

災害調査報告書

トンネル工事における型枠支保工の 崩壊災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

1. 災害の概要

トンネル工事において、流動化処理土を打設中に型枠が崩壊し、型枠下部から流動化処理土が流出して、型枠近くに設置されていたわく組足場が倒壊した。このとき、足場上にいた作業員 5 名が足場とともに倒れて負傷し、地上にいた作業員 1 名が足場の下敷きとなり負傷した。災害現場の状況を図 1 に示す。なお、流動化処理土とは、大量の水を含む泥に固化剤を加えて、流動性を持たせた安定性のある土のことであり、狭い空間などを掘削した場合の埋戻しや充填などに用いられるものである。

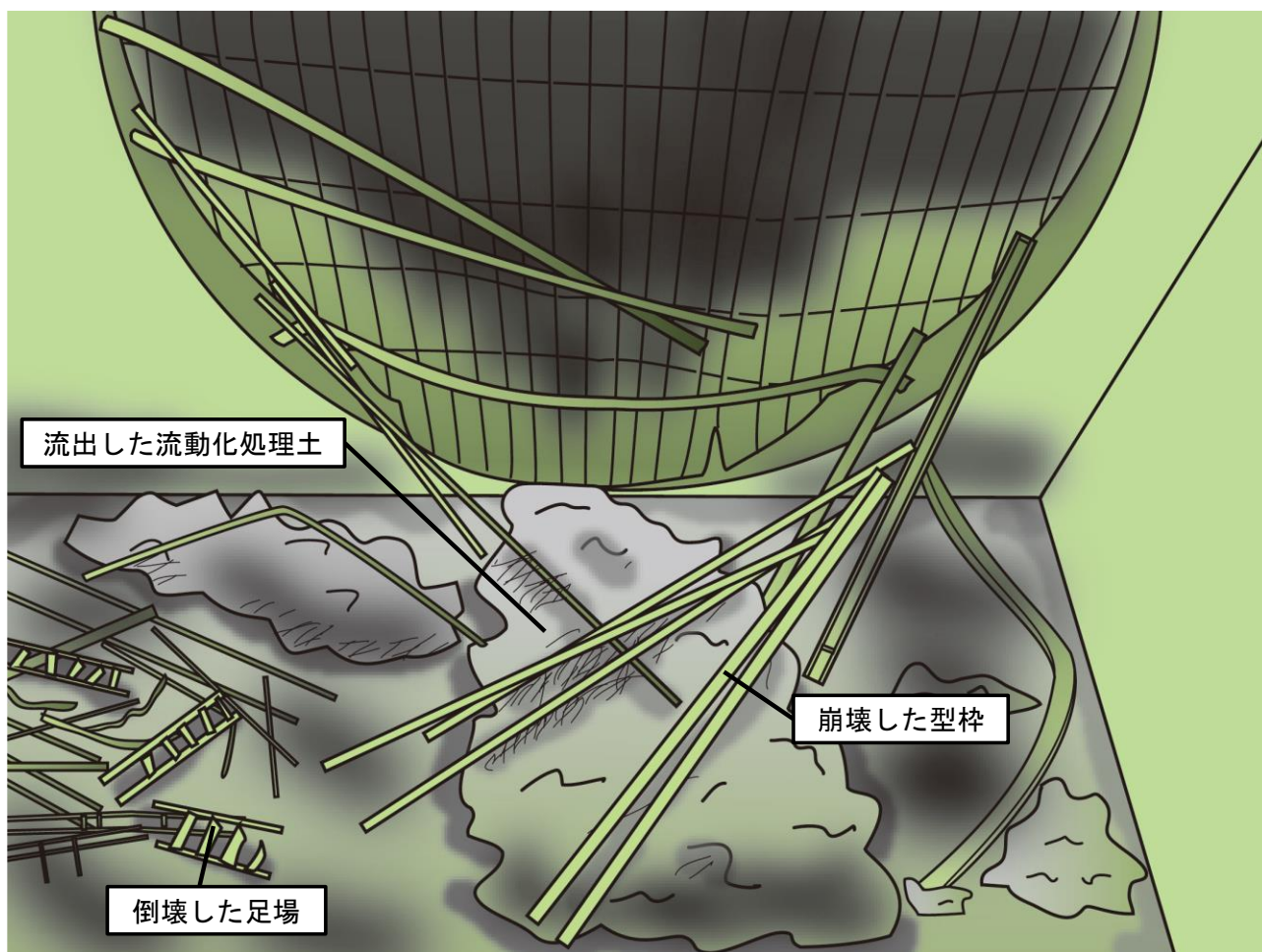


図 1 災害現場の状況

2. 崩壊した型枠の概要

災害発生前の型枠の設置状況を図 2 に、流動化処理土と型枠の設置状況を図 3 に示す。図 3 及び本報告において、型枠等の図の水平 2 方向を X, Y とし（型枠を正面から見た場合の奥行方向を X、横方向を Y）、高さ方向を Z とした。

崩壊した型枠は図 2 に示すように、高さ 9.145 m、幅 12.86 m のおおよそ円形の状態で設置されていた。この型枠は、図 2 と図 3 に示すように、水平材、大引き、及び斜材により支持されており、大引きと斜材はそれぞれ 2 本設置されていた。

型枠は、鉄板に山形鋼が溶接されており、山形鋼同士をボルト接合していた。また、水平材、大引き、及び斜材は H 形鋼であり、それぞれ溶接により接合されていた。外周部は鋼製の部材によって構成されており、型枠、水平材、大引きについては、外周部と接する部分が溶接により接合されていた。斜材の下端は床に固定した鋼材に溶接されていた。型枠と水平材については、溶接されておらず、型枠は水平材に支えられるように設置されていた。

図 3 に示すように、流動化処理土は、型枠上部に打設されており、流動化処理土の下部には、固まった流動化処理土があった。流動化処理土は水を含んでいるため流動性があり、固まるまでは型枠等に側圧が作用する。固まると側圧は作用しなくなる。

なお、現場では、計画変更があり、計画変更後、適切な型枠の強度計算はされておらず、当初計画よりも大引きと斜材の設置数は少なかった。

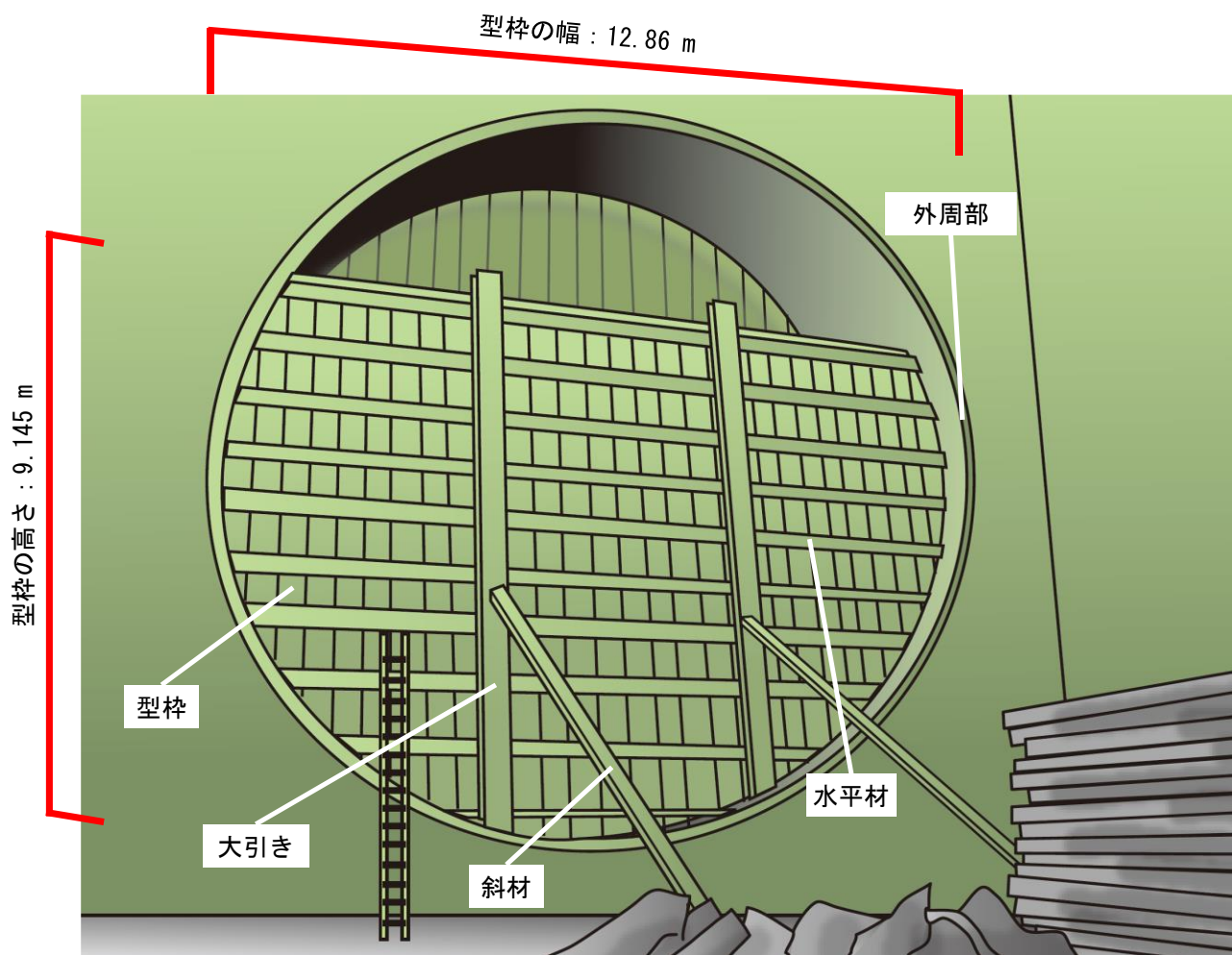
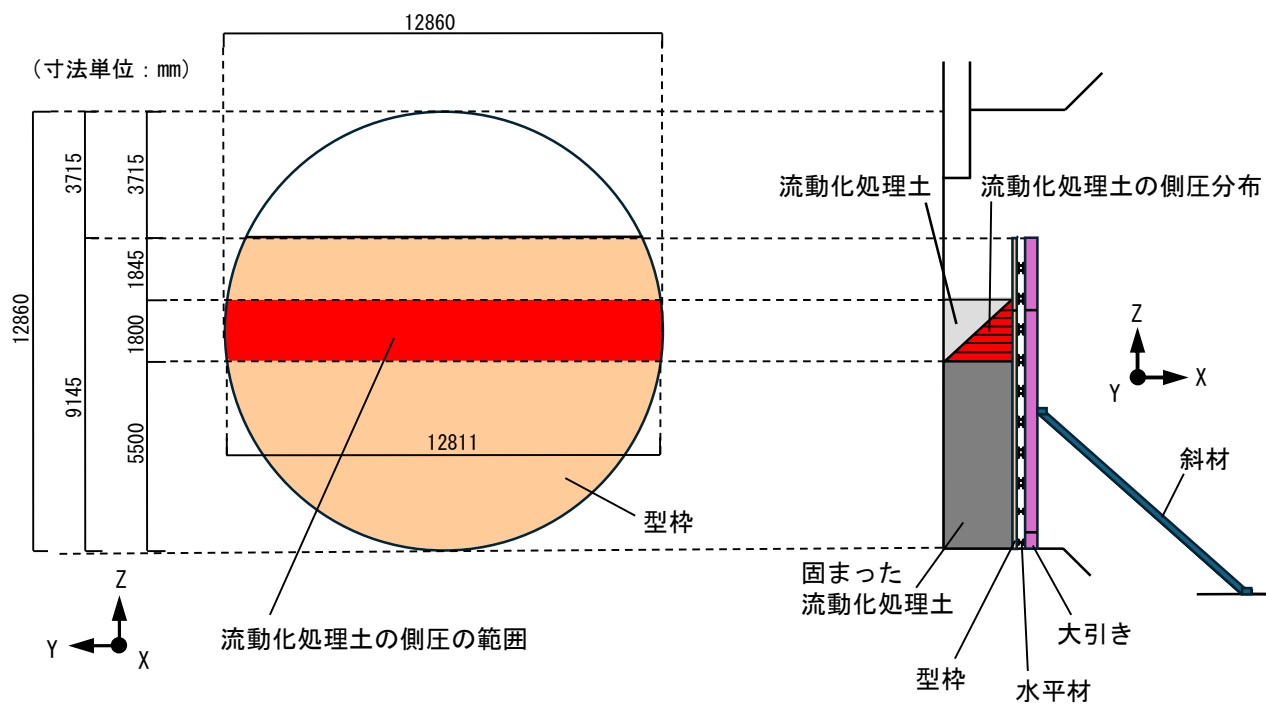


図 2 災害発生前の型枠の設置状況



型枠の正面図

型枠と流動化処理土の側面図

図 3 流動化処理土と型枠の設置状況

3. 型枠崩壊の検討

3. 1 検討の方法

型枠は流動化処理土の側圧に耐えられずに崩壊したと考えられたので、型枠に作用する流動化処理土の側圧を計算するとともに、型枠の強度を数値解析により検討した。

3. 2 流動化処理土の側圧の計算

図 3 に示すように、型枠に作用する流動化処理土の側圧分布は、三角形分布となる。この分布状態を考慮すると、型枠に作用する流動化処理土の側圧の計算値は 274.9kN であった。

3. 3 型枠強度の数値解析

3. 3. 1 解析の方法

数値解析は構造解析の分野で広く使われている汎用有限要素解析プログラムの ANSYS を用いた。

図 3 に示すように、型枠は、水平材、大引き、及び斜材により支持されていた。このため、流動化処理土の側圧による荷重は、型枠に作用した後、水平材、大引き、斜材に伝わり、これらの部材が変形して、型枠が崩壊したと考えられた。そこで、本報告では、まず、型枠のみをモデル化し、型枠に流動化処理土の側圧が作用する解析を行った。その後、型枠に作用した荷重が水平材、大引き、斜材に伝わるとして、型枠とモデルを分けて、水平材、大引き、斜材をモデル化して解析を行った。さらに、災害後の斜材を確認すると、図 4 に示すように変形しており、斜材に座屈が発生したと考えられた。座屈とは、図 5 に示すように、圧縮力を受けた部材が力を受けた方向と直交方向に弓なりに変形する現象である。型枠の崩壊は、斜材の座屈の影響が大きいと考えられたので、斜材については、他の部材と別に詳細に解析を行った。

なお、型枠、水平材、大引き、及び斜材は、鋼材であるので、材料は一般構造用圧延鋼材の SS400¹⁾として解析を行った。

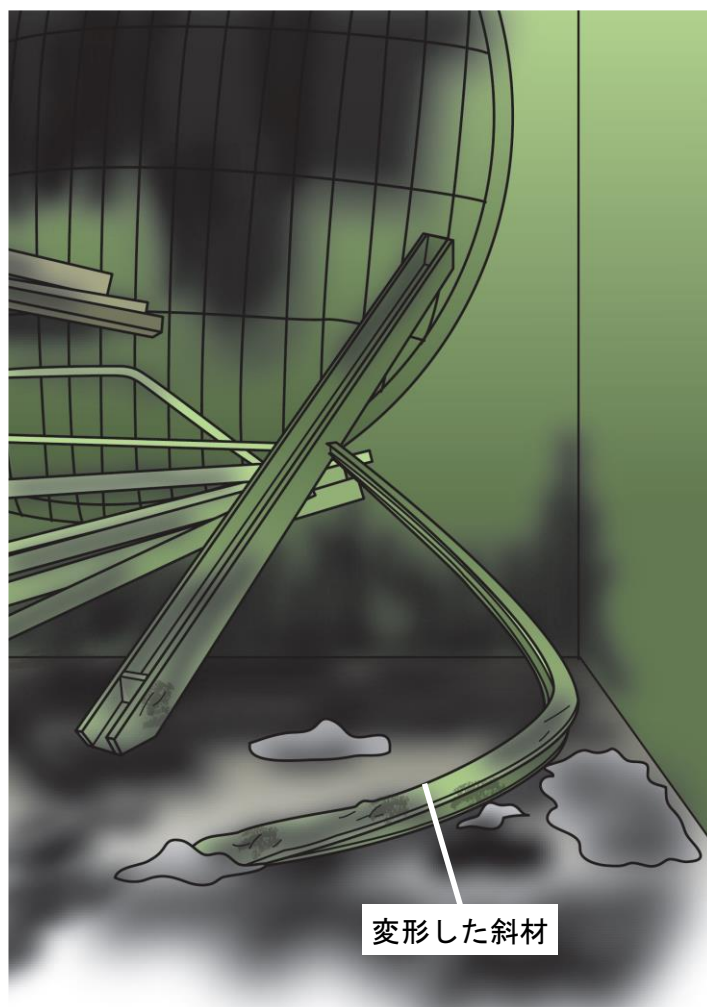


図 4 変形した斜材

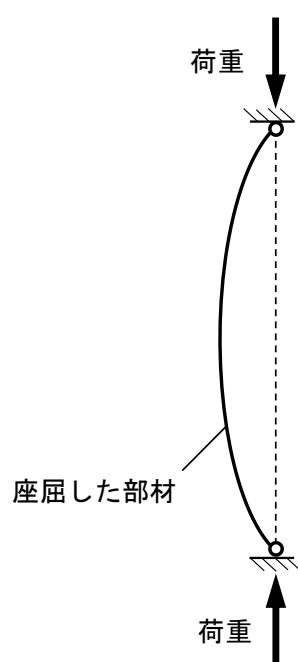


図 5 部材の座屈

3. 3. 2 型枠の解析

型枠の解析モデルを図 6 に示す．解析モデルは要素数等を考慮して，型枠の半分をモデル化したハーフモデルとした．解析に用いた要素は，型枠が主に鉄板によって構成されていることから，平面形のシェル要素を用いた．このモデルについて，型枠の外周部の変位と回転を拘束し，さらにハーフモデルであることを考慮して，型枠中央部の Y 方向の変位を拘束した．図中の緑点は，流動化処理土の側圧による荷重の載荷点である．荷重は，図 3 に示すような流動化処理土の三角形分布を考慮して，載荷点の合計が 137.45kN ($= 274.9\text{kN}/2$) となるように載荷させた．

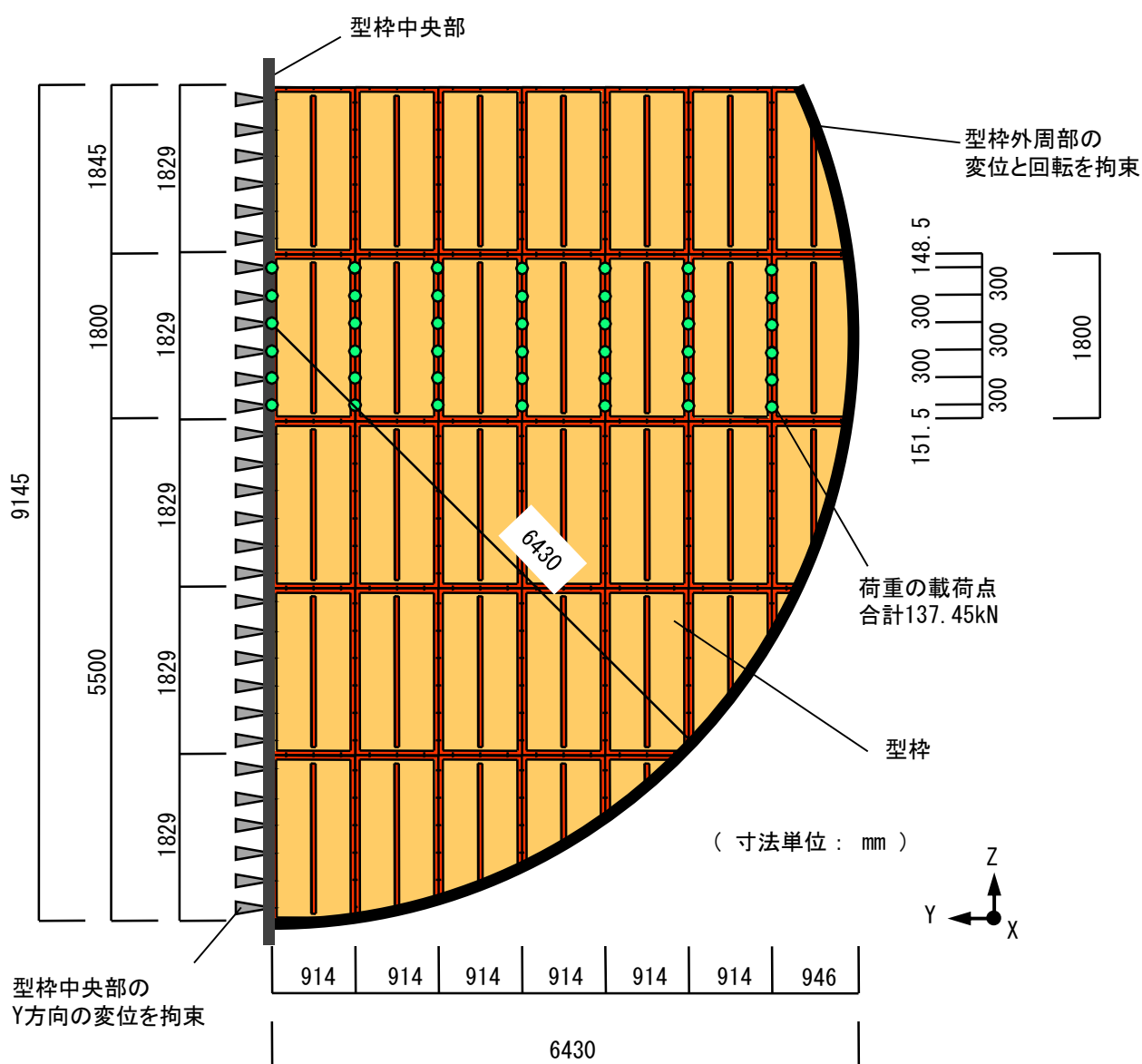


図 6 型枠の解析モデル

型枠の解析結果を図 7 に示す．図中の緑点は，水平材の位置を考慮して設定した力の作用点を示し，その上の数値は各作用点に作用した力の大きさを示す．数値がプラスの場合は，型枠を斜材側に押す力が働き，数値がマイナスの場合は，型枠を斜材側から引っ張る力が働くことを示す．作用点に作用した力は，荷重の載荷点（流動化処理土がある範囲）付近で大きくなった．

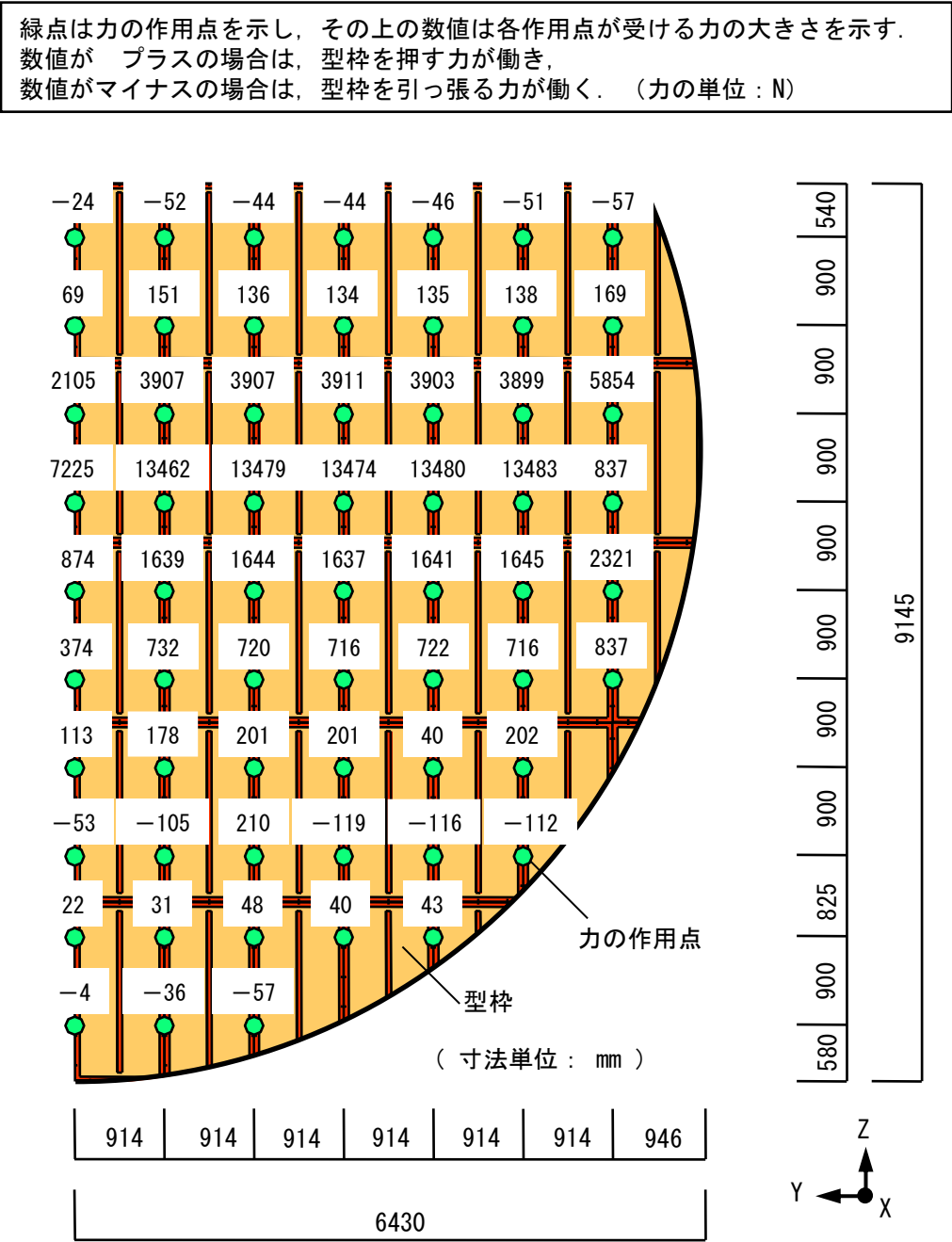


図 7 型枠の解析結果

3. 3. 3 水平材，大引き，斜材の解析

水平材，大引き，斜材の解析モデルを図 8 に示す．解析に用いた要素は，水平材，大引き，斜材が H 形鋼の棒状の部材であることから，棒状のビーム要素を用いた．このモデルについて，水平材の外周側端部の変位と回転を拘束し，大引きと斜材の下端の変位を拘束した．さらに，解析安定化のため水平材中央部の Y 方向の変位を拘束した．このモデルに，型枠の解析により計算された図 7 の作用点に作用した力を，荷重として作用させた．

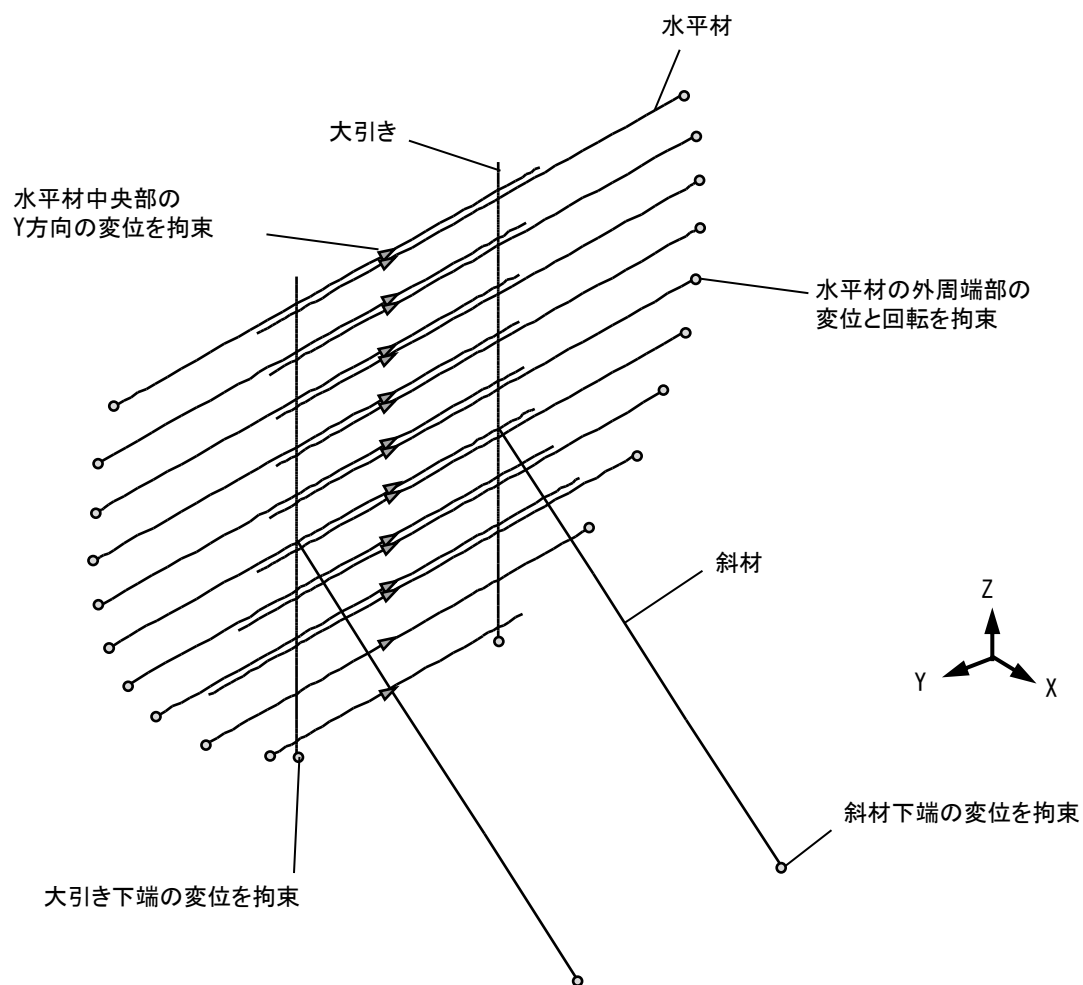
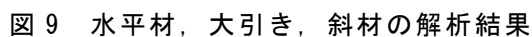


図 8 水平材，大引き，斜材の解析モデル

型枠に作用した流動化処理土の側圧の範囲



3. 3. 4 斜材（右）の解析

水平材，大引き，斜材の解析結果より，斜材（左）に比べて，斜材（右）に大きな軸力が作用したので，斜材（右）の方が先に破壊すると考えられた．そこで，斜材（右）を対象に解析を行った．

斜材（右）の解析モデルを図 10 に示す．解析に用いた要素は，部材端部の拘束条件などをビーム要素より詳細に設定できるシェル要素を用いた．このモデルについて，斜材（右）と地盤面との接合部の変位を拘束した．図 10 に示すように，現場では，斜材（右）と大引きとの接合部に鉄板が溶接されており，鉄板を介して，大引きから斜材（右）に荷重が伝わる状態であった．このことを模擬して，荷重は斜材（右）端部のフランジ部分の 2 か所に軸力として作用させた．

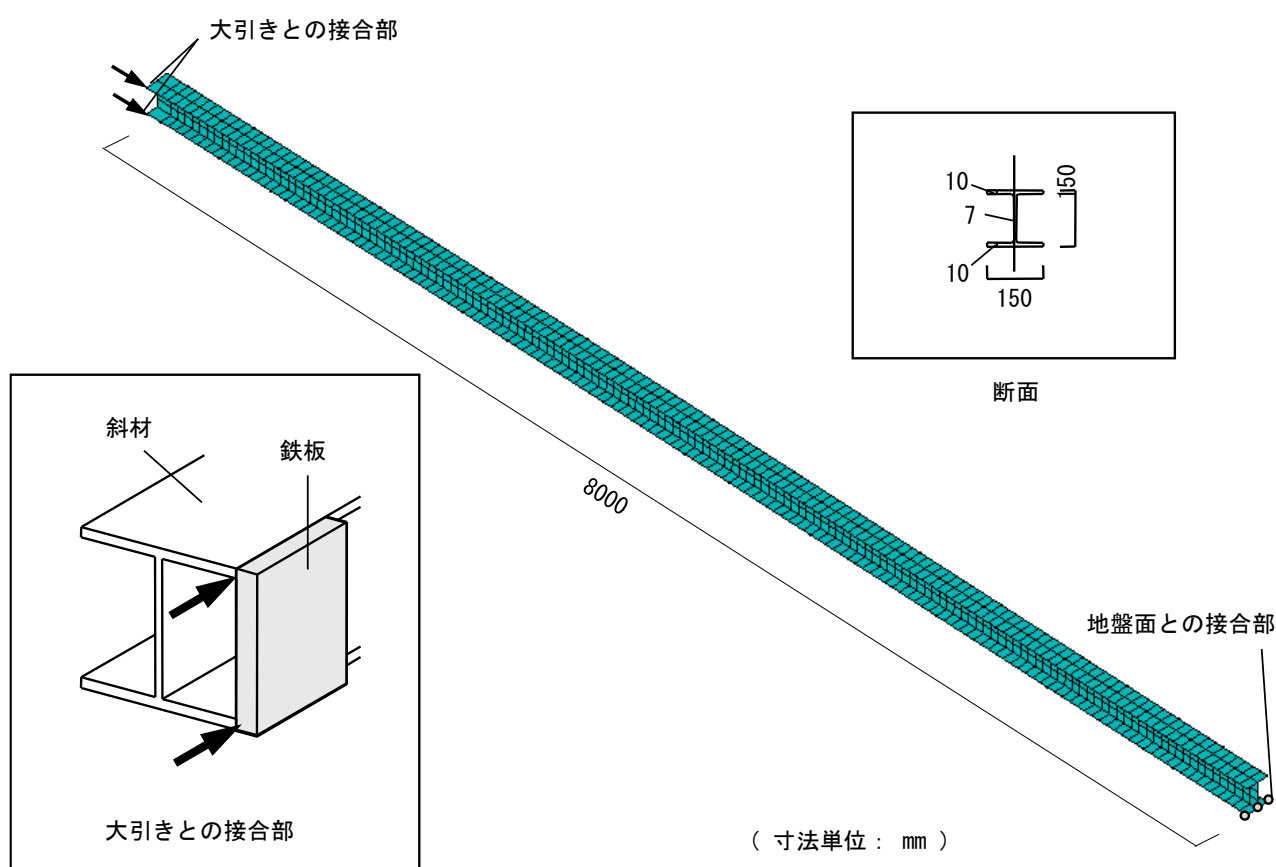


図 10 斜材（右）の解析モデル

斜材（右）の解析結果を図 11 に，最大軸力時の斜材（右）の変形を図 12 に示す．図 11 より，斜材（右）の最大軸力は 183kN であった．図 9 より，斜材（右）に作用していた軸力は 246kN であり，斜材（右）の最大軸力よりも大きな力が作用していた．このため，斜材（右）は流動化処理土の側圧に耐えられずに，破壊すると考えられる．また，図 12 より，斜材（右）は軸力を受けた方向と直交方向に変形しているので，座屈により強度が決まったと考えられる．

以上より，流動化処理土の側圧が型枠等から斜材に伝わり，斜材の強度不足により，斜材が座屈したと考えられる．

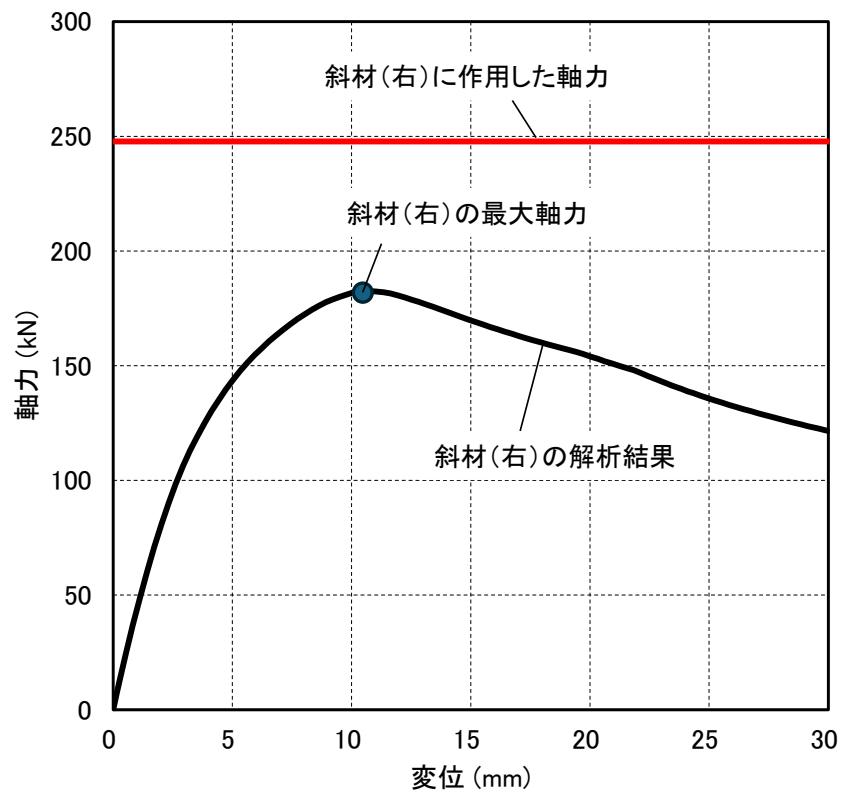


図 11 斜材（右）の解析結果

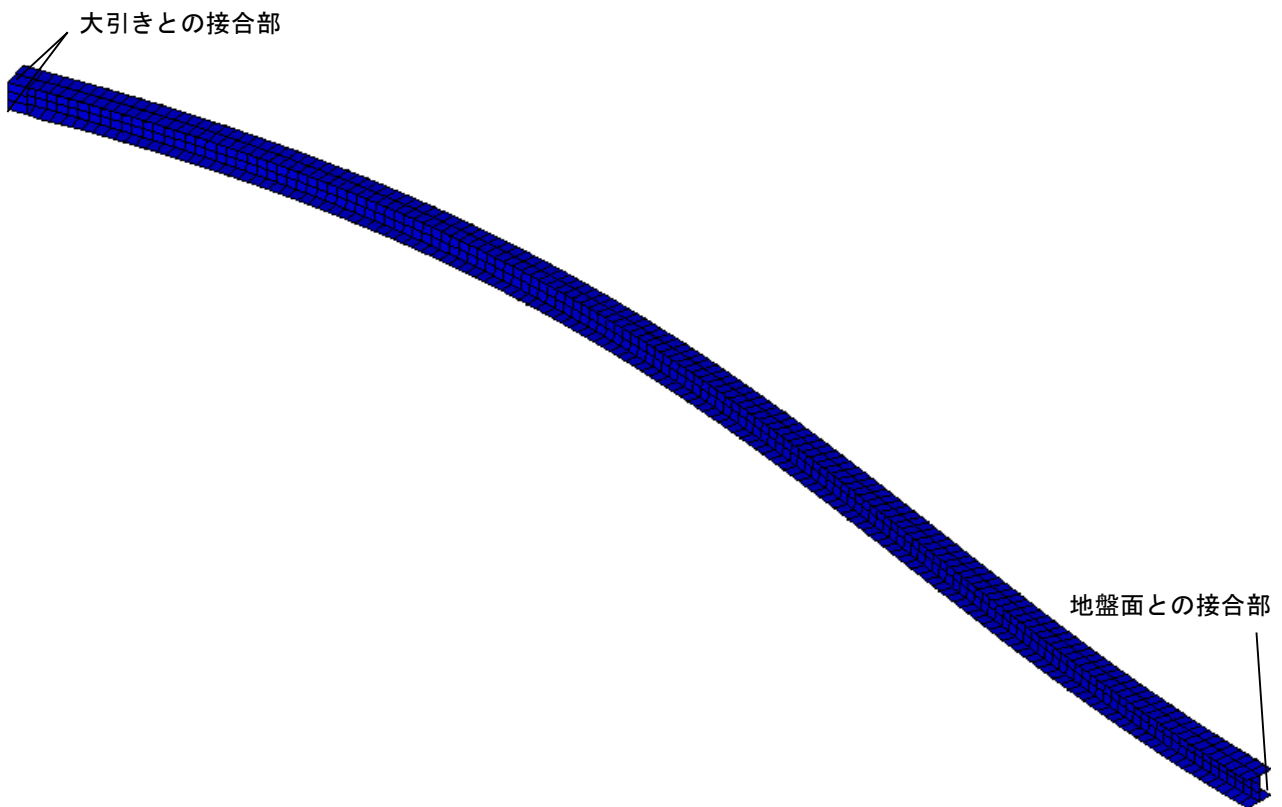


図 12 最大軸力時の斜材（右）の変形

4. 推定される災害の発生状況

現場の状況と本調査の結果より、災害の発生状況は、次のとおりであったと考えられる。

- ① 作業者が流動化処理土の打設作業を行っていた。このとき、流動化処理土の側圧が型枠に作用していた。現場では、計画変更があり、当初計画より大引きと斜材の設置数は少なかった（図 13(a)）。

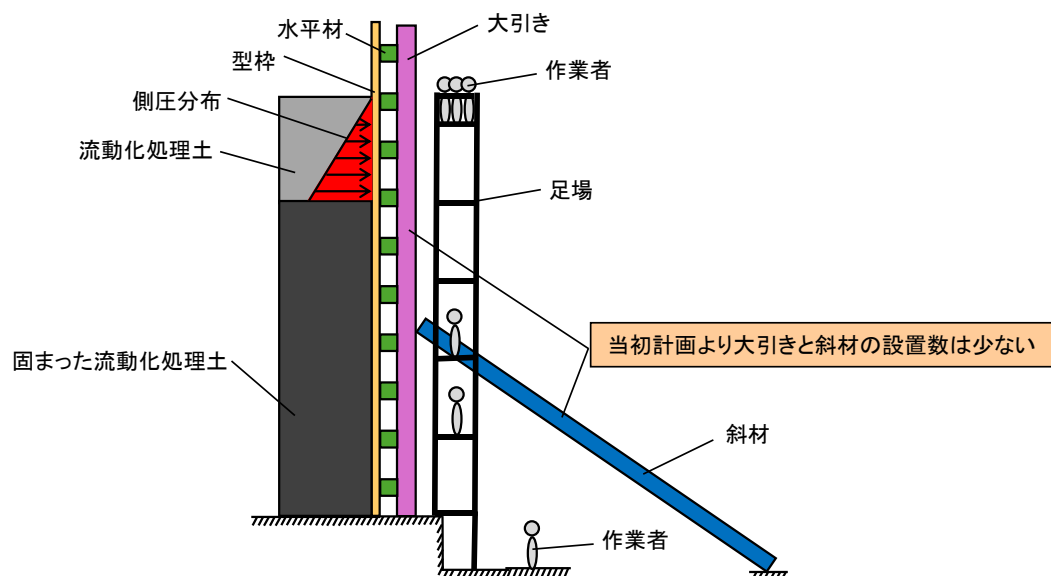


図 13(a) 流動化処理土の打設

- ② 流動化処理土の側圧が型枠等から斜材へ伝わり、斜材を変形させた。斜材が変形したことにより、水平材と大引きの溶接部分が破断した。これらの変形や破断により、型枠と固まった流動化処理土の間に隙間（隙間）ができた（図 13(b)）。

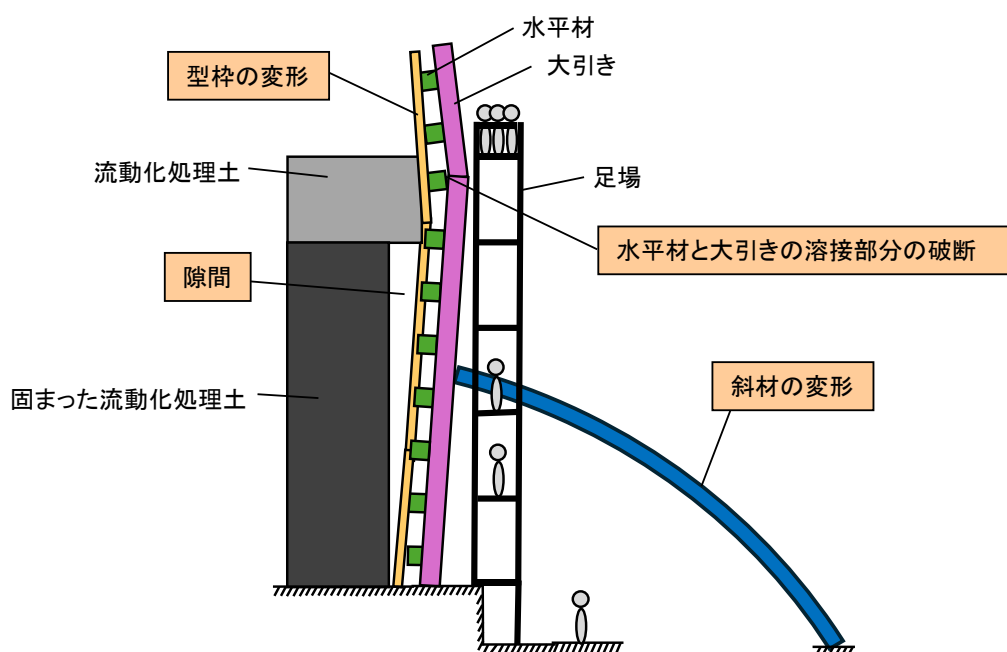


図 13(b) 型枠等の変形

- ③ 型枠と固まった流動化処理土の間にできた隙間に流動化処理土が流れ落ち、流動化処理土が型枠の下部から流出した。流出した流動化処理土により、足場が傾いた（図 13(c)）。

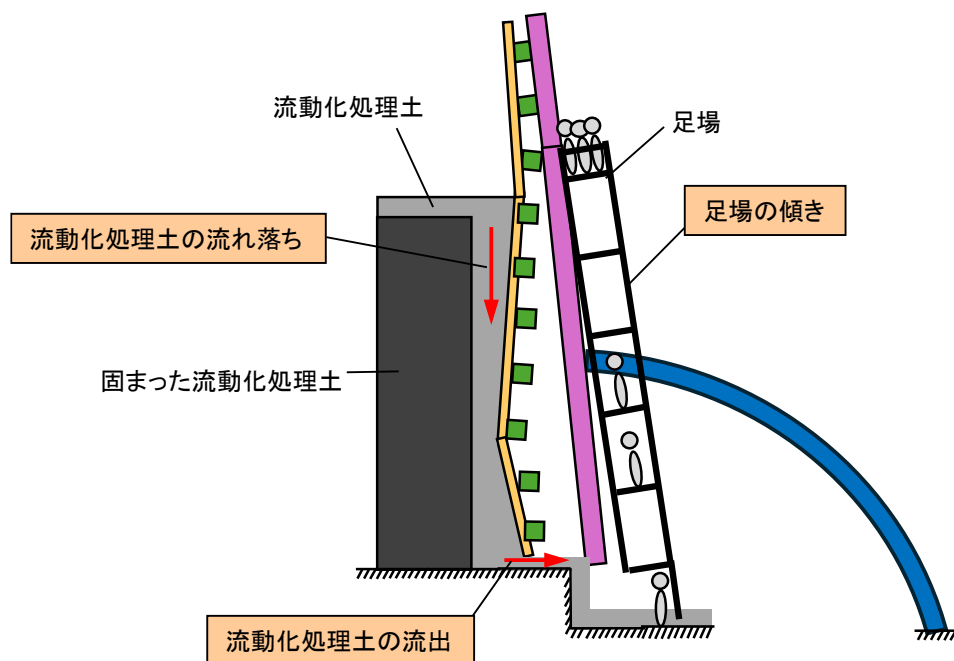


図 13(c) 流動化処理土の流出

- ④ 型枠等が崩壊し、足場も倒壊した。足場で作業をしていた作業員 5 名が足場とともに倒れ、地上で作業をしていた作業員 1 名が足場の下敷きになった（図 13(d)）。

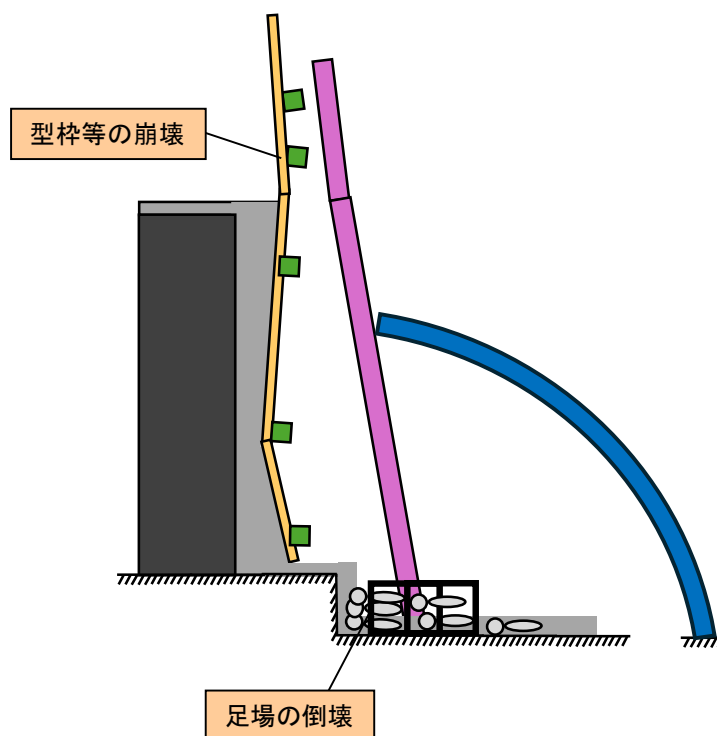


図 13(d) 型枠等の崩壊と足場の倒壊

5. 災害の発生原因

現場の状況と型枠強度の数値解析結果から、災害の発生原因は、次のように考えられる。

- ① 現場では、計画変更があったが、計画変更後に適切な型枠の強度計算はされておらず、当初計画よりも大引きと斜材の設置数が少なかったこと。
- ② 斜材の強度不足により、斜材が変形し、水平材と大引きの溶接部分が破断したことで、型枠が変形し、流動化処理土が流出したこと。

6. 再発防止対策

- ① 計画変更した場合は、適切な型枠の強度計算を行い、型枠が流動化処理土の側圧に耐えられることを確認すること。
- ② 斜材において、本数を増やす、部材断面を大きくする、座屈長さを短くするための部材を取り付ける等して、斜材が座屈等の変形をしないようにすること。

参考文献

- 1) 日本産業規格，JIS G 3101 一般構造用圧延鋼材，2015.