

落下物に対する防護構台の耐衝撃性確認試験

竹崎 真一^{*1}・欄木 龍大^{*2}・成原 弘之^{*1}・福本 陽介^{*3}・鈴木 達也^{*4}・田中 誠司^{*4}

Keywords : impact test, mock-up specimen, artificial ground, protective equipment, station building construction, temporary facility plan
衝撃試験, 実大試験体, 人工地盤, 防護構台, 駅舎工事, 仮設計画

1. はじめに

鉄道営業線の軌道上空に建物を建設する計画において、本設の構造躯体の上部に防護対策を施して防護構台を構築することで、鉄骨の建方工事等を昼間作業にて行う計画としている。これまで、営業線上空の作業は、列車の運行が終了した、深夜の僅かな時間に限られており、工期短縮、コスト削減に対する障害となっていた。これらの問題点を解決するため、昼間施工範囲は防護構台により全面被覆して、落下物に対する養生を施すことで、万一吊り鉄骨等が落下した場合においても、軌道上の安全性を確保する計画としている。一方、吊り鉄骨落下時における衝撃荷重に関しては不明な点も多いため、実施工に先立ち、実大試験体を用いた鉄骨落下衝撃試験を実施した。

本報告は、この鉄骨落下衝撃試験の概要およびその結果について記すものである。

2. 試験計画

2.1 試験体

図-1に鉄骨落下衝撃試験の模式図を、図-2に試験体の形状・寸法を示す。試験体は実際に施工される構造フレームの1スパン×1スパン(16m×13m)を取り出したモックアップ試験体であり、柱鉄骨(クロスH-600×200×11×17)下部には、地盤による衝撃力緩和の影響を排除するため、長さ6.5mの山留材(H-500)とRC基礎スラブ(2m×2m、厚さt=400mm)からなる基礎部を設けている。柱鉄骨上部の13mスパン間に大梁(BH-1, 300×650×25×40)を設置し、この

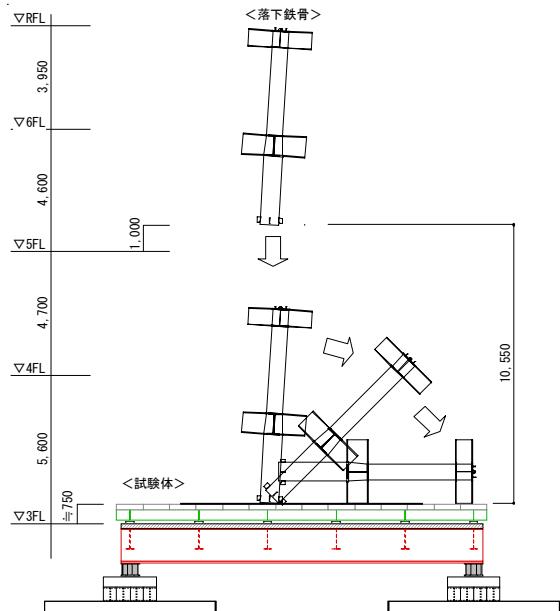


図-1 鉄骨落下衝撃試験模式図
Fig.1 Image of impact test against falling steel frame

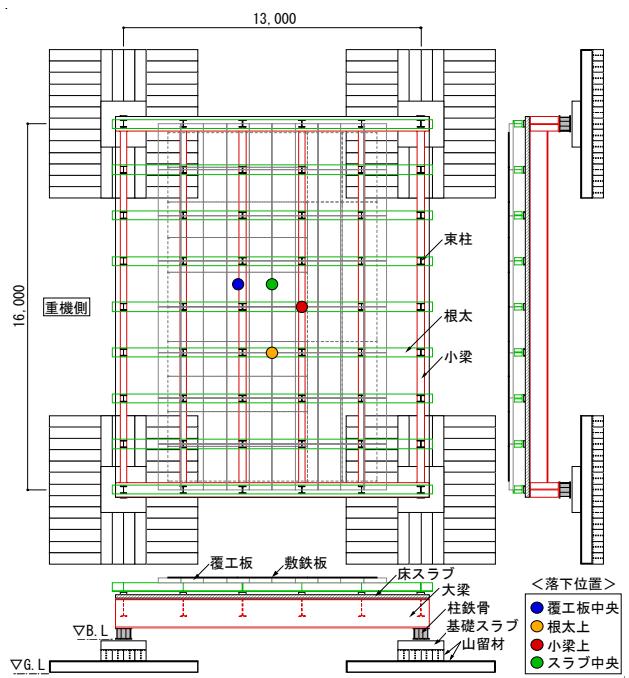


図-2 試験体形状・寸法
Fig.2 Dimensions of specimen

*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

*2 技術センター建築技術研究所防災研究室

*3 設計本部構造グループ

*4 千葉支店建築工事作業所

大梁間に小梁 (BH-800 × 300 × 14 × 25) をピッチ2,600mmで架け渡している。また、大梁上にはピッチ2,600mmで、小梁上にはピッチ2,000mmで束柱を配置するとともに、その上部にはデッキプレートを用いた床スラブが最大厚さ $t=170\text{mm}$ で打設されている。束柱上には小梁と直交する方向に根太 (H-400 × 400 × 13 × 21) を配置し、この根太上に、覆工板 (1m × 1m, 高さ $h=215\text{mm}$) と敷鉄板 (PL22) もしくは覆工板のみを設置し、本設の床スラブとともに防護構台を形成している。

図-3に落下鉄骨の形状・寸法を示す。落下鉄骨は、実施工での建て方時を想定し、2層1節部分の1種類とし、各試験ケースでの損傷を考慮して2本用意した。落下鉄骨の長さは7,350mm、その質量は $6.5 \times 10^3\text{kg}$ である。柱の断面寸法は、下部で $\square-700 \times 700 \times 28$ 、上部で $\square-600 \times 600 \times 25$ であり、その上部および中間部の周囲4面には鉄骨梁が柱芯から1,200mmの長さで取り付いている。上部の梁はBH-650 × 500 × 12 × 25、中間部の梁はBH-800 × 500 × 19 × 36である。また、落下鉄骨上部のボックス柱には揚重用の吊りピースが各辺に1箇所、計4箇所設置されている。

2.2 試験ケース

表-1に試験ケースを示す。試験ケースは、防護構台として床スラブ+覆工板+敷鉄板とした「試験体A」と、床スラブ+覆工板とした「試験体B」の2種類を計画するとともに、本試験終了後において、床スラブのみとした「試験体C」による参考試験も計画した。落下位置は、前述の図-2に示す通りであり、試験体中央近傍での覆工板中央、根太上、小梁上(束柱上)の

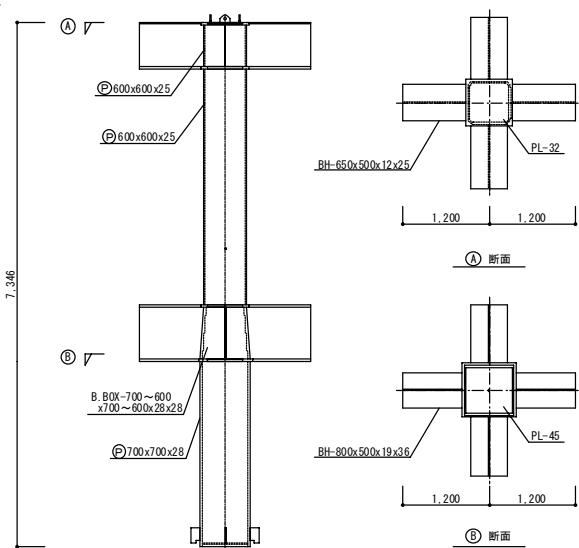


図-3 落下鉄骨の形状・寸法
Fig.3 Dimensions of falling steel flame

3地点を設定し、試験結果を見ながら適宜省略する計画とした。落下高さは実施工時を想定した11mと、測定機器の動作確認および試験手順の確認のための4mとした。

試験手順は、まず、試験体Aによる予備試験を実施し、試験準備に不備がないことを確認した後、同じく試験体Aによる本試験を実施する。次に、試験体Aから敷鉄板を撤去した試験体Bによる試験を実施して、試験体Aおよび試験体Bを用いた場合の軌道上の安全性を確認する。さらに、本試験終了後には覆工板も除去し、床スラブのみとした参考試験も実施する。

2.3 計測計画

表-2にひずみ、加速度、変位に対する計測項目および計測方法を示す。試験体四隅の柱クロスHは梁支点反力計測用のロードセルとして使用するため、フランジ部4面でのひずみ計測を実施した。得られた4点のひずみ値は4ゲージ法により1つのひずみ値(平均値)として計測し、事前に実施したキャリブレーション試験から得られた校正係数を掛けることで荷重へと変換した。その他のひずみ計測位置は、大梁と小梁におけるスパン中央での下フランジ中央部(ウェブ部)、スラブ下面(デッキプレート凸部)、スラブより突出した束柱の両フランジ中央部(ウェブ部)である。なお、

表-1 試験ケース
Table 1 Test cases

試験体名 ^{*1}	落下高さ	落下位置 ^{*2}			備考
試験体A	4m	覆工板中央	根太上	小梁上	予備試験
試験体A	11m	覆工板中央	根太上	小梁上	本試験
試験体B	11m	覆工板中央	根太上	小梁上	本試験
試験体C	11m	床スラブ中央			参考試験

注) * 1 試験体A:床スラブ+覆工板+敷鉄板

試験体B:床スラブ+覆工板

試験体C:床スラブのみ(参考試験)

* 2 適宜省略する

表-2 計測項目および計測方法
Table 2 Measurement points and method

			チャンネル数	動ひずみ アンプ	シグナル コンディショナ	貼付枚数	備考
ひずみ	柱	フランジ4面	4	4	0	16	4ゲージ法
	大梁・小梁	下フランジ	6	6	0	6	1ゲージ法
	束柱	両フランジ	2	2	0	12	2ゲージ法
	RC床スラブ	下面	4	4	0	4	1ゲージ法
	小計		16	16	0	38	
加速度	落下鉄骨		1	0	1	1	1000G
	大梁・小梁	下フランジ	4	0	4	4	100G
	RC床スラブ	下面	2	0	2	2	100G
	基礎スラブ上		1	0	1	1	10G
	地盤上		1	0	1	1	10G
変位	大梁・小梁	下フランジ	4	0	0	4	レーザ変位計
	RC床スラブ	下面	2	0	0	2	レーザ変位計
	小計		6	0	0	9	
	合計		31	16	9		

束柱のひずみは2ゲージ法により両フランジの平均値を計測するとともに、落下位置によりその計測位置を変更する計画とした。加速度の計測位置は、落下鉄骨下部、大梁と小梁におけるスパン中央での下フランジ中央部、スラブ下面、基礎スラブ上および地盤上とし、上下方向の加速度を計測した。変位の計測位置は、大梁と小梁におけるスパン中央位置での下フランジ中央部、スラブ下面とし、上下方向の変位を計測した。主な計測位置は後述の図-5に示す通りである。

各種センサーの応答波形は、サンプリング振動数20.48kHz(1秒あたり20,480回)のA/D変換を実施し、デジタル波形データを収録した。計測された原波形にはノイズや高周波成分の波が多く含まれるため、原波形の状態では試験体の衝撃応答の評価を行うことが困難なため、収録されたデジタル波形データに対して100Hzのローパスフィルター処理を施した。

2.4 実施要領

図-4に試験実施方法を示す。鉄骨落下衝撃試験は、試験体の長辺(16m)方向側面に鉄骨揚重用のクレーンを配置し、さらに、その後方に計測車を配置した。また、試験体の短辺方向と長辺方向の各1面には落下鉄骨養生用の防護柵を設置した。落下高さ、落下位置の確認は、落下鉄骨下部にマグネットにより取付けた下げ振りを用いて行った。鉄骨を落下させる方法は、同図中に示される特殊フック(掴み、開放装置)を介して落下鉄骨を主クレーンにより所定の高さまで吊り上げた後、補助クレーンにより特殊フックの端部を徐々に持ち上げることで、特殊フックからワイヤーを外し

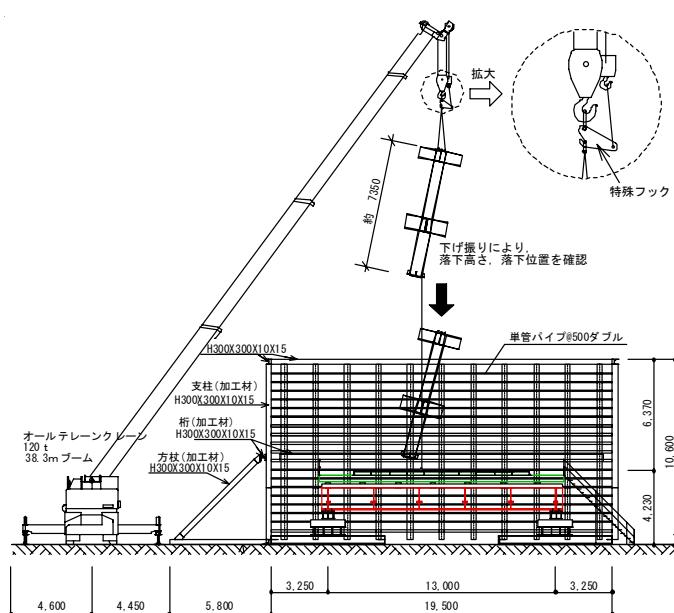


図-4 試験実施方法

Fig.4 Test set-up

て、目標とする位置に鉄骨を自由落下させた。

試験状況は通常のビデオカメラ3台とハイスピードビデオカメラ1台を用いて記録した。また、各試験終了後には試験体下面への落下物の有無を確認するとともに、鉄骨落下位置近傍での試験体の損傷状況をデジタルカメラにて記録した。

3. 試験結果

3.1 実施概要

表-3に実施した試験項目を、写真-1に試験実施状況を示す。鉄骨落下衝撃試験は約2週間にわたり、1日おき、計5日で実施した。まず予備試験として試験体Aを用い、高さ4m小梁上と高さ11m覆工板中央を実施し、試験方法およびその手順を確認した。また、落下鉄骨下部に取付けた下振りと特殊フックを用いることで、ほぼ目標とした位置に鉄骨を落下させることができることを確認した。次に本試験として、試験体Aに対し、高さ4m小梁上と高さ11m覆工板中央および高さ4m根太上を実施した。その後、試験体Aから敷設鉄板を除去した試験体Bに対し、落下高さはすべて11mとして、落下位置を覆工

表-3 試験実施項目

Table 3 Executed test item

試験体名	落下高さ	落下位置	備考
試験体A	4m	小梁上	予備試験
	11m	覆工板中央	
試験体B	4m	小梁上	本試験
	11m	覆工板中央	
	4m	根太上	
試験体C	11m	覆工板中央	本試験
	11m	根太上	
	11m	小梁上	
試験体C	1m	束材間中央	破壊試験



写真-1 試験実施状況

Photo 1 Situation of impact test

板中央, 根太上, 小梁上(束柱上)とした3ケースの試験を実施した。最後に参考試験として, 床スラブ上に高さ1mから鉄骨を落下させ, すべての試験を終了した。

3.2 試験結果概要

試験体A(床スラブ+覆工板+敷鉄板), 試験体B(床スラブ+覆工板), いずれの鉄骨落下衝撃試験においても, コンクリート打設時にデッキプレートに付着したモルタル成分(ノロ)が剥離した部分があるものの, 床スラブ, 小梁等の構造躯体には目立った損傷は見られなかった。

落下高さを11mとした4つの試験から得られた, 鉄骨落下時における加速度, 変位, 支点反力およびひずみの最大値一覧を表-4に示す。また, 同表中に示される計測位置を図-5に示す。同表中の加速度と変位は上向きを正に, 荷重とひずみは引張りを正として示している。また, 梁変位において, 小梁中央変位(B4)から大梁中央変位(B7)を差引いた小梁部材としての中央変位(演算値)も示している。なお, 落下鉄骨の加速度は, 落下衝突時における断線やセンサー不良により計測データの信頼性が低いため, 参考値として示している。

試験体A高さ11m覆工板中央において, 小梁のスパン中央ひずみ(B3)に残留ひずみが生じており, この領域は鉄骨落下の衝撃力により降伏していたことがわかる。また, 小梁中央部の材質はSS400であり, その実降伏点

は300N/mm²程度(規格降伏点235N/mm²)であると考えられるため, 計測された最大応答値(1749 μ)からも小梁は降伏していたことがうかがえる。

高さ11m覆工板中央における試験体Aと試験体Bの比較において, 試験体Bの計測値が試験体Aに対し相対的に小さくなっている。この一因として, 試験体Aでは敷鉄板の存在により衝撃力を強固に受け止めるのに対し, 試験体Bでは覆工板が著しく変形・損傷(後述3.3節参

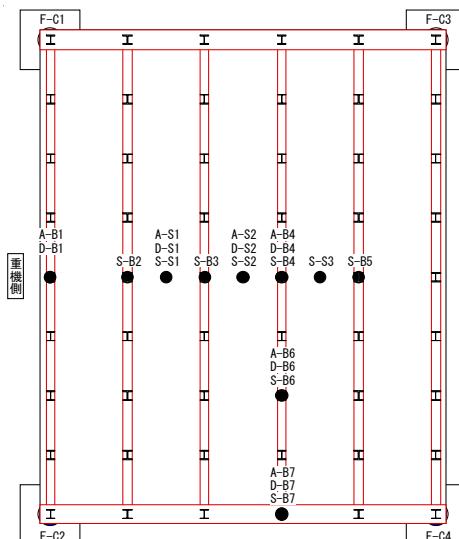


図-5 計測位置
Fig.5 Measurement points

表-4 最大値一覧 (落下高さ11m)
Table 4 List of maximum responses

計測項目	計測位置	成分 名称	単位	試験体A			試験体B			高さ11m, 小梁上		
				高さ11m, 覆工板中央			高さ11m, 覆工板中央			高さ11m, 根太上		
				MAX	MIN	残留	MAX	MIN	残留	MAX	MIN	残留
加速度 (上向き+)	落下鉄骨(参考値)	A-1	m/s ²	(102)	(-871)	-	▲	▲	-	▲	▲	-
		A-B1	m/s ²	199	-222	-	98.6	-72.7	-	120	-173	-
		A-B4	m/s ²	168	-125	-	105	-66.0	-	178	-101	-
		A-B6	m/s ²	230	-222	-	59.1	-51.0	-	162	-116	-
	スラブ	A-B7	m/s ²	73.5	-38.0	-	29.7	-18.7	-	98.7	-32.3	-
		A-S1	m/s ²	301	-193	-	231	-141	-	155	-102	-
		A-S2	m/s ²	349	-129	-	300	-238	-	315	-129	-
変位 (上向き+)	RC基礎	A-R1	m/s ²	74.0	-51.7	-	28.8	-14.9	-	59.9	-49.5	-
		A-G1	m/s ²	6.00	-6.75	-	2.38	-3.34	-	4.26	-4.96	-
	小梁部材(演算値)	D-B1	mm	37.5	-40.1	-0.6	19.5	-22.4	-0.4	32.1	-34.5	-0.2
		D-B4	mm	32.7	-53.6	-2.9	26.7	-31.7	0.1	36.4	-55.9	-5.4
		D-B6	mm	27.7	-41.0	-1.8	21.3	-23.8	-0.1	30.8	-47.0	-4.6
		D-B7	mm	12.6	-13.9	-0.5	8.1	-7.8	-0.4	21.4	-14.3	-0.8
		B4-B7	mm	20.5	-45.8	-2.4	19.7	-25.9	0.4	19.5	-41.7	-4.6
ひずみ (引張+)	スラブ	D-S1	mm	33.9	-52.2	-3.9	26.7	-34.2	0.0	38.7	-45.5	-2.9
		D-S2	mm	35.7	-59.1	-4.7	28.4	-36.4	0.3	39.0	-60.6	-5.3
	梁	F-C1	kN	482	-1698	-	436	-881	-	485	-1580	-
		F-C2	kN	237	-1964	-	347	-909	-	316	-1232	-
		F-C3	kN	19	-2604	-	137	-1453	-	31	-3050	-
		F-C4	kN	468	-1861	-	528	-854	-	593	-1691	-
		S-B2	μ	1038	-431	70	720	-362	8	706	-454	25
	梁	S-B3	μ	1749	-371	215	955	-446	30	1227	-504	70
		S-B4	μ	1266	-497	55	832	-423	20	1246	-491	55
		S-B5	μ	564	-358	5	455	-403	-6	780	-428	35
		S-B6	μ	856	-393	3	432	-290	1	989	-306	35
		S-B7	μ	556	-241	-4	249	-147	3	586	-159	50
	スラブ	S-S1	μ	608	-285	45	235	-188	40	471	-177	20
		S-S2	μ	467	-335	10	309	-241	8	669	-188	88
		S-S3	μ	744	-514	-5	217	-197	-8	539	-326	7

注) ローパスフィルタ(100Hz)処理後の最大・最小値

▲ 計測不能(断線、センサー不良等による)

照)することで,衝撃力が緩和されたためと考えられる。

試験体B高さ11m根太上において,小梁部材のスパン中央に残留変位(-4.6mm)が生じており,本条件下においても小梁は降伏域に達することがうかがえる。

試験体B高さ11m小梁上(束柱上)において,小梁中央部の2箇所(B4,B5)でそのひずみは降伏ひずみを超え,両箇所とも塑性化により比較的大きな残留ひずみが生じている。また,小梁部材のスパン中央変位(演算値)も-53.5mmを示し,その残留変位も-7.2mm(スパンの1/2220)となっており,今回実施した試験ケースの中で最も大きな計測値を示した。

以上より,床スラブ上に防護対策を施した人工地盤上に11mの高さから鉄骨が落下した場合,床スラブ,小梁等の本節の構造躯体に目立った損傷が見られないこと,小梁のスパン中央域は降伏し,残留たわみ(最大7.2mm,スパンの1/2220)が生じること,小梁上(束柱上)へ鉄骨が落下した場合の損傷が最も顕著であることが確認できた。

3.3 損傷状況

写真-2に試験体A高さ11m覆工板中央での鉄骨落下後における試験体の損傷状況を示す。なお,写真中の緑色のマークは目標とした落下位置であり,左側が本試験でのもの,右側はその直前に実施した高さ4m,小梁上でのものである。

試験体上面の敷鉄板は,鉄骨落下の衝撃力により,短辺方向の一端で160mm,他端で110mm浮き上がるとともに,落下位置では最大105mmのたわみが生じた。また,敷鉄板下部の覆工板にも損傷がみられ,その表面の一部が剥離するとともに,中央位置において115mmのたわみが生じた。さらに,覆工板下部の根太にも損傷が及び,上部フランジ部の両端が大きく変形するとともに,中央ウェブ位置において50mmのたわみが生じていた。

写真-3に試験体B高さ11m小梁上(束柱上)での鉄骨落下後における試験体の損傷状況を示す。鉄骨落下位置である4枚の覆工板には柱形に大きな変形が生じ,そのたわみ量は最大で190mmであった。また,その直下の根太にも大きなたわみが生じ,根太下端からスラブ上端までの距離は60mm(正規位置では130mm)まで短くなった。また,根太上部における中央ウェブ位置でのたわみ量は最大で100mmあった。

3.4 時刻歴波形

試験体A高さ11m覆工板中央,試験体B高さ11m覆工板中央および試験体B高さ11m小梁上の試験から得られた,小梁のスパン中央位置(B4:図-5参照)での加速度とひずみの時刻歴波形を図-6,図-7に示す。なお,

各図中の右上には計測値の最大値と最小値およびその発生時間を示している。

各計測データとも,鉄骨が衝突した最初の振幅で最大値が生じた後,徐々に振幅が小さくなり,0.5秒程度で振幅が収束した。

加速度の時刻歴波形では,試験体B高さ11m小梁上の振幅が最も大きくなり,試験体B高さ11m覆工板中央で最も小さくなった。

ひずみの時刻歴波形では,各試験ケースとも,鉄骨衝突時に下向きのたわみ性状を示す引張りひずみが生じた後,その反動により圧縮ひずみへと転化した。なお,試



(a) 敷鉄板損傷状況



(b) 覆工板損傷状況



(c) 根太損傷状況1



(d) 根太損傷状況2

写真-2 損傷状況(試験体A高さ11m覆工板中央)

Photo 2 Damages of specimen



(a) 覆工板損傷状況1



(b) 覆工板損傷状況2



(c) 根太損傷状況1



(d) 根太損傷状況2

写真-3 損傷状況(試験体B高さ11m覆工板中央)

Photo 3 Damages of specimen

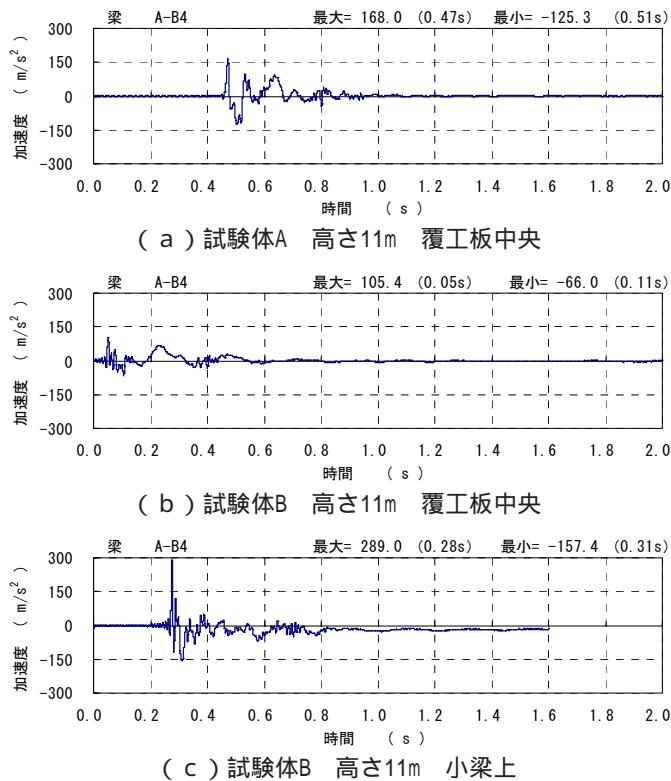


図-6 加速度の時刻歴波形

Fig.6 Time histories of acceleration

験体B高さ11m小梁上でのひずみは常に引張ひずみを示しているものの、これは鉄骨衝突時に小梁が降伏したためであり、試験終了後においても塑性化により残留ひずみが生じている。また、各試験から得られた最大値は試験体B高さ11m小梁上で最も大きくなり、試験体B高さ11m覆工板中央で最も小さくなった。

4. まとめ

営業線上空での昼間作業に対する安全性を確認する目的で、モックアップ試験体による鉄骨落下衝撃試験を実施し、以下の結果を得た。

床スラブ上の防護対策として、覆工板+敷鉄板および覆工板のみとした鉄骨落下衝撃試験において、床スラ

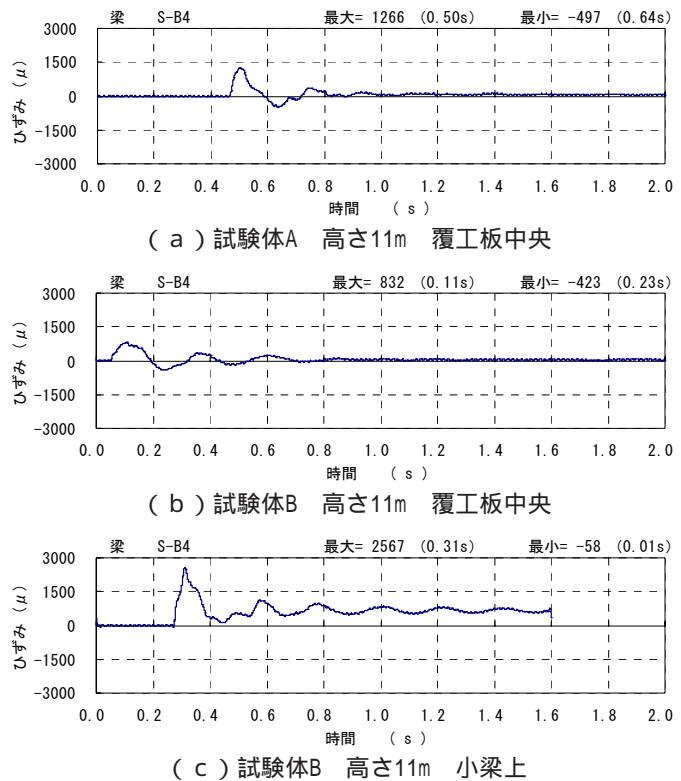


図-7 ひずみの時刻歴波形

Fig.7 Time histories of strain

ブ、小梁等の本設の構造躯体に目立った損傷は見られなかった。

高さ11mから鉄骨が落下した場合には、小梁のスパン中央域は降伏し、残留たわみ(最大7.2mm、スパンの1/2220)が生じた。

今回設定した落下点のうち、小梁上(束柱上)に鉄骨が落下した場合の損傷が最も顕著であった。

敷鉄板の有無にかかわらず、鉄骨落下による損傷は根太まで到達し、根太には大きな塑性変形が生じた。

以上より、試験体A(床スラブ+覆工板+敷鉄板)、試験体B(床スラブ+覆工板)いずれの構台においても、床スラブ下部空間の安全性は確保され、今回想定した重量の鉄骨落下に対する防護構台として、所要の性能を有していることが確認できた。