

深戸橋梁架替工事報告

前田紘道*¹ 坂井正尚*² 麦谷信輝*² 黒崎達雄*³ 江川定利*⁴

1. まえがき

本橋は国鉄磐西線が日出谷・鹿瀬間で阿賀野川を渡る支間 90.67m の曲弦単純ワーレントラス(単線)で、建設後70年を経て老朽化が著しいため、架替えられることになったものである。

この種の架替工事は多くの実績があり、我社においても支間が300ft級のトラス橋梁では、中央西線の第1木曾川橋梁、第1北上川橋梁がある。これ等の橋梁の架替工事においては、いずれも、桁更換は新旧橋を同時に横取りする工法で行なわれており、今回も実績と経験のある工法を採用しておけば安全確実であると考えられた。

しかし、本橋の架設地点は桁下空間が大きく、ベント、横取り設備が大規模となり、従来から行なわれてきた工法の採用では工費が高くなるため、少しでも設備を少なくして安く架替えが出来ないものか色々検討を行なった。

その中で、旧橋を河川中に引き落しただちに新橋を所定位置に横取りする活線架替が可能か否か検討することとなった。

今までにも古い橋梁を撤去する方法として、引き落とし工法は国鉄でもかなりの数の実績があるが、活線における桁更換工事としては初めての試みで、種々の問題を解決せねばならなかった。

まず第一に引き落とし時、橋脚を損傷もしくは破壊する



写真-1 旧桁架設状況

*1 横河工事・工事本部工務部技術課長 *2 横河工事・工事本部工事部主任専門員
*3 横河工事・工事本部工事部課長補佐 *4 横河技術情報・システム第1部開発第1課

恐れがあること、第二に水量が多い河川中より如何なる方法で橋体を引き揚げ解体するか、また、今までに200^{ft}級の橋梁の引き落とし撤去例はあるが、本橋のような300^{ft}級のもののは初めての試みであるなど、全てにおいて未知な面が多く、困難な問題が山積していた。

そこで、引き落としについては、落下時の軌跡が如何なるかを当社 SSC の大型コンピュータを使用して解析することに着手するとともに、落下後の水中解体についてはサルベージ会社数社の協力を得て検討したもので、ここでは主として旧橋の引き落としと河川中よりの橋体撤去について、その検討過程から実際施工までを通して報告したい。

2. 工事概要

工 事 名：磐西線日出谷・鹿瀬間

深戸Bけた更換他工事

工事場所：新潟県東蒲原郡鹿瀬町深戸

工 期：自 昭和58年4月1日

至 昭和59年3月31日

企 業 者：日本国有鉄道信濃川工事局

工事内容：深戸Bは磐西線日出谷・鹿瀬間の阿賀野川に架かる、支間90.67mの単純シュウエドラピントラス(鋼重約440^t)であり、このたび、老朽化に伴って新橋に架替えられた。

本工事は下記の三段階で施工された。

- (1) ケーブルクレーン直吊工法による新桁組立工事
- (2) 活線横取工法による新・旧桁更換工事
- (3) 水中切断及びウインチによる旧桁引き揚げ解体工事

本文は桁更換工事及び旧桁引き揚げ解体工事に着目して報告する。

3. 旧桁撤去工法の選定

3.1 施工条件

3.1.1 地形

工法選定に先立って、水深・流速・河床状況などの綿密な河川調査を行なった。(図-2)

- (1) 桁下は P₆付近の一部を除いて水深4～12mの流水部で、流速は最大1.6m/secである。
- (2) 地盤は左岸側が灌木の点在する畑地であり、右岸側は岩盤が露出している。流水部河底は砂れき層および岩である。
- (3) 水面から桁下端までの高さは約12mである。

3.1.2 架替時の制約

- (1) 旧桁撤去・新桁架設の全ての作業は、約10時間の線路閉鎖間合内に完了する。
- (2) 両側経間トラスおよび橋脚は引き続き使用するの

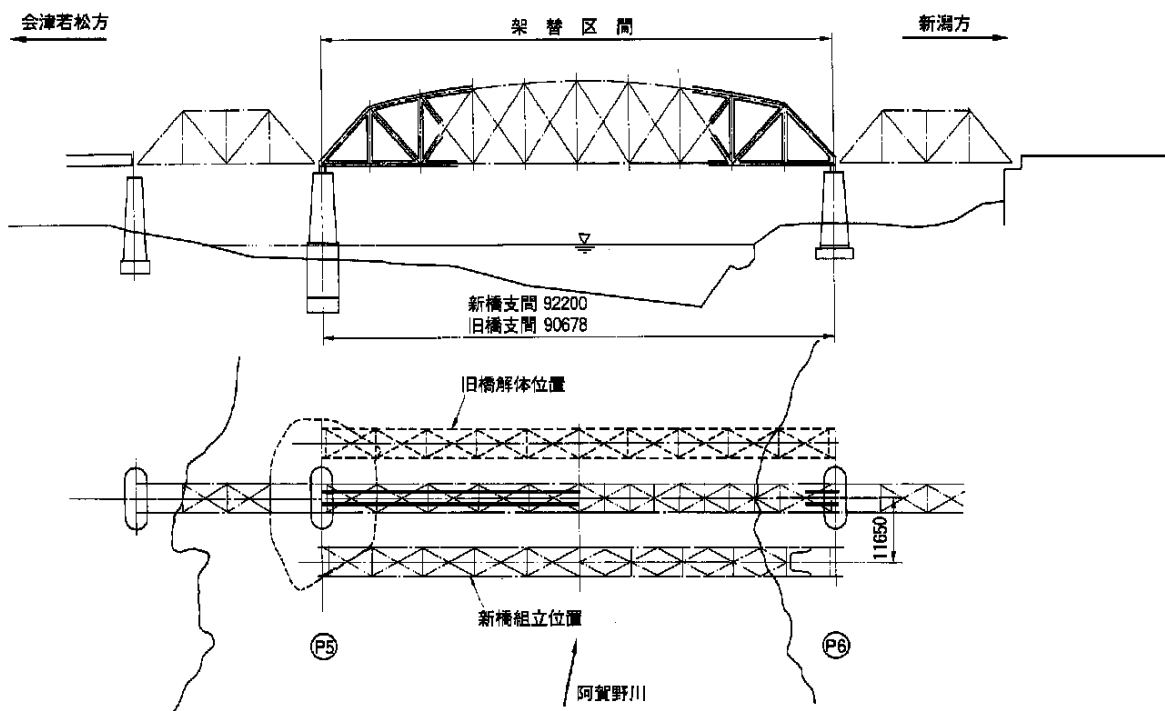


図-1 一般図

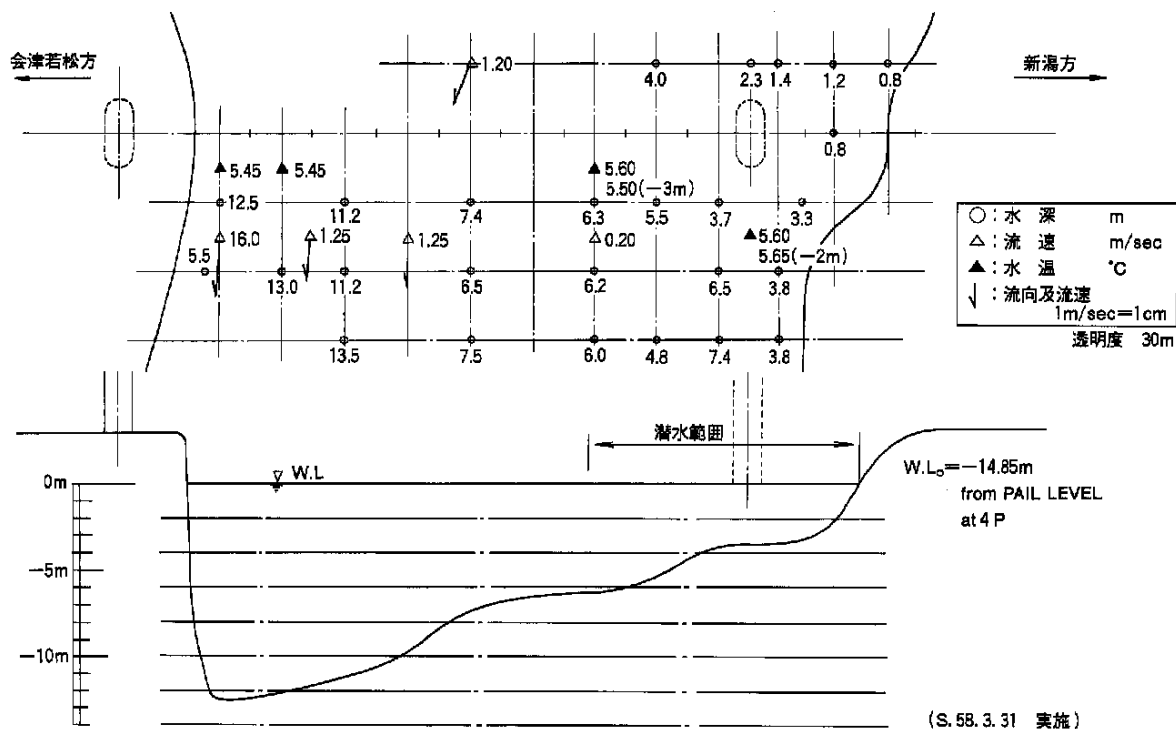


図-2 河川調査図

で、一切損傷してはならない。

- (3) 架替時期は濁水期とし、昭和58年11月20日と決定された。

3.1.3 その他

- (1) 河川内に設けた仮設構造物等の障害物は全て濁水期内に撤去・搬出し、河川内に残してはならない。
(2) 旧桁は廃材として処理する。

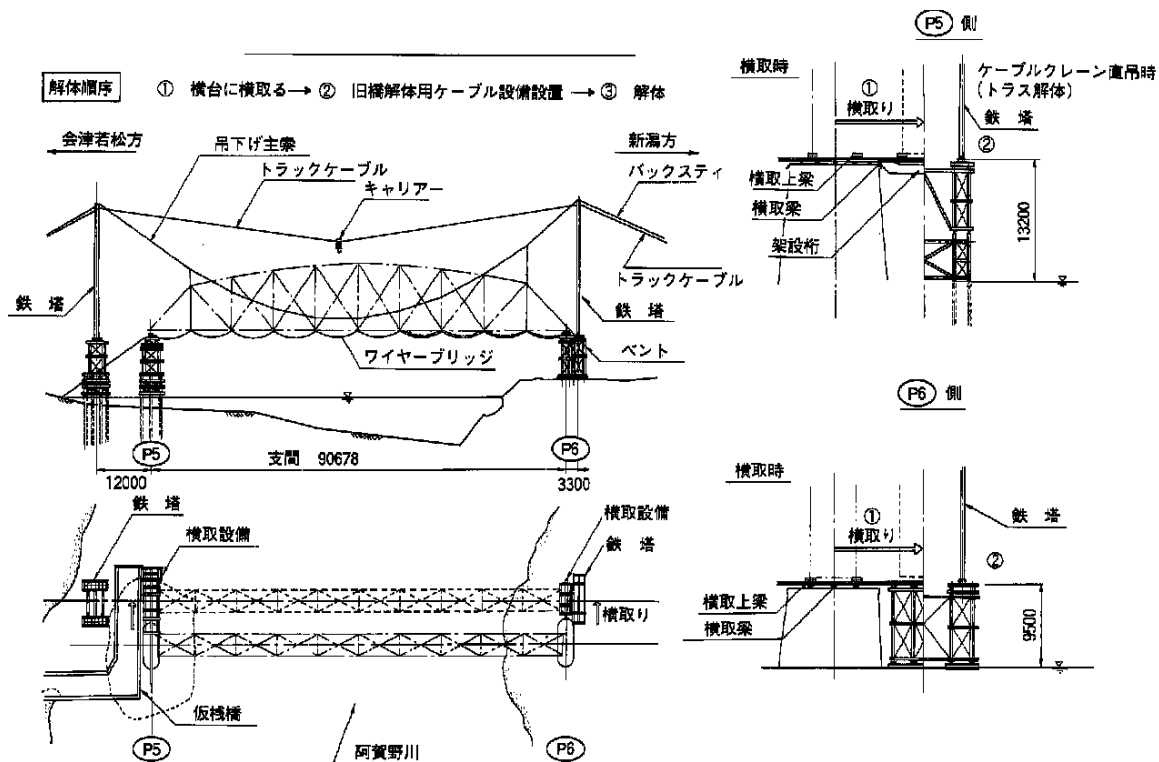


図-3 旧橋解体要領(第1案)

3.2 工法の検討

3.1に記した条件より旧橋の撤去・解体工法として、下記の4案を選定した。

(第1案) ケーブルクレーン直吊工法(図-3)

構台に横取った後、新桁組立と同様、ケーブルクレーンによる直吊工法で解体する。

(第2案) ポンツーン工法(図-4)

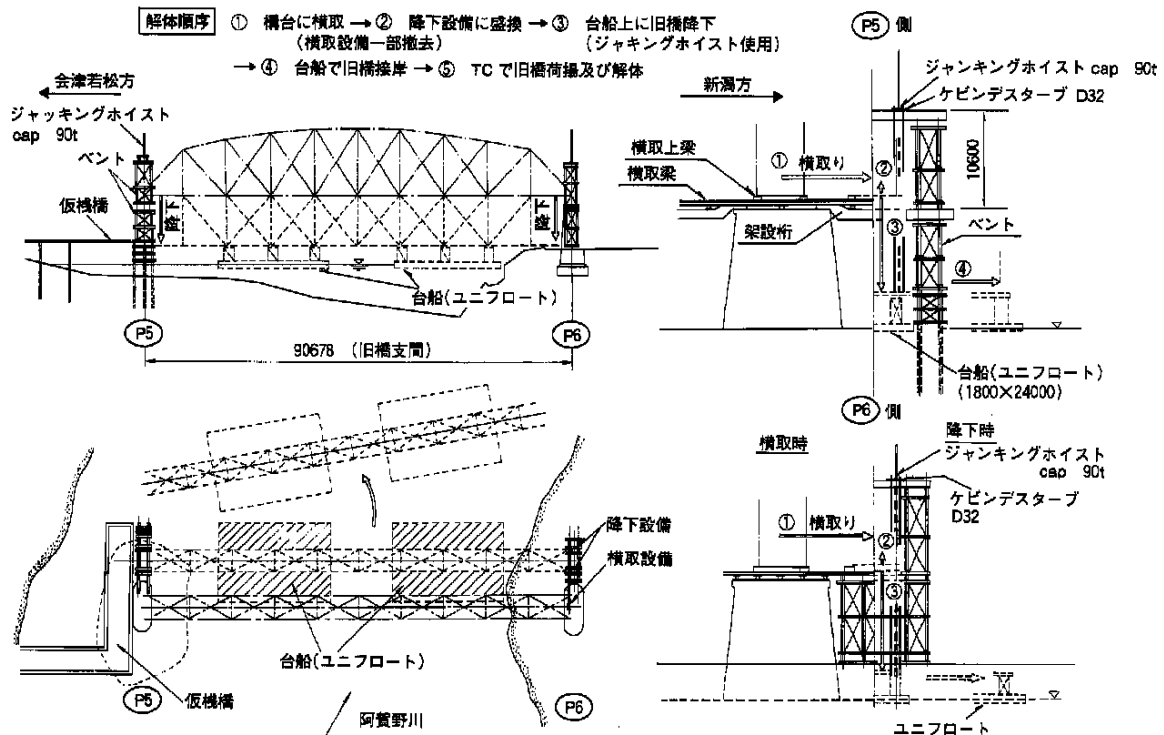


図-4 旧橋解体要領(第2案)

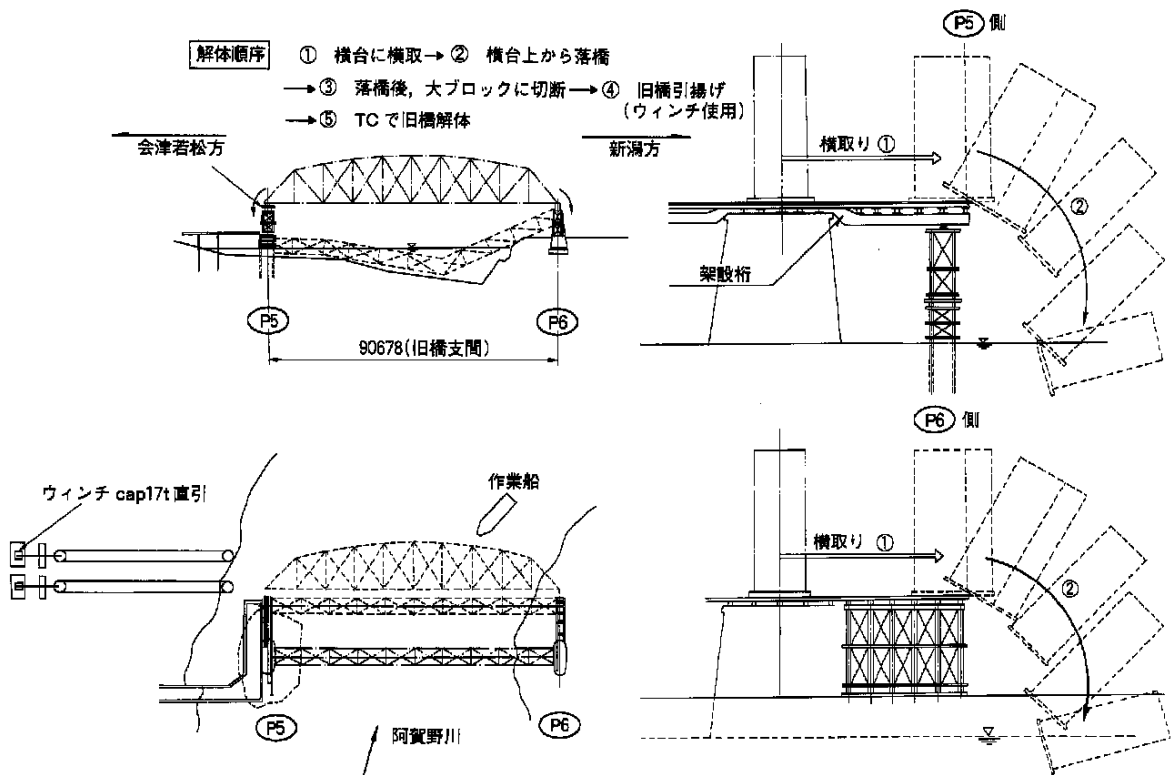


図-5 旧橋解体要領(第3案)

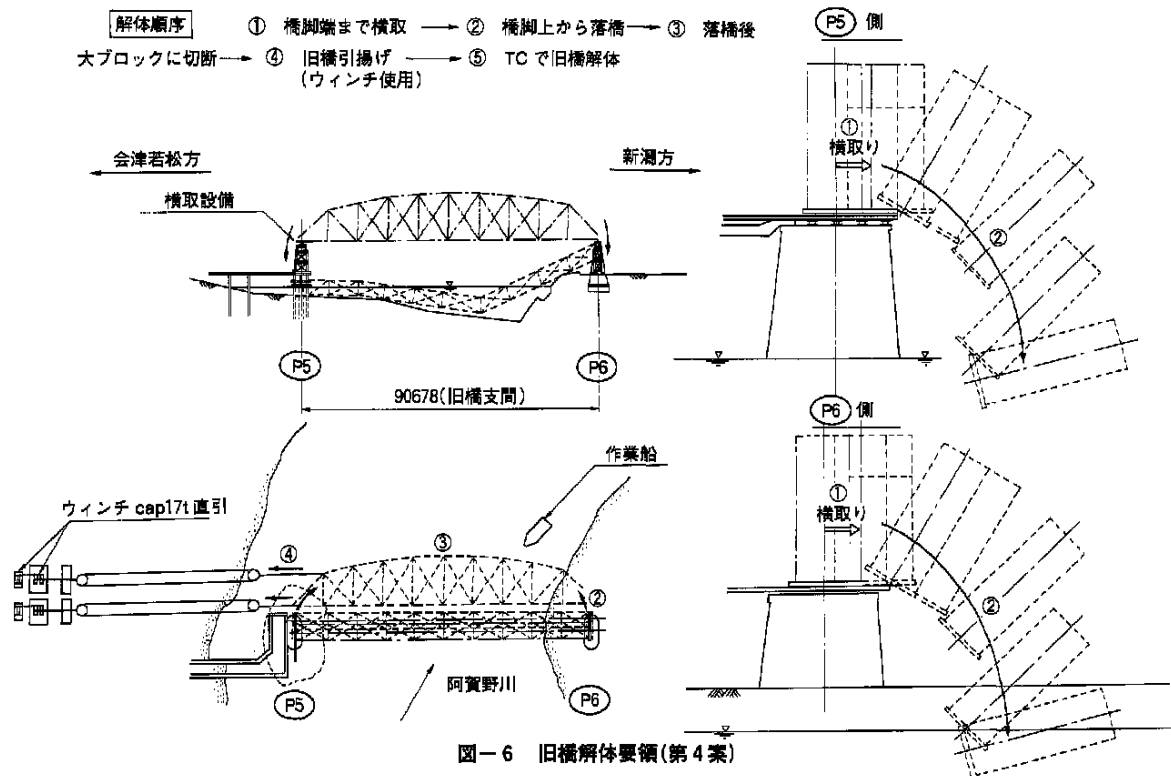


図-6 旧橋解体要領(第4案)

表-1 深戸橋梁・旧橋撤去工法比較検討表

	工 法 概 要	設 備	現場工期 (第4案を1とする)	経 済 性 (第4案を1とする)	長 所 短 所
第 一 案	(1)横取りによる活線架替 (2)ケーブルクレーンによる直吊工法で解体	(1)横橋(幅6m×24m) (2)横取構台(75t) (3)ケーブルクレーン設備 (支間106m cap3×6t) (4)吊下げ設備 (支間106m 吊下げ総重量430t) (5)クローラクレーン (cap40t)	6ヵ月	(2.07)	●施工実績もあり、技術的に確立された工法である。 ●新橋組立器材を再使用できる。 ●活線架替時の不安なし。 ●設備が大規模であること。 ●新橋組立と同等の工期・工費を要する
第 二 案	(1)横取りによる活線架替 (2)クローラ台船で軌条及び緩衝を撤去し鋼重軽減 (3)降下設備を設け、旧橋を台船上に降下 (4)台船を接岸し、地上よりクローラクレーンを用いて解体・搬出	(1)横橋(幅6m×24m) (2)横取構台(75t) (3)降下設備(50t) (ジャッキングホイスト使用) (4)組立式台船(2×110t) (5)台船上支保工(50t) (6)クローラクレーン (cap40t)	5ヵ月	(1.20)	●活線架替時の不安なし。 ●解体作業が容易 ●設備が大規模である。 ●流速が速いため操船が難しい。 ●地形上台船上にステージングを組む必要があり、やや不安定。
第 三 案	(1)横取りによる活線架替 (2)横取構台上から引落し工法によって河川に落橋 (3)適当な大きさに水中切断し、ウィンチにより陸上に引揚げ (4)クローラクレーンを用いて解体・搬出	(1)横橋(幅6m×24m) (2)横取構台(30t) (3)水中切断設備(1式) (4)作業船(1隻) (5)引揚げ設備(1式) (6)クローラクレーン (cap40t)	4ヵ月	(1.25)	●活線架替時の不安なし。 ●引落しに十分な準備作業が行なえる。 ●橋脚・側桁間トラスを損傷する危険がない。 ●落橋後の解体作業に不確定要素が多い。 ●第4案と比較して、横取構台の工事費に比する比重大。
第 四 案	(1)橋脚上から直接引落し工法によって河川に落橋(落橋後横取りによって新橋架設) (2)適当な大きさに水中切断し、ウィンチにより陸上に引揚げ (4)クローラクレーンを用いて解体・搬出	(1)横橋(幅6m×10m) (2)引落し設備(10t) (3)水中切断設備(1式) (4)作業船(1隻) (5)引揚げ設備(1式) (6)クローラクレーン (cap40t)	3ヵ月	(1.00)	●設備が最も少なく、工期も短い。 ●引落しの準備作業に大きな制約を受ける。 ●橋脚・側桁間トラスの防護の必要あり。 ●落橋後の解体作業に不確定要素が多い。

構台に横取った後、旧桁を組立式台船上に降下して所定の解体場所まで曳航・接岸し、地上よりクローラークレーンで解体する。

(第3案) 横取・落橋工法(図-5)

構台に横取った後、構台上より河川中に引き落とし、水中で適当な大きさに切断して解体する。

(第4案) 直接落橋工法(図-6)

構台を設けず、橋脚上より直接河川中に引き落とし、水中で適当な大きさに切断して解体する。

上記各案について安全性・工期・経済性・実績等を比較検討した結果、確実な落橋を行なえば、第4案が工期・経済性の面で最も優れているとの結論を得た(表-1)

3.3 落橋方法の選定

橋脚上からトラス橋を落橋させる方法としては、転倒・引き落とし・爆破などの工法が考えられ、いずれも過去に実施例がある。

『転倒工法』は、現状のまま鉛直ジャッキおよびウインチを用いて直接転倒・落橋させる工法で、山陰本線鐘打沢橋梁や会津線第三大川橋梁など、重心の高い上路トラスの解体に採用されている。

『引き落とし工法』は、橋桁をこう上してコロに乗せ、ウインチで横引き・落橋させる工法で、北陸本線庄川橋梁や鹿児島本線遠賀川橋梁など、下路トラスの解体に多く採用されている。

『爆破工法』も、最近ではS.P.Cなど一般の工業用ダイナマイトと比較して安全・確実に鋼板の切断が可能な火

薬をトラス橋の撤去などに多く使用している。しかし、爆風の危険や爆破音などのため使用場所に制約を受けると共に、活線架替工事では準備作業が困難である等の問題がある。

以上に述べた各工法の特徴から、深戸橋梁の橋梁形式・施工条件には引き落とし工法が最適であると考えられた。

しかし、ウインチを使用しての引き落としでは、地形の都合上アンカー位置が遠くなり、ワイヤの繰込みが困難であるばかりでなく、ワイヤ長が長くなるためおろしやしゃくりの状態になり、 P_5 ・ P_6 橋脚上での移動量や速度が不揃いになる可能性がある。そこで、本橋の横引き装置としては長ストロークの油圧ジャッキを用いることとした。

また、コロやスチールボールでは落橋直前の反力に対して強度不足になるので、横取り下梁と上梁は面接触させることにした。

さらに、電算機を利用して桁の落下中の挙動・軌跡を解析し、落下状態および落下地点を推定すると共に、橋脚等に衝突することがないことを確認した。

こうした検討を経て、油圧ジャッキを用いて旧桁を横取り、落橋させ、ひきつづいて新桁を横取りして、新・旧桁の更換を短時間に行なうという初めての試みが実行されることになった。

4. 旧桁の撤去工法

4.1 施工概要および施工順序

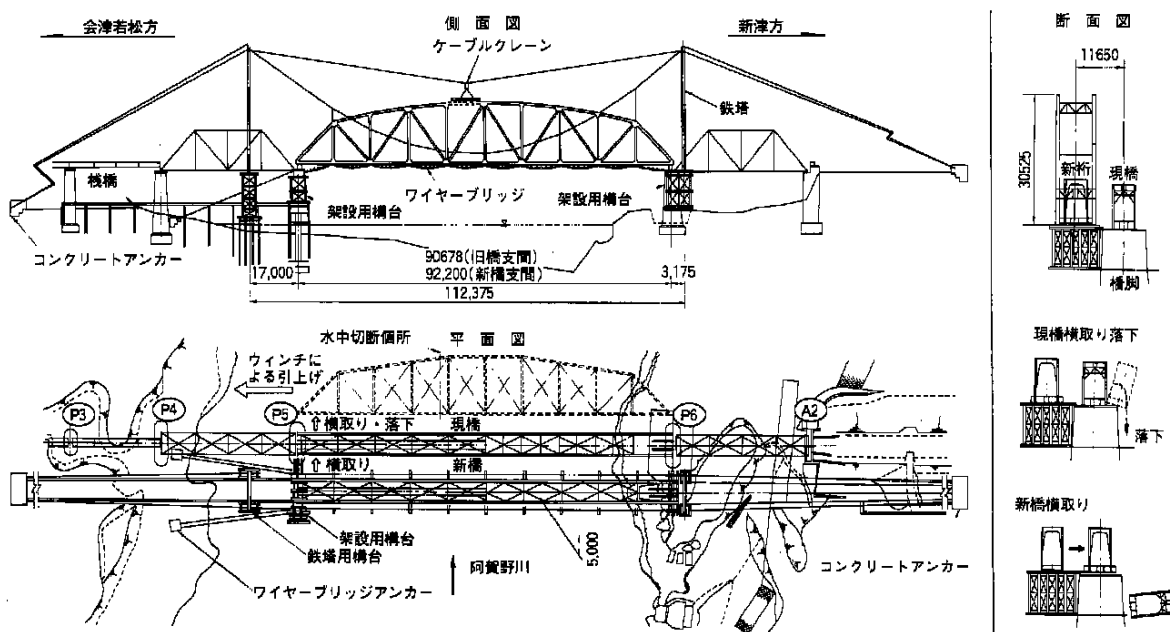


図-7 施工要領図

図-7 施工要領図に示すように、P₅側に搬入路および棧橋を設け、P₅・P₆橋脚上流側に新桁の組立用構台を設けて、ケーブルクレーン直吊工法で新桁の組立てを行った。

架替工事は、旧桁を油圧ジャッキにて横押しして橋脚端より落下させ、その後新桁をセンターホールジャッキにて横取りする工法を用いて架替えを行なった。

旧桁の河川中よりの撤去は、トラス中央付近を酸素アーク工法による水中切断と水中発破により2分割し、ウインチにより一括引揚げを行ない、陸上で更に小部材に切断・搬出した。

表-2に工事施工のフローチャートを示す。

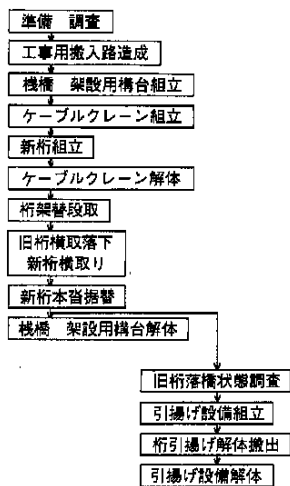


表-2 工事施工フローチャート

4.2 活線横取架替工法

4.2.1 新旧桁の更替

旧桁を横取り落下させる工法を計画するにあたり、特に留意した点は下記の通りである。

- (1) 旧桁落下状況(軌跡・落下位置など)の推定。
- (2) 横取り落下方法の安全性
- (3) 更替工事の作業時間工程。

旧桁落下時の軌跡や落下位置を予知することは、旧桁落下時の安全性、橋脚に与える影響および、河川中に落下した旧桁の引揚げ方法を検討する上で是非とも必要であった。そこで本工法の実施計画に先立って、模型による落下実験と、5項に述べるような電算機を利用した桁落下のシミュレーションを行なった。詳細は5項に記すが、この結果、橋脚に衝突する可能性は極めて低いことおよび、桁の落下位置を概ね推定することが出来た。

(2)については、落下直前の荷重の集中とシミュレーションによる桁落下時の挙動(橋脚端と桁との摩擦係数を変化させた場合の検討結果)を考慮すると、摩擦抵抗

の少ないコロガリ摩擦より、摩擦抵抗の多いスベリ摩擦による横取りの方が本工法に適していると判断し、横取り梁の上を角鋼を介して旧橋を横押しし、すべらせて落下する工法を採用した。

横押し設備には、作業性と安全性を考慮して長ストローク $l=1150\text{mm}$ 、Cap100^tの油圧ジャッキを使用し、桁端部には落下直前の集中荷重に耐えられる端部補強桁を剛結した。

横押し時の滑り面の摩擦係数は、過去の鋼と鋼の面圧と摩擦係数の実績(減摩剤塗布)から $\mu=0.2$ と推定し、横押し用油圧ジャッキの能力は下記の計算値から決定した。

$$R = \mu \cdot k \cdot N = 0.2 \times 1.3 \times \frac{460}{2} = 60\text{t} < 100\text{t}$$

R ; 摩 擦 力

k ; アンバランス係数

N ; 荷 重

表-3に横取り時の摩擦係数(実績)の値を示す。この表で推定値 $\mu=0.2$ より高い数値を示しているのは、滑り面の不整合と面圧の不均等によるものと思われる。

表-3 横取り時摩擦係数値

位 置	重 量	P ₅		P ₆	
		227t		220t	
横取回数	押出し量	反力(t)	摩擦係数	反力(t)	摩擦係数
1 回	1,125	34~43	0.15~0.19	37~62	0.18~0.30
2 回	1,075	—//—	—//—	57	0.27
3 回	1,100	—//—	—//—	62~70	0.3 ~0.33
4 回	1,200	—//—	—//—	57~62	0.27~0.30
5 回	670				

図-8に旧桁横取り要領図を、写真-2に横押し用油圧ジャッキによる旧桁横押し作業状況を示す。

活線横取り架替工法において最も重要なのは、(3)の作業時間工程である。

従来の活線横取り架替工法は、新旧桁を仮連結し同時にウインチで横取り、架替える工法で行なわれてきた。本工法では旧桁を油圧ジャッキにより横押し、落下させた後、あらためて新桁横取り設備を設ける必要があるために、事前に出来る横取り準備には限度があり、どうしても当日作業が多くなる。そこで当日作業を少しでも容易にするため、新桁横取りにも油圧ジャッキ(センターホールジャッキ Cap20^t、ストローク1000mm/m)を使用することにした。新桁横取り要領図(図-9)に示すように、滑り面には従来実績のあるスチールボールを使用し、テンションバーにはゲビンデスターブ(26φ)を用いて横取りを行なった。写真-3は新桁横取り作業状況である。

新旧桁更替作業は、昭和58年11月20日早朝より、約10

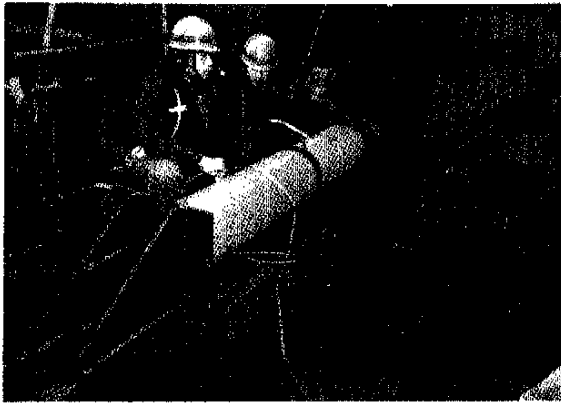


写真-2 推進用ジャッキ (cap100t) により旧桁横押作業

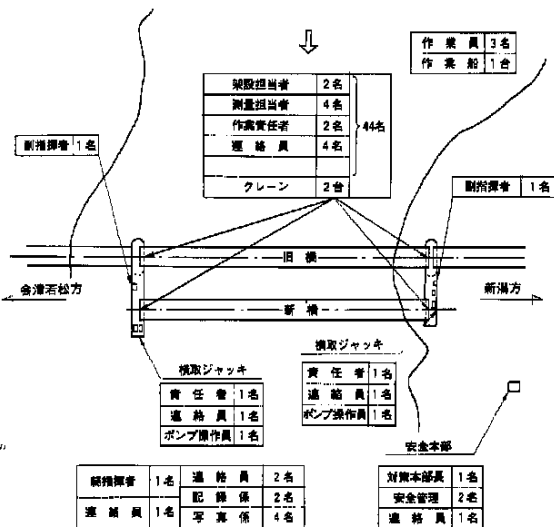


図-10 桁交換人員配置図



写真-3 新桁横取作業

表-4 新旧桁交換作業時間実施工程表

名 称	数 量	7時	8時	9時	10時	11時	12時	13時	14時	15時
		15分 30分 45分	15分 30分 45分	15分 30分 45分	15分 30分 45分	15分 30分 45分	15分 30分 45分	15分 30分 45分	15分 30分 45分	15分 30分 45分
軌道工事		3分								
		7:16 7:47								
旧橋		14分								
		7:16 7:30								
ジャッキ up・横取梁取付 (P6)	(P6)	12分								
		7:47 7:59								
ジャッキ up・横取梁取付 (P5)	(P5)	17分								
		7:59 8:16								
推進ジャッキセット (P6)	(P6)	34分								
		7:59 8:33								
推進ジャッキセット (P5)	(P5)	22分								
		8:37 8:44								
横取り(1回目)	横取り量 (P6) 1120	2分								
		8:44 8:46								
横取り(2回目)	横取り量 (P5) 1130	2分								
		8:46 8:48								
横取り(3回目)	横取り量 トータル2,200	3分								
		8:51 8:57								
横取り(4回目)	横取り量 トータル3,300	3分								
		8:57 9:00								
横取り(5回目)	横取り量 トータル4,500	5分								
		9:00 9:05								
手摺り付け・下管撤去(上流)		8分								
		9:19 9:27								
横取り設備撤去・足場取付										
下管撤去・横取梁取付(下流)										
横取り (横取り量 5,000)	P5側管セット 時間含む	37分								
		12:41 13:18								
横取り (横取り量 5,350)		37分								
		13:18 13:55								
ジャッキ up		5分								
		13:55 14:00								
上梁・ガイド撤去、仮管組立										
ジャッキダウン、調整、片付け										

4.3 旧桁の撤去・解体工法

4.3.1 落下状況調査と撤去・解体工法の選定

旧桁落下後、桁撤去工法検討のため桁落下状態及び河川状況の調査を行ない、問題点を把握した。調査結果(図-11)より。

- (1) P_6 付近は岩盤がセリ出しており、落下時最初に当たった部分は岩盤にそって破壊変形している。
- (2) トラスの上弦材は B-B 断面まで着床しているが、下弦材は何床から離れており、 P_5 側端部と最も損傷の激しい P_6 側岩盤部分で支持されている。
- (3) P_5 側端部は河床の砂れき層に突き刺さっており、引揚げようとする場合抵抗がかなり大きくなること

が予想される。

- (4) B-B 断面から P_6 側は流速が速く潜水作業は不可能である。

以上の点および作業ヤードのスペースを考えると、 P_6 側より P_5 側を基地としての引揚げが安全確実であると判断し計画を進めた。

引揚げ方法は、まず河床より離れている下弦材の B-B 断面を水中発破で河床におちつかせ、その部分をさらに酸素アーク切断(水中部)とガス切断(水上部)を併用してトラスを2分割し、ウインチにより P_5 側基地まで大ブロックで引揚げ、陸上部でトラック運搬が可能な部材に切断して搬出した。

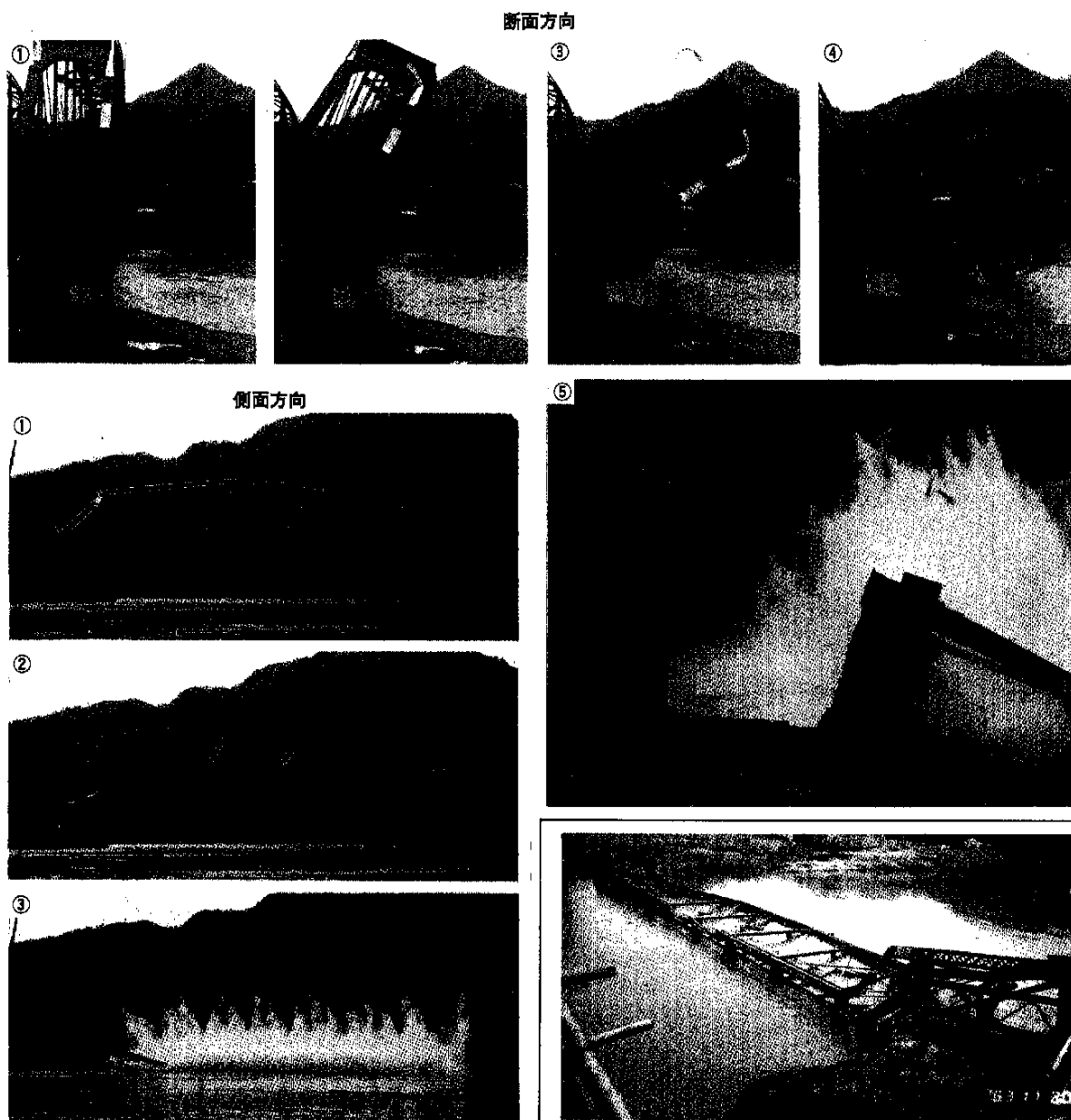


写真-4 落下時連続写真

写真-5 落下状況

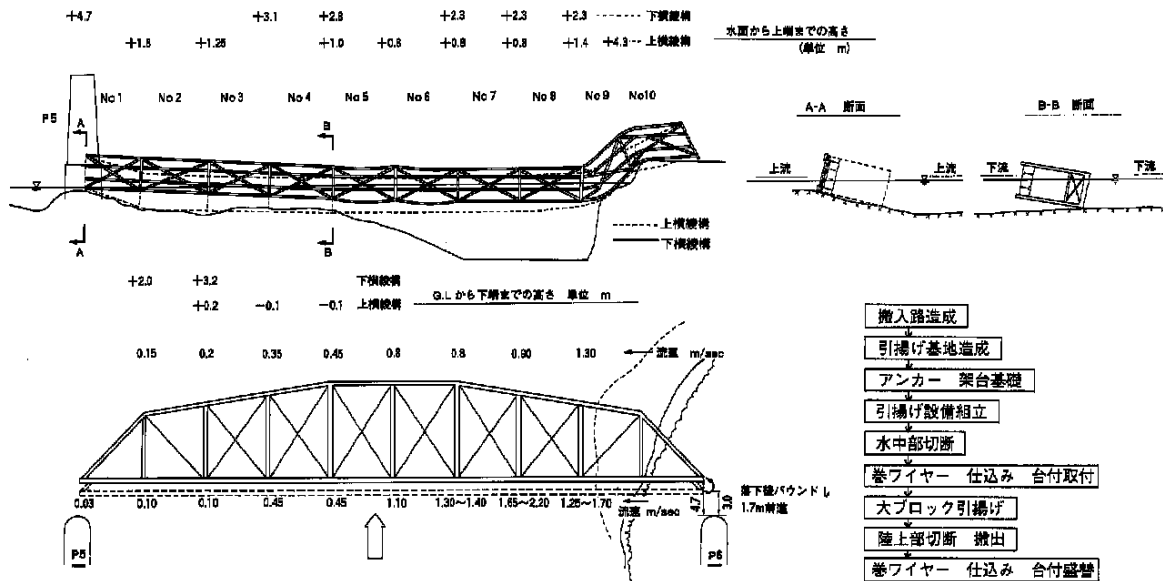


図-11 旧橋落下状態調査図

4.3.2 旧桁の撤去要領

引揚げ作業は表-5の引揚げ作業フローチャートの手順で行なった。

(1) 引揚げ係数(引揚げ力/引揚げ物重量)の決定

引揚げ設備を計画するにあたり、引揚げ力を決める引揚げ係数を推定する必要がある。推定するための要因として

- ① 沈没船・難破船などのサルベージ作業時の引揚げ係数は経験的に1.1~1.4を採用している。
- ② 地表面が傾斜しているので桁引揚げ時に土砂を一

緒に引揚げてくることによる引揚げ係数の増大が予想される。

- ③ P₅側端部が河床に突き刺さっているための引揚げ係数増大が予想される。

表-5 桁撤去工事フローチャート

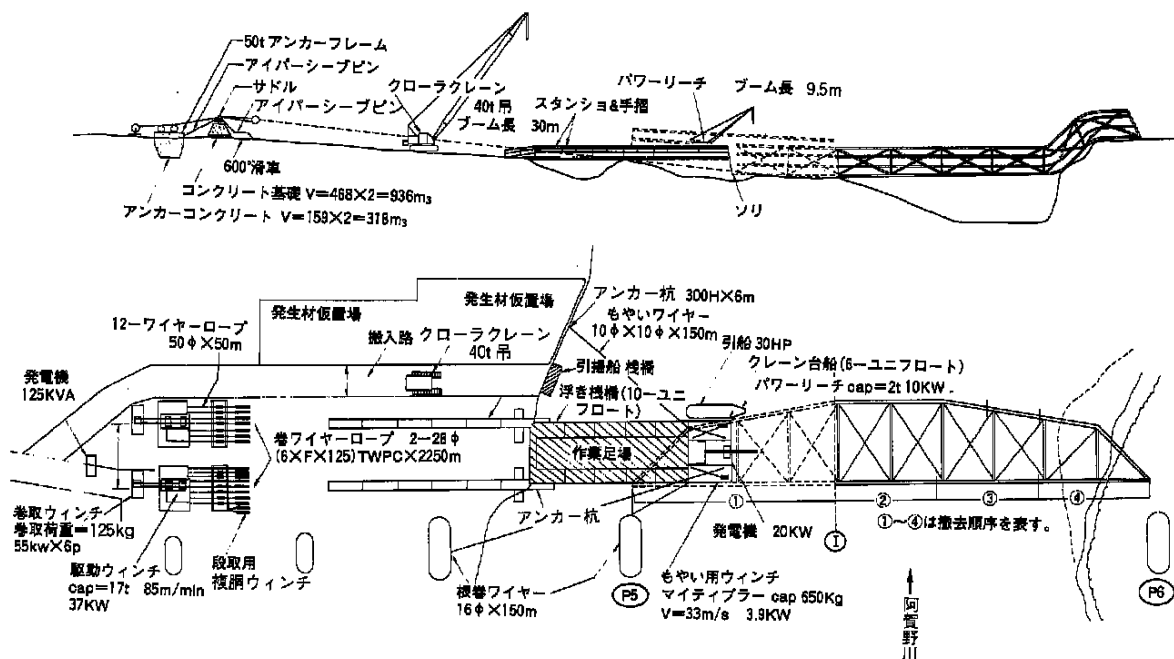
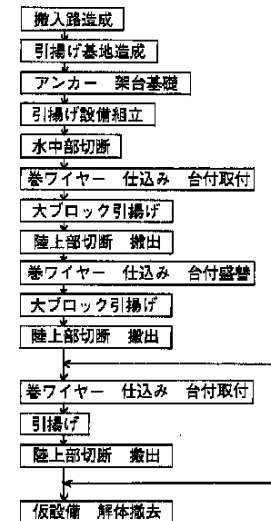


図-12 引揚げ設備図

④ P_6 側端部が河川内に落下する時、引揚げ設備に大きな衝撃が加わることが予想される。

以上の点を考慮し、引揚げ係数 $f = 1.5$ として

$$\text{引揚げ力 } P = 240 \times 1.5 = 360$$

を用いて引揚げ設備を計画した。

桁引揚げを実施した時に、ワイヤ尻手に取付けたロードセルとウインチの電流計の値から推算すると、障害物のない場合の引揚げ係数は $f = 0.4 \sim 0.6$ 位であり、土砂などの障害物を一緒に引揚げた時は $f = 1.5$ 以上になったと推算できる。

(2) 引揚げ設備

引揚げ設備は図-12のとおりである。

引揚げ用ウインチは巻ワイヤ長が長いことと直引力が大きいことから、特殊駆動ウインチ (Cap17^ト) と巻取りウインチを各々2台使用した。アンカーはコンクリートアンカーで、引揚げ方向を高くするためにアンカーの前にコンクリート基礎の架台を設けた。

河川内には台付け取付け用などの目的でクレーン船 (ユニフロート上にパワーリーチ Cap2.0^トを搭載) を使用し、滑車の繰込みや台付け取付け作業用足場として、組立式台船を使用した。



写真-6 引上げ設備

(3) 水中作業

落下した旧桁は下弦材が河床より離れているため、潜水工による水中切断は危険であると判断し、下弦材を河床に着けるため水中発破で着底させた後水中切断を行った。

図-13に水中切断位置を示す。

① 水中発破

水中発破に際しては、活線近接作業であり周囲に民家があるので、事前に実験発破を行ないその安全性を確認した。実験発破は縦桁ウェブの約半分にダイナマイトを着装して行なった。使用火薬は少量で爆速が速い新桐ダイナマイトを使用し電気発破を行なった。火薬量は

$$P = A \times C = (13.8 \times 1.4 \times 2 + 50 \times 1.3) \times 26 = 2693g$$

P : 火薬量 (g)

A : 切断断面積 (cm^2)

C : 係数 (g/cm^2)

より算出し、 $P = 2.5\text{kg}$ 使用することにした。ダイナマイトは図-14に示すようにセットした。

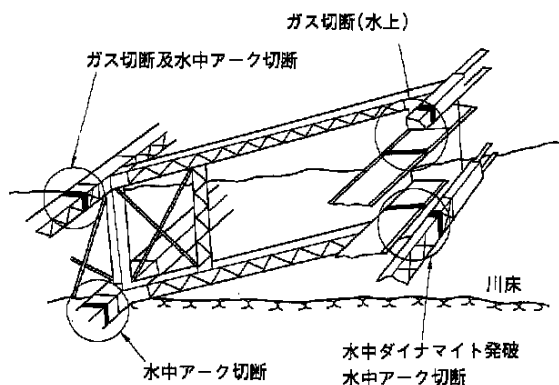


図-13 水中切断位置図

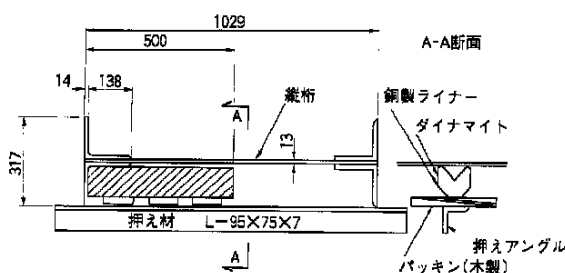


図-14 ダイナマイト取付要領図

その結果

- (イ) 発破時衝撃波により約8mの水柱があがった。
- (ロ) フランジ上面に亀裂が入ったが、ウェブ面はなべ底のようにふくらんだだけで切断できなかった。
- (ハ) 河床より2.0mあった桁の離れが、0.7m下がって1.3mになった。
- (ニ) 横桁と縦桁との取合リベット約15本が破壊した。

という状態であり、十分な発破効果ではなかった。

実験発破の結果は不十分であったが、下弦材には相当の応力が働いていると考えられるので、水中発破で切断するのではなくその点で折り曲げるという考えのもとに、実験発破と同様 $P = 2.5\text{kg}$ の火薬量を用いて下弦材の水中発破を行なった。この結果、

桁を着底させることに成功し、トラスの応力もほとんど抜けたと判断されたので、潜水工による水中切断を開始した。

② 水中切断

水中切断には、能率的でもっとも一般的な酸素アーク切断工法を採用した。これは予熱源としてアークを用い、酸素を水中電極棒の中心より噴出させるもので、被切断物はアークの予熱効果のほかに酸素による酸化発熱効果・酸素ガスの吹きとばし効果がある。

水中切断器材およびその原理を図-15水中切断装置図に示す。

水中切断作業は2月の厳寒期で水温は2℃～3℃であり、ドライスーツ着用の潜水でも40分で手足にしびれを感じるほどであった。また流速も0.4m/secで潜水可能な最大流速0.5m/secぎりぎりであるなど作業条件が悪かったため、切断速度の実績は平均200cm²/hであった。

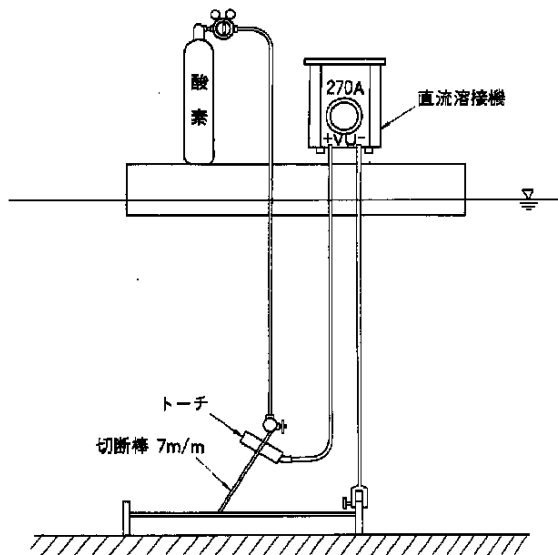


図-15 水中切断装置図

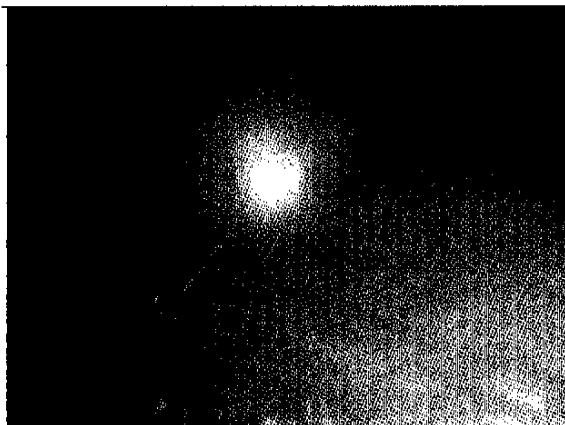


写真-7 水中切断作業

4. 引揚げ作業

引揚げ作業は、引揚げ部材先端に抵抗を少なくする目的でソリを取付けて行なった。河川部での引揚げは河床が平坦で玉石であったため少ない力で引寄せることができたが、河川から陸上に上がる部分は勾配差があるため、先端が地表に食い込み、引揚げ抵抗が極めて大きかった。

図-16に引揚げ作業段階図、写真-8、9に引揚げ状況を示す。

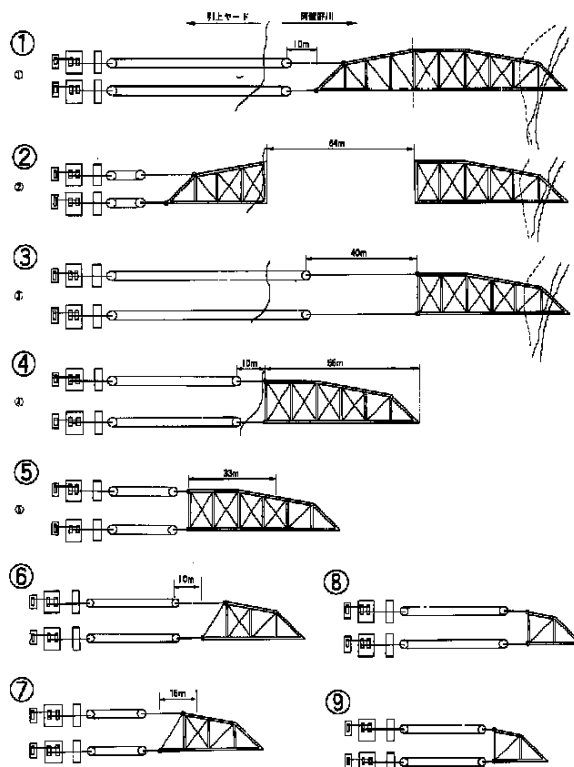


図-16 引上げ作業段階図



写真-8 第1回引上げ作業

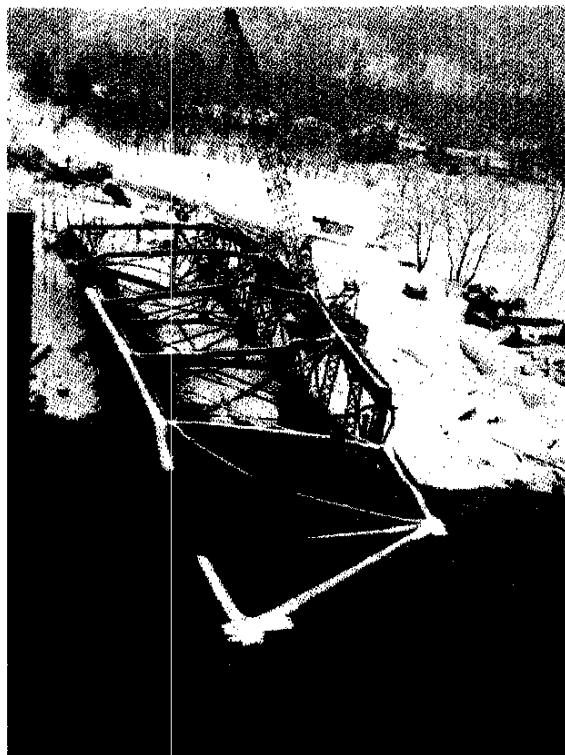


写真-9 大ブロック引上げ

4.4 全体工程表

表-6 に全体工程表を示す。

5. 桁落下状態のシミュレーション

桁が橋脚を離れ、地面に到達するまでの挙動を明確に

するため、桁を剛体と仮定して、この物体の落下運動・回転運動に関する微分方程式を作成し、時々刻々の挙動をシミュレートした。桁の落下状況として考えられる挙動について概略を述べると、次のようになる。

桁は橋脚上をジャッキによって準静的に滑らされ、桁の重心位置が橋脚端部附近に達した時点で、桁は回転を始める。この回転がある程度の大きさになると、橋脚と桁との間に滑り(ある摩擦係数に依存して)が生じ始める。以後この滑りと回転が続き、遠心力と自重および摩擦力が釣り合った段階で桁が橋脚を離れる。橋脚を離れた桁は、回転運動をしながら自由落下した後、地面に衝突する(ここでは、桁の一端が地面に衝突するが他端はまだ落下状態にある場合を考えている)。衝突の後、桁は落下運動を停止し、断面に関する回転運動の急激な変化とスパン方向に関する回転運動を生ずる。この運動の後、最終的にもう一方の端部が接地して運動を停止する。

5.1 桁の橋脚からの落下状態

桁が橋脚から離れて落下する状態は、次の4項目に分類される。

状態Ⅰ： 桁が橋脚上を準静的に滑り、橋脚端部から張り出すため、桁に剛体的な回転が生じる。この回転により桁の重量と遠心力が釣り合って、桁が橋脚から離れるまでの挙動を示す。この時、桁と橋脚との間に生じる滑りを考慮している。

状態Ⅱ： 桁が橋脚を離れ、剛体としての桁の4つの隅角部(断面の4点)のうちのどれか1点が地面に接触するまでの自然落下の挙動を示す。

状態Ⅲ： 状態Ⅱの後、他端の1点が地面に接触するまでの挙動を示す。この時桁が持っていた落下によるエネルギーは、地面に衝突した時にある程

表-6 全体工程表

工 種	58 年										59 年		
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	
桁 改 造 工													
仮設備工(ケーブルエレクション設備仮設)													
新 橋 組 立 工													
ケーブルエレクション設備解体工													
横 取 設 備 工													
現 橋 新 橋 横 取 更 換 工										●(11月20日横取更換)			
本 番 据 付 工													
仮 設 備 解 体 工													
引 上 げ 設 備 工													
水中切断、引上げ段取引上げ、搬出													
跡 片 付 工													

度吸収される。

状態Ⅳ： 桁の両端が地面に接触した後、完全に静止した状態を表わす。

5.2 桁の落下時の挙動に関する微分方程式の誘導

(1) 状態Ⅰ

- 桁が橋脚上を滑らずに回転する状態

$$\begin{aligned}\frac{dX_G}{dt} &= \gamma \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot \cos(\phi + \phi_o') \\ \frac{dY_G}{dt} &= -\gamma \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot \sin(\phi + \phi_o') \dots\dots (1)\end{aligned}$$

$$I \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2} = m \cdot g \cdot \gamma \cdot \cos(\phi + \phi_o')$$

ただし

$$X_G = \gamma \cdot \sin \phi' = \gamma \cdot \sin(\phi + \phi_o')$$

$$Y_G = \gamma \cdot \cos \phi' = \gamma \cdot \cos(\phi + \phi_o')$$

$$V = \gamma \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi' = \phi + \phi_o' (\phi_o' \text{は} \phi \text{の初期値})$$

I は極慣性モーメント

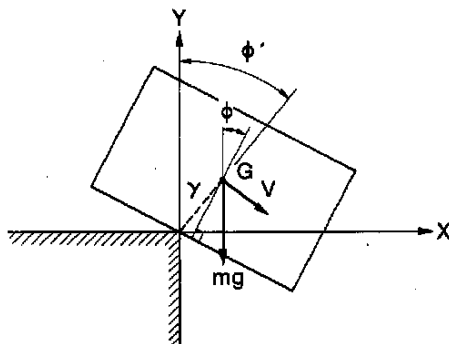


図-17 状態Ⅰ (滑りを考慮しない場合)

- 桁が橋脚上を滑りながら回転する状態

滑りに関する微分方程式は、次のようになる。

$$\begin{aligned}\frac{d^2X_G}{dt^2} &= \{(g - Y_G \cdot \omega^2 + \mu_D \cdot X_G \cdot \omega^2) \cdot \sin \phi \\ &+ (X_G \cdot \omega^2 + \mu_D \cdot Y_G \cdot \omega^2 - \mu_D \cdot g) \cdot \cos \phi\} \cdot \cos \phi \dots\dots (3)\end{aligned}$$

ただし

$$\sin \phi' = \frac{X_G}{\gamma}$$

$$\cos \phi' = \frac{Y_G}{\gamma}$$

つぎに桁の回転による遠心力と重心力が釣り合つて、橋脚から離れる時点の条件式は次のようになる。

$$\gamma \cdot \sin(\phi' - \phi) > \frac{B_0}{2} \dots\dots (4)$$

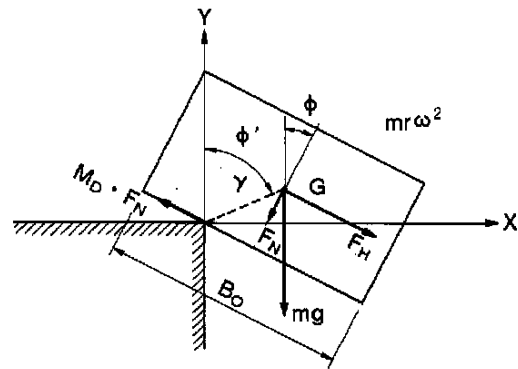


図-18 状態Ⅰ (滑りを考慮した場合)

(2) 状態Ⅱ

桁が状態Ⅰから状態Ⅱに移る瞬間、桁が持っているエネルギーの変換が行なわれるが、これは状態Ⅰと状態Ⅱの運動方程式を等置することにより表わされる。

$$\omega' = \frac{(I_0 + m \cdot \gamma^2) \cdot \omega - m \cdot \gamma \cdot v}{I_0} \dots\dots (5)$$

ただし ω は状態Ⅰの時の角速度を、 ω' は状態Ⅱの時の角速度を示すもので、 ω' は状態Ⅱの微分方程式の初期条件となる。

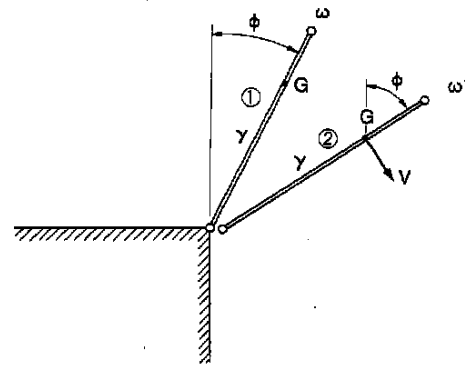


図-19 桁離脱の判定条件

つぎに桁が橋脚を離れて自由落下を始め、地面に到達するまでの挙動を表わすと次のようになる。

- 落下運動に関する方程式

$$h_1 = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + V_{oy} \cdot t \dots\dots (5)$$

$$\ell = V_{ox} \cdot t$$

$$\text{ただし } V_{ox} = V_o \cdot \sin \alpha$$

$$V_{oy} = V_o \cdot \cos \alpha$$

- 回転運動に関する微分方程式

$$\phi' = \omega' \cdot t + \phi_o' \dots\dots (6)$$

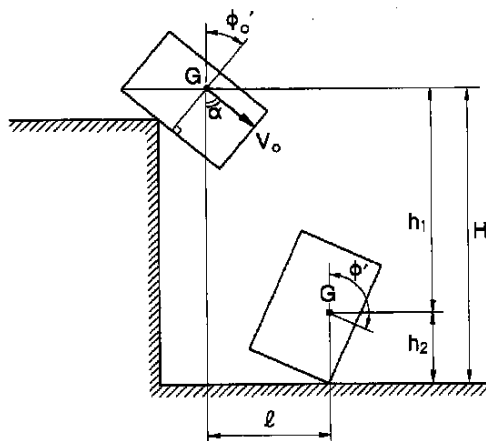


図-20 状態Ⅱ

(3) 状態Ⅲ

桁が図-21の①の状態から②の状態に移る瞬間、エネルギーの変換が行なわれるが、この現象は両状態の運動エネルギーを等置することによって表わされる。

$$\theta_0 = \frac{m \cdot l \cdot \frac{V_0}{2} - K'}{(I_0 + m \cdot \frac{l^2}{4})} \quad (7)$$

この θ_0 が状態Ⅲにおける運動の初期条件となる。つぎに桁が③の状態、すなわち回転運動状態にある時の微分方程式は、次のように表わされる。

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} - mg \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos \theta = 0 \quad (8)$$

さらに③の運動状態における断面の回転運動も表わす必要がある。ここでも桁の持つエネルギーの変化を考えることにより、回転運動の初期条件が得られる。

$$\omega_2 = \frac{m \cdot \gamma \cdot V_x + I_0 \cdot \omega_1 - K'}{I_0 + m \cdot \gamma^2} \quad (9)$$

ただし

I_0 は極慣性モーメント

K' は衝突によるエネルギー損失

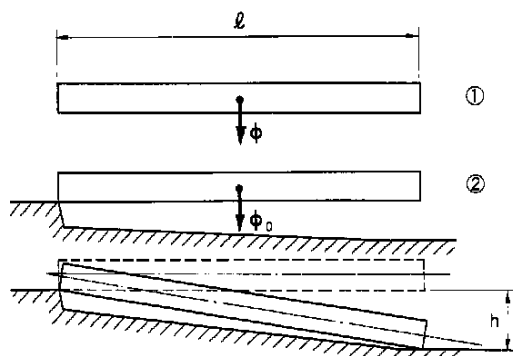


図-21 状態Ⅲ(スパン方向の回転)

桁断面の回転運動は、次の微分方程式によって表わされる。

$$\frac{d^2 \phi'}{dt^2} - \frac{m \cdot g \cdot \gamma}{I} \cdot \phi' = 0 \quad (8)$$

ただし I は極慣性モーメント

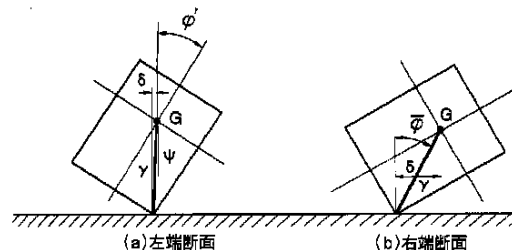


図-22 断面の回転

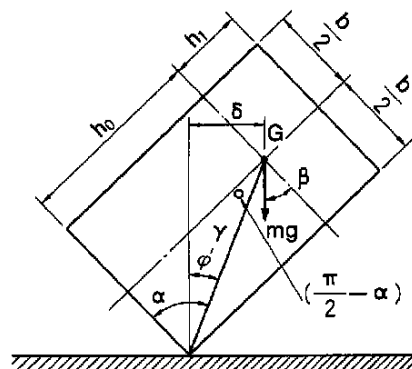


図-23 桁断面内の回転力の釣り合い

(4) 状態Ⅳ

状態Ⅲの最終状態から、桁断面がどの方向に回転するかを決定する。

$M - (F \text{ による回転力}) > 0$ 右に回転

$M - (F \text{ による回転力}) < 0$ 左に回転

.....(9)

ただし M は、桁が状態Ⅲで持っていた回転力。

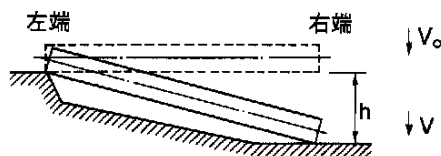


図-24 最終状態(スパン方向)

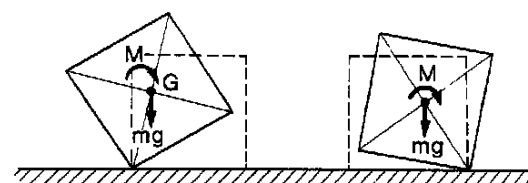


図-25 最終状態の判定

5.3 計算方法および計算結果

微分方程式(連立常微分方程式)を解くための数値解法として Euler 法, Runge-Kutta 法, Milne の予測子修正法が考えられたが, 一般的に最もよく用いられている Runge-Kutta 法を用いた。また解かれた結果はすべてディスク内に保存し, 図化用データとした。

計算の一例として, 落下状態を図-26, 27, 28に示す。

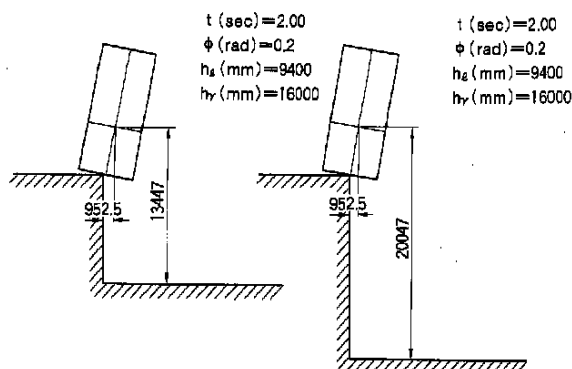


図-26 計算結果(状態 I)

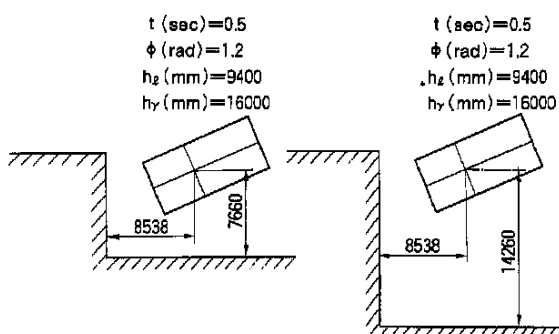


図-27 計算結果(状態 II)

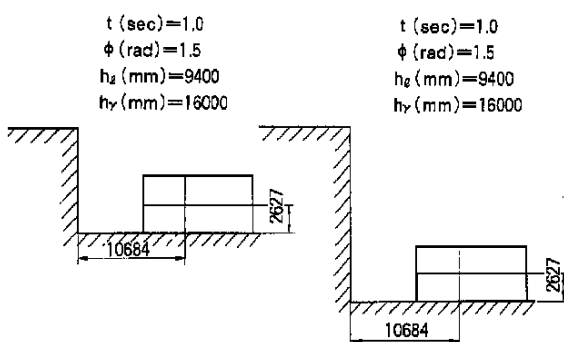


図-28 計算結果(状態 IV)

5.4 考察

桁落下の挙動を明確にするには, 現場における施工条件を考慮し, 計算における仮定を考えなければならない。

ここでは, 考えられる項目をいくつか取り挙げ, 考察することにする。

(1) 摩擦係数の影響

張り出し量 $X_0=0.1\text{m}$ で摩擦係数 μ を $0.2(0.1)^*$, $0.6(0.3)^*$, $1.0(0.5)^*$ に変化させた場合の結果を図-29に示す。これによると, 摩擦係数が増大するにつれて, 桁の水平移動量 x , 回転量 ϕ が増加している。 x と ϕ および μ との関係から, 摩擦係数が増加するにつれて滑り量が減少し, 回転量 ϕ が増加する。したがって桁に作用する遠心力が増加し, 桁の水平移動量 x が増加した。

また桁が移動を開始してから, 地面に接するまでの時間 T は, 摩擦係数が大きいほど大きくなっていることから, 滑り運動に比べて回転運動の方が橋脚を離れるまでに多くの時間を要することがわかる。

以上より滑り運動の発生を押さえ, 回転運動を大きくする。すなわち摩擦係数を大きくすることにより, 桁をより速くに飛ばすことができると考えられる。

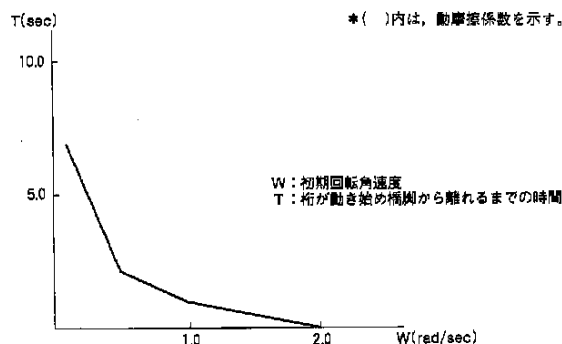


図-29 初期回転角速度による効果

(2) 初期回転角速度の影響

初期回転角速度を 0.1rad/s , 0.5rad/s , 1.0rad/s , 2.0rad/s に変化させた場合の結果を図-30に示す。これによると, 初期回転角速度が増加するにつれて桁が動き始め, 橋脚から離れるまでに要する時間がかかなり減少することがわかる。

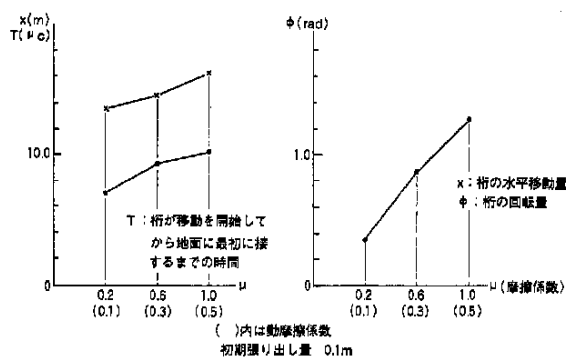


図-30 摩擦係数による効果

(3) 他の影響

このシミュレーションでは、桁を棒モデルと考え、断面積、断面2次モーメントなどを平均化して計算を行うため、その影響が多少現われると考えられる。

6. あとがき

本工事報告は旧橋の引落とし撤去および引落とし後の解体工法についてを主体に行なったものであり、今後この種の工事を計画・施工する方々への参考になれば幸いである。

この種の工事は架替工法として経費を節減する観点から多くなるものと思われるが、本文でも報告した通り種々の問題もあり、計画に着手する前に十分な調査と安全性に関する確認が必要で、盲目的に採用に踏み切ることは厳につつまなければならない。

終りにあたり本橋の施工を無事故、無災害で完了し、御指導、御助力頂いた日本国有鉄道信濃川工事局の方々をはじめ、御協力して頂いた関係者各位に感謝の意を表す次第です。

1984.5.23 受付