

災害調査報告書

建設工事現場で発生した鉄骨架構の倒壊災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

1. 災害の概要

建設工事現場において、鉄骨の柱と梁により構成された鉄骨架構上で、作業員3名が作業を行っていたところ、鉄骨架構が倒壊し、鉄骨架構の梁と共に作業員3名が地面に落ちた。落ちた後、梁の上にあった1名は倒壊してきた柱の下敷きとなり死亡し、それ以外の2名は地面に落ちた時の衝撃で負傷した。鉄骨架構の倒壊後の状況を図1に示す。

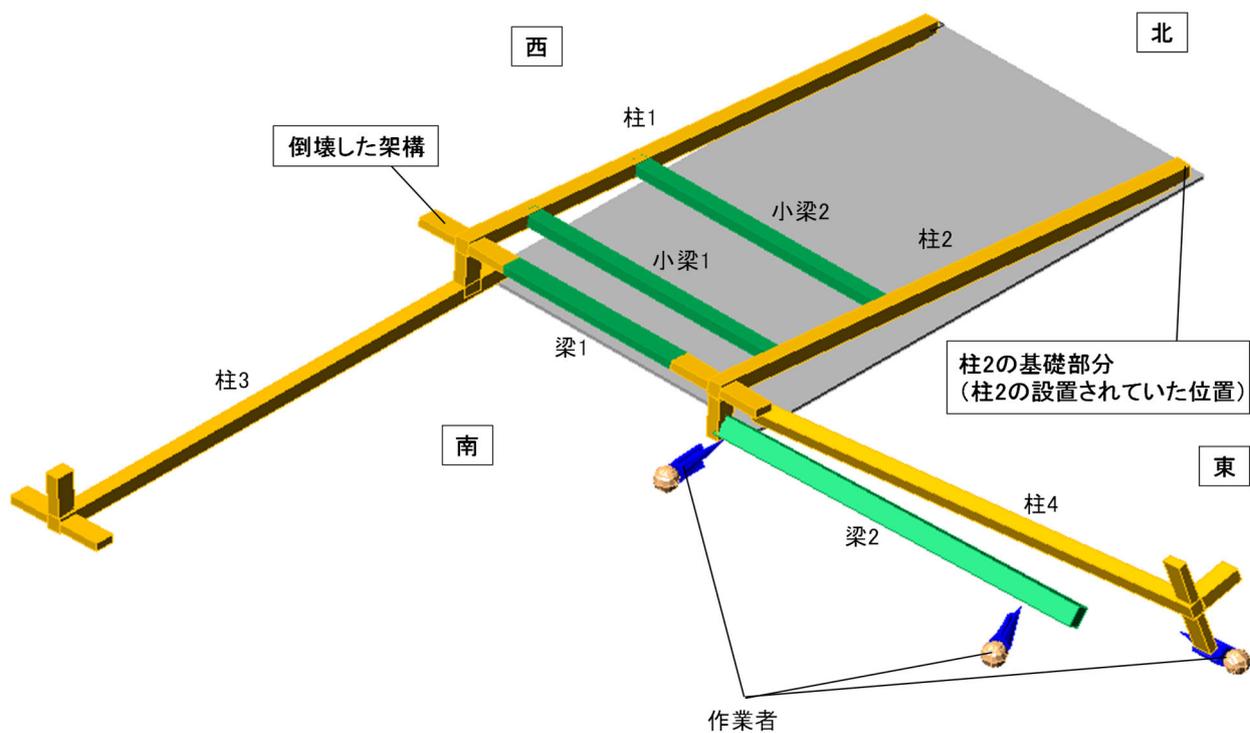


図1 鉄骨架構の倒壊後の状況

2. 災害現場の状況

2. 1 鉄骨架構の倒壊前の設置状況

倒壊前の鉄骨架構の設置状況を図2に示す。図2より、倒壊した鉄骨架構はX1通りとX2通り、およびその直角方向のY1通りとY2通りに設置されていた。柱は、柱1、柱2、柱3、柱4の4本が設置されており、X1とX2の間隔は7mであり、Y1とY2の間隔は12.4mであった。柱1と柱2間には梁1と小梁1、小梁2が設置されており、柱2と柱4間には梁2が設置されていた。柱3には梁は設置されておらず、独立柱の状態であった。柱1と柱2の高さは13.26mであり、柱3と柱4の高さは12.64mであった。また、柱1～柱4の断面形状は同じであった。作業員3名は梁2等の上で作業を行っていたと推測される。

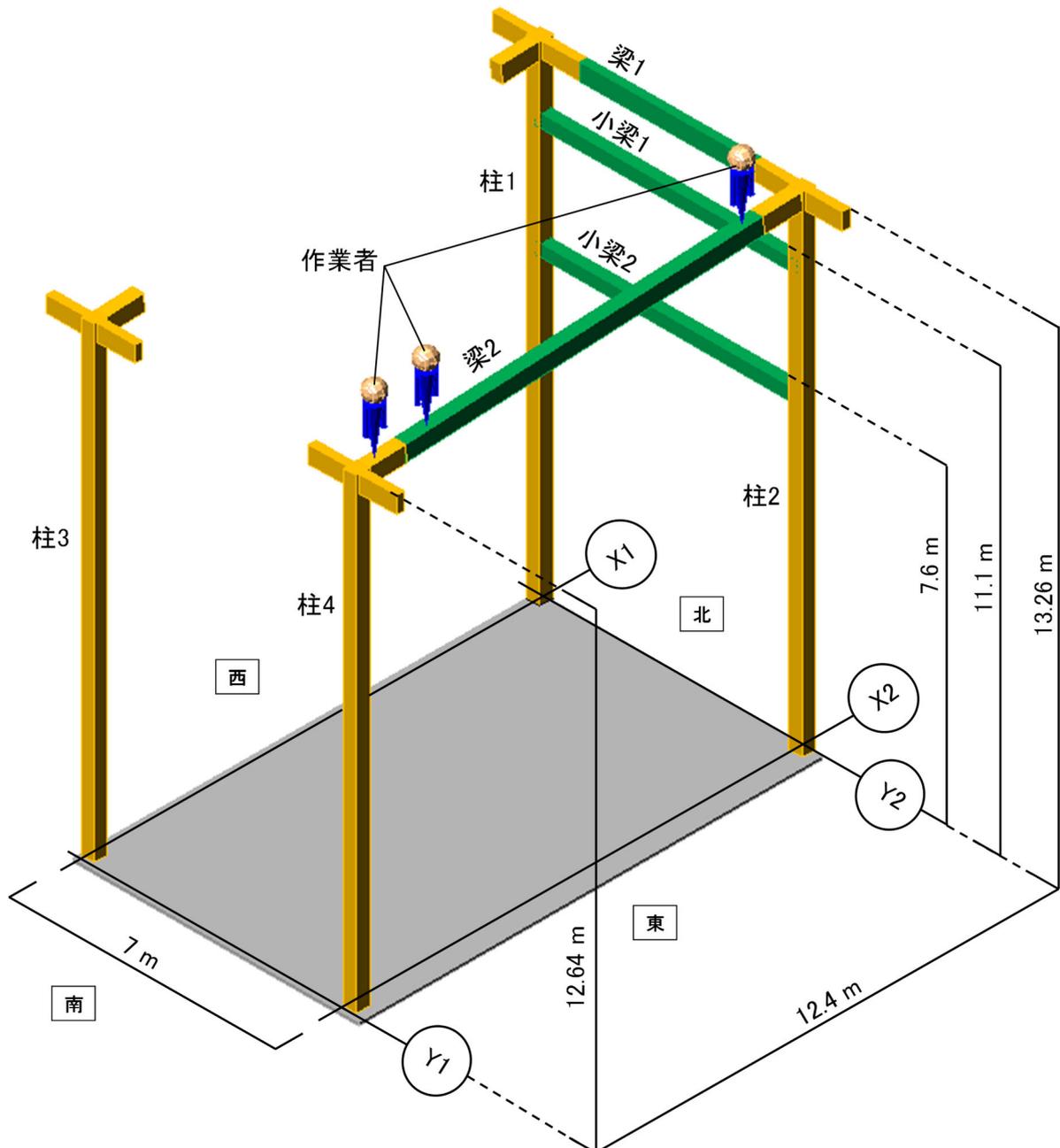


図2 鉄骨架構の倒壊前の設置状況

2. 2 鉄骨架構の倒壊前の柱の基礎部分の状況

鉄骨架構が倒壊する前の柱の基礎部の立面図を図3に示す。図3より、柱は高さ調整材とグラウト（流動性の高い充填材のことであり、災害現場では、収縮が少ないモルタルが使われていた。）の上に設置されており、ベースプレートにアンカーボルトを通して、ナットで締めて固定されていた。高さ調整材とグラウトの上端面の位置は同じであり、グラウトは高さ調整材の周囲にのみ注入されていた。アンカーボルトに設置されたナットは、ベースプレートの上面にのみ設置されており、下面には設置されていなかった。

一方で、高さ調整材の製造業者の指定では、図4に示すように、グラウトはベースプレート底面の全面を支えるように注入するようにされており、アンカーボルトに設置するナットはベースプレートの上下面に設置するようにされていた。

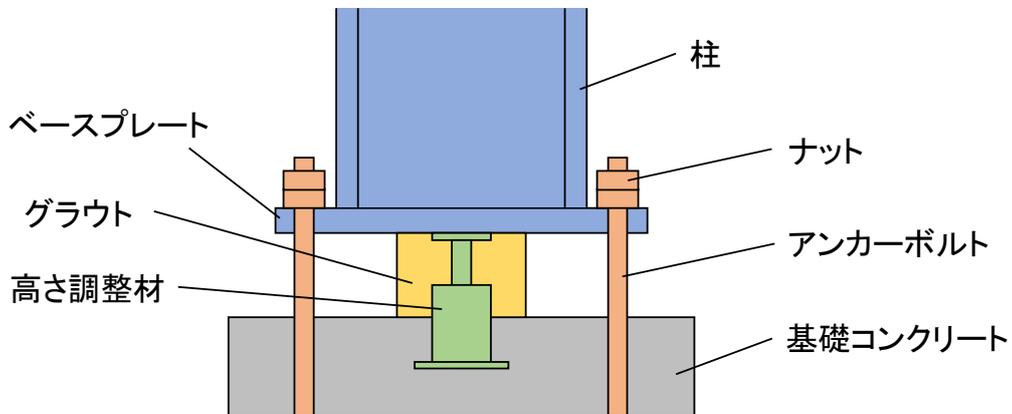


図3 鉄骨架構の倒壊前の柱の基礎部分の立面図

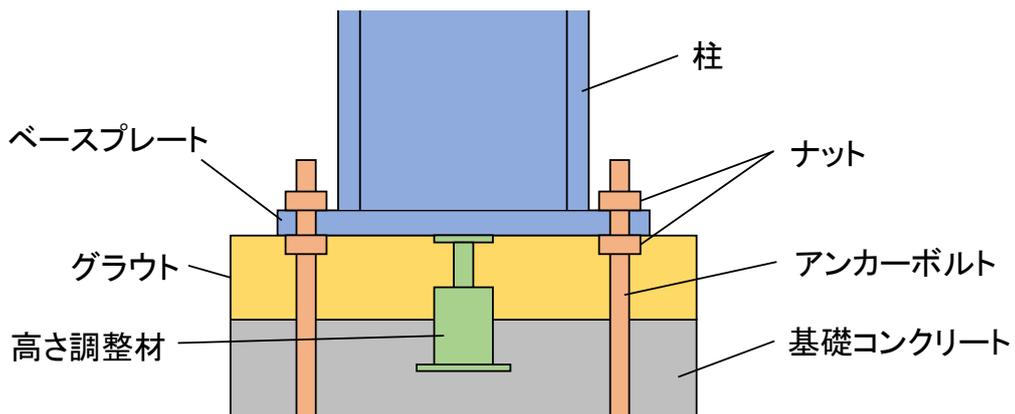


図4 業者が指定する柱の基礎部分の設置方法

2. 3 鉄骨架構の倒壊後の柱2の基礎部分の損傷状況

グラウトの破壊範囲を示した柱2の基礎部分の平面図を図5に示す。図5より、柱2を支えていたグラウトは、柱2の重心（高さ調整材の中央）より南側と東側が破壊していた。図1より、柱2は設置されていた位置より南側に倒壊しているが、柱2が南側のみに倒壊した場合、グラウトは重心位置より南側のみが破壊すると考えられる。重心位置より東側のグラウトも破壊したことを考えると、柱2は最初に東側に傾き、その後、南側に方向を変えて倒壊した可能性が考えられる。

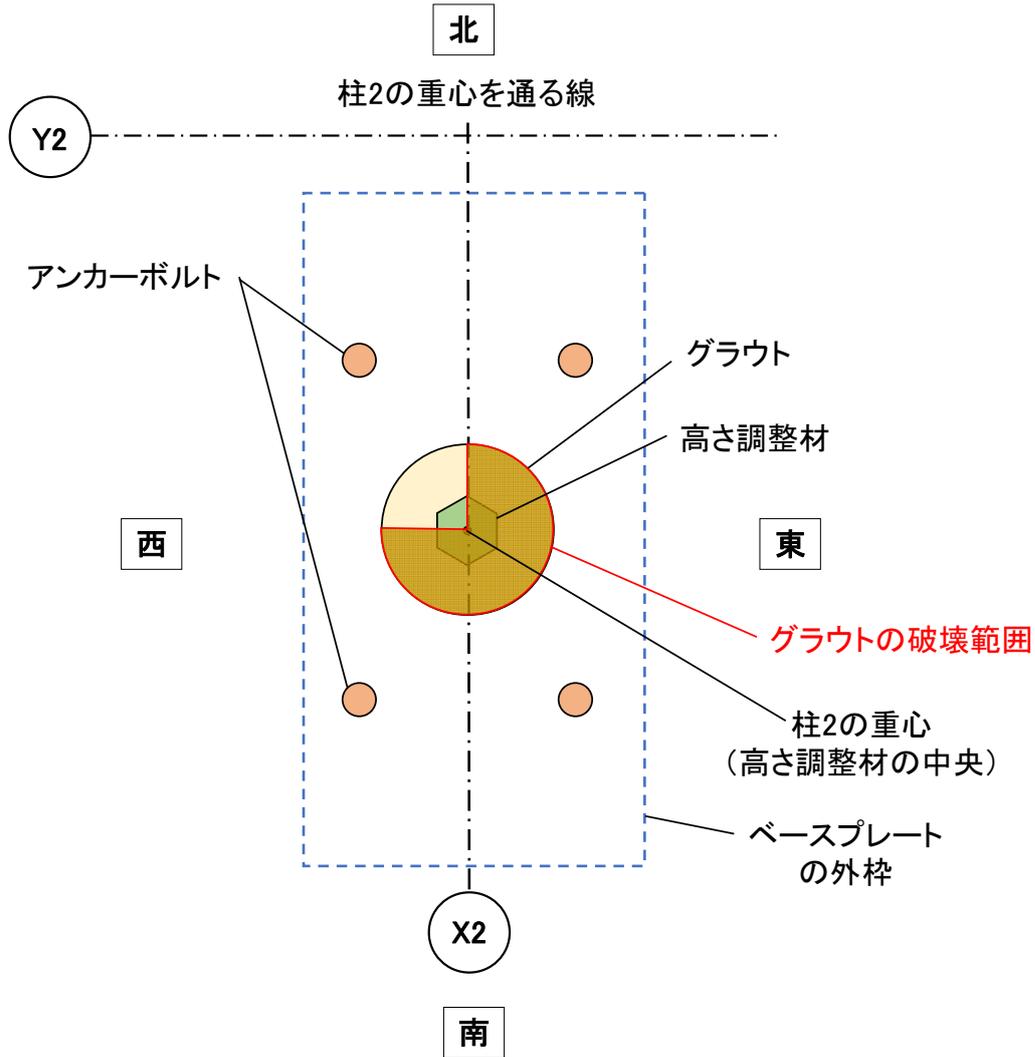


図5 グラウトの破壊範囲（柱2の基礎部分の平面）

3. 鉄骨架構の倒壊の検討

3. 1 検討の方法

災害現場での聞き取り調査より、鉄骨架構は作業者が乗る前から、ぐらついており、不安定な状態であったということであった。不安定な鉄骨架構に、作業者が乗れば、さらにぐらつき、鉄骨架構には作業荷重による水平方向の力（水平荷重）が加わったと考えられる。

本報では、水平荷重に対する鉄骨架構の安定性を計算し、その結果に基づいて、鉄骨架構の倒壊について検討した。

3. 2 柱 2 の安定性の検討

(1) 柱 2 に作用する鉛直荷重について

図 2 より、柱間に設置された梁の重量を、梁を支える 2 本の柱が均等に負担すると仮定すると、柱 1～柱 4 の 4 本の柱うち、梁 1 や梁 2 等を支える柱 2 が最も梁の重量を負担すると考えられる。さらに柱 1～柱 4 の断面形状は同じであり、柱 1 と柱 2 は、柱 3 と柱 4 に比べて高さが高い。このため、柱に作用する鉛直荷重が最も大きいのは柱 2 である。最も大きい鉛直荷重を受ける柱 2 の基礎部分が、最も破壊しやすいと考えられたので、柱 2 の安定性について検討を行った。

(2) 柱 2 の基礎部分の最大強度の計算

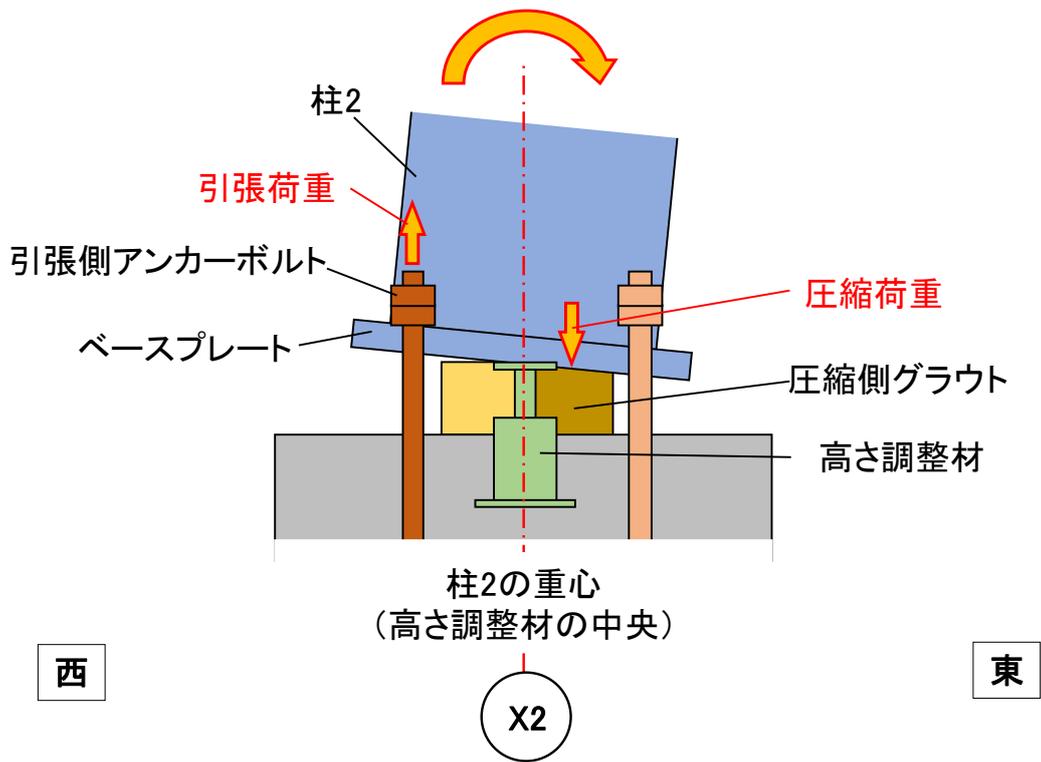
柱 2 に水平荷重が作用すると、柱 2 は図 6 (a)に示すように、柱 2 の重心（高さ調整材の中央）を軸として傾くと考えられる。災害発生後の柱 2 の基礎部分の損傷状況を見ると、柱 2 の重心より東側が破壊していたので、柱 2 は最初に東側に傾いたと考えられる。柱 2 が東側に傾くと、図 6 に示すように、柱 2 の重心より西側にあるアンカーボルト 2 本が引っ張られ、柱 2 の重心より東側のグラウトが圧縮されると考えられる。ここで、引っ張られるアンカーボルトを引張側アンカーボルトとし、圧縮されるグラウトを圧縮側グラウトとした。引張側アンカーボルトまたは圧縮側グラウトに最大強度を超える荷重が作用すると、引張側アンカーボルトまたは圧縮側グラウトは破壊し、柱 2 は安定性を失って傾くと考えられる。そこで、引張側アンカーボルトと圧縮側グラウトの最大強度を計算した。

【引張側アンカーボルトの最大引張強度】

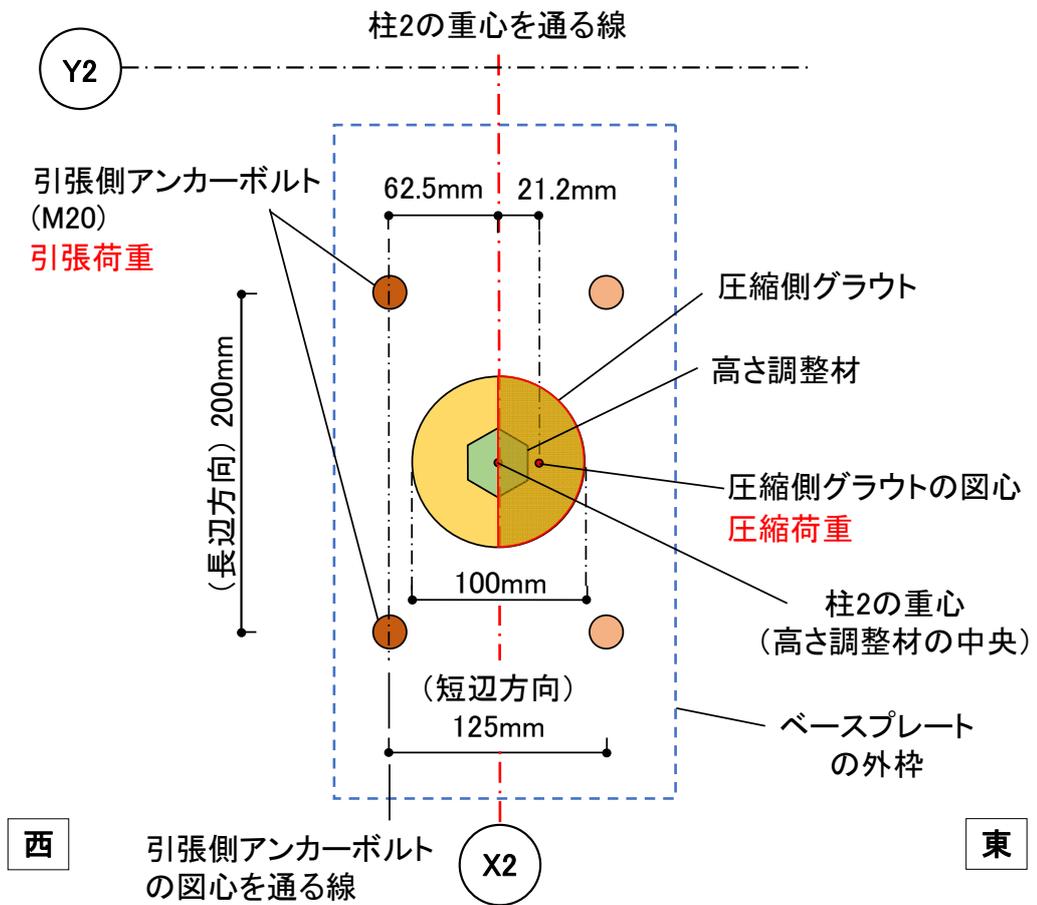
引張側アンカーボルトの断面積とボルトの材料強度を考慮して、引張側アンカーボルトの最大引張強度 N_{ma} を計算すると、50 kN であった。

【圧縮側グラウトの最大圧縮強度】

圧縮側グラウトの断面積とグラウトの材料強度を考慮して、圧縮側グラウトの最大圧縮強度 N_{mg} を計算すると、108 kN であった。



(a) 柱 2 の基礎部分の立面



(b) 柱 2 の基礎部分の平面

図 6 柱 2 の傾きにより基礎部分に作用する荷重

(3) 柱 2 の柱部分の安定性に関する計算

建設工事において、仮設構造物の安定性を検討する際、照査水平荷重という仮想の水平荷重を仮設構造物に作用させて、仮設構造物が倒壊しないことを確かめる¹⁾。このとき照査水平荷重には、仮設構造物の重量等の 5% を作用させる¹⁾。本報では、この照査水平荷重を用いて、柱 2 の安定性を検討した。

柱 2 の柱部分の安定性に関する計算条件と結果を表 1 に、柱 2 の柱部分に作用する照査水平荷重と曲げモーメントを図 7 に示す。

柱 2 に作用する照査水平荷重については、柱 2 の重量の上半分の重量と、柱 2 に接合されている梁 1、梁 2、及び小梁 1、小梁 2 の重量の 5% を作用させた。梁 1 本の重量については、その梁を支える 2 本の柱が均等に負担するとして、梁 1 本の半分の重量を柱 2 が負担すると仮定した。

照査水平荷重の作用点については、柱 2 の重量の上半分の重心位置（柱 2 の高さの 3/4 の地点）と、それぞれの梁及び小梁と柱 2 との接合部とした。

表 1 と図 7 に示すような照査水平荷重が作用した場合、柱 2 の柱下端に作用する曲げモーメント M_{C2} を計算すると、14.5 kNm であった。

表 1 柱 2 の柱部分の安定性に関する計算条件と結果

部材名	重量に対する割合 α	重量 W (kN)	照査水平荷重 P ($= \alpha W$) (kN)	柱2下端から照査水平荷重の作用点までの高さ h (m)	照査水平荷重により柱下端に作用する曲げモーメント M_0 ($= Ph$) (kNm)	柱2の柱下端に作用する曲げモーメントの合計 M_{G2} (kNm)
柱2	0.05	10.90	0.55	9.945	5.47	14.5
梁1		2.68	0.13	13.26	1.72	
小梁1		2.68	0.13	11.1	1.44	
小梁2		2.68	0.13	7.6	0.99	
梁2		7.34	0.37	13.26	4.91	

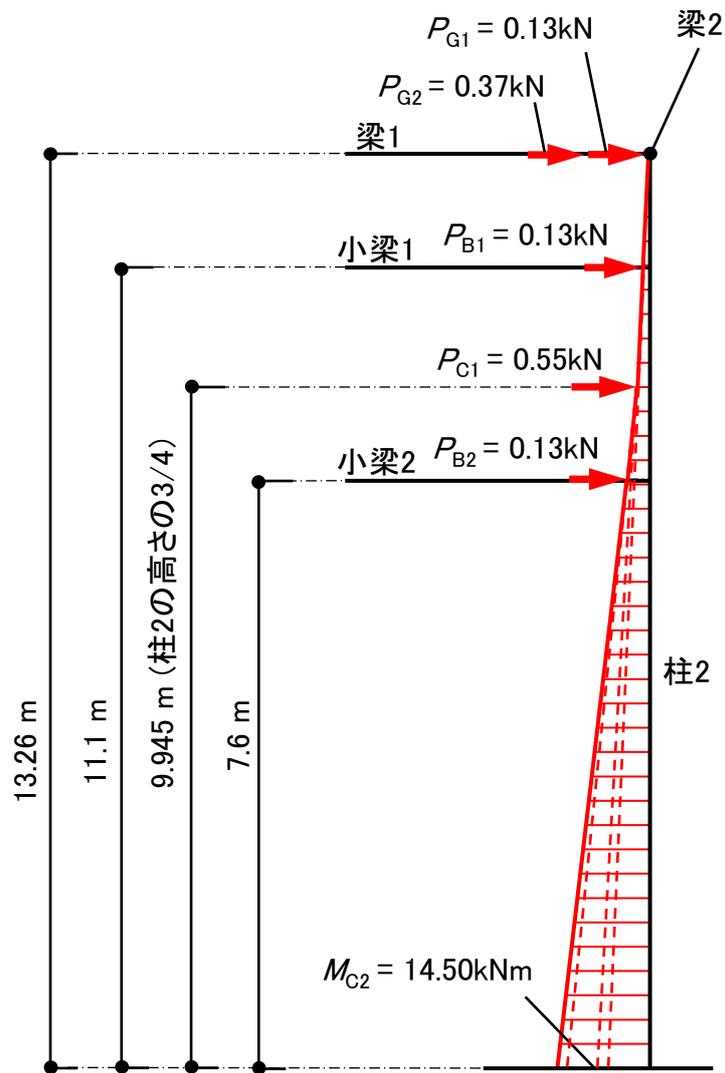


図 7 柱 2 の柱部分に作用する照査水平荷重と曲げモーメント

(4) 柱2の基礎部分の安定性に関する計算

柱2の基礎部分の安定性に関する計算条件と結果を表2に、柱2の基礎部分に作用する曲げモーメントと力を図8に示す。

柱2が傾いた時の柱2の重心位置における曲げモーメントの分担割合を、引張側アンカーボルトと圧縮側グラウトの部材の硬さ、断面積、図心からの距離を考慮して計算すると、次のようになる。

$$\beta_a : \beta_g = 0.79 : 0.21 \quad (1)$$

β_a : 柱2の重心位置における引張側アンカーボルト側の曲げモーメントの分担割合

β_g : 柱2の重心位置における圧縮側グラウト側の曲げモーメントの分担割合

表1と図7に示す柱2の柱下端に作用する曲げモーメント $M_{C2} = 14.5 \text{ kNm}$ の値を、式(1)の分担割合を用いて、柱2の重心位置で分担すると、表2と図8に示すように、引張側アンカーボルト側の曲げモーメントは 11.5 kNm になり、圧縮側グラウト側の曲げモーメント M_g は 3.0 kNm になる。 M_a と M_g および、柱2の重心から引張側アンカーボルトと圧縮側グラウトの図心までの距離を用いて、引張側アンカーボルトと圧縮側グラウトに作用する力を計算すると、引張側アンカーボルトに作用する力 N_a は 183 kN になり、圧縮側グラウトに作用する力 N_g は 143 kN になる。

表2 柱2の基礎部分の安定性に関する計算条件と結果

部材名称	柱2の端に作用する曲げモーメントの合計 M_{C2} (kNm)	曲げモーメントの分担割合 β	基礎部分に作用する曲げモーメント M ($=\beta M_{C2}$) (kNm)	柱2の重心から部材図心までの距離 b (m)	部材に作用する力 N ($=M/b$) (kN)	最大強度 N_m (kN)	部材破壊の判定
引張側アンカーボルト	14.5	0.79	11.5	0.0625	183	50	破壊する
圧縮側グラウト		0.21	3.0	0.0212	143	108	破壊する

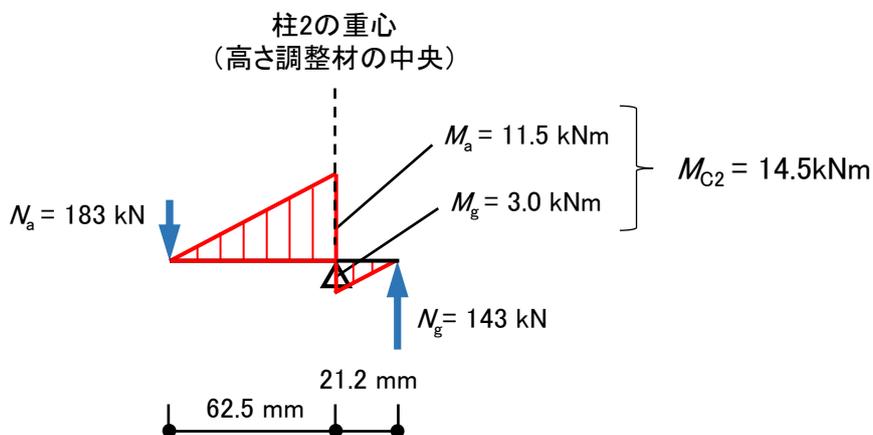


図8 柱2の基礎部分に作用する曲げモーメントと力

3. 3 柱 2 の安定性と鉄骨架構の倒壊の検討

表 2 と図 8 に示すように，柱 2 に作用する照査水平荷重により，柱 2 の基礎部分に作用する力を計算した結果，引張側アンカーボルトに作用する力 N_a は 183 kN になり，圧縮側グラウトに作用する力 N_g は 143 kN になった．一方，柱 2 の基礎部分の最大強度については，3.2 (2)節に示したように，引張側アンカーボルトの最大引張強度 N_{ma} は 50 kN であり，圧縮側グラウトの最大圧縮強度 N_{mg} は 108 kN であった．引張側アンカーボルトと圧縮側グラウトに作用する力と最大強度を比較すると以下のようなになる．

$$N_a = 183 \text{ kN} > N_{ma} = 50 \text{ kN} \quad (2)$$

$$N_g = 143 \text{ kN} > N_{mg} = 108 \text{ kN} \quad (3)$$

式(2)と式(3)より，引張側アンカーボルトと圧縮側グラウトには，照査水平荷重によって最大強度よりも大きい力が作用したため，引張側アンカーボルトと圧縮側グラウトは破壊して，柱 2 は不安定な状態になったと考えられる．

柱 2 が不安定となり傾けば，梁によって連結されている柱 1 と柱 4 にも過大な水平荷重が作用し，柱 1 と柱 4 の基礎部分も破壊して，鉄骨架構は倒壊すると考えられる．

また，柱 2 は最初に，図 2 に示す東側に傾いたと考えられるが，この柱 2 の傾きに伴って，柱 1 と柱 4 も東側に傾いたと考えられる．ただし，柱 2 と柱 1 は，梁 1 と小梁 1，小梁 2 によって連結されているため，東側への倒壊が拘束され，柱 4 のみが東側に倒壊し，柱 2 と柱 1 については，最終的に南側に倒壊したと考えられる．

4. 推定される災害発生状況

災害現場の状況と本報の検討結果より、想定される災害発生状況は以下のものであったと考えられる。

- ① ぐらついている鉄骨架構に作業者が乗る。ぐらついている鉄骨架構に作業員が乗ったことにより、鉄骨架構に作業荷重が作用する（図9(a)）。

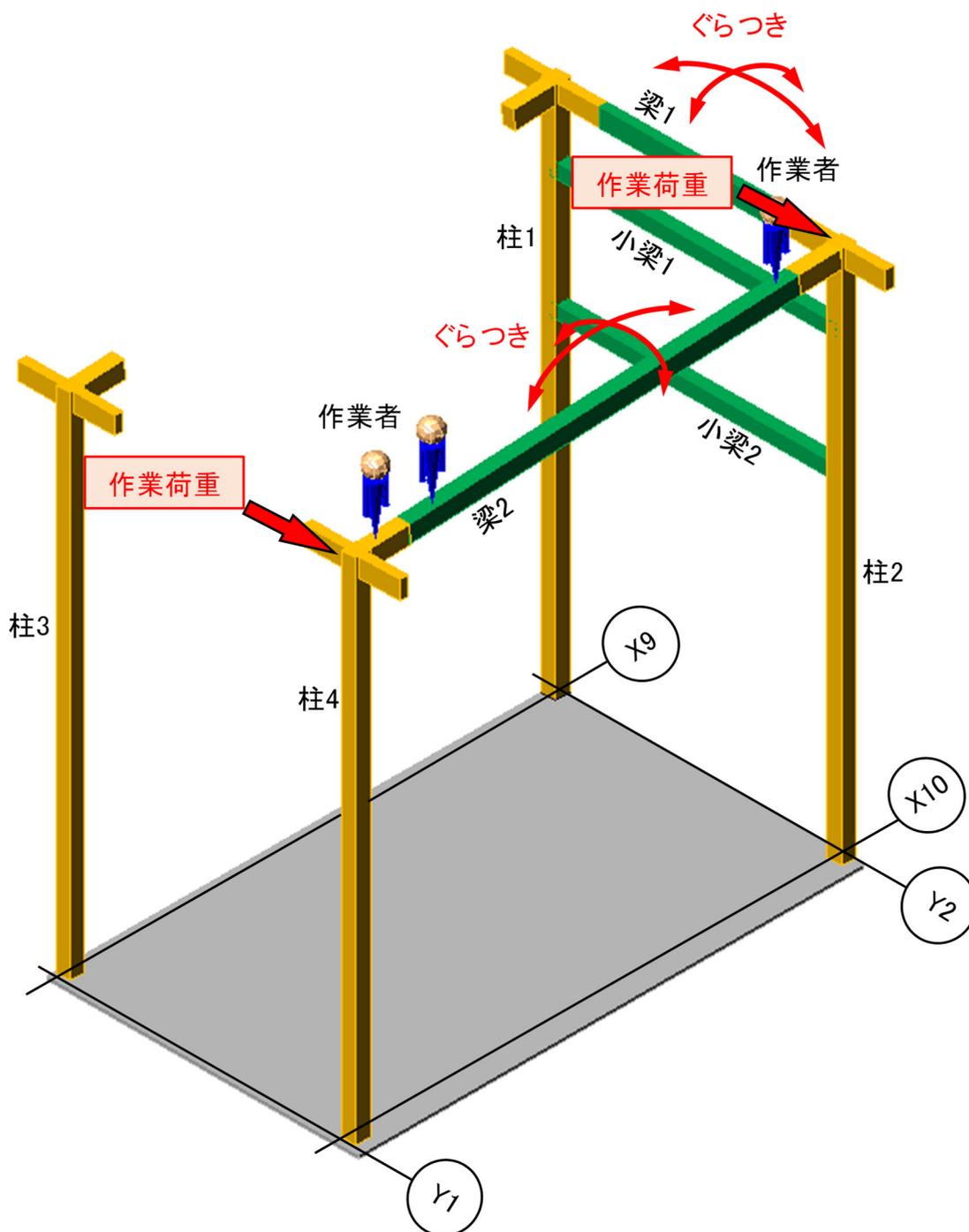


図9(a) 作業における鉄骨架構の状況

- ② 作業荷重の水平分力（水平荷重）により柱2に曲げモーメントが作用し、この曲げモーメントの影響で柱2の基礎部分が破壊する。基礎部分が破壊したことで、柱2は安定性を失って傾く（図9(b)）。

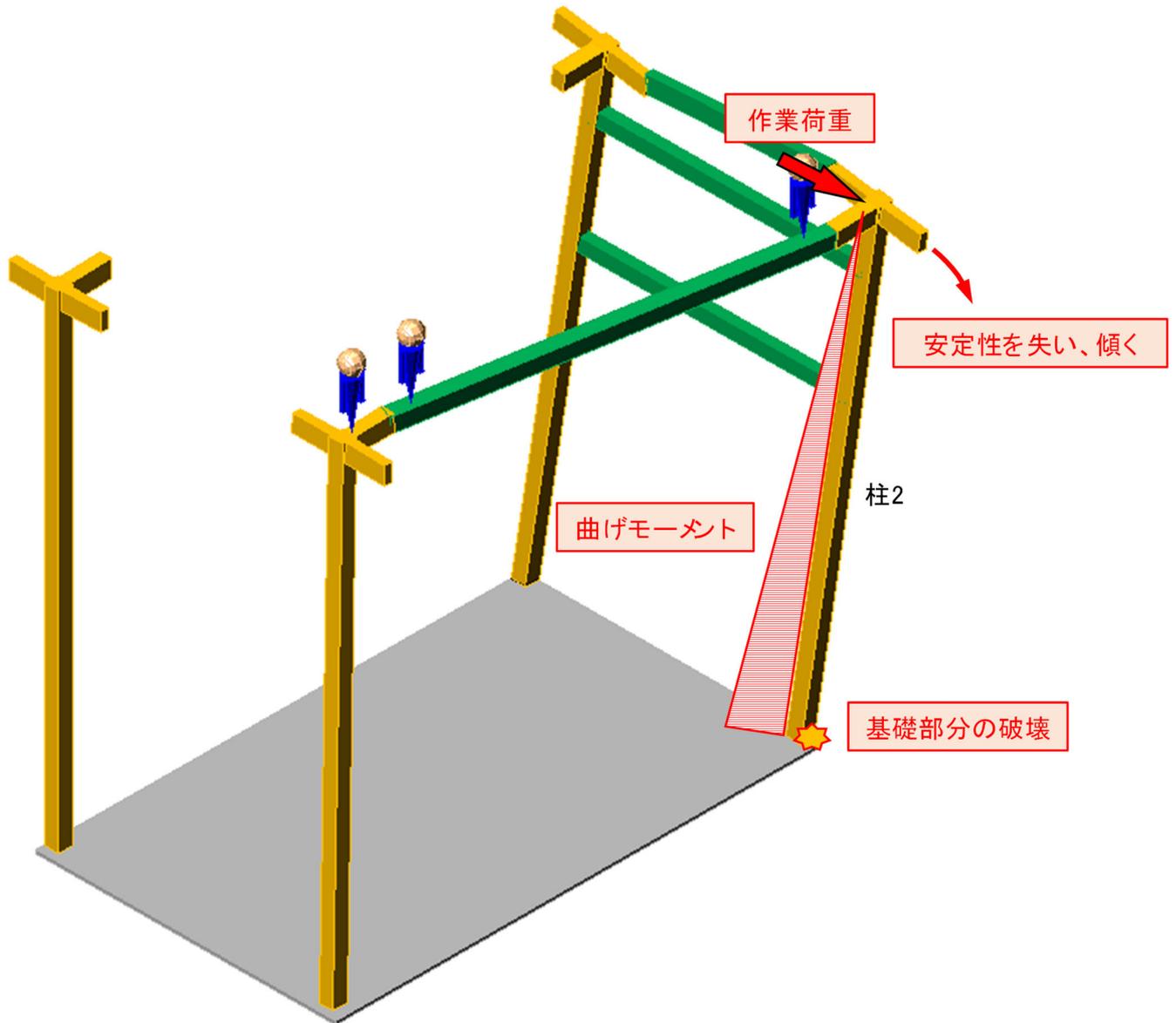


図9(b) 柱2の傾き

- ③ 柱 2 が傾いたことにより，梁 2 によって柱 2 と連結している柱 4 にも過大な荷重が作用する．柱 4 に過大な荷重が作用したことで，柱 4 に曲げモーメントが作用し，この曲げモーメントの影響で柱 4 の基礎部分が破壊する．基礎部分が破壊したことで，柱 4 も安定性を失って傾く（図 9 (c)）．

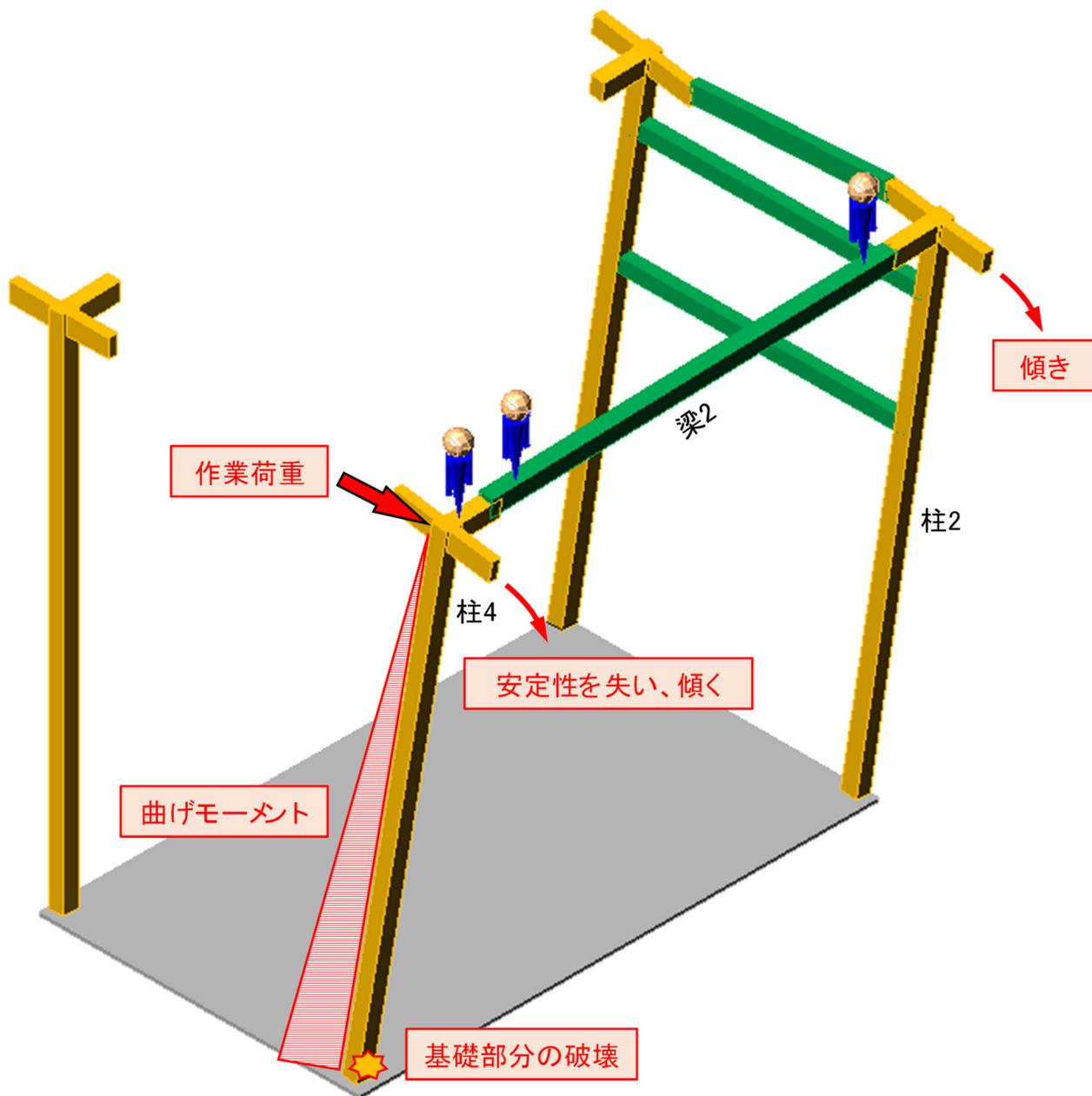


図 9 (c) 柱 4 の傾き

- ④ 柱4の傾きが大きくなる。柱2も傾きが大きくなるが、柱2は梁1等によって柱1に連結されて門型の構造となっていることから、柱4が倒壊した方向に対する強度が高い。このため、柱2は柱4が倒壊した方向には倒れにくい構造である。これらより、柱2は柱4が傾いた方向ではなく、柱4が倒れた方向と直角方向へ柱4に引っ張られるように傾く。この時、柱1も柱2に伴って傾きが大きくなる（図9(d)）。

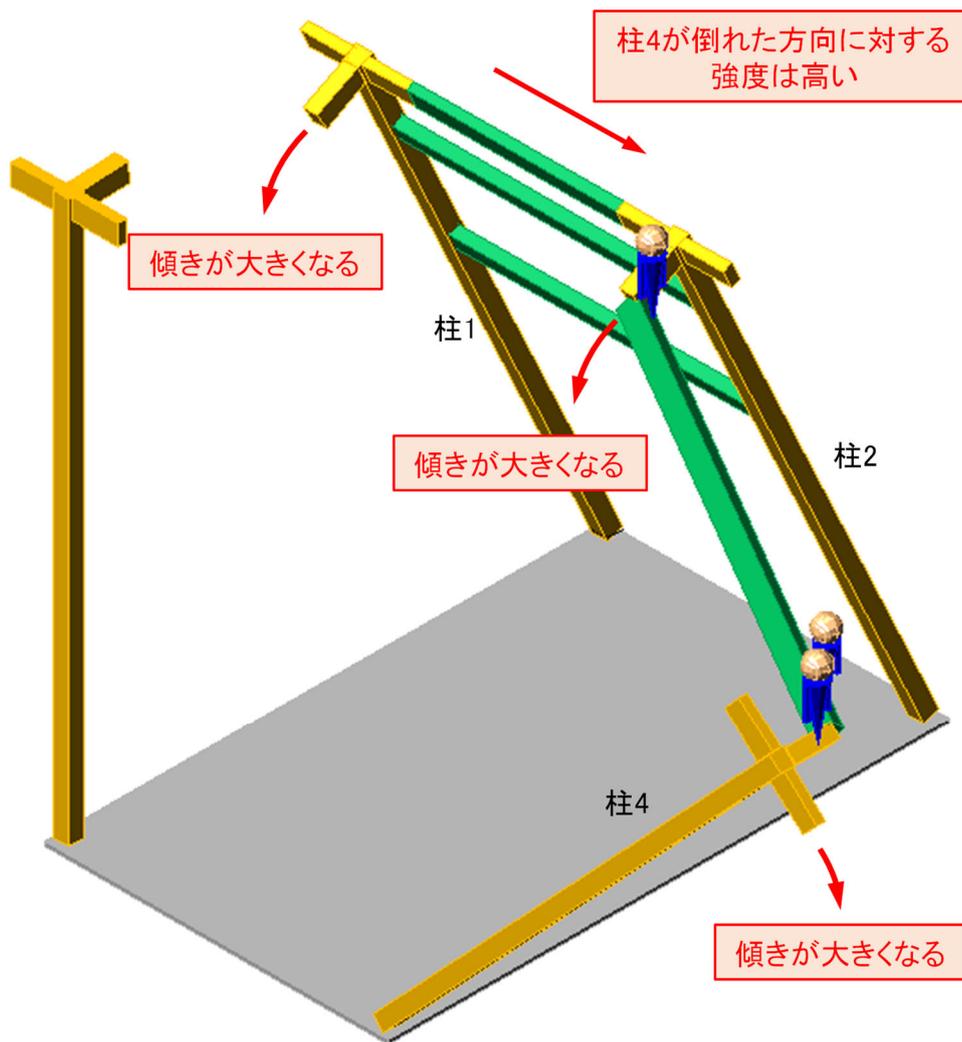


図9(d) 鉄骨架構の傾き

⑤ 柱 1, 柱 2, 柱 4 が倒壊する. 柱 3 も柱 1 に当たって, 倒壊する (図 9 (e)).

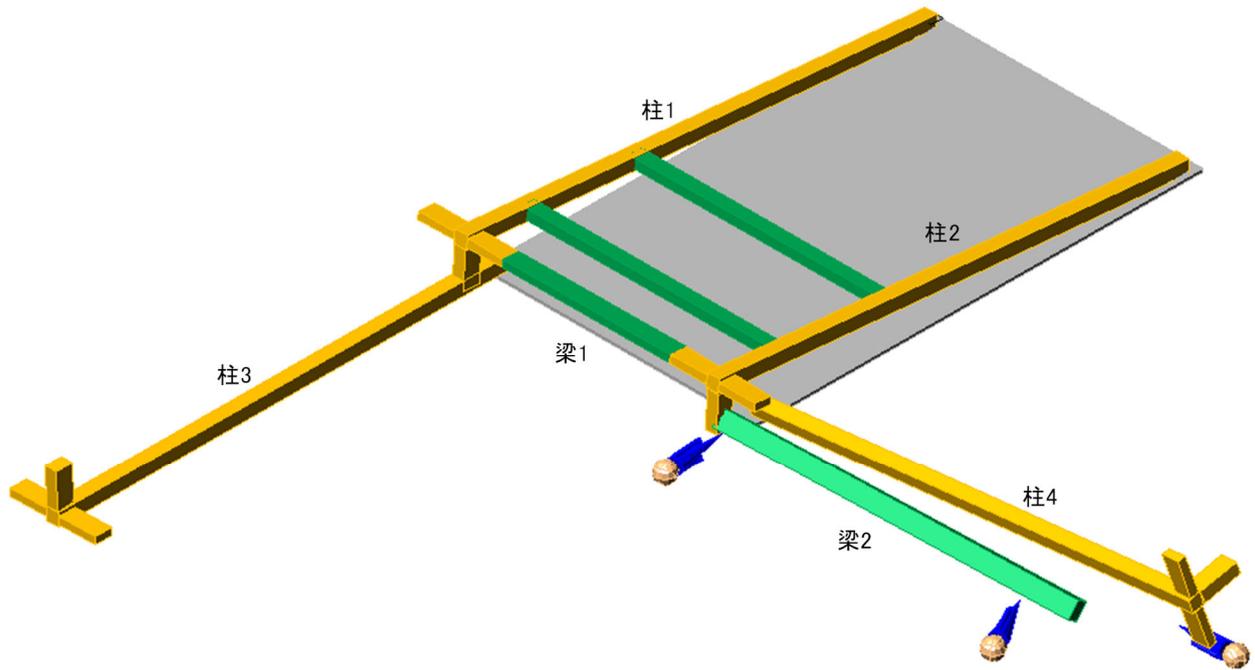


図 9 (e) 鉄骨架構の倒壊

5. 災害発生の原因

災害現場の状況と本報の検討結果より、災害発生の原因は、以下のものであったと考えられる。

- ① ぐらついて不安定な鉄骨架構に作業者を乗せたこと。
- ② 想定される作業荷重に対して、柱の基礎部分の強度が著しく小さかったこと。
- ③ 現場での柱の基礎部分のベースプレートのナットの設置位置とグラウトの注入範囲が、業者の指定どおりではなく、柱の基礎部分の強度が小さかったこと。
- ④ ぐらついて不安定な鉄骨架構に対して、ワイヤロープを張る等の倒壊防止措置を講じていなかったこと。
- ⑤ 鉄骨架構は高さスパンともに非常に長く、不安定な構造であった。不安定な構造の鉄骨架構の周囲に、足場を設置する等の墜落防止措置を講じていなかったこと。

6. 再発防止対策

災害の再発防止対策は以下のようなになる。

- ① ぐらついて不安定な鉄骨架構に作業員を乗せない。
- ② 鉄骨架構に作業員を乗せる時は、照査水平荷重を用いる等して架構の安定性を検討する。
- ③ 柱下端の柱の固定方法は、業者の指定どおりに行う。
- ④ 鉄骨架構にワイヤロープを張る等の倒壊防止措置を講じる。
- ⑤ 鉄骨架構の周囲に足場を設置する等の墜落防止措置を講じる。

参考文献

- 1) 一般社団法人仮設工業会：足場・型枠支保工設計指針，2019。