

### 3.2 海洋油田の開発

山下 敢 一\*

#### 1. はじめに

石油開発には、『野生物捕獲の法則』が働くといわれる<sup>1)</sup>。本来の意味は、この流体鉱物我先者の所有に帰すという歴史的事情を指すのだが、石油鉱業における技術の性格を表現する言葉としても興味ぶかい。その特徴は次のように要約できる。

- ① 技術的可能性が直接開発の可否を左右することが多い。
- ② きわめて International な性格が強い。
- ③ 一つの技術分野を形成している。

海洋の石油開発において、これらの特徴はとくに著しい。わが国の石油工業は生産部門と精製、販売部門が分

離していて、相対的に生産部門が弱体であった。また最近まで開発地域が国内に限られていた。このことはわが国石油工業の跛行的、従属的性格の一面を示している。現在の国際的な石油開発のすう勢は次のとおりである。

- ① 従来未着手であった新地域、自然条件の過酷な地域へ開発が進んでいる。したがって、新技術の開発が重要な課題になっている。
- ② 危険分散のため合弁事業方式が広く採用されている。経済的、技術的優者が主導権をにぎる。
- ③ 石油開発関連企業の系列化が急速に進んでいる。海洋建設業もその一環に組み込まれる。

この報告では、これらの問題点に深く立入ることはできないので、石油産業の事情に比較的なじみの薄い人のために、あらかじめ問題点を指摘しておく。

#### 2. 海洋油田開発の歴史と埋蔵量

古くから知られた海洋油田としては、ソビエトのバクー油田のカスピ海への延長部分、ベネズエラのマラカイボ湖、カリフォルニア、ルイジアナの浅水域があるが、いずれも陸上油田の延長に過ぎない。1930年代初期にルイジアナの湿地帯の探鉱が始まり、このころから海底油田に対する探鉱技術が発達した。1947年に最初の鋼製海洋掘削プラットフォームがルイジアナ沖 Vermilion ブロック 71 に建設され、海洋油田開発技術の基礎がつくられた。それ以来、メキシコ湾、カリフォルニア沖の海洋油田開発は急速に発展した。

図-1 海洋掘削の稼働地域 (Oil and Gas Journal, April 22, 1968 による)



\* 正会員 石油開発公団事業本部

表-1 わが国企業の海外石油開発事業

企業名	地域名	作業開始 (昭和年)	既投資額 (億円)	陸地面積 (km <sup>2</sup> )	海域面積 (km <sup>2</sup> )	計 (km <sup>2</sup> )	予想油層 掘削深度 (m)
アラビヤ石油	ベルシャ湾中立地帯沖	33	790	—	7 000	7 000	2 500
アブダビ石油	アブダビ土侯国沖	43	—	—	4 400	4 400	3 300
中東石油	アブダビ土侯国	43	—	6 500	—	6 500	—
北スマトラ石油	北スマトラ	36	—	3 600	—	3 600	—
インドネシア石油	北スマトラ沖	41	17	—	23 000	23 000	3 400
インドネシア石油	東カリマンタン沖	42	5	—	34 000	34 000	3 500
九州石油	南カリマンタン沖	42	13	—	130 000	130 000	3 000
九州石油	南東カリマンタン沖	43	—	—	65 000	65 000	3 000
サバティセキ	サバ	43	—	13 400	13 400	6 600	2 000
ジャベックス	カナダ西部	43	—	3 100	—	3 100	—
カナダ ジャベックス	ニューギニヤ	43	—	25 000	—	25 000	—
オーストラリア アラスカ石油	アラスカ	43	—	340	30	370	3 600

### 3. 石油の探鉱と掘削

海洋油田の探鉱は、原理的には陸上と違わない。海底の岩盤露出分布を調査したり、地質構造の予備調査の目的で航空写真や音響測深器による海底地形図が用いられる。アクアラングを使用して直接調査する方法は、地震探鉱や音波探鉱の解釈のチェックに使うと効

1950年代後半から1960年代にかけて、中東沖合地域で続々と大油田が発見され、原油埋蔵量は24億klに達した。この時期の海洋油田として、サウジアラビアの Safaniya, Manifa 両油田、カタールの Idd-el-Shargi 油田、イランの Bahregansor 油田、中立地帯の Khafji 油田、アブダビの Umm-Saif 油田などがある。これが1964年には36億klに増大した。すなわちイラン沖合に Darius, Cyrus 両油田、中立地帯沖合に Hout 油田、カタール沖合に Maydan, Mazan 両油田、イランのカルグ島油田、アブダビ沖の Zakun 油田、さらに El-Bunduq 油田、イラン沖合の Sassan, Esfaniya 油田が加わった。

アジアではオーストラリア南東部やブルネイ沖で油田が発見され、アフリカではナイジェリヤやスエズ沖の油田が確認されている。日本には、秋田県土崎沖油田がある。

現在、世界で海洋油田の開発と探鉱が行なわれている地域を 図-1 に示した。また、わが国企業の海外海洋石油開発の現況は 表-1 のとおりである。

過去10年間に、資本主義圏の海洋原油生産量は4倍に、埋蔵量は3倍に増加し、全体の8%、14%を占めている。社会主義圏を含めると、海洋原油は総生産量の16%、総埋蔵量の16%になる。

世界の確認埋蔵量(1967年末)656.7億kl、究極可採資源量3180億klに対し、そのうち大陸棚に存在する資源量は次のように考えられている<sup>2)</sup>。

石油(一次回収)	1 100 億 kl
(二次回収)	500 億 kl
タールサンド油	300 億 kl
頁岩油	1 600 億 kl

今後さらに増大するわが国のエネルギー需要に対処するためには、どうしても、この海洋の石油資源開発をとり上げなければならない理由がここにある。

果が大きい。また、船からドレッジャーにより海底地質試料を採取して地質を調査する方法も用いられるが、軟弱な第3紀層上部までしか利用できない。

最近の進んだ航空磁力による探鉱は、陸上、海洋の区別なく使用されている。

海上地震探鉱では、爆破船によって発振された震動の反射を観測船が曳航する受信器で受ける方法が用いられる。発振源としてはダイナマイトがすぐれているが、魚族保護や調査能率向上のために、放電衝撃、ガス爆発、磁歪振動子その他の振源が活用される。海上の位置測量には、ショラン、ロラン、デッカ等の電波測量、トランシットによる測量が行なわれる。

海上の重力探鉱では、測定船の定着、重力計の降下、位置測定に時間がかかり、陸上に比して稼働率が下がる。最近測定船を走らせながら連続的に測定する方法も開発されているが、まだ精度が高くなく、作業費が割高な欠点がある。

探鉱作業の結果、推定された油田構造に対する試掘は、移動式掘削装置を用いて行なわれることが多い。移動式掘削装置は複雑な海洋条件下で使用されるため、多種多様なものが考案されているが、原理的には

- ① 移動沈座型 (Submersible type)
- ② 昇降型 (Jack-up type)
- ③ 浮上型 (Floating type)
- ④ 半潜型 (Semisubmersible type)

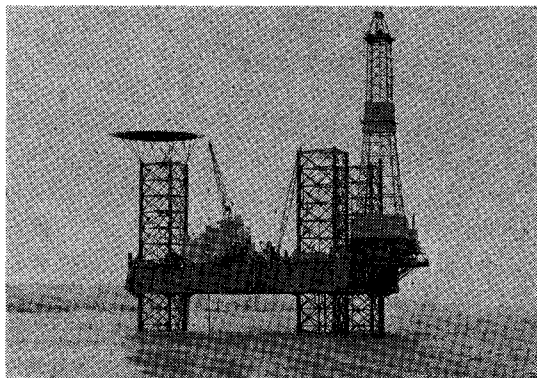
に大別することができる。

沈座型はバラストタンクの上に作業甲板を立ちあげたもので、バラストタンクに注水して、海底に沈座設置する。したがって、海底の地質、平坦度に影響され、また稼働水深が限定される。わが国で海底炭田調査に用いられたかめ号はこの型に入る。通常は水深25m程度が限界であるが、沈座設置時の安定性に改良が加えられ、大型のものでは稼働水深75mのものがある。

昇降型は曳航後、脚を下ろして本体を海面上に持ち上

げた状態で設置するもので、設置後の受圧部分が小さいために波や潮流の影響を受けにくい、昇降装置に難点があり、また海底の洗掘による危険性がある。稼働水深は通常 50 m までであるが、安定性を増すために脚を傾斜させたり、脚の下端にフーチングをつけて水深 75 m まで稼働できるようにしたものもある。石油開発公団の白竜号（写真-1）、現在建造中の日本海洋掘削（株）のふじ号はこの型である。

写真-1 白竜号  
(石油開発公団)



浮上型は通常の船を改良したもので、船の中央または舷外に掘削点を設けるか、双胴船の中央で掘る。mohole 計画では水深 3410 m の地点で 9000 m 掘った実績がある。浮上型は固定が困難で、横波による振動を受け易いが他の型に比べて建造費が安く、機動性に富む等の利点がある。最近浮上型の固定技術として動力的定位法 (Dynamic Stationing) が進歩してきている。

沈座型に対する水深の制限、浮上型に対する波の影響を克服する方法として、船型の曳航特性を犠牲にして、海象への抵抗性を、大幅に改善した半潜型が実現している。一般に半潜型は建造費が高く、大きな欠点となっている。

表-2 に現在稼働中の移動式掘削装置数を示す。稼働水深別の分類に各形式の特徴がよく表われている。

海洋作業では災害対策が重要な問題になる。過去 15 年間に 100 万ドル以上の損害を生じた災害 23 件の内訳を示すと沈座型 38%、昇降型 40%、浮上型 22% で、原油ガス噴出事故 20%、移動、移動準備中 60%、荒天によるもの 20% であった。

#### 4. 海洋構造物

試掘によって確かめられた油田の探掘は移動式掘削装置を用いて行なわれることもあるし、固定式プラットフォームから行なわれることもある。移動式掘削装置によって掘削された油井は、俗にジャケットと呼ばれる鋼構造

表-2 世界の移動式掘削装置数

##### (1) 稼働地域別

稼働地域	沈座型	昇降型	浮上型	半潜型	合計
メキシコ湾	29	37	9	5	80
アラスカ	1	1	1	0	3
太平洋岸	0	1	12	1	14
それ以外の西半球	0	12	1	2	15
ヨーロッパ	8	16	2	0	26
中東	0	12	4	0	16
アフリカ	1	8	8	2	19
オーストラリア	0	1	6	2	9
樹東	0	1	2	2	5
合計	39	89	45	14	187

##### (2) 稼働水深別

稼働水深	沈座型	昇降型	浮上型	半潜型	合計
30 m 以内	37	27	1	0	65
45 m 以内	1	25	0	0	26
60 m 以内	1	25	0	0	26
75 m 以内	0	6	0	0	6
90 m 以内	0	6	0	0	6
180 m 前後	0	0	44	14	58
合計	39	89	45	14	187

注: Offshore 誌: April 1968 による。

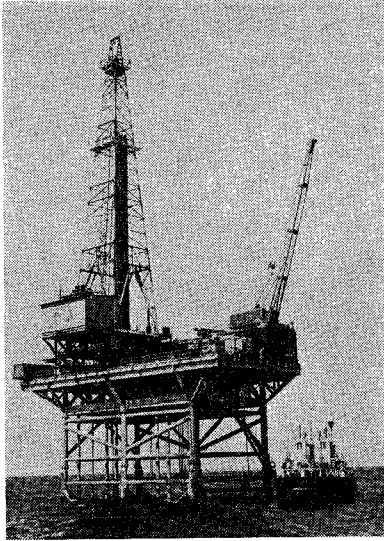
物で保護され、海面上に坑口装置が設けられる（写真-2）。

固定式プラットフォームには写真-3のような鋼管骨組構造が用いられるのが普通である。掘削用プラットフォームは、①全搭載型 (Selfcontented type) と、②テンダーバージ同伴型 (Platform with tenderbarge type) に分類される。つまり、初期のプラットフォームは、掘削作業に必要な全装備を搭載した大規模なものであったのに対し、付属機械や重量資材を船に乗せて横づけする形式が考案された。しかし、この方式は天候の影響を受け易い欠点を持つため、現在でも全搭載型は用いられ、装備を極力集約化してプラットフォーム寸法を小さくする努力が進められている。最近の全搭載型プラットフォームの平均デッキ寸法は 19.8×35.8 m 程度である。

写真-2 秋田県土崎沖油田 油井ジャケット



写真-3 新潟県鳩町沖第4人工島  
(帝国石油)



プラットフォームの設計は使用する作業船の能力によって基本的に制約される。初期のプラットフォームは、当時製造されていた鋼材寸法と作業船の吊上能力、ブーム長さの制約のために、多数の杭を林のように打込まなければならなかった。1950年代の中頃には、使用可能な杭径は75cmになり、所要杭数が減り、大きな骨組みが可能となった。約30mの水深につくられた最初のプラットフォームは8本足のジャケット3基からなる66×48mのデッキ寸法のものである<sup>3)</sup>。

プラットフォームは普通ジャケット部分と上部ラッキ部分にわけて工場製作される。各ブロックをバージで現場へ運び、まずジャケットを海中に設置して、ジャケット脚をとおして杭を所定深度まで打ち込んだのち、上部デッキを設置する。現在ではデッキ上の主要機械装置はあらかじめ工場で装備されて建設されることが多い。

1967年夏にルイジアナ沖 South Pass ブロック62の水深104mの地点に建設されたプラットフォームが現在最深のもので、これは外径120cmの8本の杭と8本のスカート杭を持つ形で、500t吊りの起重機船を用いて建設された。現在世界で稼働している500t吊りの起重機船は11隻以上にのぼる。

海洋構造物に加わる上部荷重を合理的にすることは重要である。それ以上に水平方向の問題が海洋という環境下にあっては重要である。メキシコ湾はハリケーンによる災害多発地域として知られ、オーストラリアは世界で最も海の荒い地域の一つである。北海の天候は夏でも悪化することがあり、冬期には40m/secの強風、14mをこえる波浪もめずらしくない。カリフォルニア沿岸では地震荷重が大きい。またアラスカのCook入江では厚さ1.8m、直径300mの氷板、11mの潮位差、31m/sec

の風、10ノットの潮流に耐えることが要求される。

観測記録がきわめて得にくい地域に建設する場合の自然条件の推定にあたっては、構造物の特性の配慮が必要である。たとえば、海洋構造物の設計波に最大波高が用いられ、波峯上昇が重視される。今日では波力は構造系に働く抗力と質量力の図表として与えられるのが普通である。

杭には大きな水平力が働くので、杭寸法は水平支持力によって定まることが多い。一般には杭の弾性方程式の解として得られるが、土の弾性係数の推定方法に問題が残されている<sup>4)</sup>。

パイプ部材の溶接継手は、海洋構造物の特徴の一つである。格点継手の補強にはさまざまな工夫が行われてきたが、現在では静力学的に望ましい補強が応力集中の結果、疲労の原因となることが知られ、部材肉厚を増して補強材を用いない傾向にある。材料には高張力調質鋼材が用いられている。Cook入江等では従来の形式からさらに発展して、自然条件に適した骨組構造や塔柱構造が用いられるようになった。

メキシコ湾における船舶衝突を除く事故例32のうち2基は仮設構造物、4基は初期構造物、残り26基のうち23基は暴風時外力の算定に問題があり、2基は軟弱地盤によるもの、1基は継手部の損傷によるものであった。

## 5. 海洋油田の採取施設

生産段階になると

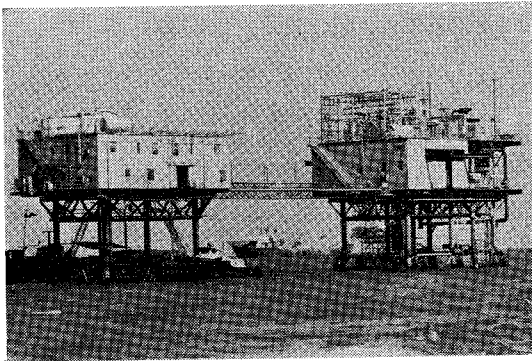
- ① 採取基地 (Flow station)
- ② 集油基地 (Gathering station)
- ③ 貯油施設 (Storage tank farm)
- ④ 積出施設 (Loading Dock)

などが必要になる。施設の内容は油田規模、土地条件によって著しく異なるが、典型的な例は、次のとおりである。

各油井の坑口には安全装置、減圧装置、坑内諸測定用の装置が取付けられ、坑口で減圧された生産物は海底パイプで採取基地へ集められる。採取基地には各種セパレーター、計量装置、昇圧ポンプ等があって、原油中のガスを分離し、各油井の産出量を計量して集油基地に送る役目を果たす。また、ここには変電設備、消火設備、ヘリポート等も設けられる。

集油基地(写真-4)には、昇圧ポンプ、計量装置があって、各採取基地から送られてくる原油を海底送油管で陸上の貯油施設へ送る。集油基地はまた海上作業の司令部でもあって、ここにラジオ室、機械室、発電機室、作業室、倉庫、宿舎等が設けられる。

写真—4 カフジ油田集油基地  
(アラビヤ石油(株))



海上のこれら基地は、プラットフォーム上に設けられる。掘削用プラットフォームが転用されることもあるが、目的に合わせて別のものがつくられることが多い。

採取施設は海洋の悪条件下でも安定した運転が可能のように完全に自動化され、陸上基地から遠隔制御することができる。緊急用を除く電力も陸上の発電機から海底ケーブルで各基地に送られる。

海底パイプの布設方法には

- ① 海底引出布設法 (Bottom pull method)
- ② 浮上曳航沈設法 (Floating method)
- ③ 巻取パイプ布設法 (Reeled pipe method)
- ④ 布設船沈設法 (Laybarge method)

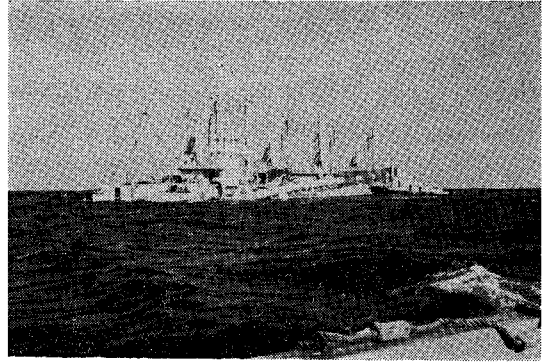
の4つがあって、条件に応じて各工法の特徴を生かして工事が行なわれる<sup>9)</sup>。ある程度大口径、長距離、大水深になると、専用の布設船(写真—5)が用いられることが多い。この工法の欠点の一つは、布設前にパイプの漏れ検査を実施できないことで、溶接継手の検査に大きな配慮が払われる。布設工事中のパイプ曲げ応力を小さくするために、さまざまな工夫が払われている。

- ① 布設船にトリムを与える。
- ② 管の水中重量を小さくする。
- ③ ステイナーと称する斜路を用いる。
- ④ 管に張力を加えて曲率半径を大きくする。
- ⑤ 特殊なポンツーンを取り付ける。

海底管布設工事には経験的な要素が非常に大きい。布設中の応力解析も今後に残された問題である。海底パイプには、防食塗装のほかに加重被覆としてコンクリート外装がしばしば用いられる。布設されたパイプは海底土中に沈下しない程度に軽く、かつ土の液性限界比重より大きくなければならない。局所的な洗掘等によって沈下すると、大きな張力を受けるおそれがある。海底パイプの補修には多額の費用と長期間の休転をとまらうから、十分な安全性が要求される。

布設船による布設速度は自然条件によって異なるが、最近行なわれた深い水域における工事記録から抜き出す

写真—5 第2 あんぜん丸  
(日本鋼管(株))



表—3 海底パイプ布設工事例

地点名	布設水深 (m)	延長 (km)	口径 (in)	常設速度 (m/日)
ベルシャ湾 Mina Al Ahmadi 沖	30	16	48	730
	30	16	20	2 100
ベルシャ湾 Sassan 油田	102	140	22	1 600
北海 West Sole 油田	30	62.5	16	930

と表—3 のとおりである。

## 6. 将来の展望

最近の技術進歩によって、油田開発は沖合の地域にまで拡大している。油井の海底仕上げ技術は現在すでにカリフォルニアの Caliente, Molino 両ガス田の水深 80 m の地点で実用に供されているが、水深の大きな地域でますます多く用いられるようになるだろう。坑井サービスや坑内諸測定は、作業船から立上がりパイプを立てて海上で操作できるようにするか、ワイヤーラインの代わりに、Pump down through tubing tools などの特殊な技術を用いなければならない<sup>6)</sup>。海底にある坑口装置の遠隔制御技術も、原子力を動力に使い、音波信号で制御する方法などが開発されようとしている。

採取基地や集油基地は、おそらく水深 180 m 程度まではプラットフォームの上につくるのが経済的に有利であろう。120 m から 180 m の水深に対する試設計がすでに進められている。

しかし、陸地から遠距離の場合は海上に貯油施設や積出施設を設けることが有利になる。ルイジアナ沖の水深 40 m に建設された海上貯油タンクやベルシャ湾 Fateh 油田の水深 39 m に建設中の海底貯油タンクはこの例である。Futeh 油田は Dubai 沖 104 km にあって3つの採取基地に集められた原油は容量 8 万 kl の海底タンク 2 基に貯えられ、直接タンカーに積出される。その他、海洋貯油ステーションには一点繫留タンカーや、半潜式円筒構造を用いる方式、PCコンクリート製貯槽を沈設

する構想もある。

将来さらに水深が増すと採取基地や集油基地も海中に設けざるを得なくなるだろう<sup>7)</sup>。水中にプラットフォームがつくられ、潜水作業可能水深に装置が設けられる。

水中作業技術の開発が重要になっている。坑井サービス用機器、水中構造物の検査機器、水中可搬式測深器、水中用ラジオビーコン、水中テレビが開発されている。潜水技術の進歩にあわせて潜水作業用の気密室やさまざまな水中作業機械の試作研究が進められている。

## 7. おわりに

海洋石油開発の進展に対応するための国内技術整備の重点は、まず物理探鉱技術と移動式掘削装置、ついで海洋構造物、採取施設にある<sup>8)</sup>。これには石油鉱業の経験技術とともに広く関連産業の技術の総力を結集することがさしせまって必要とされる。同時に早急に海洋開発技術相互の関連、位置づけを明確にして体系的な技術開発

を進める必要がある。海洋油田開発が既存の諸技術の適用だけでなく、広汎な諸科学の成果を不可欠とする新しい段階に直面するのは間近いことと思われる。

## 参 考 文 献

- 1) オーコンナー：石油帝国，岩波書店
- 2) 石油開発公団：海外石油開発計画基礎資料，石油の開発，Vol. 1, No. 2, 3 1968年8月
- 3) Griff C. Lee：Offshore structures, past, present, future and design conditions, Offshore, June 5, 1968, p. 48
- 4) 石油資源開発株式会社・運輸技術研究所：海洋構造物に関する二、三の問題，昭36年
- 5) M.J. Lamb：Underwater pipelines, Transactions of the 2nd annual MTS conference, Marine technology society, June 27-29, 1966, p. 293
- 6) 田中修：坑井の海底仕上げについて，石油学会誌第10巻，第10号 p. 32)
- 7) What industry is doing to solve deep water production problem, World oil, July 1968, p. 96
- 8) 通産省鉱山石炭局開発課：海洋石油開発における技術開発について，昭43年9月18日

## ＊土木工学叢書

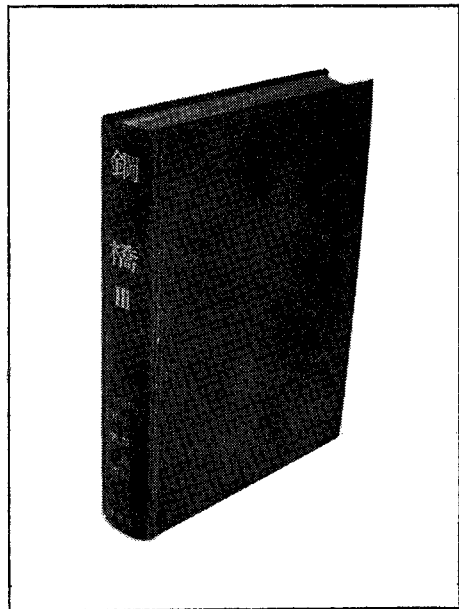
# 新版 鋼 橋 Ⅲ

平 井 敦 著 (東大教授・工博)

監修 土木学会 B 5・876 頁 定価 5,500円

本書は第Ⅰ巻において、すでに好評を博した鋼橋の続刊であり、著者のもっとも専門とするところのローゼ桁、吊橋について、著者多年の研究、諸外国の文献、研究をもれなくとりあげ、これにいちいち懇切な解説を加えたもので、今回、吊橋の耐風性、鉄道吊橋、長大吊橋など最新の研究成果を盛りこみ全面的に改訂した新版

【主要目次】ローゼ桁汎論／補剛アーチ橋の設計／ローゼ桁計算例／ランガー桁およびランガートラス／吊橋の概説／ケーブルとその定着／吊橋の弾性理論／吊橋の撓度理論／吊橋の固有振動／吊橋の耐風性／小吊橋の設計／長大吊橋の設計／アーチの座屈 橋梁力学と行列



技 報 堂

東京都港区赤坂1-3-6 (郵107) TEL. (584) 4786・振替東京10