事例である。試験体は12mにおよぶ大型構造であることから、反力床(図2-R2)の上でコンクリートを打設して試験体を完成させ(図16(c))、その後載荷するという工程とした。

(f) 地震振動

水平および鉛直の二軸のアクチュエーターを搭載した振

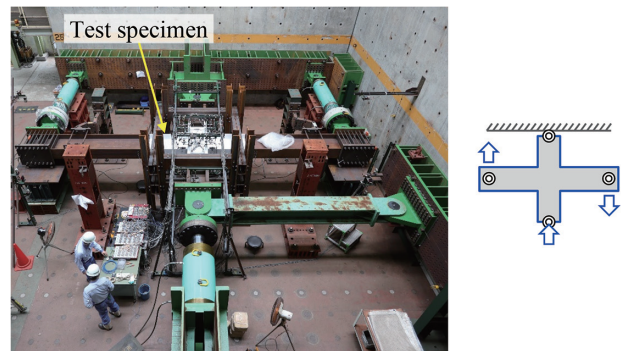


図14 十字骨組実験
Cross-frame test

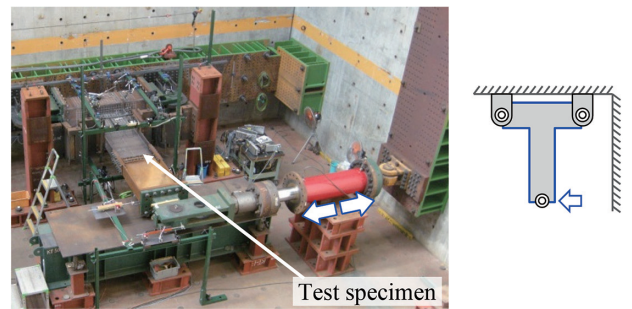


図15 ト字骨組実験
T-frame test

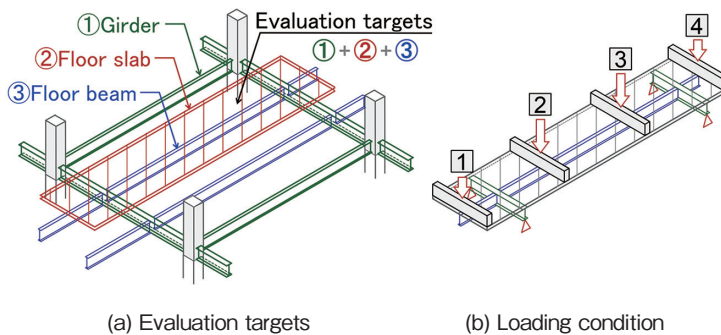


図16 建築床部分構造の曲げ実験
Flexural test of building floor substructures

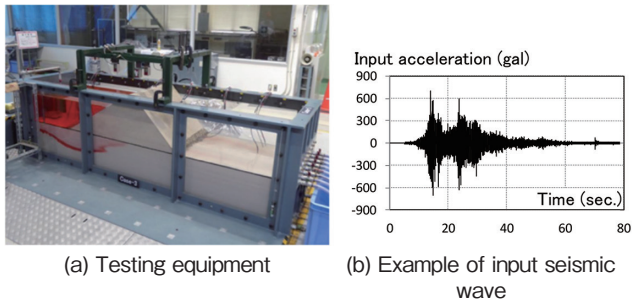


図 17 ため池堤防の地震振動実験
Seismic shaking tests of a reservoir levee

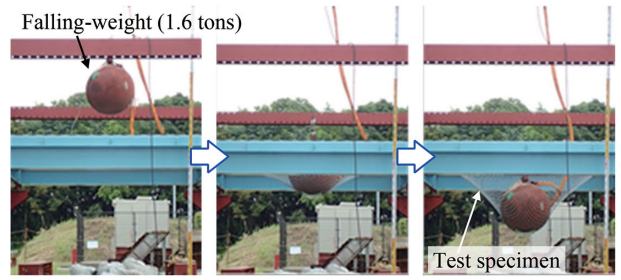
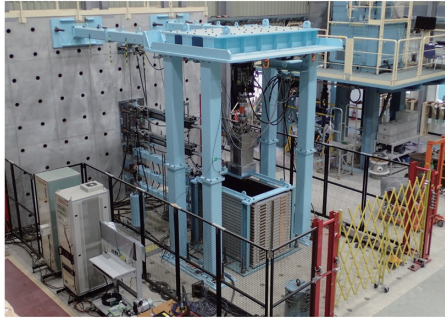
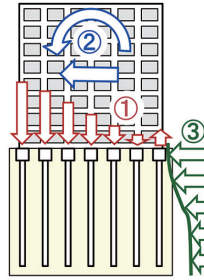


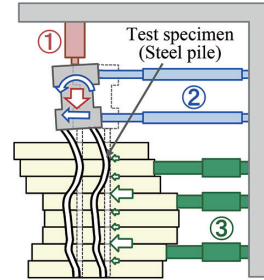
図 18 落石防護金網の落錘実験^{*2}
Falling weight test of rockfall protection wire mesh



(a) Testing equipment



(b) Loading condition



(c) Replication of earthquake loading

① Vertical force caused by the building's own weight and inclination, ② Horizontal force and rotational moment caused by building mass inertia, ③ Shear force caused by ground deformation

図 19 土中杭シミュレータ
Pile in soil behavior simulator

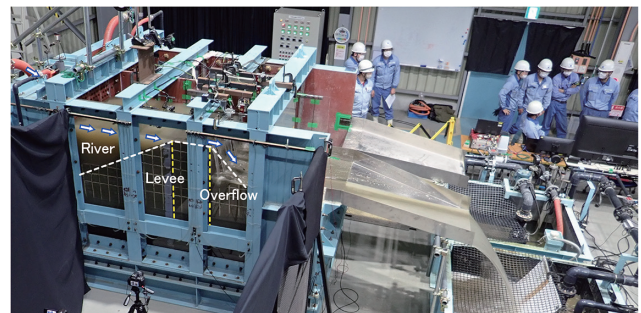
動台を利用し、1/25 サイズに縮小した堤防の地震振動実験の事例を図 17 (a) に示す。振動台サイズは 2m×3m であり、水平加振は長辺方向になされる。給排水機能を備えており、ため池が満水となった際の地震被害を再現できる。阪神・淡路大震災や東日本大震災の際に、神戸や釜石など各地で観測された地震波 (図 17 (b) など) を入力できる。

(g) 衝撃力

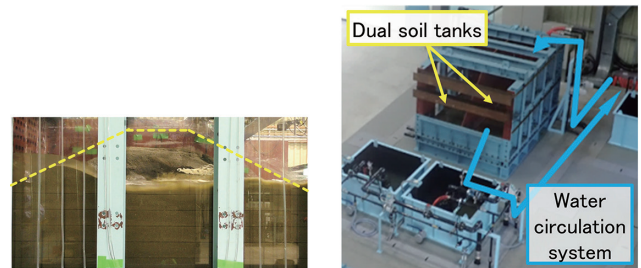
落石等の衝突、あるいは車両の衝突など衝撃力が構造物に作用する場合の評価は、錘を上方から落下させる落錘実験により行う。図 18 は金網に対し、上方 3.8m から、落石を想定した 1.6ton の錘を落下させる実験^{*2} の事例である。

(h) 土圧

熊本地震 (2016 年) では基礎杭の見えない損傷が顕在化した。それら新たな建物被害を踏まえて、大地震時に杭に生じる現象を追究するための専用設備として、土中杭シミュレータ (図 19 (a)) を開発した。地震時の地盤変形 (図 19 (b)) を三本の水平ジャッキで再現すると同時に、杭頭へ鉛直、水平、回転の三力を自由に作用させることができる (図 19 (c))。大地震により基礎杭に生じる任意の応力状態、変位状態を再現可能な設備である。



(a) Overflow experiment



(b) Loss of levee due to flooding (Observed from the side of the levee)

(c) Dual soil tanks and water circulation system

図 20 水災害シミュレータ
Water disaster simulator

(i) 水圧

令和元年東日本台風 (2019 年 19 号台風) では千曲川、阿武隈川などの堤防決壊が甚大な災害を招いた。河川堤防の崩壊現象を明らかにし、効果的な補強方法を検討するための専用設備として、水災害シミュレータ (図 20) を開発

^{*2} 日鉄建材(株)が所有。最大 2ton の錘体を、8m の高さから落下させることができる。

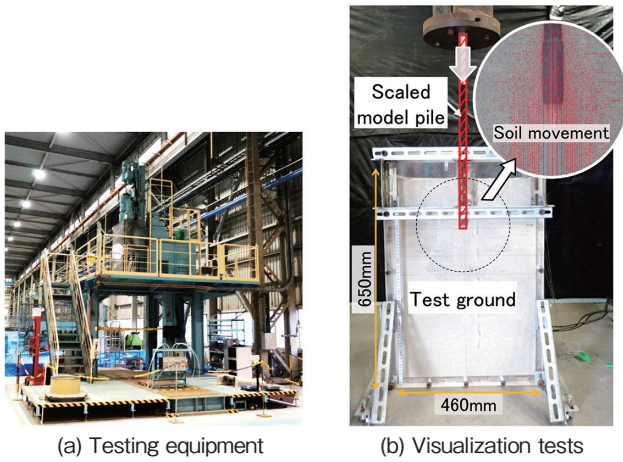


図 21 地盤施工シミュレータ
Pile installation simulator



図 22 RE センター (富津) の実大試験ヤード
Full-scale test yard at RE Center (Futtsu)

した。約 1/15 スケールの堤防の背面水位を高めることで、越水時の破堤挙動を側面から観察できる (図 20 (b))。また二つの堤防を並設し、補強の有無の効果、補強の種類の影響などの比較実験が可能である (図 20 (c))。循環給水設備により、最大 1.2m³/min の給水を継続でき、模型堤防を対象に、短期から長期にわたるまで、河川で想定される現象を網羅的に再現できる。

3.2 施工実験

建設現場における施工法も重要な研究開発の対象である。特に鋼管杭や鋼矢板など地中の構造体は、地盤種別により施工性が大きく変わることから、それらを確認する必要がある。その専用設備として施工シミュレータ (図 21) を開発した。杭などの打設時の圧入力や回転トルクと、打設後の支持力との関係性を評価することが可能である。また、アクリル製土槽と PIV (Particle Image Velocimetry, 粒子画像流速計) 技術を組み合わせることで、杭が地盤に及ぼす影響を可視的に分析することができる。

模型で検討した改良案を確かめるためには、実大での評価が必要になる。富津の北側には屋外ヤードを有しており、実大での鋼管杭や鋼矢板の施工試験、支持力確認試験 (図 22) ができる。

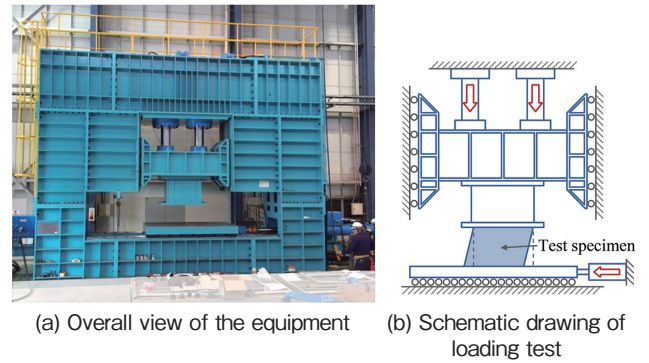


図 23 免震デバイスの性能評価^{*3}
Performance evaluation of seismic isolation devices

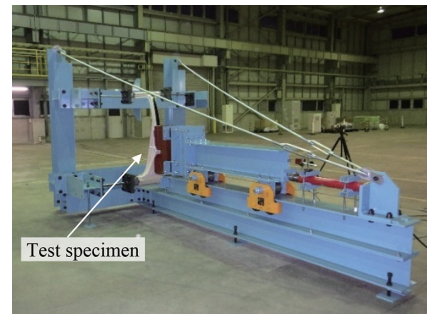


図 24 直進性の高い圧縮・曲げ実験 (200kN)^{*4}
Straight-line compression/flexural test equipment

3.3 その他の実験

3.3.1 免制震デバイスの性能評価技術

地震時の地盤の揺れが建物に直接加わることを防ぐ装置や、地震エネルギーを吸収するダンパーなどの免制震デバイスを開発するための試験設備を図 23^{*3} に示す。柱の軸力を再現する大型の鉛直ジャッキと、その軸力を保持したまま、地震力を再現する水平ジャッキを備える。四階建前後の大型物流倉庫の柱の軸力を再現することができ、実大の免制震デバイスの性能を評価できる。

3.3.2 外力の直進性を高めた載荷実験

図 24 に示す試験機^{*4} を利用することで、直進性を高めた水平力を載荷することができる。同試験機では自動車部品の評価事例を示しているが、横置きで 200kN までであれば、建設構造を対象に評価することができる。

3.3.3 音と振動の可視化技術

住宅建築分野においては、音や振動への対策ニーズは高く、自動車分野の技術を活用した技術構築を進めている。図 25 は音響可視化のための計測装置である。ランダムに配置された 38 個のマイク (図 25 (a)) で測定した音響データを解析することで、各周波数の音の発信源を可視化することができる。図 25 (b) は、500Hz の音が、床板と床梁の

^{*3} 日鉄エンジニアリング(株)が所有。

^{*4} 日鉄テクノロジー(株)が所有。

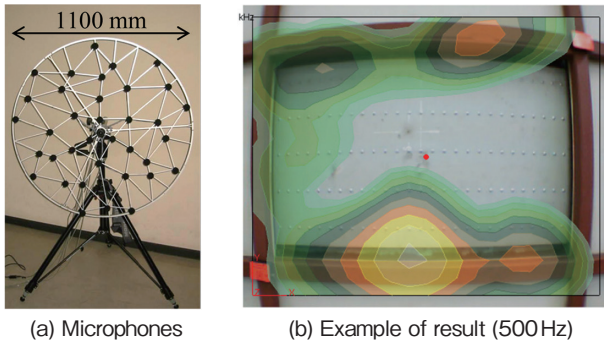


図 25 音響可視化技術
Acoustic visualization technology

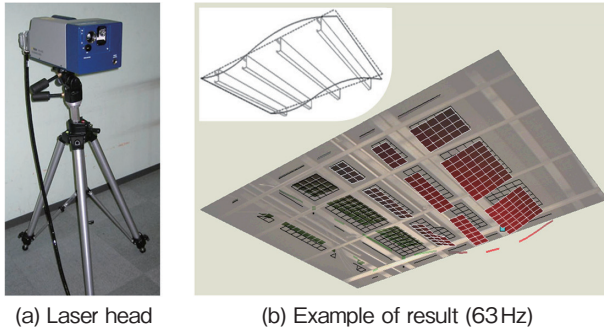


図 26 振動可視化技術
Vibration visualization technology

隙間から生じていることを捉えた計測事例である。

図 26 は振動可視化のための計測装置である。いわゆるレーザドップラー振動計と同じ仕組みであり、測定対象の

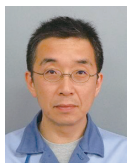
振動状況を面で計測できる（スキャンできる）点に特徴がある。図 26 (b) は、建設中の低層住宅の床の振動モードの計測例である。重量衝撃音として課題となる 63Hz のモードが、床梁と直行方向の振動からなることを捉えたものである。

4. おわりに

計算機とソフトウェアの発展により、数値シミュレーション技術（CAE）が、構造実験の一部を担えるようになり、今後もその傾向は加速するであろう。CAE で正確な結果を得るためには、適切に実施された実験結果が必要になる。高度な実験技術へのニーズは今後いっそう高まるといえる。また米国や欧州において、新技術の安全検証には、ほぼ実大の構造実験が求められる場合もあることから、実験の大型化も進むといえる。日本製鉄グループは、自動車、エネルギー、船舶などの他分野の構造実験技術を活用できる強みを活かし、いっそうの技術強化をもって、国内外の建設市場の更なる発展へ貢献していく。

謝 辞

日鉄環境(株)林智裕氏、飯室賢一朗氏、日鉄建材(株)西海健二氏、日鉄エンジニアリング(株)渡辺厚氏、脇田直弥氏、および日鉄テクノロジー(株)浜谷秀樹氏から各社の実験技術と設備についての情報提供を受けた。ここに記して心からの感謝を示す。



半谷公司 Koji HANYA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部長 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



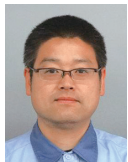
計 洋介 Yousuke HAKARI
技術開発企画部 波崎研究支援室
鋼構造係 係長代行



日下裕貴 Hiroki KUSAKA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部
鋼構造研究第一室長



仲村敏幸 Toshiyuki NAKAMURA
日鉄テクノロジー(株)
TSセンター 材料試験第一係 係長



清水信孝 Nobutaka SHIMIZU
鉄鋼研究所 鋼構造研究部
鋼構造研究第二室長 博士(工学)