

3.2.9 E-ディフェンスによる実大鉄筋コンクリート建物の三次元震動破壊実験

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成 15 年度業務目的

(2) 平成 15 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 実大実験のテーマ
 - 2) 実験パラメータ
 - 3) 試験体の基本設計
 - 4) 実大実験実施上の諸問題
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成 16 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人 防災科学技術研究所 (東京大学地震研究所)	客員研究員 (教授)	壁谷澤 寿海
独立行政法人 防災科学技術研究所	研究員	松森 泰造
	研究員	加藤 敦
	特別研究員	陳 少華
(株)大林組 技術研究所	主任研究員	勝俣 英雄
	研究員	白井 和貴

(c) 業務の目的

E - ディフェンスによる実大鉄筋コンクリート建築物の三次元震動破壊実験に関する基本計画を作成し、実施する。

(d) 5カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成14年度：

E - ディフェンスによる実験研究の可能性について整理した。

2) 平成15年度：

実大実験における検討項目を整理する。

試験体の基本設計を行う。

実大実験実施における検討必要課題を整理する。

3) 平成16年度：

平成17年度の試験体の詳細設計を行う。

実大実験における加振計画および測定計画を行う。

実大実験実施施工計画を策定する。

4) 平成17年度：

実大実験を実施し、実験結果をまとめる。

平成18年度の試験体の詳細設計を行う。

5) 平成18年度：

実大試験体を実施し、実験結果をまとめる。

5カ年間の成果をまとめる。

(e) 平成 15 年度業務目的

E - ディフェンスにおいて平成 17 ~ 18 年度の 2 ヶ年間に行う実大鉄筋コンクリート建物の三次元震動破壊実験の基本計画を作成する。まず、実大実験における検討項目を整理し、実験パラメータの選定を行う。さらに、試験体の基本設計を行い、実験実施上の問題点を整理・把握する。

(2) 平成 15 年度の成果

(a) 業務の要約

E - ディフェンスによる実大鉄筋コンクリート建物の三次元震動破壊実験に関する基本計画を行った。実験のテーマを、a) 3次元動的挙動と破壊メカニズムの解明、b) 既存建築物の耐震補強方法の確立、c) 現行耐震設計法の検証と耐震性能評価手法の高度化、d) シミュレーション解析のためのデータ取得、の4つとする。平成 17 ~ 18 年度の 2 ヶ年間に 2 体ずつを実施することを想定し合計 4 体とする。そのうちの 1 体を最新の耐震設計指針に従って設計した試験体、1 体を 1970 年代建設を模擬した試験体、残りの 2 体を 1970 年代建設相当の既存建築物に対して異なる方法で補強した場合を模擬した試験体とする。当該年度は、平成 17 年度に行う予定の 2 体の基本設計を行った。

(b) 業務の成果

1) 実大実験のテーマ

実大試験体震動台実験で検討の対象となりうる項目を整理した。以下にキーワードを示し、表 1 および表 2 に検討項目および検討内容をまとめた。

主要な項目	その他の項目
1) 連層耐震壁の破壊	9) 耐震壁の不連続
2) スケール効果	10) 損傷評価
3) 動的効果	11) 2次部材
4) 柱・壁の軸崩壊	12) 非構造部材
5) 多方向入力・繰り返し入力	13) 耐震補修
6) 剛性偏心・耐力偏心	14) 変動軸力
7) 耐震壁の基礎固定条件	15) 上下入力
8) 設計レベル(新旧設計基準)	16) 梁のねじり破壊
	17) 柱梁接合部の破壊
	18) 柱・梁の付着破壊
	19) 建物什器
	20) 降伏変形
	21) センシング
	22) 免震
	23) 制震

表1 実大実験の検討項目（主要な項目）

項目	現象/破壊モード	特に関連する設計法/解析手法	検討内容	架構レベル/部材レベル	重要度	備考
1. 連層耐震壁の破壊	耐震壁の曲げ降伏後のせん断破壊 境界梁、直交梁の損傷	耐震壁の曲げ、せん断強度式	外力分布、反曲点 高次モードの影響 大変形 - 破壊に至る挙動	架構/部材		基礎の固定条件が全体挙動に及ぼす影響が大きい。 基礎の固定条件を実状に近づける必要がある。
2. スケールエフェクト	縮小実験と挙動(せん断力係数、損傷、破壊状況など)が若干異なる	部材のせん断強度式 付着強度式 ひび割れ幅評価式	寸法効果の影響	部材		寸法効果により、縮小実験と比べて実大実験の方がせん断伝達のアーチ作用が減少すると推察される。 縮小実験との直接的な比較が望ましい。
3. ダイナミックエフェクト	静的実験では得られない損傷、破壊挙動の再現 載荷速度の影響による材料特性の変化(例えば、鉄筋の降伏強度の上昇)	時刻歴応答解析	載荷速度が部材の強度、靱性能に及ぼす影響 静的な実験(例えば、擬似動的実験)との損傷、破壊状況の比較	架構/部材		静的な実験(例えば、擬似動的実験)との直接的な比較が望ましい。 仮動的実験と比べて、質量、減衰、載荷速度、架構の回転変形、ねじれ振動、入力方向、基礎固定条件、などが異なる。 振動台の並進、回転の制御精度を高める必要がある。
4. 柱、壁の軸崩壊	独立柱、壁付き柱の軸崩壊	曲げ、せん断強度式 フレーム解析	柱や壁の軸崩壊時の挙動(部材レベル) 脆性柱や壁の軸崩壊後の、残存する柱の軸力の変化(架構レベル)	架構/部材		少なくとも、1層の各柱にロードセルが必要である。
5. 多方向入力、繰り返し入力	柱、壁のせん断破壊	部材の曲げ、せん断強度式 FEM解析 エネルギー法	多方向入力の影響 載荷経路の影響 繰り返し入力の影響	部材		試験体が1体の場合、多方向入力、繰り返し入力が前提となる。 定性的、定量的評価のためには、複数試験体の方が評価が容易である。
6. 剛性偏心、耐力偏心	ねじれ振動	偏心率 時刻歴応答解析	ねじれ応答性 剛床仮定の検証	架構		偏心率を実状に近づける必要がある。 定性的、定量的評価のためには、偏心の有無をパラメータとした複数試験
7. 耐震壁の基礎固定条件	基礎の固定条件により、破壊モードが異なる(例えば、基礎固定では耐震壁の曲げ降伏後のせん断破壊、基礎浮き上がりでは直交基礎梁のせん断破壊)	耐震壁の曲げ、せん断強度式 フレーム解析 D値法 仮想柱手法	基礎の固定/浮き上がりによる影響 外力分布、反曲点 高次モードの影響 大変形 - 破壊に至る挙動	架構/部材		連層耐震壁フレームの挙動に及ぼす影響が大きい。 定性的、定量的評価のためには、複数試験体の方が評価が容易である。
8. 設計レベル	例えば、同じ入力レベルに対し、現行基準により設計した試験体は崩壊せず、旧基準による試験体は崩壊する。	許容応力度	異なる設計レベル(基準の新旧、材料強度など)による試験体の、耐震性能の違いを比較	架構/部材		例えば、試験体が2体の場合、各部材の断面寸法は同じとし、鉄筋量などを新旧の設計基準に従いそれぞれ設計し、実験結果を比較する。

表2 実大実験の検討項目（その他の項目）

項目	現象/破壊モード	特に関連する設計法(Demand)	検討内容	架構レベル/部材レベル	重要度	備考
9. 耐震壁の不連続	上下方向、水平方向の剛性不連続 特定層(ピロティ階など)への損傷集中	剛性率 偏心率	上下の剛性が不連続な場合の挙動 剛床仮定の検証	架構		ある層の耐震壁を一部撤去する、または後打ち等により耐震壁を付加する。
10. 補修後の耐震性能	耐震性能の回復	耐震診断 補強用の設計式	補修後の部材、および架構の耐震性能の検証	架構/部材		試験体の破壊後、一般的な手法により建物の補修を行う。 補強後、再び加振実験を行うことで、補修後の保有性能を検証する。
11. 変動軸力	変動軸力による柱や壁の曲げ、せん断挙動の変化	MSモデル FEM解析	変動軸力の影響	部材		対象とする柱にロードセルが必要。
12. 上下入力	スラブ、梁の上下振動による柱の軸力変動	時刻歴応答解析(フレーム解析)	スラブ、梁の上下挙動 解析における質点の与え方(節点集中質点、梁中央集中質点、分布質量)の検証	架構		上下1方向、または水平+上下方向の入力を行う。 対象とする柱にロードセルが必要。
13. 梁のねじり破壊	スラブ、小梁の影響による梁のねじり破壊	ねじり耐力式 FEM解析	梁のねじり破壊時の挙動	部材		ねじりモーメントの計測は困難である。
14. 柱梁接合部の破壊	梁の偏心取り付けによる柱梁接合部の破壊	FEM解析	柱梁接合部の破壊時の挙動	部材		中柱のある実大架構の実験はほとんど行われていない。 連層耐震壁フレームであれば、柱梁接合部が破壊しても、建物全体の挙動には大きく影響しないと推察される。
15. 柱、梁の付着破壊	柱、梁の付着破壊	付着強度式 FEM解析	柱、梁の付着破壊時の挙動 寸法効果	部材		
16. 2次部材	スラブ、小梁、階段、バルコニーの損傷 耐震スリットが剛性、耐力に寄	許容応力度 フレーム解析	スラブ、小梁、階段、バルコニーの挙動 耐震スリットの影響	部材		
17. 建物什器	什器の揺れ、移動、転倒	-	震度階や過去の災害事例と、実験における什器挙動の対応づけ	-		例えば、最上階(6F)に各種什器を設置し、挙動を観察する。 試験体の振動レベルを感覚的に把握しやすい。 デモンストレーション効果がある。
18. 降伏変形	各部材の降伏	性能設計 降伏時剛性低下率	各部材の降伏変形の評価 層の降伏変形の評価	架構/部材		
19. 損傷評価	各部材の損傷	性能設計 ひび割れ幅評価式 FEM解析	柱、梁、耐震壁の、変形とひび割れ幅の関係	部材		
20. センシング	各部の変位、加速度、鉄筋歪みの計測 柱脚部の軸力、せん断力、モーメントの計測 ひび割れ状況、ひび割れ幅の計測 その他損傷状態の検知	全般	実大建物の応答の把握 部材の応力、変形、損傷の関係 加振中のひび割れと、加振終了時の残留ひび割れの関係	架構/部材		高速度ビデオカメラによる、実大建物の実時間損傷過程の把握。 デジタルカメラ、画像処理によるひび割れ検知。 デジタルビデオ、画像処理による変位計測。 各種センサーによる損傷検知。
21. 免震	応答加速度の低減 ねじれ応答 転倒モーメントの影響による損傷	限界耐力計算 時刻歴応答解析 等価線形化法 エネルギー法	免震建物の実挙動 ねじれ応答 アスペクト比が大きい免震建物の挙動	架構		基礎免震とし、免震建物の挙動把握を行う。その後は基礎固定とし、破壊実験を行う。 例えば、試験体のアスペクト比を大きくし、転倒モーメントによる影響を把握する。

このように実大実験の検討項目は多岐にわたるが、試験体数がごく少数に限られるため、2年間の実験研究ではそのすべてをカバーすることは到底できない。平成17～18年度のE-ディフェンスにおける実大鉄筋コンクリート建築物の震動実験研究においては、以下の4つを大きなテーマとして掲げる。

- a) 3次元動的挙動と破壊メカニズムの解明
- b) 既存建築物の耐震補強方法の確立
- c) 現行耐震設計法の検証と耐震性能評価手法の高度化
- d) シミュレーション解析のためのデータ取得

a) 3次元動的挙動と破壊メカニズムの解明

E-ディフェンスにおける実験においては、コンポーネントや静的実験では解明が難しい、3次元動的挙動、破壊メカニズム、およびスケール効果の解明を行なう。柱、梁、耐震壁など、性質の異なる部材から構成される鉄筋コンクリート建築物の3次元動的挙動と破壊メカニズムは複雑であり、その性質はE-ディフェンスにおける実大震動実験でこそ解明可能であり、これらを解明することは、次に述べる既存建築物の耐震補強方法の確立や、耐震設計法の高度化にもつながる。

b) 既存建築物の耐震補強方法の確立

我が国における建築構造物の耐震安全性に関しては、旧基準で建設された既存建築物の脆弱性最も大きな問題である。そのため、既存建築物の基本的な地震応答性状を無損傷域から崩壊に至るまでを把握し、震災低減を図るための効果的な補強方法の開発とその促進提言は重要なテーマである。

既存建築物の耐震性能は、建設年代によって以下の3種類に大別できる。

・1971年代の建築基準法改正以前の設計

この時期の建築構造物の耐震性能が乏しいのは過去の地震被害などにより明白であるが、震動台による実験によって、建築構造物が崩壊に至る過程を記録・解明することは、過去に例がなく重要である。これを実験研究の対象とすることは、デモンストレーション的には非常に効果があると思われるが、今回の本実験研究においては見送ることとする。

・1971年から1981年の建築基準法が改正される以前の設計

鉄筋コンクリート建築物に関して言えば、柱の帯筋間隔に関する規定が改正された後であり、1971年以前と比較すれば耐震性能はかなり改善されていると言えるが、耐震性能としては「中途半端」である。効果的な耐震補強により十分な耐震性を付与できる可能性があり、検討の余地が十分にある。そこで、これを本実験研究の検討対象とする。

・1981年の建築基準法が改正された以降の設計

耐震性が高く、特殊な事例を除けば、補強の必要はないと考えられる。

以上から、1970年代に建設された既存建築物を今回の実験研究の検討対象の一つとする。

c) 現行耐震設計法の検証と耐震性能評価手法の高度化

旧基準で建設された既存建築物の耐震性が大きな問題である一方で、現行耐震設計基準で建設された建築物については、東南海・南海地震など未知の大地震に対する安全性の検証が一つの課題である。さらには、現在の建築構造物の耐震設計の趨勢は、地震により生じる応答と設定した限界状態の比較によって耐震性能を評価しようという考え方にある。すなわち、建築構造物の耐震性能を指標化し、どの程度の耐震性能を有するものかを確定値として表現しようとするものである。そこでは、建築構造物の地震後の損傷度や修復費用の定量的な評価が必要である。

そこで、本実験研究においては、最新の耐震設計指針に従って設計した試験体1体の実験を合わせて行うことにより、1970年代に建設された既存建築物を模擬した試験体との比較に用いるとともに、新築建築物の未知なる巨大地震に対する耐震性を検証し、設計レベル、入力地震動レベル、損傷レベルの関係を明らかにする。さらに、耐震性能評価手法の高度化のためのデータとして、各加振後の損傷状況を詳細に調査し、修復経費の模擬的な算出や復旧へのシナリオを作成する。ひび割れ幅や窓サッシの損傷など、実大実験でなければ評価できない事項が含まれる。

d) シミュレーション解析のためのデータ取得

E - ディフェンスにおける実験で得られたデータは、開発中の地震応答シミュレーション解析手法の検証に用いる。シミュレーション解析手法を確立することにより、ごく少数に実験ケースが限定される実大実験研究ではカバーしきれないパラメータを変動させた試験体の解析を行い、パラメータの影響を検討できる。

2) 実験パラメータ

E - ディフェンスにおける実験研究においては、平成17～18年度の2ヵ年間に2体ずつを実施することを想定し合計4体とする。そのうちの1体を最新の耐震設計指針に従って設計した試験体、1体を1970年代建設を模擬した試験体、残りの2体を1970年代建設相当の既存建築物に対して異なる方法で補強した場合を模擬した試験体とする。

- ・試験体A（平成17年度）：最新の耐震設計指針に従って設計した試験体。
- ・試験体B（平成17年度）：1970年代建設を模擬した試験体。基本建築計画は試験体Aと同等とする。
- ・試験体C（平成18年度）：1970年代建設相当の既存建築物に対して、一般的な方法で補強した場合を模擬した試験体。
- ・試験体D（平成18年度）：1970年代建設相当の既存建築物に対して、制振装置を付加するなどして、特殊であるが効果的な方法で補強した場合を模擬した試験体。

3) 試験体の基本設計

研究の対象を鉄筋コンクリート共同住宅として一般的な6層の耐震壁を有するフレーム構造とする。E - ディフェンスにおける天井クレーンの巻上げ高さなどの制約から、実大

の約5/6スケールとする。各階階高を2.5m、基礎梁高さ1.0mとし、試験体の総高さを16.0mとする。震動台の面積と積載重量を最も有効に活用することを考え、平面は10×15m（X方向を2スパン、Y方向を3スパン、ともにスパン長さは均等に5mとする。）とする。実験ヤード外部で製作した試験体を震動台上へ設置する際に実験棟天井クレーンで吊り上げることを考慮し、クレーン2台吊り時の荷重容量800tfの範囲内に、試験体および吊り治具の重量を抑える必要がある。

試験体の形状については、実験結果からより多くの知見を得ることを目的として1つの試験体に性質の異なる複数の構面を混在させ、各構面においてそれぞれ異なる損傷・破壊性状が観察できる計画とする。具体的には、主たる加震方向（最終的に破壊させる方向）を長軸方向とし、長軸方向は、純フレーム構造、連層耐震壁を含むフレーム構造、（旧基準を想定した試験体Bについては）腰壁・垂壁により短柱化した柱を含むフレーム構造という異なる性質を混在させた構造とする。

試験体のイメージ図を図1に、試験体の基準階伏図を図2に、部材断面寸法を図3に、代表的な部材の断面リストを表3～表5に示す。試験体の基本設計図書は省略する。

試験体の一般事項を以下にまとめる。

用途：共同住宅を想定

階数：6階

高さ：階高2.5m、総高さ16.0m（基礎スラブを含む）

平面：2×3スパン、スパン長さ5.0m

重量：各階約109tonf、総重量770tonf（積載重量を含む）

柱断面：500mm×500mm

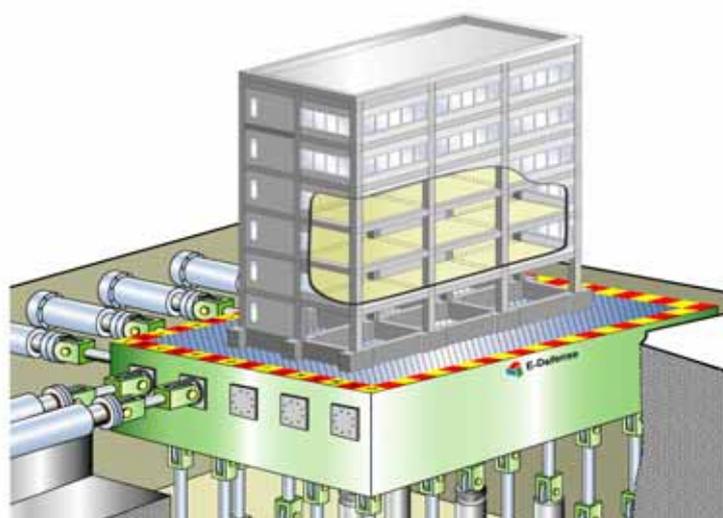


図1 震動実験のイメージ図
（試験体の一部にのみ仕上げ加工を行う。）

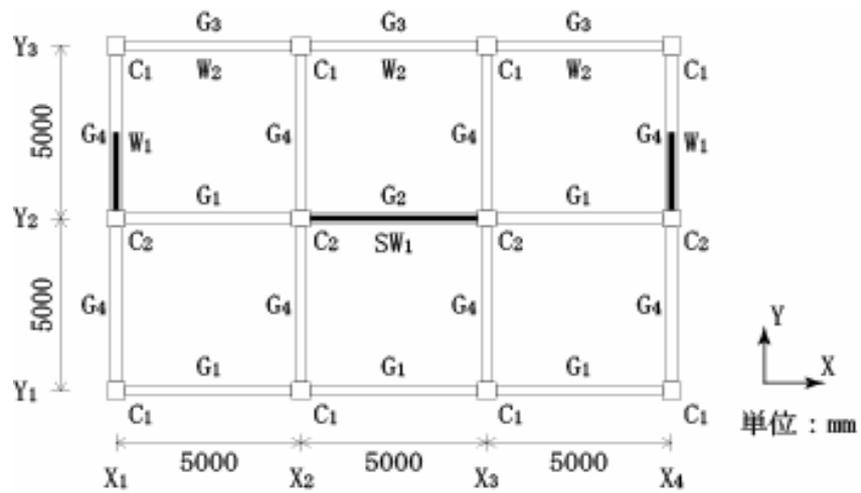
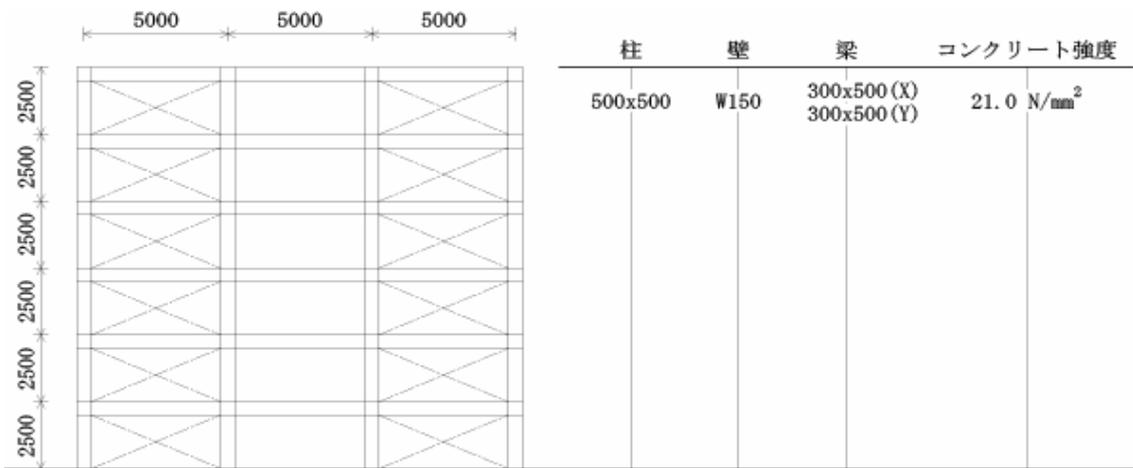


図2 試験体の基準階伏図（試験体A、B共通）



スラブ厚さ：120（全階）

単位：mm

図3 試験体の断面寸法とコンクリート強度（試験体A、B共通）

表3 代表的な柱断面

試験体	試験体 A	試験体 B
階	1 ~ 3 階	1 ~ 3 階
符号	C ₁ , C ₂	C ₁ , C ₂
断面	500 × 500mm	500 × 500mm
主筋	12-D19	8-D19
帯筋	□-D10@80	□-D10@100

表 4 代表的な梁断面

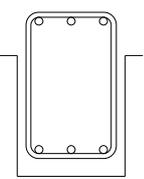
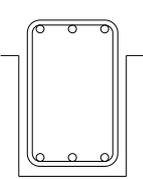
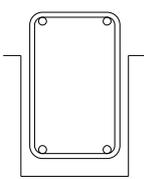
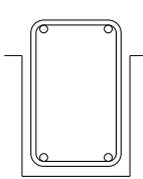
試験体	試験体 A		試験体 B	
	階	2 ~ 4 階	2 ~ 4 階	2 ~ 4 階
符号	G ₁ , G ₂ , G ₃	G ₄	G ₁ , G ₂ , G ₃	G ₄
断面	300 × 500mm	300 × 500mm	300 × 500mm	300 × 500mm
上端筋	3 -D19	3 -D19	2 -D19	2 -D19
下端筋	3 -D19	3 -D19	2 -D19	2 -D19
あばら筋	□-D10@120	□-D10@120	□-D10@150	□-D10@150
				

表 5 連層耐震壁の断面（試験体 A、B 共通）

階・符号	厚さ (mm)	配筋
全階・SW ₁	150	D10@300 ダブル

4) 実大実験実施上の諸問題

実験実施にあたり、試験体の製作・搬入・設置・搬出・解体方法の検討が必要である。

鉄筋コンクリート建築物の単独の実験として見れば、試験体は、震動台上あるいは実験棟内の空きスペースにて一体で製作するのが最も望ましい。しかし、前後に他の実験が予定され、震動台の占有可能期間が限定される状況においては、これを望むことは難しい。そこで、試験体は屋外にて一体で打設し、一体のまま移動して震動台上に設置する方法を採る。試験体を一体で打設することは、分割製作した時に要する連結部が不要であるため、試験体に弱点がなく確実に試験体が製作できる。しかし、施工期間が長くなるため、早めの準備が必要となる。図 4 に試験体の搬入ルート案を示す。屋外の試験体製作エリアでコンクリートを打設し、エアローラーを使用して実験棟内へ引き込み、実験棟内では天井クレーン 2 台で相吊りして吊り込むことを想定している。分割製作など他の製作方法と比較して重量が 800tonf と最も重くなるため、引き込みや吊り上げのために頑強な治具類が必要となる。本当に移動・設置が可能であるかについては、今後、十分な吟味が必要である。

試験体の解体・搬出については、まず、実験が終了した試験体は一体のまま震動台上から吊り上げ、実験棟内に仮置きする。次に、仮置きした試験体を解体して、容易に搬出できる大きさに解体して実験棟外へ搬出する。試験体の壊れ方の影響、解体時のほこりの発生の問題、他の実験の工程の影響なども大きく、解体・搬出についても、今後、解決すべき重要な問題である。

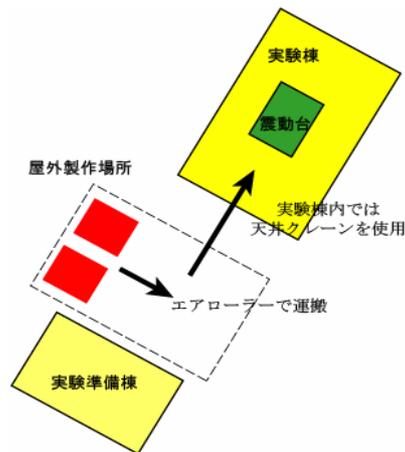


図4 試験体の屋外製作および運搬ルート

(d) 結論ならびに今後の課題

実大実験における検討項目を整理し、試験体の基本設計を行い、さらに実験実施上の検討必要課題を整理するという平成15年度に掲げた目標は概ね達成できた。平成16年度は、実験実施上の問題点をクリアにした上で、より詳細で現実的な実験実施計画を策定する。

(e) 引用文献

なし

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成16年度業務計画案

平成17年度に実施する予定の試験体の各種予備解析を行い、試験体の基本設計を見直すとともに、加振計画および測定計画を策定する。さらに、支保工の計画、試験体の製作・搬入・設置・搬出・解体方法や、実験準備時の仮設方法などを含む実験実施施工計画を策定する。